



ANÁLISE TÉRMICA E MECÂNICA DE LIGAÇÕES AÇO-MADEIRA SOLICITADAS À TRAÇÃO E AO FOGO

CARLOS MISAEL SILVA GOMES

outubro de 2022

ANÁLISE TÉRMICA E MECÂNICA DE LIGAÇÕES AÇO-MADEIRA SOLICITADAS À TRAÇÃO E AO FOGO

Carlos Misael Silva Gomes

1170942

2022

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

ANÁLISE TÉRMICA E MECÂNICA DE LIGAÇÕES AÇO-MADEIRA SOLICITADAS À TRAÇÃO E AO FOGO

Carlos Misael Silva Gomes

1170942

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

2022

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

JÚRI

Presidente

Armando José Vilaça De Campos

Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Orientador

Elza Maria Morais Fonseca

Professor Coordenador, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Arguente

Renato Manuel Natal Jorge

Professor Catedrático, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer à minha família especialmente aos meus pais, José Armando e Maria Carolina pelos bons valores que me transmitiram e por todo o apoio nesta jornada académica. Às minhas irmãs Andreia, Ângela e Carla pelos conselhos e pela partilha de experiências que foram essenciais para o meu crescimento pessoal e académico. Agradeço também à minha tia Fátima, pela qual tenho muito carinho, pela disponibilidade e sugestões dadas.

Um agradecimento especial à minha companheira Francisca por todo o apoio demonstrado em todos os momentos, fossem estes bons ou maus.

Agradeço à minha orientadora, Professora Doutora Elza Fonseca, por todo o apoio e disponibilidade que demonstrou como também pelo acompanhamento contribuindo com recomendações muito importantes para a realização da dissertação apresentada neste documento.

PALAVRAS-CHAVE

Madeira; fogo; ligações aço-madeira; cavilhas de aço; método de elementos finitos

RESUMO

Com a crescente preocupação das alterações climáticas, a utilização da madeira na construção é apresentada como uma solução a este problema. A principal razão prende-se com a contribuição positiva no ciclo de carbono, sendo que para além deste aspeto, a madeira consegue apresentar boas características de resistência ao fogo como também uma boa relação entre a resistência mecânica e a massa volúmica.

Com este trabalho, inicialmente efetuou-se uma revisão bibliográfica dos temas inerentes à análise termomecânica de três tipos de ligações aço-madeira com cavilhas metálicas, nomeadamente: ligações totalmente em madeira (WWW) e ligações com elementos internos ou externos em aço (WSW e SWS). Abordaram-se os temas relativos às propriedades mecânicas e térmicas dos materiais das ligações; os processos envolvidos na combustão da madeira; as normas aplicáveis no dimensionamento das ligações e os modos de transferência de calor envolvidos numa situação de incêndio. Após essa revisão de literatura, concluiu-se que existe uma lacuna de estudos na quantificação da resistência da madeira ao fogo, comparativamente a outros materiais. Adicionalmente, a revisão bibliográfica, possibilitou um conhecimento e a compreensão para uma base mais clara do tema a ser desenvolvido na dissertação de mestrado.

Para o desenvolvimento do tema de dissertação, apresentou-se uma análise numérica termomecânica de diferentes tipos de ligações aço-madeira com cavilhas em aço, solicitadas à tração quando expostas ao fogo. Foram considerados três tipos de materiais de madeira com massa volúmica distinta. As simulações realizadas permitem determinar o campo de tensões de origem térmica e mecânica, através de um problema de análise conjunta numérica. Inicialmente calculou-se o campo de temperaturas nas ligações, através de uma análise térmica em regime transiente. O perfil de temperatura calculado, correspondente a um determinado instante de exposição ao fogo, que em conjunto com uma carga de tração incremental, permitiu determinar a resistência mecânica máxima da ligação. Além disso, os resultados numéricos permitiram verificar a influência da massa volúmica da madeira, na resistência mecânica da ligação exposta ao fogo. Como conclusão geral, a capacidade de carga diminui com a exposição ao fogo e com a menor massa volúmica do material em madeira.

KEYWORDS

Wood; fire; steel-wood connections; steel dowels; finite element method

ABSTRACT

With the growing concern about climate change, the use of wood in construction presents itself as a solution to this problem. The main reason is related to the positive contribution to the carbon cycle, and in addition to this aspect, wood can present good fire resistance characteristics, as well as a good relationship between mechanical strength and density.

With this work, a bibliographic review was initially carried out on the themes inherent to the thermomechanical analysis of three types of steel-wood connections with steel dowels, namely: connection only in wood material (WWW) and connections with internal or external steel plate elements (WSW and SWS). Topics related to the mechanical and thermal properties of connection materials were addressed; the processes involved in the combustion of wood; applicable standards in the design of connections and the modes of the heat transfer involved in a fire situation. After this literature review, it was concluded that there is a gap in studies for the wood fire resistance and its quantification, compared with other materials. In addition, the literature review enabled knowledge and understanding for a clearer basis of the subject to be developed in the master thesis.

For the development of the thesis subject, a thermomechanical numerical analysis of different types of steel-wood connections with steel dowels, in tensile when exposed to fire, was presented. Three types of wood materials with different densities were considered. The simulations carried out make it possible to determine the thermal and mechanical stresses, through a numerical analysis problem. Initially, the temperature field in the connections was calculated, through a transient and thermal analysis. The calculated temperature profile, corresponding to a given time instant of fire exposure, which together with an incremental tensile load, allowed the determination of the maximum mechanical strength of the connection. Furthermore, the numerical results made it possible to verify the influence of wood density on the mechanical strength of the connection exposed to fire. As a general conclusion, the load-bearing capacity in the connection decreases with fire exposure and with lower wood density.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

APDL	ANSYS® <i>Parametric Design Language</i>
CEN	Comité Europeu de Normalização
EC1-1-2	Eurocódigo 1 parte 1-2
EC3-1-1	Eurocódigo 3 parte 1-1
EC3-1-2	Eurocódigo 3 parte 1-2
EC5-1-1	Eurocódigo 5 parte 1-1
EC5-1-2	Eurocódigo 5 parte 1-2
EN	<i>European Standard</i>
Glulam	Madeira lamelada colada
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
MEF	Método de Elementos Finitos
NP	Norma Portuguesa
SWS	Ligação aço-madeira-aço
WSW	Ligação madeira- aço -madeira
WWW	Ligação madeira-madeira-madeira

Lista de Unidades

°C	Graus centígrados
g	Grama
h	Hora
J	Joule
K	Kelvin
m	Metro
min	Minuto
mm	Milímetro
N	Newton
Pa	Pascal
s	Segundo

Lista de Símbolos

a_1	Distância entre ligadores na direção paralela às fibras
a_2	Distância entre ligadores na direção perpendicular às fibras
$a_{3,t}$	Distância entre ligador e o bordo com solicitação
$a_{4,c}$	Distância entre ligador e o bordo sem solicitação
A_s	Área transversal
c_p	Calor específico
d	Diâmetro
E	Módulo de elasticidade
E_b	Poder emissivo de um corpo
E_d	Módulo de elasticidade de projeto
$F_{ax,Rk}$	Resistência à tração axial do ligador
F_d	Carga de tração aplicada
$F_{d,R}$	Carga pontual resistente
$f_{h,i,k}$	Resistência ao esmagamento característica do membro i
$f_{t,0,d}$	Resistência de projeto à tração ao longo da fibra
$f_{t,0,k}$	Valor característico de resistência à tração ao longo da fibra
f_u	Tensão de rotura
$f_{u,k}$	Tensão de rotura característica do ligador
$F_{V,Rk}$	Capacidade de resistência à tração axial característica do ligador e por plano de corte
$F_{V,Rd}$	Capacidade de resistência à tração axial de projeto do ligador e por plano de corte

f_y	Tensão de cedência
h	Coeficiente de convecção
k	Coeficiente de condutividade térmica
k_{mod}	Fator de correção para a duração do carregamento e conteúdo de umidade
$M_{y,Rk}$	Momento de cedência característico do ligador
N	Número de cavilhas em metade da ligação
n_p	Número de planos de corte
N_t	Número total de cavilhas da ligação
q''	Fluxo de calor
t	Tempo
t_1	Espessura dos membros laterais das ligações
t_2	Espessura do membro central das ligações
t_s	Espessura da placa de aço das ligações
α	Coeficiente de expansão térmica
β	Rácio entre a resistência ao esmagamento dos membros estruturais
γ_M	Fator parcial para as propriedades do material, tendo em conta incertezas e variações geométricas
ε	Coeficiente de emissividade da superfície do material
θ	Temperatura
θ_g	Temperatura do forno
θ_{sur}	Temperatura do meio envolvente
θ_∞	Temperatura do fluido

θ_s	Temperatura à superfície
ν	Coeficiente de Poisson
ρ_a	Massa volúmica do aço
ρ_k	Massa volúmica característica da madeira lamelada colada
ρ_m	Massa volúmica média da madeira lamelada colada
σ	Constante de Stefan-Boltzmann
$\sigma_{t,0,d}$	Tensão à tração paralela à fibra de projeto

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Modelos geométricos das ligações: a) SWS; b) WWW; c) WSW	4
Figura 2 - Representação esquemática do ensaio de flexão em quatro pontos sob a ação do fogo [10] ..	12
Figura 3 - Modos de rotura de ligações WWW em corte duplo [4]	13
Figura 4 - Modos de rotura ligações em duplo corte: (a) ligação WSW; (b) ligação WSW [4] (adaptado) 13	
Figura 5 - Modos de rotura em ligações de madeira: (a) Rotura dúctil; (b)(c)(d)(e) Rotura frágil [12]	14
Figura 6 – Ilustrações de defeitos da madeira: a) nós; b) descaio; c) fio inclinado; d) fendas [23]	20
Figura 7 – Exemplo de madeira laminada colada [27]	20
Figura 8 - Sistema de eixos da madeira relativamente à direção das fibras e dos anéis de crescimento [24]	21
Figura 9 – Ilustração das zonas do processo de carbonização [32]	22
Figura 10 - Condutividade térmica da madeira em função da temperatura	24
Figura 11 - Calor específico da madeira em função da temperatura	24
Figura 12 - Massa volúmica de três classes de madeira em função da temperatura	24
Figura 13 – Módulo de elasticidade de três classes de madeira em função da temperatura	25
Figura 14 - Curvas tensão-deformação dependentes da temperatura de três classes de madeira	25
Figura 15 - Calor específico do aço em função da temperatura	27
Figura 16 - Condutividade térmica do aço em função da temperatura	28
Figura 17 – Módulo de elasticidade do aço em função da temperatura	28
Figura 18 – Curvas tensão-deformação dependentes da temperatura do aço	29
Figura 19 - Curva nominal de incêndio ISO 834 [6]	34
Figura 20 - Condução através de um sólido ou de um fluido [40]	35
Figura 21 - Troca de calor por radiação entre duas superfícies (adaptado) [40].	36
Figura 22 – Espaçamento entre cavilhas e distâncias aos bordos	44
Figura 23 - Dimensões das ligações em estudo e posicionamento das cavilhas	50
Figura 24 – Modelos de elementos finitos: a) SWS; b) WWW; c) WSW	51
Figura 25 - Fluxograma das etapas de simulação numérica	52
Figura 26 – Representação do elemento SOLID 278	53

Figura 27 – Modelos de elementos finitos com faces de exposição ao fogo: a) SWS; b) WWW; c) WSW .53	
Figura 28 – Plano de corte e pontos nodais para a discussão de resultados: a) SWS; b) WWW; c) WSW .54	
Figura 29 – Representação do elemento SOLID185	55
Figura 30 – Modelo termomecânico e condições de fronteira nas ligações: a) SWS; b) WWW; c) WSW .55	
Figura 31 - Temperatura ao longo do tempo de exposição ao fogo dos pontos da coluna c da ligação SWS	62
Figura 32 - Temperatura ao longo do tempo de exposição ao fogo dos pontos da coluna b da ligação WSW	62
Figura 33 - Temperatura ao longo do tempo de exposição ao fogo dos pontos da coluna b da ligação WWW	62
Figura 34 - Temperatura ao longo da cavilha a 1800s da ligação SWS.....	65
Figura 35 - Temperatura ao longo da cavilha a 1800s da ligação WSW	65
Figura 36 - Temperatura ao longo da cavilha a 1800s da ligação WWW	65
Figura 37 - Campo de temperaturas no plano em estudo a 1800s da ligação SWS	66
Figura 38 - Campo de temperaturas no plano em estudo a 1800s da ligação WSW	66
Figura 39 – Campo de temperaturas no plano em estudo a 1800s da ligação WWW	66
Figura 40 – Carga resistente da ligação SWS em função do tempo de exposição ao fogo	70
Figura 41 - Carga resistente da ligação WSW em função do tempo de exposição ao fogo	70
Figura 42 - Carga resistente da ligação WWW em função do tempo de exposição ao fogo.....	70
Figura 43 – Campo de temperaturas e tensão equivalente de Von Mises na madeira GL32h da ligação SWS a 400s	72
Figura 44 - Campo de temperaturas e tensão equivalente de Von Mises no aço da ligação SWS a 400s .72	
Figura 45 – Campo de temperaturas e tensão equivalente de Von Mises na madeira GL32h da ligação WWW a 3600s	73
Figura 46 - Campo de temperaturas e tensão equivalente de Von Mises nas cavilhas da ligação WWW a 3600s.....	73
Figura 47 – Madeira da classe GL32h não carbonizada na ligação WWW a 3600s.....	73
Figura 48 – Campo de temperaturas e tensão equivalente de Von Mises na madeira GL32h da ligação WWW a 180s	74
Figura 49 - Campo de temperaturas e tensão equivalente de Von Mises nas cavilhas da ligação WSW a 180s.....	74

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Resumo dos principais fatores que influenciam a carbonização da madeira (adaptada) [3]	12
Tabela 2 - Propriedades mecânicas à temperatura ambiente de três classes de <i>Glulam</i>	22
Tabela 3 - Propriedades térmicas da madeira	23
Tabela 4 - Valores nominais das propriedades mecânicas do aço S275	26
Tabela 5 - Propriedades térmicas do aço	27
Tabela 6 - Distâncias dos espaçamentos entre os ligadores [4]	45
Tabela 7 - Carga resistente das ligações e espécies de madeira em estudo em [kN]	57

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	3
1.1	Contextualização	3
1.2	Motivação	5
1.3	Objetivos	5
1.4	Metodologia	6
1.5	Estrutura do relatório.....	7
2	ESTADO DA ARTE.....	11
2.1	Materiais	11
2.2	Tipos de ligações em madeira.....	13
2.3	Fogo em ligações.....	14
2.4	Ensaio experimentais.....	15
2.5	Testes computacionais.....	16
3	PROPRIEDADES DOS MATERIAIS	19
3.1	Madeira lamelada colada (<i>Glulam</i>)	19
3.1.1	Propriedades mecânicas	21
3.1.2	Propriedades térmicas	22
3.2	Aço.....	26
3.2.1	Propriedades mecânicas do aço	26
3.2.2	Propriedades térmicas do aço.....	27
4	TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	33
4.1	Curva de incêndio ISO 834	33

4.2	Modos de transferência de calor	34
4.2.1	Condução.....	34
4.2.2	Convecção	35
4.2.3	Radiação	36
5	DIMENSIONAMENTO DAS LIGAÇÕES AÇO-MADEIRA À TRAÇÃO	41
5.1	Temperatura ambiente	41
5.2	Elevadas temperaturas	45
6	MODELOS AVANÇADOS POR ELEMENTOS FINITOS.....	49
6.1	Análise térmica.....	53
6.2	Análise termomecânica.....	55
7	DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....	61
7.1	Evolução da temperatura em pontos das ligações	61
7.2	Temperatura ao longo do comprimento da cavilha após 1800s	64
7.3	Campo de temperaturas no plano em estudo das ligações.....	66
7.4	Resistência mecânica das ligações ao fogo	68
8	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	77
8.1	Conclusões	77
8.2	Propostas de trabalhos futuros.....	78
9	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO.....	81
10	ANEXOS.....	87
10.1	Tabelas de dimensionamento das ligações à temperatura ambiente com modos de rotura	87
10.2	Código APDL da curva ISO 834	90

10.3	Código APDL da geometria das ligações	91
10.4	Código APDL dos materiais das ligações	94
10.5	Evolução da temperatura ao longo do tempo da ligação SWS	99
10.6	Evolução da temperatura ao longo do tempo da ligação WSW	100
10.7	Evolução da temperatura ao longo do tempo da ligação WWW	101

INTRODUÇÃO

- 1.1 Contextualização
- 1.2 Motivação
- 1.3 Objetivos
- 1.4 Metodologia
- 1.5 Estrutura do relatório

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Na atualidade, o assunto mais debatido têm sido as alterações climáticas, sendo que a desflorestação e a redução da área florestal, em especial nos países tropicais, são apontadas como fatores com influência negativa. Mesmo assim, a utilização da madeira na construção, tem sido apresentada como uma solução para os problemas afetos às alterações climáticas, no que respeita à mudança climática global, ao esgotamento dos combustíveis fósseis e à crescente perda de biodiversidade. Tal razão, prende-se com o facto de a madeira ser um material sustentável, devido à contribuição positiva no ciclo de carbono, desde que corretamente aplicadas as políticas florestais sustentáveis. Na fase inicial, o ciclo armazena dióxido de carbono e produz oxigénio para o meio ambiente, com o recurso mínimo a combustíveis fósseis nos processos de transformação [1, 2].

Para além da vantagem anterior, a madeira é um material com grande variedade e disponibilidade de espécies, formas, tamanhos com uma boa relação entre a resistência mecânica e a massa volúmica, tornando as estruturas em madeira interessantes para a indústria da construção. Para além das boas propriedades à temperatura ambiente, a madeira apresenta ainda uma boa resistência para situações de incêndio, apesar de ser um material combustível. Sob a ação do fogo, é formada uma camada carbonizada na zona exterior da madeira, que atua como um isolante térmico para o interior, manifestando-se por isso, uma degradação pouco significativa das boas propriedades mecânicas na seção residual da estrutura [3].

Numa qualquer estrutura, as ligações desempenham um papel significativo na resistência e na estabilidade, por serem o ponto mais frágil e muitas vezes responsáveis pelo colapso estrutural. Por esse motivo, o dimensionamento das ligações, com especial importância no projeto de estruturas em madeira à temperatura ambiente e sob a ação do fogo, é extremamente importante.

Atualmente, as ligações não permanentes têm elevado destaque, devido ao melhor controlo de qualidade e à facilidade na montagem ou desmontagem no local de construção. Neste grupo de elementos, inserem-se as ligações em madeira com cavilhas, particularmente as ligações madeira-madeira-madeira (WWW), madeira-aço-madeira (WSW) e aço-madeira-aço (SWS), sendo estes os três grupos de ligações abordadas neste relatório e representados na Figura 1. Este tipo de ligações pode ter ligadores

distintos (pregos, parafusos de enroscar, parafusos de porca ou cavilhas), sendo que no presente trabalho optou-se por ligadores do tipo cavilha metálica. As ligações serão solicitadas à tração, pelo que os ligadores terão de resistir ao corte.

Conforme as regras de projeto, o dimensionamento de ligações em madeira deve ser realizado conforme o indicado no Eurocódigo 5 parte 1-1 (EC5-1-1) [4] e no Eurocódigo 5 parte 1-2 (EC5-1-2) [5].

À temperatura ambiente, no EC5-1-1 [4], são propostos métodos simplificados para a determinação da capacidade resistente dos ligadores, tipo cavilha, sujeitos ao corte.

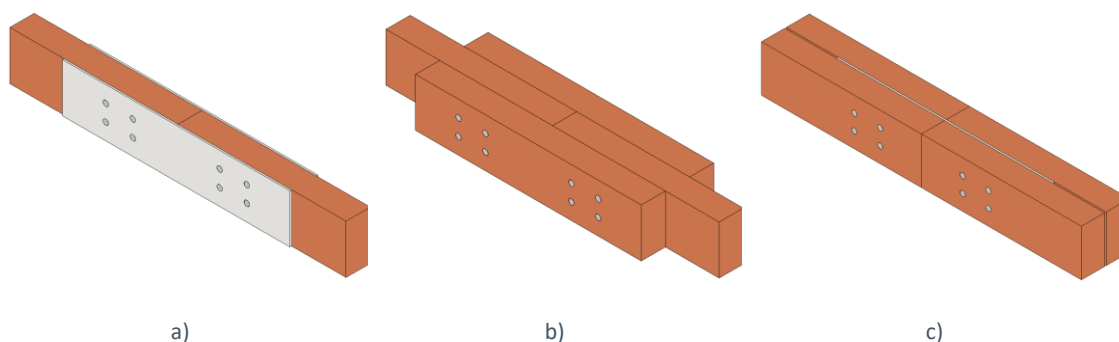


Figura 1 – Modelos geométricos das ligações: a) SWS; b) WWW; c) WSW

Em situação de exposição ao fogo, e com base no cumprimento do EC5-1-2 [5], as ligações não protegidas e com os elementos laterais em madeira devem ter uma resistência ao fogo R15, ou seja, que garanta a sua capacidade resistente durante 15 min. Para esta resistência, os membros laterais devem ter uma espessura mínima de 45 mm, EC5-1-2 [5]. Para uma resistência ao fogo superior a R15, a espessura e as distâncias ao topo e ao lado dos elementos devem ser aumentadas. Estes métodos e os pressupostos em que se baseiam, estão do lado da segurança do projeto, implicando por vezes o sobredimensionamento.

1.2 Motivação

Tal como mencionado anteriormente, em geral o ponto mais frágil de uma estrutura em madeira são as suas ligações, assim é importante um cálculo adequado destas para a integridade da estrutura. Atualmente, na Europa, o dimensionamento das ligações aço-madeira encontra-se regulamentado nos Eurocódigos que recorrem a métodos simplificados para o cálculo das ligações. A utilização de métodos simplificados implica um dimensionamento conservativo e pressupostos como uma espessura mínima da madeira para ligações não protegidas.

Pelas razões acima enunciadas é importante avaliar estes pressupostos comparando com resultados experimentais ou numéricos para uma melhor compreensão da realidade e avaliar o fator de segurança aplicado nestes regulamentos.

Neste seguimento, na literatura há ainda poucos resultados, experimentais ou numéricos, que permitam a avaliação da resistência destas ligações em aço-madeira sob a ação do fogo. Relativamente aos resultados numéricos a maior lacuna encontra-se na análise térmica em modelos construídos a três dimensões e na sua análise termomecânica. Verifica-se que a aplicação do método de elementos finitos ou é utilizada apenas para prever as tensões resultantes de solicitações mecânicas, através de uma análise estrutural estática, ou unicamente para obtenção de campos de temperatura, através de uma análise térmica. Por outras palavras, as análises termomecânicas aplicadas a estes modelos construtivos estão pouco desenvolvidas na literatura.

1.3 Objetivos

O principal objetivo desta dissertação é avaliar, através de um modelo de cálculo avançado, com base no método dos elementos finitos (MEF), o comportamento das ligações aço-madeira em situações de incêndio, considerando a não-linearidade e o regime elastoplástico dos materiais. Esta metodologia permitirá identificar a capacidade resistente das ligações, garantindo o projeto das mesmas em segurança. No presente estudo serão consideradas as ligações SWS, WSW e WWW. Em simultâneo, pretende-se verificar qual é o efeito da massa volúmica da madeira relativamente ao calor transferido através da ligação no cálculo da sua resistência. Para este efeito, ter-se-á em consideração três classes de madeira de massa volúmica diferente. Como objetivo mais geral pretende-se, contribuir para ampliação do conhecimento neste tipo de elementos estruturais quando solicitados por ações mecânicas, em conjunto com ações térmicas derivadas de ações acidentais.

1.4 Metodologia

A metodologia utilizada no desenvolvimento do presente relatório tem como base os seguintes pontos:

- Pesquisa bibliográfica dos mais recentes avanços no tema das ligações aço-madeira sob a ação do fogo, no sentido de obter uma percepção do tema em estudo.
- Leitura e compreensão dos Eurocódigos envolvidos no dimensionamento das ligações, tanto à temperatura ambiente como a altas temperaturas, para interiorização das regras de dimensionamento atuais.
- Pesquisa bibliográfica das propriedades dos materiais envolvidos nas ligações em estudo, à temperatura ambiente e a altas temperaturas.
- Estudo dos modos de transferência de calor numa situação de incêndio.
- Dimensionamento das ligações com base em equações de cálculo simplificadas de acordo com a metodologia apresentada no EC5-1-1 [4] e EC5-1-2 [5] à temperatura ambiente.
- Utilização de um programa de elementos finitos de elevado desempenho para a análise térmica transiente não linear material, e a análise termomecânica incremental não linear material com elementos de contato.
- Determinação da capacidade resistente de carga máxima em ligações aço-madeira quando submetidas à ação do fogo e sob carregamento axial à tração.

1.5 Estrutura do relatório

Nesta dissertação os temas foram abordados pela seguinte ordem: estado da arte, propriedades dos materiais, modos de transferência de calor, dimensionamento de ligações aço-madeira, modelos avançados por elementos finitos, discussão de resultados e conclusões e por fim propostas de trabalhos futuros.

No presente capítulo foi apresentada uma contextualização ao tema seguida da motivação, objetivos e metodologia usada para o desenvolvimento do tema.

No estado da arte foram apresentadas, por ordem cronológica, as principais investigações científicas realizadas ao longo dos últimos anos integradas no tema das ligações em madeira. Foram divididas pelos subcapítulos: materiais, tipos de ligações em madeira, fogo em ligações, ensaios experimentais e testes computacionais.

No capítulo das propriedades dos materiais, foi efetuado o levantamento das propriedades mecânicas e térmicas da madeira e do aço, mais relevantes para o dimensionamento das ligações à temperatura ambiente, como também para as análises térmicas e termomecânicas.

No capítulo seguinte foi feita uma revisão dos modos de transferência de calor, nomeadamente da condução, convecção e radiação, e no final uma exposição escrita sobre a curva de incêndio ISO 834 [6], indicada no Eurocódigo 1, parte 1-2 (EC1-1-2)[7].

No capítulo cinco foram descritos os procedimentos indicados no EC5-1-1 [4] para o dimensionamento das ligações aço-madeira à temperatura ambiente, e no EC5-1-2 [5], para o dimensionamento a elevadas temperaturas.

Nos modelos avançados por elementos finitos, foi realizada uma breve descrição do método e do programa, utilizados na realização dos modelos térmicos e termomecânicos. No seguimento foram descritas as geometrias e as condições de fronteira aplicadas aos modelos em estudo.

No capítulo sete foram analisados os resultados obtidos das simulações dos modelos térmicos e termomecânicos avaliando: a evolução da temperatura em pontos nodais pré-definidos nas ligações, a temperatura ao longo do comprimento da cavilha e a resistência das ligações ao fogo.

No final foram expostas as principais conclusões obtidas com as análises tendo em conta os objetivos traçados, destacando a importância do tema em estudo.

ESTADO DA ARTE

- 2.1 Materiais
- 2.2 Tipos de ligações em madeira
- 2.3 Fogo em ligações
- 2.4 Ensaios experimentais
- 2.5 Testes computacionais

2 Estado da arte

Nos recentes anos têm sido feitos alguns estudos, para colmatar a falta de informação do comportamento de ligações madeira-madeira e madeira-aço sob a ação do fogo. Alguns testes experimentais e computacionais têm sido realizados para obtenção de resultados que demonstrem os métodos aplicáveis e complementem a informação disponibilizada nos Eurocódigos [4, 5].

2.1 Materiais

Os materiais em estudo e aplicáveis nas ligações são: a madeira do tipo lamelada colada (*Glulam*), para os membros das ligações; e o aço, também para as placas das ligações e para as cavilhas, que serão os ligadores entre os membros.

Nas últimas décadas, tem havido desenvolvimentos científicos no âmbito da avaliação e da análise do comportamento da madeira à temperatura ambiente e sob a ação do fogo.

No ano de 2012, Xu, *et al.* [8] propõem um modelo numérico, para a previsão da força de esmagamento da *Glulam*, recorrendo a ligadores tipo cavilhas. É considerado um comportamento não-linear da madeira, particularmente, ao nível plástico em compressão e rotura frágil em tração e em corte. Este autor compara os resultados obtidos do modelo com os resultados de ensaios experimentais, indicando uma boa aproximação, nomeadamente, para o caso particular de compressão na direção perpendicular ao grão.

Mais tarde, em 2018, Bartlett, *et al.* [9] analisaram os processos de pirólise, ignição e combustão associados à madeira, para edifícios altos, tendo como objetivo a reunião dos fatores que têm influência na queima da madeira. Com base na literatura científica existente, concluíram que, o fenómeno carbonização da madeira depende das propriedades da madeira (massa volúmica, teor de humidade, permeabilidade), do sistema (orientação das fibras, proteção contra o fogo e tamanho das amostras) e do cenário de fogo (concentração de oxigénio e do fluxo de calor). Na Tabela 1 apresentam-se os fatores com maior influência na carbonização, comprovados no estudo.

Dos fatores apresentados concluíram que, o que tem maior influência na carbonização, é a quantidade de fluxo de calor, realçando a importância deste nas propriedades termomecânicas da madeira.

Tabela 1 - Resumo dos principais fatores que influenciam a carbonização da madeira (adaptada) [3]

Parâmetro	Explicação
Massa volúmica	Quanto maior a quantidade de material num dado espaço, maior será a energia por volume necessária para a decomposição da madeira.
Teor de água	Para a evaporação da humidade da madeira é necessária energia.
Proteção	Reduz a temperatura afeta à madeira, retardando a carbonização. Por outro lado, quando perde o efeito, acelera a carbonização.
Fluxo de calor	O aumento do fluxo de calor fornece mais energia para a pirólise.
Concentração de oxigénio	Quanto maior a concentração, maior a oxidação da camada de carvão, o que potencia uma combustão dos gases libertados na pirólise. Desta forma, aumenta o tamanho da chama e a radiação.

Em 2021, Qin, *et al.* [10], realizaram um estudo experimental com o objetivo de caracterizar o fenómeno de carbonização em três classes de madeira (cedro-vermelho, pinho radiata e abeto-de-Douglas) e perceber o efeito deste, no comportamento à flexão da madeira. Foram realizados ensaios de flexão em quatro pontos, com exposição ao fogo e sob carga constante, tal como demonstrado na Figura 2.

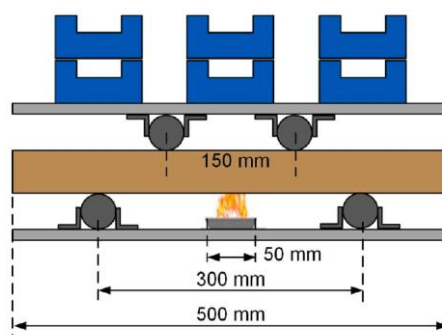


Figura 2 - Representação esquemática do ensaio de flexão em quatro pontos sob a ação do fogo [10]

Com base nos resultados obtidos, concluíram que o efeito combinado da carga constante, com a tensão termomecânica causada, provoca um aumento da velocidade de carbonização da madeira, o que por consequência leva a uma rotura prematura.

2.2 Tipos de ligações em madeira

De acordo com Negrão [11], é possível dividir as ligações de madeira em dois grupos, segundo o princípio mecânico das mesmas. Distinguem-se entre as ligações entalhadas, mais direcionadas para a carpintaria e marcenaria, e as ligações mecânicas que recorrem a ligadores. Os ligadores dividem-se entre ligadores do tipo planos (*connectors*), como placas metálicas dentadas, anéis, chapas de pregar etc. e entre ligadores do tipo cavilha (*fasteners*) que incluem os pregos, os parafusos de enroscar, os parafusos de porca e anilha, os agrafos e as cavilhas, indicados para as estruturas de grandes dimensões onde está presente a transmissão de esforços elevados.

O EC5-1-1 [4], distingue ligações madeira-madeira e madeira-aço, havendo uma divisão nestes tipos de ligação, de acordo com o esforço aplicado aos ligadores. Assim em função do esforço de corte simples ou de corte duplo, são identificados os principais modos de rotura. Relativamente às ligações em corte duplo, com particular interesse no presente trabalho, são apresentados três modos de rotura para as ligações WWW (Figura 3).

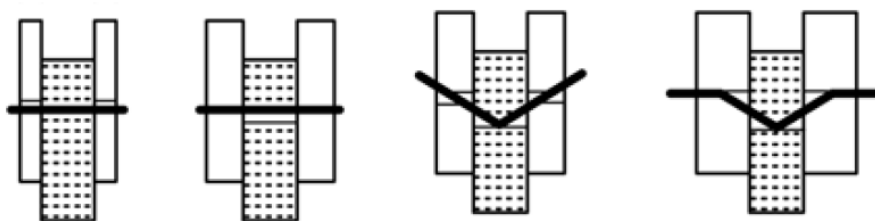


Figura 3 - Modos de rotura de ligações WWW em corte duplo [4]

Observando a Figura 3, é possível afirmar que a rotura das ligações em corte duplo, deve-se ao esmagamento das placas laterais, esmagamento da placa central, à flexão do ligador, ou ainda à sobreposição desses efeitos.

Da mesma forma, o EC5-1-1 [4] identifica os modos de rotura das ligações madeira-aço em corte duplo (Figura 4), e os motivos de rotura são do mesmo que para a ligação anterior.

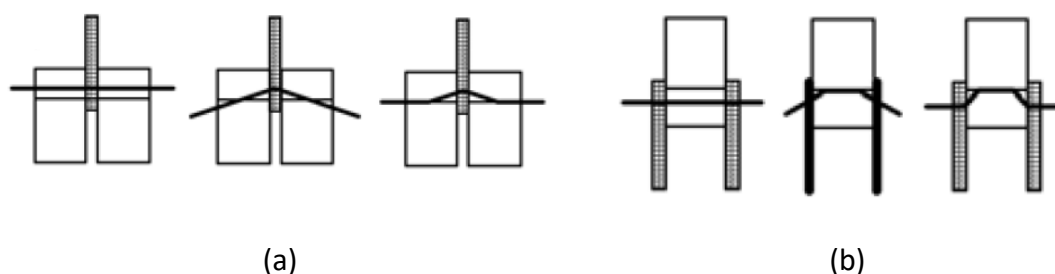


Figura 4 - Modos de rotura ligações em duplo corte: (a) ligação WSW; (b) ligação WSW [4] (adaptado)

Em 2021, Yurrita e Cabrero [12] estudaram os modos de rotura em ligações em madeira com cavilhas (Figura 5), realçando a importância da ocorrência de rotura dúctil, em detrimento de rotura frágil. Indicam também que as normas atuais para a previsão de um modo de rotura dúctil têm na sua constituição métodos conservativos, que em certas situações, apesar de preverem uma rotura dúctil, ocorre a rotura frágil.

Com base em testes experimentais realizados, propõem um fator de segurança de 1,55 em vez de 1,3 apresentado no EC5-1-1 [4], para uma melhor previsão do modo de rotura.

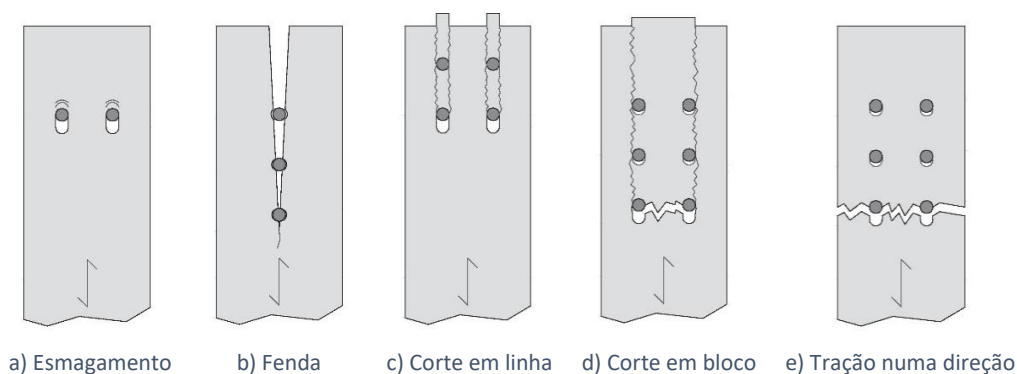


Figura 5 - Modos de rotura em ligações de madeira: (a) Rotura dúctil; (b)(c)(d)(e) Rotura frágil [12]

2.3 Fogo em ligações

Nas últimas décadas, têm sido feitos esforços para compreender melhor a ação do fogo em estruturas, considerado como um fenómeno de elevada gravidade e complexidade. É especialmente preocupante quando ocorre em edifícios, provocando danos materiais e colocando vidas humanas e animais em perigo.

Para melhor compreender este fenómeno, é importante estudar as ligações estruturais que fazem parte das construções em geral, pois são os pontos mais frágeis da estrutura quando expostas ao fogo. Por este motivo, nos últimos anos têm sido feitos esforços neste sentido, privilegiando a prevenção das falhas estruturais, que ocorrem nas ligações sob a ação do fogo.

No ano de 2011, Peng, *et al.* [13] estudaram as ligações WWW, WSW e SWS expostas ao fogo sem proteção, com recurso a cavilhas e a parafusos como ligadores. É feita, em primeiro lugar, uma revisão dos modelos de cálculo mais atuais, para a previsão da resistência mecânica das ligações em estudo. Baseando-se em dados recentes, e na revisão de modelos existentes, os autores propõem um novo modelo de cálculo. Este modelo tem em conta a espessura dos membros de madeira, o diâmetro dos ligadores e o valor percentual de carga.

Em 2013, Maraveas, *et al.* [14] apresentam uma revisão dos ensaios e estudos numéricos de ligações de aço-madeira em duplo corte, expostas ao fogo, mais

relevantes até à data. Em particular, ligações do tipo WWW, WSW e SWS, com parafusos e cavilhas. Com os resultados dos ensaios e dos estudos analisados, concluíram que, o fator predominante para a perda de resistência ao fogo das ligações, é a tensão de esmagamento, o que normalmente implica num aumento do furo do ligador. Este aumento dos furos dos ligadores indica a ocorrência de rotura dúctil.

2.4 Ensaios experimentais

O estudo experimental das ligações, tanto ao fogo como à temperatura ambiente, possuem uma particular importância para a previsão do comportamento das ligações, quando estão sujeitas a determinados esforços. Com estes estudos, é possível compreender o impacto real de certos parâmetros na resistência da ligação, como por exemplo os diâmetros das cavilhas, a espessura dos membros e o número de cavilhas. Para além da compreensão do impacto das variáveis, os estudos experimentais permitem ainda testar e validar teorias para o melhor dimensionamento das ligações.

Em 2010, Peng, *et al.* [15] fizeram uma revisão de testes experimentais em ligações sujeitas à ação do fogo pela imposição da curva ISO 834 [6]. As ligações testadas foram do tipo madeira-madeira e de aço-madeira. As ligações foram testadas com ligadores por cavilhas, parafusos e pregos. Com este conjunto de ensaios, conseguiram demonstrar o efeito da taxa de carregamento e da geometria dos membros, na resistência ao fogo da ligação. Também com base nos dados recolhidos, foi proposto um novo método de cálculo para o dimensionamento de ligações em madeira, sob a ação do fogo.

Mais recentemente, em 2019, Audebert, *et al.* [16] apresentaram um estudo com o conjunto dos principais ensaios realizados entre 1999 a 2019, em ligações madeira-madeira e madeira-aço, à tração à temperatura ambiente e expostas ao fogo. As ligações em estudo, encontravam-se com ligadores do tipo cavilhas, parafusos ou pregos, e com aplicação de carga na direção paralela, a 45° e 90°, relativamente às fibras da madeira.

No final constataram que, apesar de geometrias diferentes, de cargas aplicadas distintas e do tipo de madeira utilizada, certos parâmetros apresentavam grande destaque na resistência das ligações ao fogo. Por ordem de relevância, os parâmetros que se destacaram foram: a espessura dos membros laterais, o valor percentual de carga e o tipo de ligador. De realçar que, em relação a este último parâmetro, as ligações com cavilhas possuem maior resistência comparativamente àquelas com os parafusos ou pregos. Observaram também que os resultados experimentais à temperatura ambiente mostraram uma margem de segurança de 25% com os valores calculados segundo o EC5-1-1 [4] e que, com a exposição ao fogo apresentaram resultados diversos quando comparados com os valores do método de redução, EC5-1-2 [5], confirmando assim a dificuldade na previsão da resistência ao fogo das ligações.

2.5 Testes computacionais

No seguimento dos ensaios experimentais, são também realizados testes computacionais recorrendo ao MEF. Os modelos numéricos facilitam a utilização de diferentes variáveis, tornando possível o estudo de diferentes modelos. Os custos associados e o tempo necessário na preparação dos modelos podem tornar-se numa vantagem, comparativamente aos testes experimentais.

Em 2014, Khelifa, *et al.* [17], desenvolveram um modelo numérico, com o objetivo de prever a tensão de rotura, em ligações com várias cavilhas sobre a ação do fogo. Este modelo é baseado na mecânica contínua e aplica a teoria clássica da plasticidade. Tem em conta, fatores como as deformações plásticas, o efeito do calor e o enrijecimento do material devido às propriedades ortotrópicas da madeira. O modelo apresentado demonstrou estar de acordo com os resultados experimentais e concluíram que a tensão de rotura diminui com o aumento da temperatura.

Em 2019, Palma e Frangi [18], desenvolveram um modelo computacional, com ligações em aço-madeira com cavilhas e carregamento aplicado na direção perpendicular às fibras da madeira, à temperatura ambiente e sob a ação do fogo. O modelo tem como base o MEF que combina, a transferência de calor em regime transiente com a capacidade de carga imposta. Dentro de determinadas condições e, comparando com os resultados experimentais, o modelo numérico desenvolvido demonstrou ser capaz de prever o modo de rotura de cada cavilha e a capacidade de carga da ligação.

Em 2021, Szász, *et al.* [19], analisaram o comportamento de ligações aço madeira, com cavilhas e parafusos, em duplo corte sob a ação do fogo. Desenvolveram um modelo numérico para a previsão da resistência ao fogo, de uma ligação do tipo WSW, à tração. O trabalho foi baseado no Eurocódigo 5, para a obtenção da variação das propriedades dos materiais sob a ação do fogo e, para o projeto da ligação. No final, avaliaram o impacto do parâmetro de entrada com base no diâmetro dos ligadores, onde concluíram que este tem grande influência na resistência da ligação. Também verificaram que a temperatura ambiente o aumento do diâmetro do ligador implica um aumento da resistência da ligação. Com a ação do fogo a resistência da ligação diminuía devido, à carbonização na zona em contato com o ligador.

PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

3.1 Madeira lamelada colada (*Glulam*)

3.2 Aço

3 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

Para o desenvolvimento da análise termomecânica do presente trabalho é necessário aplicar as propriedades dos materiais das ligações em estudo, nomeadamente as propriedades mecânicas e térmicas, da madeira e do aço utilizados. De salientar que as propriedades apresentadas nos próximos subcapítulos serão as utilizadas nos modelos de ligações desenvolvidos no capítulo 6.

3.1 Madeira lamelada colada (*Glulam*)

A madeira é um material compósito de origem natural, com uma composição química complexa composta por celulose, hemicelulose, lignina e extratos [3].

A madeira é obtida através do tronco das árvores que se classificam, a nível botânico, como Fanerógamas. Este grupo subdivide-se em Gimnospermas, onde se inserem as madeiras resinosas, conhecidas internacionalmente como “*softwoods*”, e Angiospermas onde estão incluídas as designadas madeiras folhosas “*hardwoods*” [20]. Apesar do nome, algumas madeiras da categoria “*softwood*” possuem uma dureza maior que da categoria “*hardwood*”. As diferenças estão ao nível da folhagem e da porosidade da madeira em que, na categoria “*softwood*”, estão presentes madeiras não porosas e as árvores de folha persistente, como por exemplo os pinheiros. Por outro lado, na categoria “*hardwood*” inserem-se as madeiras porosas e árvores tipicamente de folha caduca, como por exemplo o carvalho [21].

A qualidade da madeira é medida pela quantidade, tipo e distribuição de defeitos e pelas características médias da madeira. A norma NP 180 [22] faz uma descrição pormenorizada de todos os defeitos possíveis de serem encontrados na madeira. Tendo em conta a utilização da madeira como material de construção, os defeitos mais relevantes encontrados são: os nós, o fio inclinado, o descaio e as fendas [3]. Na Figura 6 encontram-se ilustrações dos defeitos mencionados.

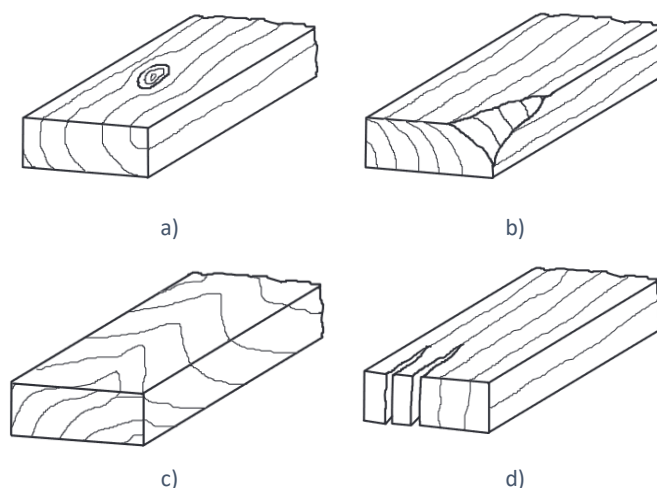


Figura 6 – Ilustrações de defeitos da madeira: a) nó; b) descaio; c) fio inclinado; d) fendas [23]

A madeira lamelada colada, mais conhecida como *Glulam*, é um material processado da madeira simples e um material de engenharia largamente utilizado em aplicações estruturais e arquitetônicas. Caracteriza-se como um material compósito, composto por duas ou mais camadas de madeira serrada colada, alinhadas paralelamente à direção das fibras [24, 25]. Este material é atrativo para a engenharia estrutural devido às suas propriedades mecânicas, função da rigidez e resistência. Estas boas características estruturais devem-se ao facto da *Glulam*, ser um material processado de forma rigorosa e com controlo de defeitos durante a produção [26].



Figura 7 – Exemplo de madeira laminada colada [27]

A norma BS EN 1194-1999 [28] estabelece um sistema de classes de resistência, para facilitar a comercialização da *Glulam*, possibilitar a combinação de várias qualidades e espécies, matéria-prima e fabrico.

O sistema aplica-se a *Glulam* com mais de quatro lâminas e é do tipo *GLxxx*, em que na posição três e quatro são algarismos referentes à resistência à flexão. O último dígito é

uma letra e indica se a *Glulam* é homogênea (“h”) ou seja, todas as lâminas são da mesma classe, ou combinada (“c”), quando as lâminas exteriores são de uma classe diferente das lâminas interiores. A título de exemplo, a madeira com a nomenclatura GL24h identifica que o material é madeira lamelada colada, com 24 N/mm² de resistência à flexão e é composto só por lâminas da mesma classe de resistência.

3.1.1 Propriedades mecânicas

Relativamente às propriedades mecânicas da madeira, esta é considerada um material ortotrópico, ou seja, possui diferentes propriedades dependendo da direção de carregamento. As três direções características são perpendiculares entre si: direção longitudinal, radial e tangencial (Figura 8). A primeira direção é paralela às fibras, a segunda é na direção normal aos anéis de crescimento, e a terceira é normal ao plano formado pelas direções longitudinal e radial [24].

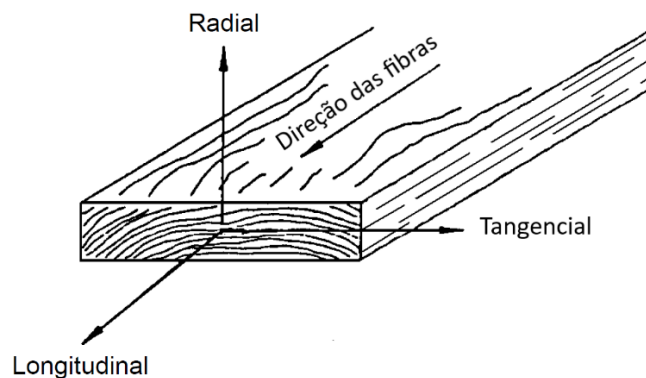


Figura 8 - Sistema de eixos da madeira relativamente à direção das fibras e dos anéis de crescimento [24]

As propriedades mecânicas da *Glulam*, à temperatura ambiente, segundo o EC5-1-1 [4], devem respeitar a norma EN 14080:2013 [29]. As classes de madeira utilizadas nesta dissertação foram a GL20h, GL24h e GL32h sendo que a madeira utilizada nos modelos é do tipo bétula, que pertence ao grupo das *softwoods*, com um teor de humidade de 12% e um coeficiente de Poisson (ν) igual a 0,4 [24]. O módulo de elasticidade (E) e a resistência à tração na direção das fibras ($f_{t,0,k}$) e massa volúmica (ρ) à temperatura ambiente foram obtidas através de um catálogo de fabricante [30] que respeita a norma referida. As propriedades referidas anteriormente encontram-se resumidas na Tabela 2. Outras propriedades podem ser consultadas no catálogo de fabricante [30].

Tabela 2 - Propriedades mecânicas à temperatura ambiente de três classes de *Glulam*

Propriedade	Unidade	Simbologia	GL20h	GL24h	GL32h
Teor de humidade	[%]			12	
Coeficiente de Poisson	[-]	ν		0,4	
Resistência à tração na direção das fibras	[MPa]	$f_{t,0,k}$	16	19,2	25,6
Módulo de elasticidade	[MPa]	E	84000	11500	14200
Massa volúmica	[kg/m ³]	ρ	370	420	480

3.1.2 Propriedades térmicas

A madeira apresenta boa resistência ao fogo, apesar de ser um material combustível, e apresentar um mau desempenho na reação a este tipo de carga accidental.

Na presença de fogo e ar, a madeira começa por secar e à temperatura de, aproximadamente, 280 a 300°C entra em combustão, iniciando a carbonização, ou seja, a transformação da madeira em carvão. Numa fase inicial, este é um processo rápido, em que a camada mais exterior da madeira incendeia e queima, transformando-se rapidamente em carvão. O processo envolvido nesta transformação denomina-se pirólise, processo térmico de decomposição da madeira. Após a rápida queima inicial, a carbonização abranda, mas quando a secção intacta se torna demasiado pequena, o processo volta a acelerar até à queima total [3, 31].

Na Figura 9 apresentam-se, de forma simplificada, as zonas referentes ao processo de carbonização.

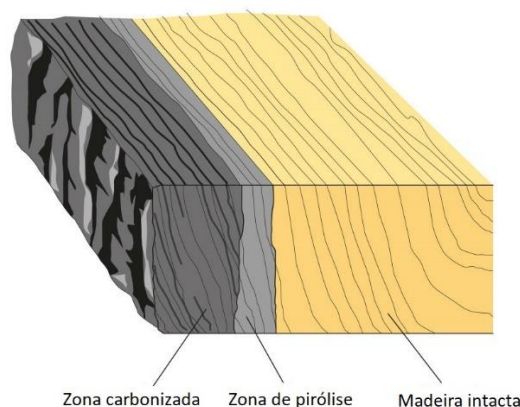


Figura 9 – Ilustração das zonas do processo de carbonização [32]

Pelo facto de o carvão permanecer aderente ao material, e pela sua alta resistência térmica (três vezes superior à madeira), este atua como um isolante térmico, o que retarda a carbonização e diminui a temperatura da zona intacta. Ou seja, apesar da camada exterior da madeira, em contato com o fogo, se degradar, a zona interior não sofre qualquer alteração significativa nas suas propriedades mecânicas [3].

As quatro propriedades térmicas definidas no modelo da madeira são: a condutividade térmica, o calor específico, o coeficiente de expansão térmica e a emissividade.

A condutividade térmica (k) da madeira é diretamente proporcional ao teor de água e de um modo geral, bastante inferior à dos metais. O calor específico (c_p) também depende, de forma direta, da temperatura e do teor de água da madeira, sendo independente da massa volúmica. O coeficiente de expansão térmica (α) da madeira seca é positivo em todas as direções, ou seja, com o aumento da temperatura a madeira aumenta de volume, e diminui com o arrefecimento [33].

O coeficiente de expansão térmica (α) e a emissividade (ϵ) da madeira estão apresentados na Tabela 3 de acordo com o EC5-1-2 [5]. A variação da condutividade térmica, Figura 10, e o calor específico, Figura 11, em função da temperatura foram retiradas do anexo B do EC5-1-2 [5]

Na Figura 12 encontra a variação da massa volúmica, em função da temperatura, para a madeira resinosa com 12% de humidade. As Figuras 13 e 14 mostram o módulo de elasticidade e curvas tensão-deformação das diferentes classes de madeira tendo em conta os fatores de redução indicados no anexo B do EC5-1-2 [5]. As variações destas propriedades também foram tidas em conta nos modelos desenvolvidos.

Tabela 3 - Propriedades térmicas da madeira

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

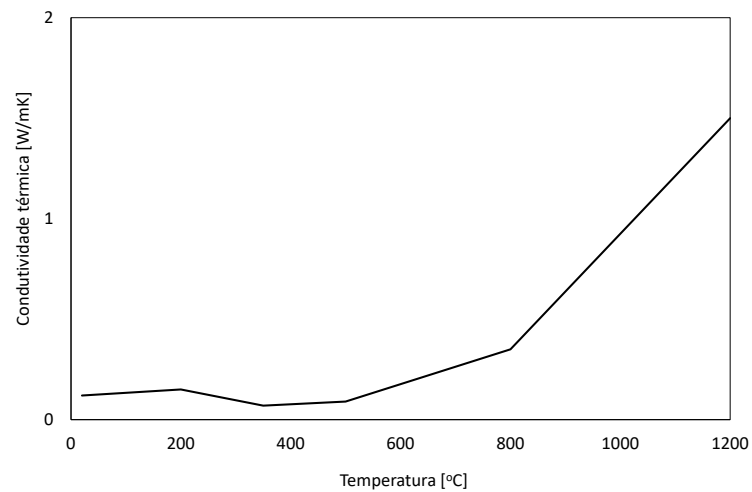


Figura 10 - Condutividade térmica da madeira em função da temperatura

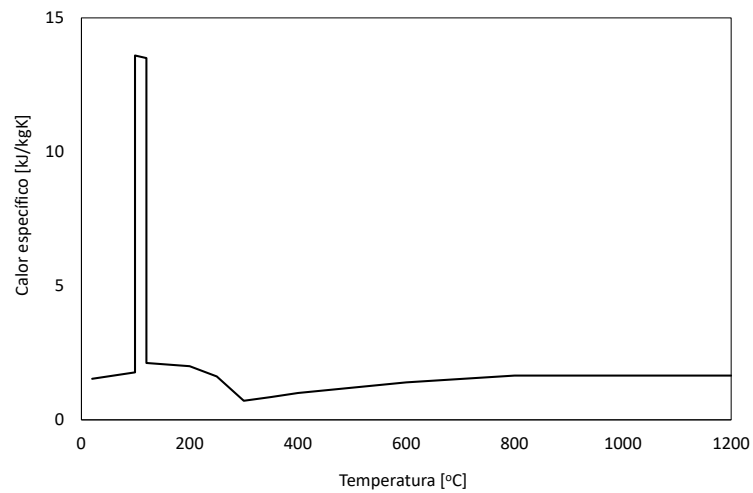


Figura 11 - Calor específico da madeira em função da temperatura

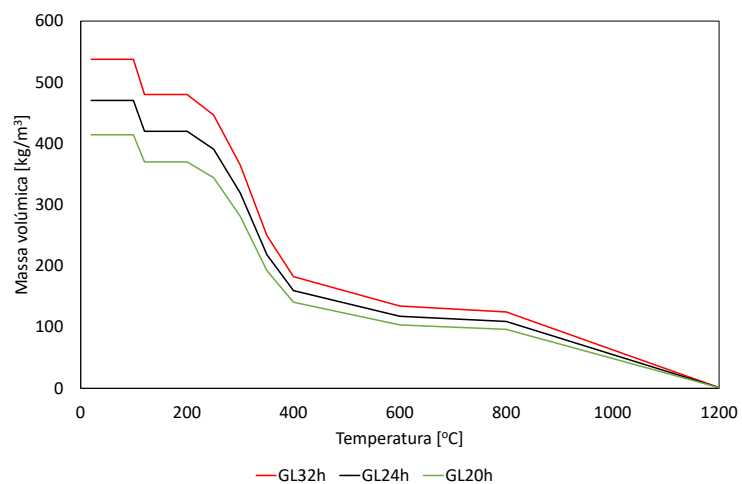


Figura 12 - Massa volúmica de três classes de madeira em função da temperatura

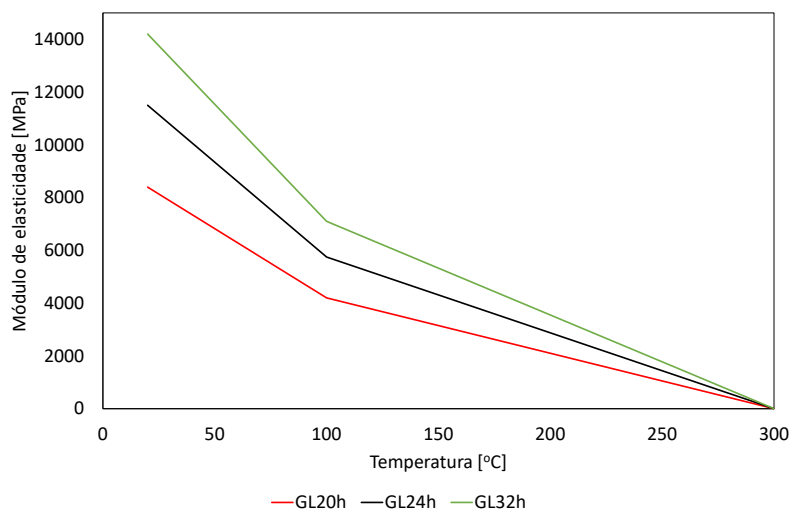


Figura 13 – Módulo de elasticidade de três classes de madeira em função da temperatura

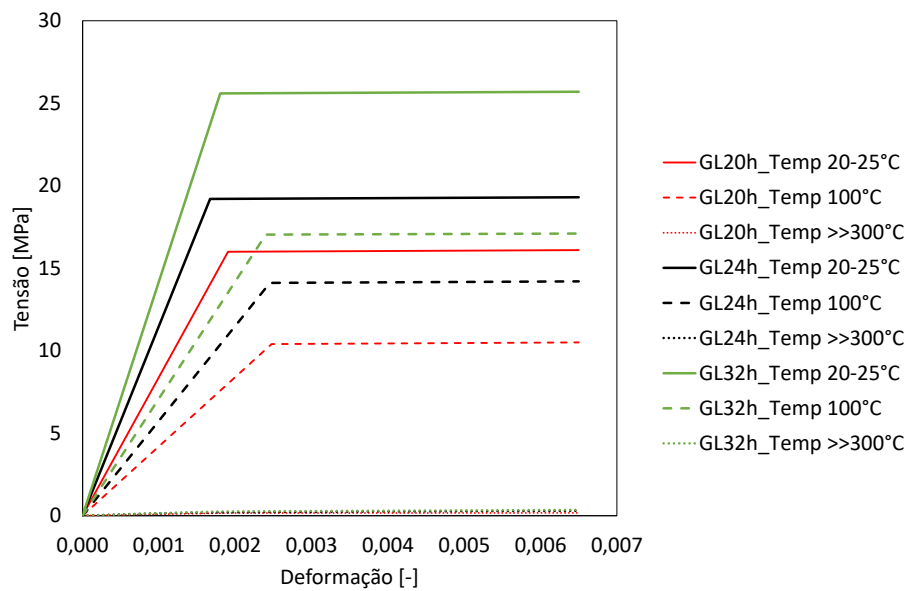


Figura 14 - Curvas tensão-deformação dependentes da temperatura de três classes de madeira

3.2 Aço

O aço é um material que tem sido usado desde o primeiro quarto do século XIX, e teve como aplicação inicial o reforço de estruturas em cimento. Com os avanços tecnológicos a nível industrial, a abundância de matéria-prima e as necessidades da época, o aço passou a ser utilizado como material de construção.

Caracteriza-se por ser um material com um grande intervalo de propriedades mecânicas, entre elas: elevada tensão de tração e de compressão, dureza e a possibilidade de ser deformado plasticamente, tornando-o num material versátil [3].

3.2.1 Propriedades mecânicas do aço

O Eurocódigo 3 parte 1-1 (EC3-1-1) [34] apresenta as propriedades do aço estrutural laminado a quente, a serem consideradas para o dimensionamento à temperatura ambiente. No presente trabalho o aço selecionado, para os membros de aço e das cavilhas, é da classe S275, por ser uma das classes mais usuais para construções metálicas, com espessura inferior a 40 mm.

Na Tabela 4 encontram-se as propriedades mecânicas apresentadas no EC3-1-1 [34], segundo a norma EN 10025-2 [35], nomeadamente a tensão de cedência (f_y) e de rotura (f_u). Na mesma tabela, são apresentadas as restantes propriedades a serem adotados nos cálculos para dimensionamento das ligações: o módulo de elasticidade (E), o coeficiente de Poisson (ν), a massa volúmica (ρ) e o coeficiente de expansão térmica (α). A massa volúmica do aço (ρ), contrariamente à da madeira, e de acordo com Eurocódigo 3 parte 1-2 (EC3-1-2) [36], deve ser considerada independente da temperatura, ou seja, considera-se que a massa volúmica do aço permanece constante, sendo igual a 7850 kg/m³.

Tabela 4 - Valores nominais das propriedades mecânicas do aço S275

	Unidade	Simbologia	Aço S275
Tensão de cedência	[MPa]	f_y	275
Tensão de rotura	[MPa]	f_u	430
Tensão de rotura característica	[MPa]	$f_{u,k}$	400
Módulo de Elasticidade	[MPa]	E	210x10 ³
Massa volúmica	[kg/m ³]	ρ_a	7850
Coeficiente de Poisson	[-]	ν	0,3

3.2.2 Propriedades térmicas do aço

O comportamento mecânico do aço é bastante afetado a altas temperaturas. Acima de aproximadamente 500°C, a microestrutura do aço muda, começando a perder rigidez e quando sujeito a forças relativamente pequenas, pode ser facilmente deformado. Outra alteração negativa é o facto de a elevadas temperaturas o aço poder sofrer corrosão/erosão severa, o que implica a redução da secção do material [37].

Contudo, EC3-1-2 [36] tem em consideração estes outros fatores, e estabelece os valores das propriedades térmicas do aço. O coeficiente de expansão térmica (α) e a emissividade (ε) do aço recomendados pelo EC3-1-2 [36] encontram-se na Tabela 4.

Tabela 5 - Propriedades térmicas do aço

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

Relativamente às propriedades de condutividade térmica e calor específico do aço, ambas variam com a temperatura, e estão descritas no EC3-1-2 [36], de acordo com expressões analíticas. De acordo com essas expressões, o gráfico da evolução das propriedades em função da temperatura é apresentado nas Figuras 15 e 16, para o calor específico e da condutividade térmica, respetivamente.

Tal como na madeira, no aço está previsto a degradação do módulo de elasticidade com o aumento da temperatura, bem como a alteração da curva tensão-deformação. Nas Figuras 17 e 18 representa-se a evolução dessas propriedades em função da temperatura de acordo com o EC3-1-2 [36].

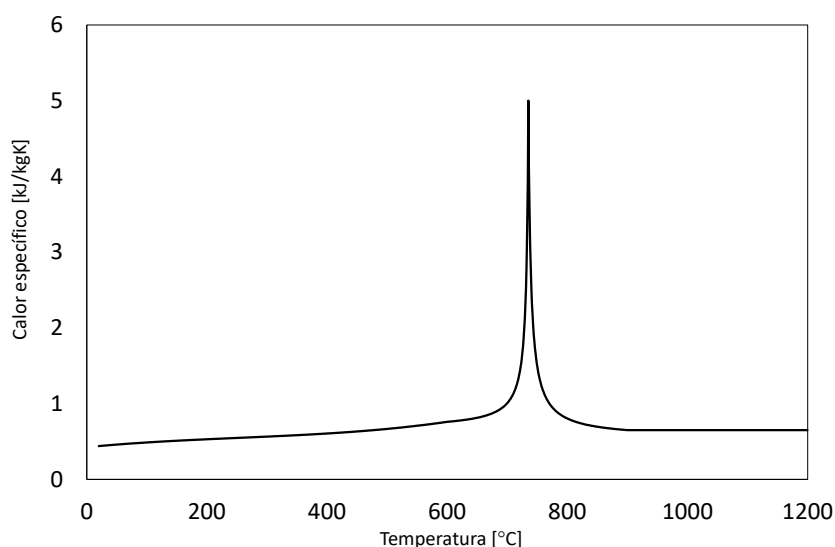


Figura 15 - Calor específico do aço em função da temperatura

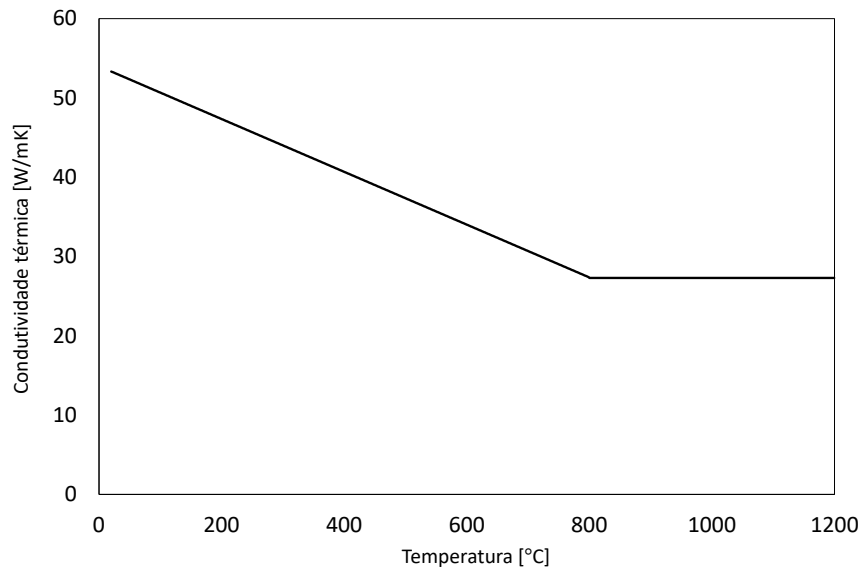


Figura 16 - Condutividade térmica do aço em função da temperatura

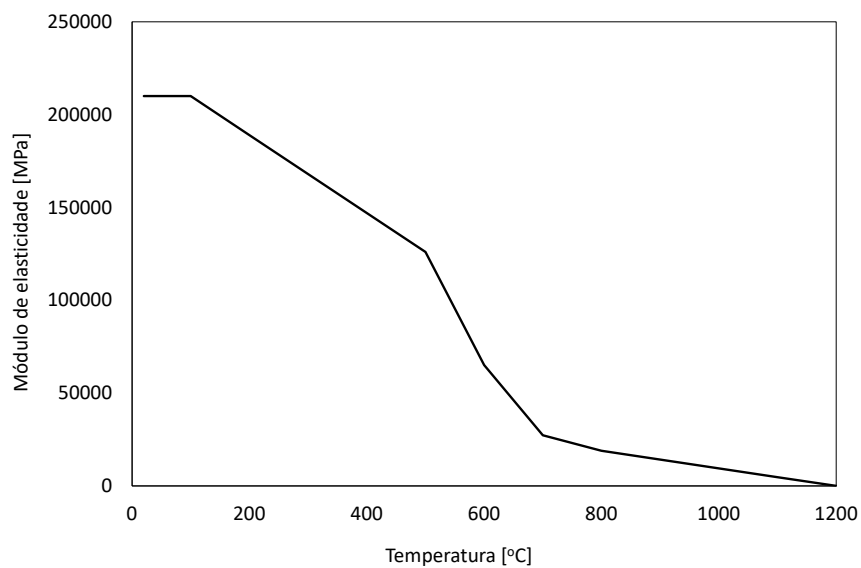


Figura 17 – Módulo de elasticidade do aço em função da temperatura

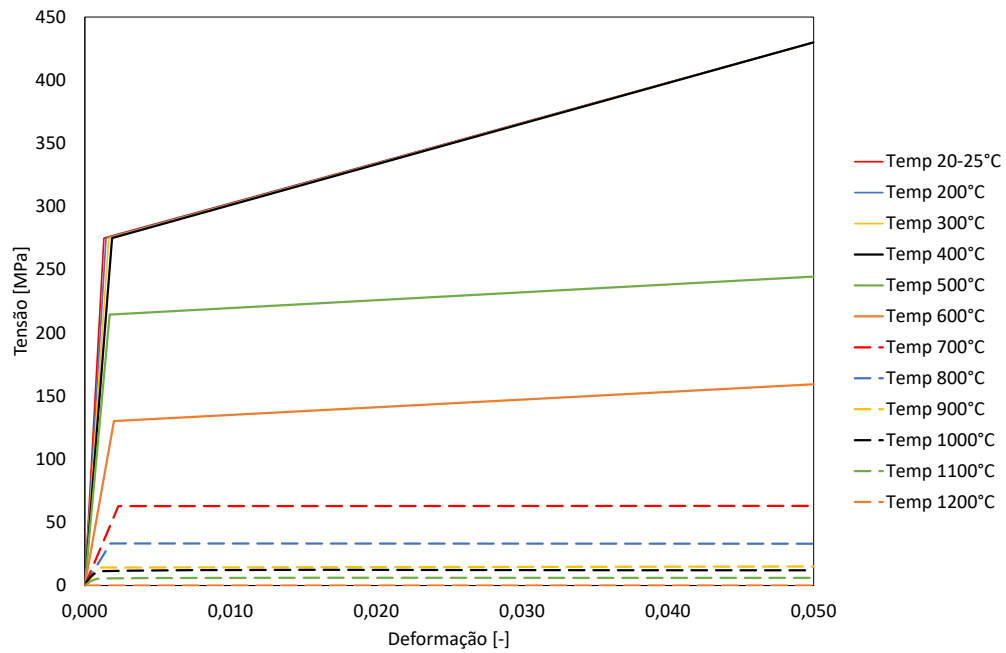


Figura 18 – Curvas tensão-deformação dependentes da temperatura do aço

TRANSFERÊNCIA DE CALOR

- 4.1 Curva de incêndio ISO 834
- 4.2 Modos de transferência de calor

4 TRANSFERÊNCIA DE CALOR

De modo a obter a distribuição de temperaturas para uma análise térmica é necessário compreender os modos de transferência de calor e os aspetos a ter em conta por indicação do EC1-1-2 [7], nomeadamente a evolução da temperatura ao longo do tempo durante um incêndio.

4.1 Curva de incêndio ISO 834

O fogo é a manifestação de uma reação química que pode tomar várias formas, envolvendo a combinação de uma fonte de calor, com um combustível e oxigénio. Varia de acordo com o estado físico e distribuição do combustível, do meio envolvente e da sua natureza química [38].

O EC1-1-2 [7] propõe diferentes equações para considerar a ação do fogo, para a análise térmica de elementos estruturais, as designadas curvas nominais de incêndio. Estas curvas fornecem a evolução da temperatura ambiente, que envolve a estrutura, ao longo do tempo na presença de um incêndio. O termo “nominal” refere-se ao facto destas curvas serem regidas por equações analíticas.

A curva de incêndio ISO 834 [6], é função da evolução da temperatura ambiente no tempo, sendo a mais utilizada no âmbito da investigação. É assim utilizada para representar um incêndio totalmente desenvolvido num compartimento, e a equação analítica que a define tem origem na norma ISO 834 [6], apresentada na equação (4.1) [39].

$$\theta_g = 20 + 345 \log(8t + 1) \quad (4.1)$$

Em que θ_g é a temperatura do forno em °C e t o tempo em min. De acordo com esta expressão, o gráfico da curva ISO 834 [6] pode ser observada na Figura 19.

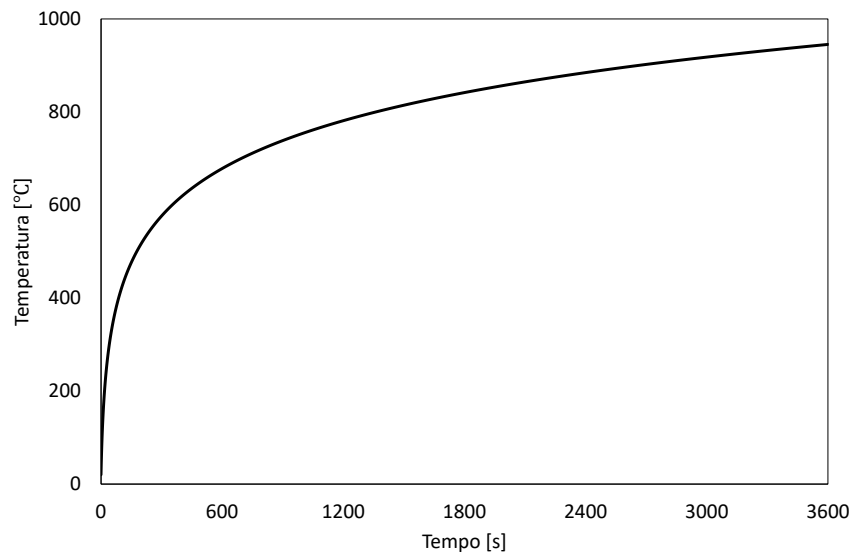


Figura 19 - Curva nominal de incêndio ISO 834 [6]

4.2 Modos de transferência de calor

A transferência de calor pode ser definida como a energia térmica transferida devido a uma diferença de temperatura espacial. Sempre que exista uma diferença de temperatura entre corpos e/ou meios. Pode ocorrer por três diferentes modos: condução, convecção e radiação [40].

4.2.1 Condução

Este modo de transferência de calor ocorre, devido à existência de uma diferença de temperaturas no meio. Está relacionado com o movimento molecular, num meio sólido ou fluido que, ao nível macroscópico, se encontra estacionário. Pode ser definido como, um modo de transferência de calor de um meio, com maior energia cinética molecular, para um outro de menor energia, tentando assim, uniformizar a temperatura [40].

A transferência de calor por condução é regida pela lei de Fourier, e tem em conta a condutividade térmica do material (k) e a distribuição da temperatura do meio ($\theta(x)$). Para o caso representado na Figura 20, de condução unidirecional, é definido pela equação (4.2). O sinal negativo indica que o sentido do fluxo de calor é contrário ao gradiente de temperatura.

$$q''_{cond} = -k \frac{\partial \theta}{\partial x} \quad (4.2)$$

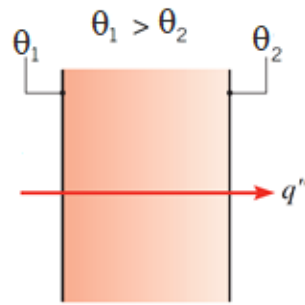


Figura 20 - Condução através de um sólido ou de um fluido [40]

Tratando o fluxo de calor como uma quantidade vetorial, a lei de Fourier pode ser reescrita numa equação mais generalizada tridimensional como a equação (4.3).

$$q''_{cond} = -k \nabla \theta = -k \left(i \frac{\partial \theta}{\partial x} + j \frac{\partial \theta}{\partial y} + k \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) \quad (4.3)$$

Tratando-se de um regime transiente, em que a condutividade térmica do material pode ser considerada constante, a equação simplificada geral de condução de calor no sólido, considerando-o como um elemento infinitesimal tridimensional é dada pela expressão (4.4). Sendo o calor específico, c_p e t o tempo [40].

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}}{k} = \rho c_p \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (4.4)$$

4.2.2 Convecção

O modo de transferência por convecção ocorre, entre um fluido em movimento e uma superfície delimitadora, encontrando-se a temperaturas diferentes

A convecção conjuga o mecanismo da condução de calor (movimento molecular) com o movimento macroscópico de um fluido. De acordo com a natureza do movimento do fluido, pode ser considerada forçada ou natural. O modo de transferência de calor por convecção forçada acontece quando o movimento do fluido é causado por um elemento externo, como ventoinhas e bombas de água. Relativamente à convecção natural o movimento do fluido tem origem na variação de massa volúmica causada por variações de temperatura [40].

Independentemente da natureza do modo de transferência por convecção, natural ou forçada, a quantificação do calor transferido é feita através da equação de arrefecimento de Newton (equação (4.5)). Esta relaciona o coeficiente de transferência

de calor por convecção (h) e a diferença entre a temperatura da superfície (θ_s) e a temperatura do fluido (θ_∞).

$$q''_{conv} = h(\theta_s - \theta_\infty) \quad (4.5)$$

Na análise térmica das ligações em estudo, a convecção será apenas utilizada como condição de fronteira e de acordo com o EC1-1-2 [7], h é considerado igual a 25W/m²K.

4.2.3 Radiação

A radiação térmica é, a energia emitida por matéria, que se encontra a uma temperatura diferente de zero Kelvin. De acordo com a literatura, é considerada um fenómeno superficial, onde a energia é transportada por ondas eletromagnéticas, e devido a este meio de transporte não precisa de um meio material para se propagar, contrariamente à condução e à convecção. De facto, a propagação das ondas eletromagnéticas é mais eficiente no vácuo [40]. Na Figura 21 encontra-se uma representação de transferência de calor através da radiação em duas superfícies com temperaturas acima de zero Kelvin.

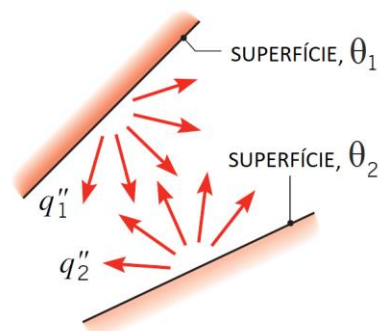


Figura 21 - Troca de calor por radiação entre duas superfícies (adaptado) [40].

A lei de Stefan-Boltzmann, apresentada na equação (4.6), define o poder emissivo de um corpo (E_b), que emite o máximo de radiação térmica, considerado um corpo negro. O corpo absorve toda a energia incidente sem refletir.

$$E_b = \sigma\theta_s^4 \quad (4.6)$$

Nesta equação, θ_s define a temperatura da superfície do corpo e σ , a constante de Stefan-Boltzmann que tem o valor igual a 5,67x10⁻⁸W/m²K⁴.

Visto que o corpo negro se trata de uma situação ideal, o fluxo de calor por radiação de um corpo real é menor à mesma temperatura e é definido pela equação (4.7). A emissividade do corpo (ε) apresentada na equação, toma valores entre zero, em que corpo que não emite energia só reflete, e 1, quando se trata de um corpo negro.

$$E = \varepsilon \sigma \theta_s^4 \quad (4.7)$$

Tendo em consideração a situação frequente de troca de radiação entre uma superfície muito menor que a outra, o fluxo de calor (q''_{rad}) pode ser equacionado da seguinte forma:

$$q''_{rad} = \varepsilon \sigma (\theta_s^4 - \theta_{sur}^4) \quad (4.8)$$

Neste caso θ_s é a temperatura da superfície do corpo real, e θ_{sur} é a temperatura no meio envolvente.

Neste trabalho a emissividade do fogo é definida pelo EC1-1-2 [7] e é igual à unidade. A emissividade do aço e da madeira já foram definidas anteriormente sendo igual a 0,8 e 0,7, respetivamente.

DIMENSIONAMENTO DE LIGAÇÕES AÇO-MADEIRA À TRAÇÃO

- 5.1 Temperatura ambiente
- 5.2 Elevadas temperaturas

5 DIMENSIONAMENTO DAS LIGAÇÕES AÇO-MADEIRA À TRAÇÃO

As geometrias das ligações em estudo (WWW, WSW e SWS) foram dimensionadas com recurso às equações simplificadas presentes no EC5-1-1 [4] e EC5-1-2 [5] para a temperatura ambiente e altas temperaturas, respetivamente.

Seguindo o procedimento indicado nos Eurocódigos [4, 5] foram elaboradas tabelas de projeto, com toda a informação relevante para o dimensionamento em segurança dos diferentes tipos de ligações em estudo (WWW, WSW e SWS). O procedimento utilizado no cálculo das ligações e refletido nessas tabelas encontra-se nos subcapítulos seguintes. Como hipótese, foi sempre considerado que o número de linhas de cavilhas se mantinha constante em qualquer ligação e igual a dois.

5.1 Temperatura ambiente

No EC5-1-2 [5] é referido que para as ligações aço-madeira com cavilhas, a espessura dos membros laterais, t_1 , deve ter uma espessura superior a 45mm para pelo menos 20min de resistência ao fogo.

Relativamente aos estados limites últimos, o EC5-1-1 [4] estabelece que para a tração na direção das fibras da madeira, a tensão à tração do projeto ($\sigma_{t,0,d}$), não deve exceder a de resistência ($f_{t,0,d}$), como mostrado na inequação (5.1).

$$\sigma_{t,0,d} \leq f_{t,0,d} \quad (5.1)$$

O cálculo da resistência à tração da ligação, demonstrado na equação (5.2), tem em consideração o valor característico de resistência à tração ao longo da fibra $f_{t,0,k}$ da madeira e alguns fatores de segurança enunciados no EC5-1-1 [4]. Estes fatores incluem o fator de correção (k_{mod}) e o fator parcial de segurança para cada tipo de material (γ_M). Sendo que k_{mod} tem em conta a classe de serviço e a duração da carga.

$$f_{t,0,d} = \frac{k_{mod} \times f_{t,0,k}}{\gamma_M} \quad (5.2)$$

De acordo com o EC5-1-1 [4], para a madeira *Glulam*, γ_M é igual a 1,25. Para o caso em estudo considerou-se um carregamento de duração média e uma classe de serviço dois,

que pressupõem que o teor de humidade da madeira a 20°C ultrapassa a humidade relativa do meio envolvente apenas algumas semanas por ano. Nestas condições o EC5-1-1 [4] indica um valor de k_{mod} igual a 0,8.

O valor de $\sigma_{t,0,d}$ é calculada pela equação (5.3) dividindo a carga aplicada (F_d) pela área da secção transversal do membro (A_s).

$$\sigma_{t,0,d} = \frac{F_d}{A_s} \quad (5.3)$$

A capacidade de resistência à tração axial característica do ligador e por plano de corte, $F_{v,Rk}$, no caso de uma ligação WWW, calcula-se através da obtenção do valor mínimo entre os valores calculados a partir da equação (5.4), sendo que cada valor corresponde a um modo de rotura diferente.

$$F_{v,Rk} = \min \begin{cases} f_{h,1,k} t_1 d \\ 0,5 f_{h,2,k} t_2 d \\ 1,05 \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{2 + \beta} \left(\sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_1^2}} - \beta \right) + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \\ 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \sqrt{2M_{y,Rk} f_{h,1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \end{cases} \quad (5.4)$$

Em que:

t_1 - Espessura dos membros laterais da ligação;

t_2 - Espessura do membro central da ligação;

d - Diâmetro das cavilhas;

$f_{h,i,k}$ - Resistência ao esmagamento característico do membro i ;

β - Rácio de resistência ao esmagamento;

$M_{y,Rk}$ - Momento característico de cedência do ligador;

$F_{ax,Rk}$ - Resistência à tração axial do ligador;

O rácio de resistência ao esmagamento (β) é a relação entre a resistência de esmagamento do membro central ($f_{h,2,k}$) e dos membros laterais, ($f_{h,1,k}$), como mostra a equação (5.5).

$$\beta = \frac{f_{h,2,k}}{f_{h,1,k}} \quad (5.5)$$

Pelo facto de se considerar que na ligação WWW os membros laterais e central são do mesmo material, β é igual à unidade.

De acordo com o EC5-1-1 [4], a capacidade de resistência à tração axial característica do ligador para ligações com placa(s) de aço depende, da espessura da placa e do tipo de esforço de corte (duplo ou simples). A placa de aço pode ser considerada fina, quando a espessura é menor ou igual a metade do diâmetro do ligador, ou grossa para espessuras maiores ou iguais ao diâmetro da cavilha. Nas ligações deste tipo, nomeadamente WSW e SWS, a espessura da placa escolhida foi de 3mm.

Na ligação do tipo WSW o cálculo de $F_{v,Rk}$ traduz-se pela equação (5.6).

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{h,k} t_1 d \\ f_{h,k} t_1 d \left[\sqrt{2 + \frac{4M_{y,Rk}}{f_{h,k} d t_1^2}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \\ 2,3 \sqrt{M_{y,Rk} f_{h,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \end{array} \right. \quad (5.6)$$

Da mesma forma, $F_{v,Rk}$ para a ligação do tipo SWS é calculado pela equação (5.7).

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} 0,5 f_{h,k} t_s d \\ 1,15 \sqrt{2 M_{y,Rk} f_{h,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \end{array} \right. \quad (5.7)$$

Em todas as ligações considerou-se, de acordo com o EC5-1-1 [4], o valor de $F_{ax,Rk}$ igual a zero, devido aos elementos de ligação serem cavilhas.

A resistência ao esmagamento característico dos membros de madeira ($f_{h,k}$), apresentada na equação (5.8), depende do diâmetro das cavilhas (d) e da massa volúmica (ρ_{gk}).

$$f_{h,k} = 0,082(1 - 0,01d) \rho_{gk} \quad (5.8)$$

Relativamente ao momento característico de cedência de ligadores tipo cavilha, $M_{y,Rk}$, este é calculado tendo em conta a tensão de rotura à tração característica do ligador ($f_{u,k}$) e o seu diâmetro, d , tal como demonstrado na equação (5.9).

$$M_{y,Rk} = 0,3f_{u,k}d^{2,6} \quad (5.9)$$

Por fim, é feita a divisão entre F_d , e $F_{v,Rd}$ como mostrado na equação (5.10). O resultado no final é arredondado por excesso à unidade de modo a obter o número de cavilhas (N).

$$N = \frac{F_d}{F_{v,Rd}} \quad (5.10)$$

Relativamente ao posicionamento das cavilhas o EC5-1-1 [4], numa ligação com múltiplos ligadores, este define os espaçamentos mínimos entre cavilhas, na direção das fibras da madeira e na perpendicular. Na Figura 22 é apresentada, para as ligações em estudo nesta dissertação, a disposição das cavilhas relativamente à direção das fibras da madeira, com d o diâmetro da cavilha. De acordo com a figura, a_1 e a_2 representam o espaçamento entre cavilhas mais próximas na horizontal e na vertical. O espaçamentos entre os bordos do membro na horizontal e na vertical com carregamento na direção das fibras é definido por $a_{3,t}$ e $a_{4,c}$, respetivamente.

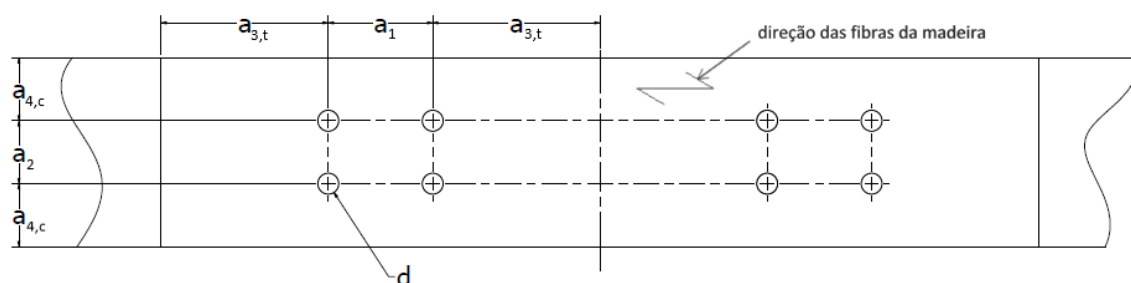


Figura 22 – Espaçamento entre cavilhas e distâncias aos bordos

Na Tabela 6, são expostas as equações para o cálculo dos espaçamentos entre os ligadores no projeto das ligações [4].

Tabela 6 - Distâncias dos espaçamentos entre os ligadores [4]

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

As tabelas de projeto realizadas de dimensionamento à temperatura ambiente para cada tipo de ligação estão apresentadas em função das diferentes variáveis das ligações, nomeadamente da carga aplicada (5 kN, 10 kN e 15 kN), o diâmetro das cavilhas (6mm, 8mm e 10mm) e as classes de madeira utilizada (GL20h, GL24h e GL32h). Para além das variáveis das ligações em estudo, constam as dimensões dos elementos das ligações, a disposição das cavilhas, o número de cavilhas necessário para a resistência ao corte duplo da ligação, bem como os modos de rotura previstos pelo EC5-1-1 [4]. Estas tabelas encontram-se no Anexo 1.

5.2 Elevadas temperaturas

No que se refere a elevadas temperaturas o EC5-1-2 [5] estabelece um critério de verificação de resistência numa situação de exposição ao fogo das ligações em madeira. A ligação considera-se dimensionada corretamente ao fogo quando a inequação (5.11) é verificada.

$$\frac{E_{d,fi}}{A_s} \leq f_{d,fi} \quad (5.11)$$

Sendo que $E_{d,fi}$ é o resultado das ações de projeto em situação de fogo, incluindo os efeitos de expansão térmica e deformações, e $f_{d,fi}$ a resistência da ligação exposta ao fogo.

O cálculo de $E_{d,fi}$ é obtido por multiplicação do fator de redução de carga de projeto de exposição ao fogo (η_{fi}) com F_d tal como mostrado na equação (5.12).

$$E_{d,fi} = E_d \eta_{fi} \quad (5.12)$$

O cálculo de $f_{d,fi}$ é feito de acordo com a equação (5.13) e depende do fator de modificação para o fogo ($k_{mod,fi}$), do quantil correspondente a 20% da propriedade de resistência à temperatura ambiente (f_{20}) e do fator de segurança parcial relativo à madeira exposta ao fogo ($\gamma_{M,fi}$).

$$f_{d,fi} = k_{mod,fi} \frac{f_{20}}{\gamma_{M,fi}} \quad (5.13)$$

O fator $\gamma_{M,fi}$ indicado no EC5-1-2 [5] é igual a um, tal como o valor de $k_{mod,fi}$. Relativamente a f_{20} , este é calculado de acordo com a equação (5.14) tendo em conta o coeficiente k_{fi} e a resistência à tração na direção das fibras da madeira ($f_{t,0,k}$).

$$f_{20} = k_{fi} f_{t,0,k} \quad (5.14)$$

O coeficiente k_{fi} definido no EC5-1-2 [5] para madeira *Glulam* é igual a 1,15.

De modo a aumentar o tempo de resistência ao fogo, o EC5-1-2 [5] propõe para as ligações com madeira nos elementos laterais, ligações WWW e WSW, o aumento da espessura e largura dos membros laterais e a distância aos bordos das cavilhas. Relativamente à ligação SWS, com os elementos laterais em aço, o EC5-1-2 [5] menciona que não devem estar diretamente expostos ao fogo, ou seja, necessitam de proteção de membros de madeira ou painéis derivados de madeira. Como o objetivo desta dissertação é estudar as ligações sem proteção os pontos de aumento de resistência da ligação mencionados são apenas expositivos das recomendações do EC5-1-2 [5].

MODELOS AVANÇADOS POR ELEMENTOS FINITOS

- 6.1 Análise térmica
- 6.2 Análise termomecânica

6 MODELOS AVANÇADOS POR ELEMENTOS FINITOS

A análise de problemas reais de engenharia tem sido realizada, através de modelos de cálculo avançado com recurso a programas baseados no MEF. Estes modelos possibilitam a obtenção de soluções aproximadas bastante fiáveis, com menor consumo de recursos e mais rápidos, em detrimento dos métodos analíticos e ensaios experimentais [41, 42].

O MEF caracteriza-se pela discretização ou decomposição de um problema físico, em partes finitas mais pequenas, denominadas de elementos. Deste modo, divide-se o problema complexo inicial num conjunto de problemas mais simples, cuja solução é conhecida ou pode ser aproximada. Estes elementos são de dimensão finita com geometria simples, como tetraedros ou cubos no caso de análises tridimensionais, estando ligados entre si através de pontos, denominados de nós. Cada nó tem um conjunto de graus de liberdade, como temperatura ou deslocamentos, que variam de acordo com o tipo de análise e condições de fronteira impostas no sistema. O aglomerado dos elementos e nós é designado por malha [42].

A quantidade de elementos e nós pode influenciar a solução obtida, sendo que a decisão do número de elementos finitos, através de um processo de convergência e até mesmo através de um controlo de malha em função da geometria, poderá levar a uma solução mais precisa.

Na presente dissertação, os modelos numéricos desenvolvidos para as ligações aço-madeira em estudo foram realizados no ANSYS® *Mechanical* 2022 R1 (ANSYS®), um programa indicado para a realização de várias análises multifísicas, baseadas no MEF.

A realização do modelo numérico foi iniciada com a escolha do tipo de elementos finitos disponíveis na biblioteca interna do ANSYS®, tanto para a análise térmica como para a análise termomecânica, sendo em ambas as situações, escolhidos elementos sólidos tridimensionais.

A geometria utilizada ocorre do dimensionamento à temperatura ambiente efetuado no capítulo anterior, de acordo com o EC5-1-1 [4]. Das variáveis consideradas optou-se pela escolha das ligações com uma carga imposta de 10 kN, com cavilhas de 10mm de diâmetro. O desenho com as dimensões das ligações em estudo são as apresentadas na Figura 23.

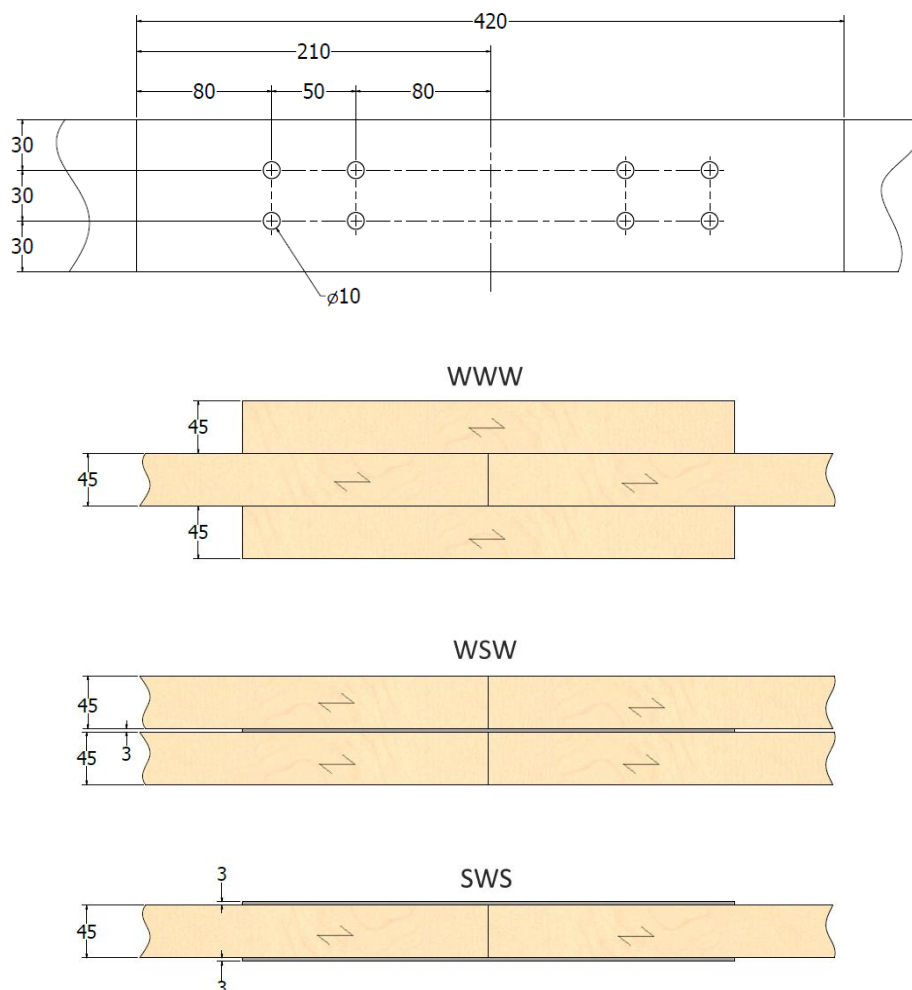


Figura 23 - Dimensões das ligações em estudo e posicionamento das cavilhas

Foram depois produzidos, os modelos geométricos tridimensionais, para cada tipo de ligação, com recurso ao desenvolvimento de um código na linguagem *Parametric Design Language* (APDL) do ANSYS®. Atendendo ao plano de simetria geométrica e de carregamento, os modelos representam metade da ligação, reduzindo assim custos computacionais e tempo de análise. Os códigos desenvolvidos na linguagem APDL encontram-se no Anexo 10.3.

Relativamente à discretização da malha nas ligações, considerou-se o tamanho do elemento finito de 3mm, optando-se pelo controlo de malha em função da geometria de modo a obter uma malha homogénea com um número de elementos razoável no interior das cavilhas. As geometrias com a discretização da malha apresentam-se na Figura 24.

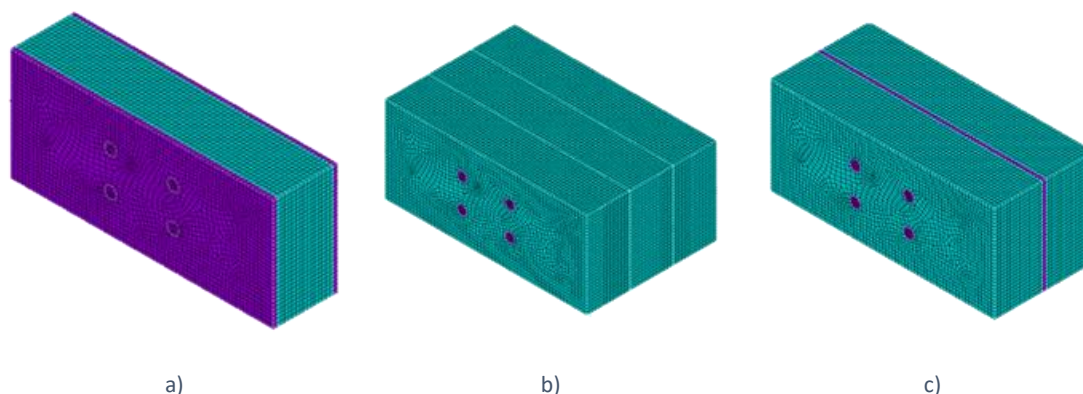


Figura 24 – Modelos de elementos finitos: a) SWS; b) WWW; c) WSW

Para utilização nas diferentes simulações numéricas desenvolveram-se códigos em linguagem APDL com as propriedades mecânicas e térmicas dos materiais, indicadas no capítulo 3. Estes códigos são apresentados no Anexo 10.4. Foram depois importados para o modelo de análise, sendo a madeira o material com o identificador “1” e o aço com o identificador “2”.

Partindo dos modelos descritos foram efetuadas análises térmicas e termomecânicas fazendo variar a classe de madeira entre GL20h, GL24h e GL32h.

A análise termomecânica baseou-se num processo de simulação numérica em duas etapas. Numa primeira fase, a ligação é submetida ao fogo para o cálculo das temperaturas em regime transiente (análise térmica). Posteriormente, é realizada uma análise termomecânica, em que para um determinado instante de tempo de exposição ao fogo, o campo de temperaturas correspondente é adicionado à carga mecânica incremental aplicada à ligação. De referir que estes dois tipos de análise conjunta são desacoplados. O campo de temperaturas afeta a análise mecânica no cálculo de tensões e deformações para cada processo incremental, mas a análise mecânica não afeta o cálculo de temperaturas previamente calculado.

O estudo computacional é complexo, por envolver cargas de origem mecânica e térmica em regime transiente e materiais não lineares. Permite, no entanto, uma maior flexibilidade de cálculo e o controlo dos parâmetros que se pretendem analisar.

É importante notar que, para o funcionamento correto da análise conjunta térmica e mecânica, a malha de elementos finitos da segunda análise (termomecânica) deve ser idêntica à malha definida na primeira etapa (térmica). Esta metodologia garante a correta imposição nodal do modelo, tendo para o efeito sido escolhidos elementos com o mesmo número de nós.

Na Figura 25 é apresentado um fluxograma que resume os passos para a obtenção das diferentes simulações realizadas nesta dissertação.

Nos subcapítulos seguintes são descritos os modelos térmicos e termomecânicos de forma mais pormenorizada.

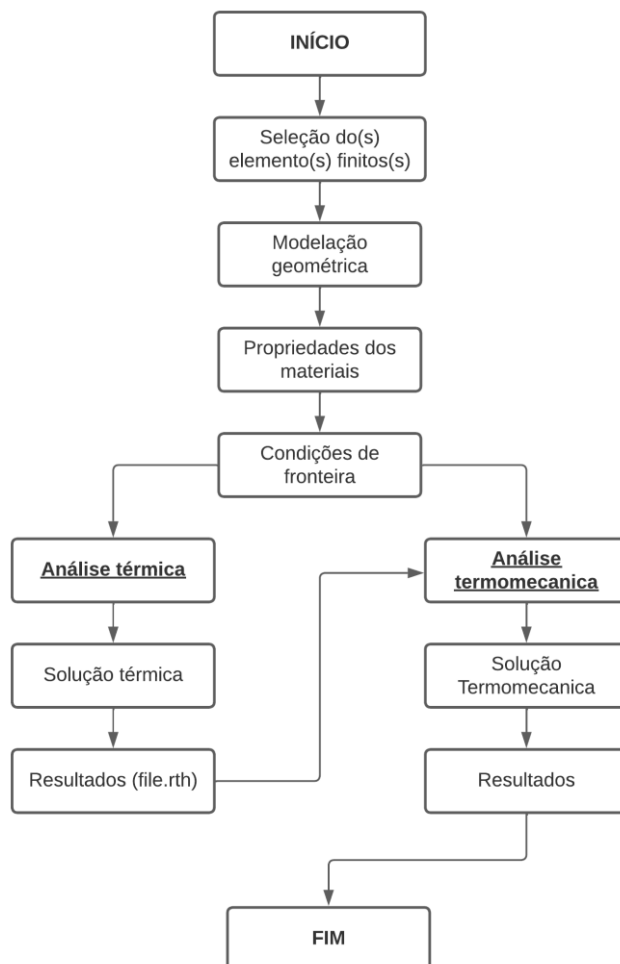


Figura 25 - Fluxograma das etapas de simulação numérica

6.1 Análise térmica

A análise térmica consiste na determinação das temperaturas nodais, em regime transiente, dos modelos aplicando condições de fronteira de convecção e radiação.

Para a representação da malha nos modelos tridimensionais foi utilizado o elemento “SOLID 278”, indicado para a análise térmica transiente. O elemento possui oito nós com um único grau de liberdade (temperatura), em cada nó.

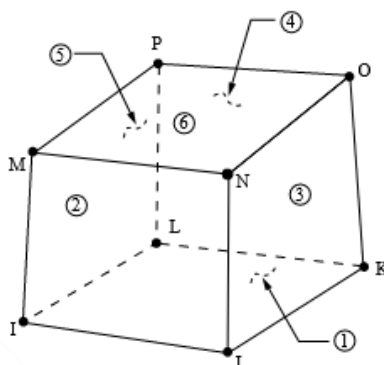


Figura 26 – Representação do elemento SOLID 278

O caso em estudo, representa uma situação de exposição ao fogo das ligações SWS, WSW e WWW durante 1800s (30 min) sendo a temperatura inicial nos modelos igual à temperatura ambiente (20°C). De modo a simular a ação do fogo é imposta a curva nominal de temperatura-tempo ISO 834 [6] exterior ao modelo. A aplicação das condições de fronteira é feita nas superfícies frontal e posterior, tal como representado na Figura 27, sendo que os elementos a roxo representam o aço e a azul a madeira.

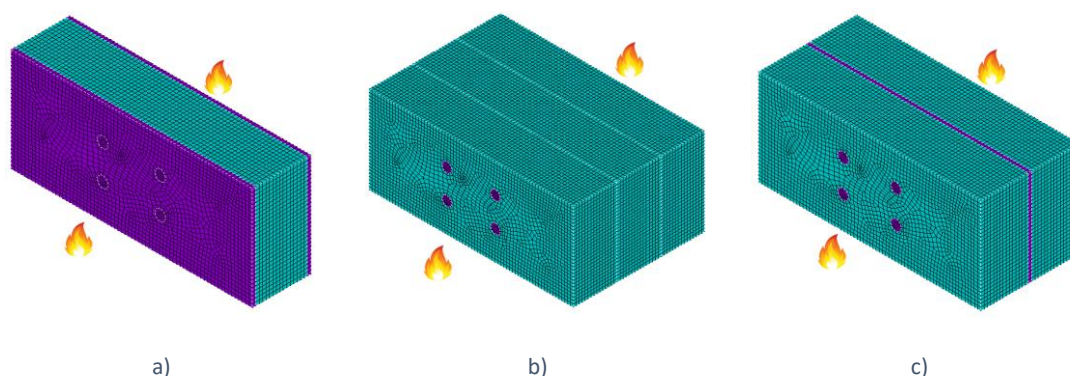


Figura 27 – Modelos de elementos finitos com faces de exposição ao fogo: a) SWS; b) WWW; c) WSW

O valor do coeficiente de convecção aplicado é igual a 25 W/m²K nas superfícies expostas e o valor da emissividade ambiente é igual à unidade, de acordo com o EC1-1-2 [7].

Para o cálculo e o registo da resposta térmica em regime transiente foi imposto um incremento de tempo (*time-step*) de 60s até ao mínimo de 1s, caso não haja convergência da solução. De modo a otimizar a convergência do modelo considerou-se, para o cálculo do fluxo de calor, uma tolerância absoluta de 0,9, sendo as restantes variáveis consideradas padrão do ANSYS®. No final da análise puramente térmica, é alcançada a evolução das temperaturas na ligação.

Para a fase de pós-processamento e análise de resultados, foi selecionado em cada um dos modelos em estudo um plano de corte, coincidente com as cavilhas mais próximas do local de aplicação de carregamento mecânico. Neste plano de corte, foram destacados alguns nós nos elementos em madeira e exterior, como ainda um conjunto de nós ao longo da cavilha superior. A Figura 28 ilustra os aspetos mencionados.

A designação dos pontos divide-se pelas colunas *a*, *b*, *c* e *d* e pelas linhas K1, K2 e K3. Sendo que a linha K1 identifica a zona entre a cavilha e o exterior superior da ligação, a linha K2 na zona ao longo da interface cavilha-madeira e a linha K3 entre duas cavilhas.

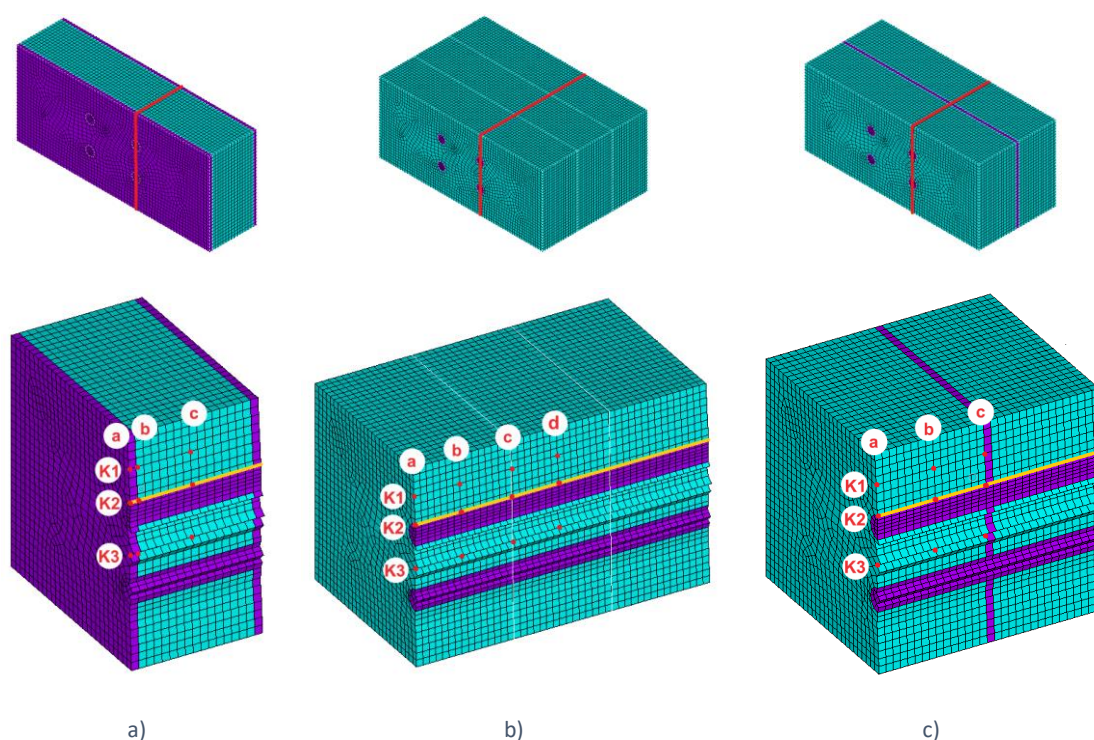


Figura 28 – Plano de corte e pontos nodais para a discussão de resultados: a) SWS; b) WWW; c) WSW

6.2 Análise termomecânica

A análise termomecânica permite identificar a resistência máxima da ligação, ou seja, a carga máxima que a ligação consegue suportar, sem exceder as condições de cedência do material.

A malha de elementos finitos do modelo termomecânico utiliza o elemento SOLID185, dedicado à modelação tridimensional e equivalente ao elemento SOLID278 da análise térmica. É definido por oito nós, com três graus de liberdade em cada nó: translações nas direções nodais x, y e z.

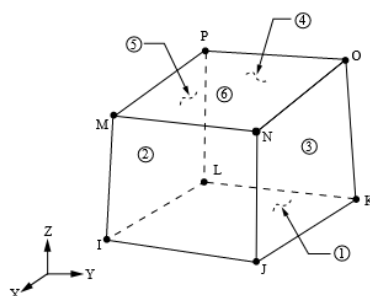


Figura 29 – Representação do elemento SOLID185

Recorrendo às capacidades multifísicas presentes no programa ANSYS® realizou-se a análise mecânica em que, para um determinado tempo de exposição ao fogo, são aplicadas as cargas térmicas calculadas previamente no modelo de ligação, através da leitura do ficheiro de resultados com as temperaturas nodais (file.rth). Em simultâneo, é imposta a carga incremental de tração linear na(s) face(s) correspondente(s) da ligação. Uma vez que estudo é realizado em metade da ligação, foram aplicadas condições de fronteira de simetria (S) no lado oposto à carga, nas superfícies dos elementos de madeira exteriores para a ligação do tipo WWW e nas de aço para as ligações do tipo SWS e WSW. Estas condições de fronteira encontram-se representadas na Figura 25.

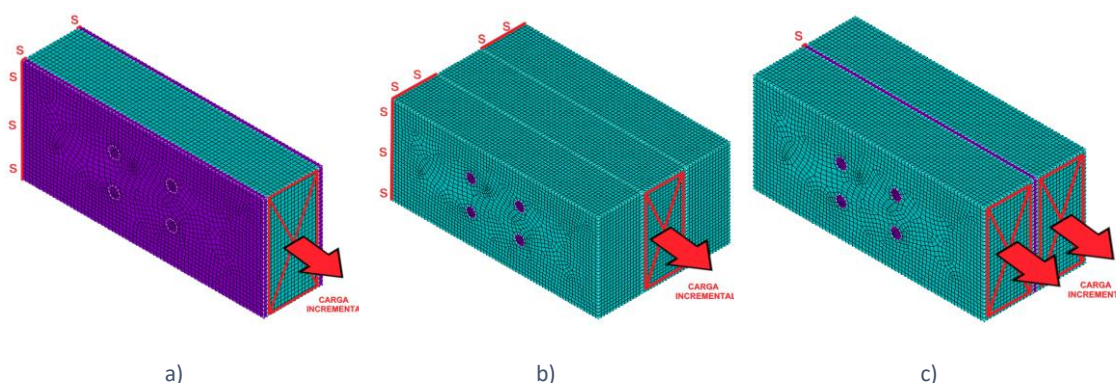


Figura 30 – Modelo termomecânico e condições de fronteira nas ligações: a) SWS; b) WWW; c) WSW

A modelação do contacto entre elementos foi feita introduzindo elementos de contacto, nomeadamente o CONTA174 e o TARGE170, com recurso ao método implícito da ferramenta *Contact Wizard* do ANSYS®. Com esta ferramenta é possível gerar de forma automática pares de contactos, definidos por uma “superfície alvo”, que pode deslizar por uma “superfície de contacto”. Considerando o deslize do elemento de madeira com carga aplicada, sobre os restantes elementos, as superfícies destes elementos de madeira foram identificadas como sendo de “contacto” e por consequente as superfícies dos restantes elementos como “alvo”.

A modelação de contacto requer a especificação do coeficiente de atrito entre madeira e o aço. O valor adotado foi igual a 0,3, considerando o valor limite estimado para uma superfície da cavilha lisa [43].

De modo a obter uma convergência da solução do problema numérico, o ANSYS® utiliza o método Newton-Raphson, que determina a nova posição de equilíbrio de forma incremental e iterativa. O ANSYS® realiza a análise em *steps* e aplica a carga em incrementos definidos por *time-steps*. Este conceito de incremento por *step* e de proporcionalidade com a carga aplicada é utilizado de modo a obter o valor máximo que a ligação consegue suportar, sem exceder as condições de cedência do material.

A carga incremental é definida no ANSYS®, através de uma tabela com o número de *steps* de 0 até 100 e a carga de 0 MPa até ao valor de carga pontual resistente ($F_{d,R}$) calculada pela equação (6.1), dividido pela área de aplicação de modo a obter uma melhor distribuição da carga.

$$F_{d,R} = F_{v,Rd} 2N_t n_p \quad (6.1)$$

O valor de $F_{d,R}$ é a multiplicação da carga resistente de projeto por ligador e por plano de corte ($F_{v,Rd}$) pelo número total de ligadores (N_t) e de planos de corte da ligação (n_p). Os valores de $F_{d,R}$ calculados apresentam-se na Tabela 7.

Aplicada a simetria e a carga incremental é definido o time-step igual a 5, podendo diminuir até ao mínimo de 1 caso não haja convergência da solução.

Tabela 7 - Carga resistente das ligações e espécies de madeira em estudo em [kN]

	GL20h	GL24h	GL32h
SWS	54,70	58,21	62,23
WSW	66,88	73,99	82,51
WWW	54,79	60,81	68,02

DISCUSSÃO DE RESULTADOS

- 7.1 Evolução da temperatura em pontos das ligações
- 7.2 Temperatura ao longo do comprimento da cavilha após 1800s
- 7.3 Campo de temperaturas no plano em estudo das ligações
- 7.4 Resistência mecânica das ligações ao fogo

7 DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Tendo por base a literatura revista, os estudos numéricos tridimensionais da evolução da temperatura no interior e nas cavilhas das ligações WWW, SWS e WSW são escassos e não retratam o problema de análise termomecânica. Do mesmo modo, o EC5-1-2 [5] não demonstra a evolução transiente da temperatura em ligações deste tipo, que sendo constituídas por diferentes materiais se traduz num problema de análise complexa.

Assim, da análise térmica, avaliou-se a evolução da temperatura no centro de um elemento de madeira em pontos nodais diferentes, de modo a compreender o efeito do aquecimento das cavilhas na madeira e alteração da massa volúmica pela escolha do tipo de madeira. De igual forma, é avaliada a evolução da temperatura ao longo do comprimento das cavilhas na zona em contato com a madeira. Em todos os resultados, a posição da linha de carbonização da madeira é determinada pela linha isotérmica de 300°C. Por fim, para o último instante de análise, a 1800s, é apresentado o campo de temperaturas no plano de secção definido anteriormente.

Relativamente à análise termomecânica é avaliada a capacidade de carga resistente das ligações, pelo efeito térmico e mecânico, considerando as diferentes massas volúmicas da madeira, assim como avaliado o respetivo campo de tensões equivalentes e de temperaturas.

7.1 Evolução da temperatura em pontos das ligações

A distribuição de temperatura nas ligações foi registada em diferentes pontos no plano em estudo das ligações, em que as suas posições se encontram demonstradas na Figura 24.

Da análise dos resultados da evolução da temperatura nos diferentes pontos, optou-se pela análise dos pontos localizados no interior da madeira mais próxima do fogo. A designação dos pontos divide-se pelas colunas a, b e c e pelas linhas K1, K2 e K3, conforme mencionado no capítulo anterior.

Os resultados das temperaturas nodais, obtidas nesses pontos encontram-se nas figuras 31, 32 e 33, e correspondem à ligação SWS, WSW e WWW, respetivamente. Os resultados nos restantes pontos nodais encontram-se nos Anexos 10.4, 10.6 e 10.7.

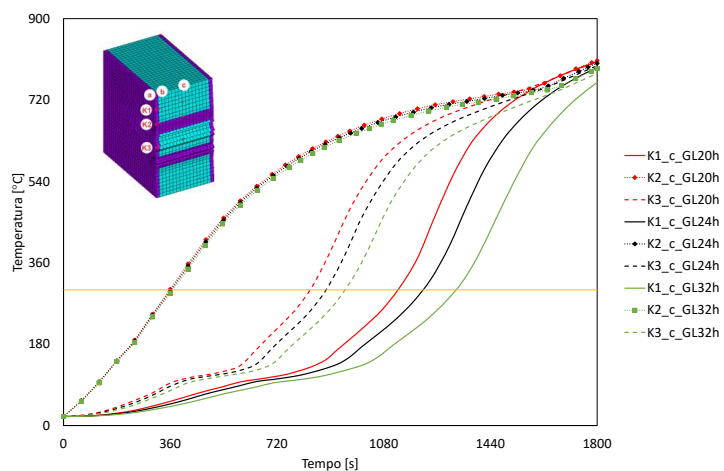


Figura 31 - Temperatura ao longo do tempo de exposição ao fogo dos pontos da coluna c da ligação SWS

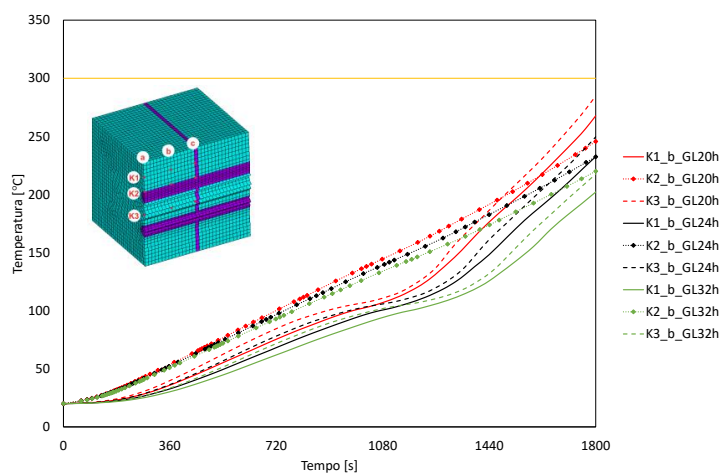


Figura 32 - Temperatura ao longo do tempo de exposição ao fogo dos pontos da coluna b da ligação WSW

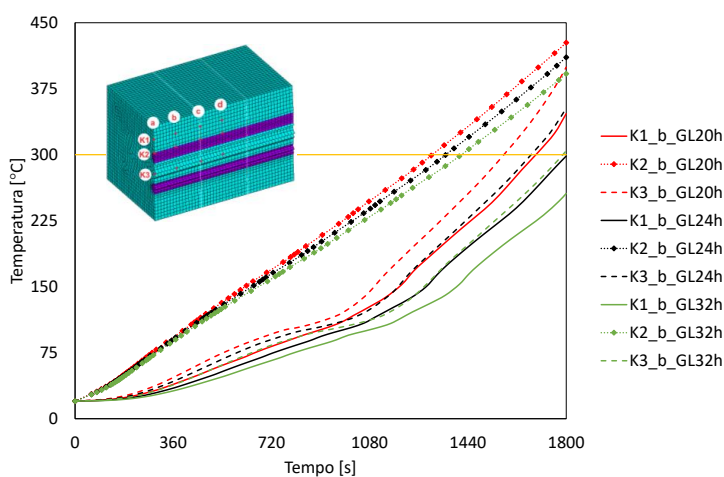


Figura 33 - Temperatura ao longo do tempo de exposição ao fogo dos pontos da coluna b da ligação WWW

Os valores nodais das temperaturas, em regime transiente, obtidas para a coluna a, apresentados nos Anexos 10.5, 10.6 e 10.7, permitem verificar a proximidade de valores à curva ISO 834 [6]. Os pontos nodais em análise foram escolhidos na superfície exterior do modelo com exposição ao fogo. Os valores numéricos obtidos são concordantes com a curva ISO 834 [6], validando assim a metodologia utilizada no cálculo do campo de temperaturas para os modelos de ligações em estudo.

Na ligação SWS todos os pontos nodais estudados no final dos 1800s de exposição ao fogo, ultrapassam os 300°C independentemente da massa volúmica da madeira. Dos três pontos em análise, o ponto K1_c permaneceu mais tempo a uma temperatura abaixo dos 300°C até ao intervalo entre 1100-1300s; o ponto K3_c no intervalo entre 830-950s e o ponto K2_c (ponto mais próximo da cavilha) aproximadamente 360s.

Na ligação WSW nenhum dos pontos considerados para o registo do campo de temperaturas, e para as três massas volúmicas da madeira, atinge os 300°C. Dos pontos em análise, o ponto K2_b mantém uma temperatura mais alta que os restantes até ao intervalo de tempo 1530-1800s, intervalo em que o ponto K1_b ultrapassa ou iguala o anterior. Do mesmo modo, o ponto K3_b entre 1600-1800s tem o mesmo comportamento exceto para a madeira GL32h que apesar de não chegar a igualar o ponto K2_b mantém uma tendência de aumento de temperatura, em que com mais tempo de exposição ao fogo poderá ultrapassar a temperatura do ponto K2_b. De notar que os pontos K1 e K3 exibem uma curva de temperatura semelhante devido à mesma distância a que se encontram da cavilha, sendo que o ponto K3_b se encontra a temperatura maior por estar entre duas cavilhas.

Na ligação WWW os pontos nodais K2_b e K3_b ultrapassam os 300°C no final dos 1800s, independentemente da massa volúmica da madeira. Sendo que o K2_b se mantém com a temperatura mais elevada e atinge os 300°C entre 1300-1400s, enquanto o K3_b atinge a mesma temperatura entre 1600-1800s. Relativamente ao K1_b, ao fim de 1800s só a ligação com a madeira GL32h é que ultrapassa os 300°C.

Comparando os resultados obtidos dos pontos nodais das diferentes ligações, o interior da madeira na ligação SWS demonstra ser aquela que ultrapassa primeiro os 300°C, momento em que a madeira entra em carbonização, após 6min. Seguindo-se a ligação WWW que só ultrapassa os 300°C após 20min de exposição ao fogo, enquanto a ligação WSW não chega a carbonizar em 1800s. Por observação dos resultados é possível também aferir que os pontos nodais das ligações com a madeira GL20h encontram-se a temperaturas mais altas, seguida da GL24h e finalmente, com as temperaturas mais baixas, a madeira de maior massa volúmica, a GL32h.

7.2 Temperatura ao longo do comprimento da cavilha após 1800s

A temperatura ao longo do comprimento da cavilha, na secção transversal estudada, foi obtida para diferentes momentos de exposição ao fogo, de modo a identificar a variação entre o lado externo exposto ao fogo e o lado interno da ligação. Nas figuras 28, 29 e 30, estão apresentados os resultados numéricos dos campos de temperaturas para 1800s de exposição ao fogo para a ligação SWS, WSW e WWW.

Os resultados mostram que, a 1800s de exposição ao fogo, para as classes de madeira em estudo, a temperatura ao longo da cavilha é bastante elevada, entre 790-810°C, para a ligação SWS. No que diz respeito às ligações WSW e WWW as temperaturas são mais baixas entre 220-245°C e 300-340°C, respetivamente.

A diferença de temperaturas entre a ligação SWS e as restantes ligações deve-se ao material que se encontra exposto diretamente ao fogo. Ou seja, devido ao facto da madeira ser um bom isolante e o aço um bom condutor de calor.

Comparando as ligações WSW e WWW, apesar de ambas possuírem madeira no exterior, a ligação com a placa em aço central WSW permanece aproximadamente 100°C abaixo da temperatura verificada na ligação WWW. Esta constatação pode ser explicada pelo efeito da proximidade do aço, que tende a absorver o calor das cavilhas limitando o aumento da temperatura nas cavilhas, este efeito é mais facilmente observado no subcapítulo seguinte.

O efeito da massa volúmica da madeira também é verificado, onde se conclui que as ligações com a madeira GL32h absorvem menos temperatura em comparação com os outros tipos de madeira. Ou seja, a cavilha de aço em contato com a madeira de maior massa volúmica atinge menor temperatura comparativamente com a madeira de menor massa volúmica.

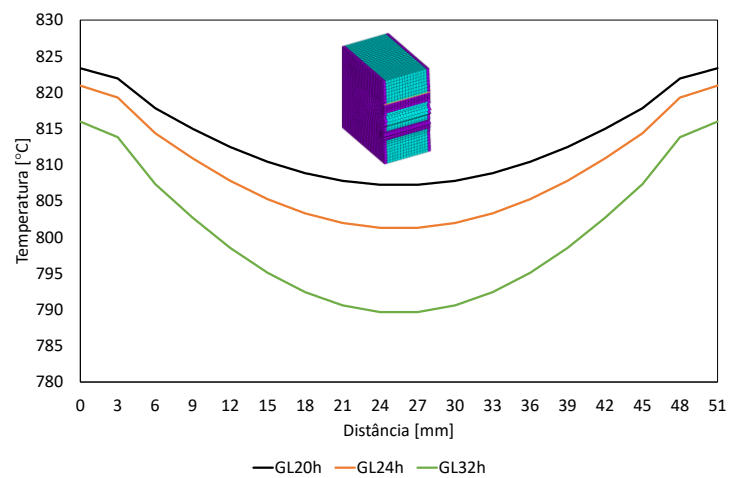


Figura 34 - Temperatura ao longo da cavilha a 1800s da ligação SWS

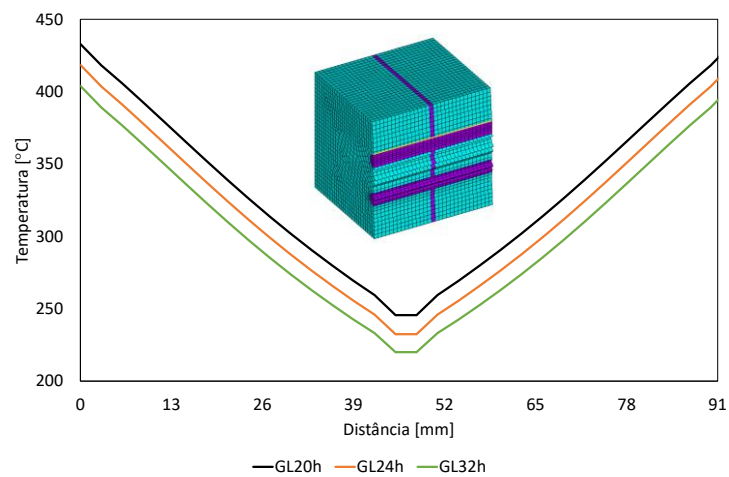


Figura 35 - Temperatura ao longo da cavilha a 1800s da ligação WSW

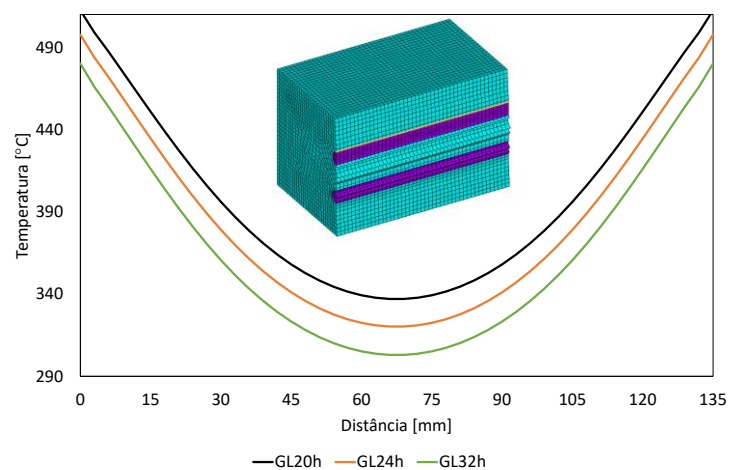


Figura 36 - Temperatura ao longo da cavilha a 1800s da ligação WWW

7.3 Campo de temperaturas no plano em estudo das ligações

As Figuras 37, 38 e 39 mostram os resultados do campo de temperatura no interior da secção transversal em estudo para cada uma das ligações, variando a classe da madeira. Estes resultados possibilitam uma visualização do interior da madeira e da influência das cavilhas em aço para o instante de exposição ao fogo igual a 1800s.

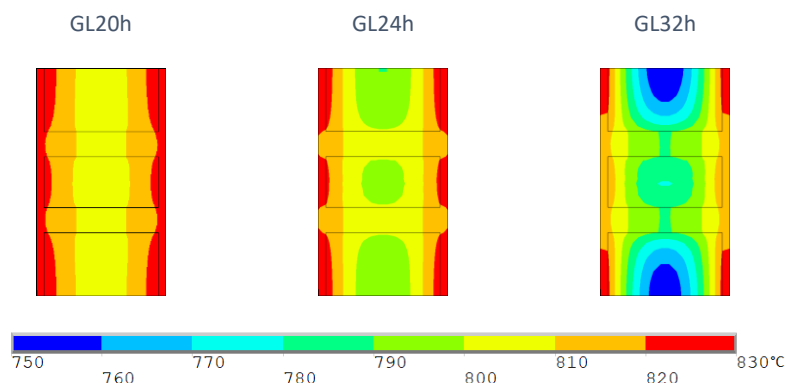


Figura 37 - Campo de temperaturas no plano em estudo a 1800s da ligação SWS

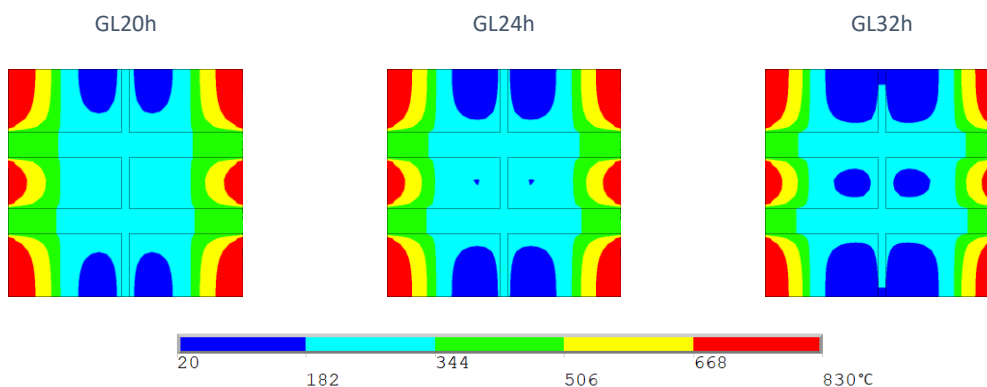


Figura 38 - Campo de temperaturas no plano em estudo a 1800s da ligação WSW

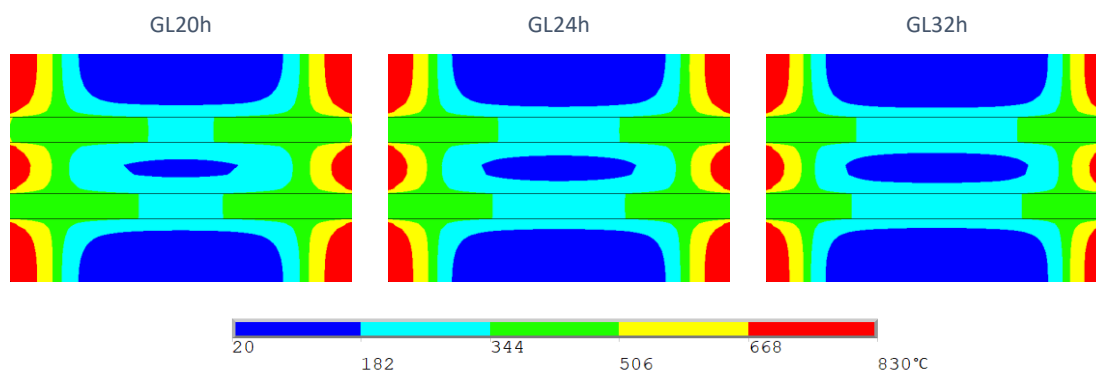


Figura 39 – Campo de temperaturas no plano em estudo a 1800s da ligação WWW

Os resultados mostram uma variação de 750°C a 830°C para a ligação SWS, o que indica que ao fim de 1800s o plano da madeira já se encontra todo carbonizado.

Na ligação WSW constata-se visualmente o efeito da proximidade do aço referido anteriormente, que tende a absorver o calor das cavilhas limitando o aumento da temperatura no interior das cavilhas e consequentemente da ligação.

Em relação à ligação WWW verifica-se que o interior da ligação permanece a baixas temperaturas, sendo notória a transmissão de calor pelas cavilhas de aço, em que o contato com o tipo de madeira tem alguma influência. Na ligação em madeira GL20h a cavilha em aço encontra-se a uma temperatura maior comparativamente à ligação com maior massa volúmica da madeira.

Pela observação dos resultados obtidos é possível afirmar que com o aumento da massa volúmica da madeira, e para qualquer ligação, a temperatura no interior das ligações é menor, para o mesmo instante de tempo de exposição ao fogo.

7.4 Resistência mecânica das ligações ao fogo

Na análise do modelo termomecânico, é avaliada a resistência ao fogo em conjunto com a aplicação de uma carga de tração linear incremental. Os resultados desta análise encontram-se representados nos gráficos das Figuras 40, 41 e 42.

Os resultados à temperatura ambiente, instante de tempo inicial, mostram a carga resistente sem o efeito da curva temperatura-tempo ISO 834 [6]. Os valores obtidos para esse instante de tempo inicial permitem comparar a solução numérica com os valores já calculados para as ligações utilizando as equações simplificadas do EC5-1-2 [5]. Os valores são concordantes, validando a metodologia aplicada.

As ligações quando expostas ao fogo, à medida que o tempo de exposição ao fogo aumenta, evidenciam um decréscimo da carga resistente.

De seguida é feita a descrição dos resultados obtidos referindo, para o mesmo tipo de ligação, o intervalo de valores de carga resistente e de valor percentual, entre a madeira de menor e de maior massa volúmica, para um determinado instante.

Relativamente à ligação SWS os resultados da carga resistente foram obtidos para os instantes de tempos 0s, 360s e de 400s. Até ao instante de 360s a ligação perde entre cerca de 19-33,5 kN da carga resistente inicial, nos 40s seguintes diminui entre 5-8 kN. Em termos percentuais, a ligação perdeu entre 31-61% da carga resistente inicial no primeiro intervalo de tempo e 45-70% no seguinte instante.

A ligação WSW demonstrou os piores resultados de resistência ao fogo, sendo que os valores de carga resistente foram calculados para 0s, 120s e 180s. Nos primeiros 120s de exposição a carga resistente da ligação reduz entre 26-38,5 kN e a partir deste instante até 180s diminui para 21-37 kN, aproximando-se do limite de resistência. Ou seja, a ligação perde entre 32-58% do valor inicial de carga resistente, em 120s de exposição ao fogo, e até 180s os resultados indicam que atinge o limite de resistência, entre 77-89%.

Por último a ligação WWW, mostra um comportamento bastante mais favorável em condições de exposição ao fogo. Como a ligação demonstrou uma perda de carga resistente abaixo dos 50% a 1800s, procedeu-se à extensão da análise térmica para os 3600s e consequente a análise termomecânica para a obtenção dos resultados apresentados na Figura 42. Os resultados analisados foram calculados para os tempos de exposição de 0s, 2700s e 3600s. Até o instante de 2700s a ligação obteve perdas de 7-31 kN, seguindo-se uma diminuição de 18,5-35 kN até ao final dos 3600s. Em termos percentuais os resultados indicam uma perda de 11-57% da carga resistente ao fim de 2700s e de 63-91%, ao fim de uma hora de exposição ao fogo.

Em relação à massa volúmica, constata-se que as ligações com a madeira da espécie GL32h são mais resistentes comparativamente com as outras espécies de menor massa volúmica. Comparando o valor de carga resistente à temperatura ambiente e o primeiro registo de resultados, a ligação GL32h regista uma perda de carga resistente menor comparativamente com as outras espécies em estudo, ou seja, um menor declive. Por outro lado, com a aproximação do limite de carga resistente, observa-se uma tendência de aproximação para o mesmo tempo de exposição ao fogo, independentemente da classe de madeira.

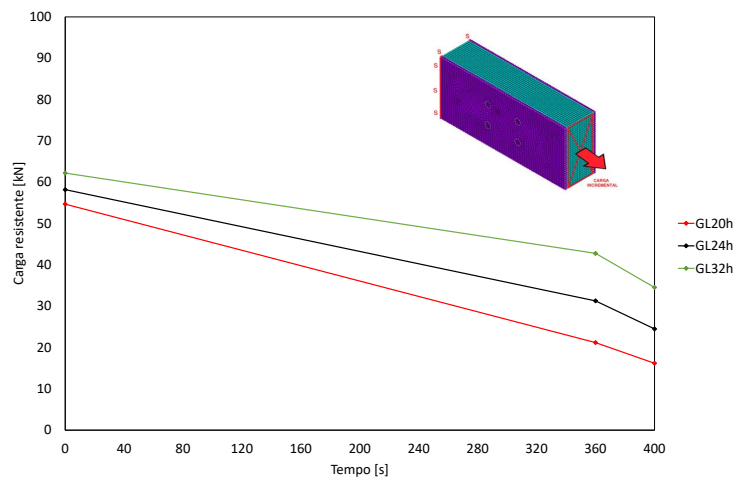


Figura 40 – Carga resistente da ligação SWS em função do tempo de exposição ao fogo

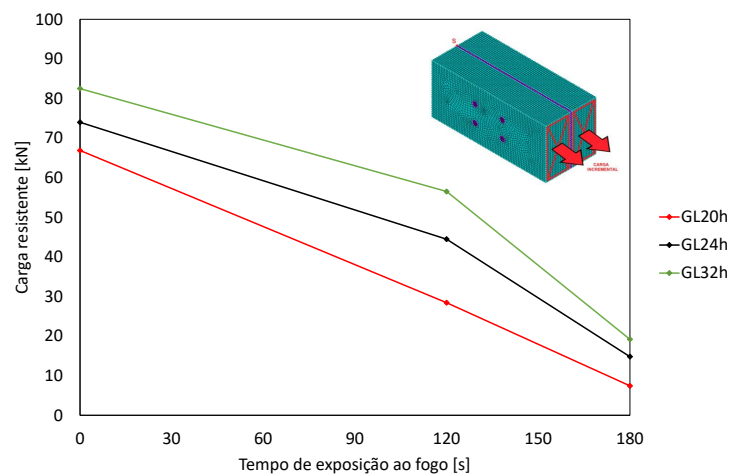


Figura 41 - Carga resistente da ligação WSW em função do tempo de exposição ao fogo

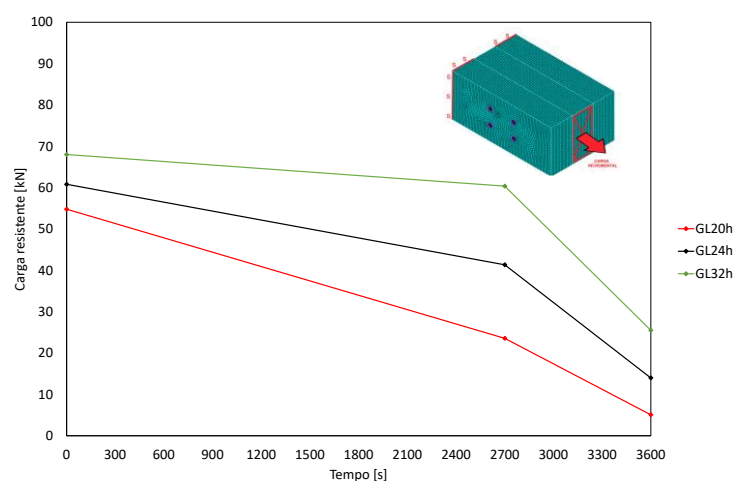


Figura 42 - Carga resistente da ligação WWW em função do tempo de exposição ao fogo

As figuras seguintes representam o campo de tensão equivalentes de Von Mises observado nas ligações WWW, WSW e SWS para o maior tempo de exposição ao fogo registado com a madeira da classe GL32h, que demonstrou melhor desempenho. O campo de tensão é acompanhado pelo campo de temperaturas para o mesmo instante de tempo. Os resultados são apresentados separando os elementos de aço e de madeira, considerando o plano da secção mencionada anteriormente e uma vista isométrica do modelo. Para além do campo de tensões é apresentado o campo de temperaturas para o mesmo instante de tempo.

Nas Figuras 43 e 44 são apresentados os resultados para o instante de 400s da ligação SWS onde as tensões máximas se concentram no exterior da placa de aço, mais precisamente na zona entre cavilhas atingindo o valor de tensão máximo igual a 380 MPa. Nas cavilhas a tensão máxima foi registada no centro alcançando um valor máximo entre 228-304 MPa. Na madeira, na zona circundante das cavilhas, a tensão registada é nula pelo facto de ter ultrapassado os 300°C e se encontrar carbonizada de forma indireta pelas cavilhas. Por observação do campo de temperaturas, a tensão máxima registada na zona intacta da madeira foi igual a 17,5 MPa.

Nas Figuras 45, 46 e 47 são apresentados os resultados para o instante de 3600s da ligação WWW onde as tensões máximas se concentram no centro das cavilhas atingindo 120 MPa do valor de tensão máxima. Tal como na ligação SWS, a madeira na zona circundante das cavilhas regista uma tensão nula e na zona onde a madeira não se encontra carbonizada a tensão máxima atinge 20 MPa. Na Figura 47 observa-se a madeira que, a 3600s, não carbonizou.

Os resultados, relativos à ligação WSW a 180s de exposição ao fogo, são apresentados nas Figuras 48 e 49. A tensão máxima registada foi 71 MPa nas cavilhas, mais precisamente na zona próxima da placa de aço. No caso da madeira, a tensão máxima registada foi 15 MPa na zona circundante das cavilhas mais próxima do fogo, sendo que nesta zona as cavilhas estão a uma temperatura entre 50-70°C.

Conclui-se que a ligação com o maior valor de tensão na madeira foi a WWW seguida da SWS e por fim a WSW.

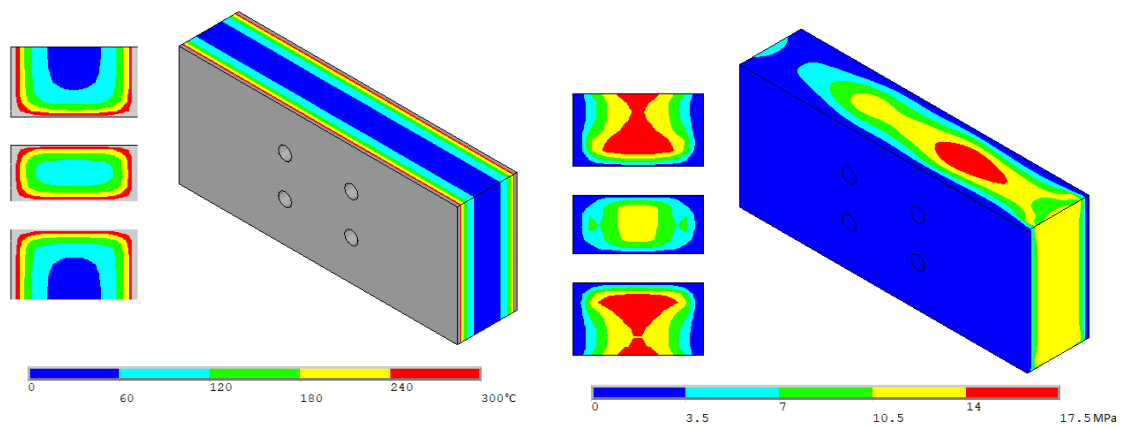


Figura 43 – Campo de temperaturas e tensão equivalente de Von Mises na madeira GL32h da ligação SWS a 400s

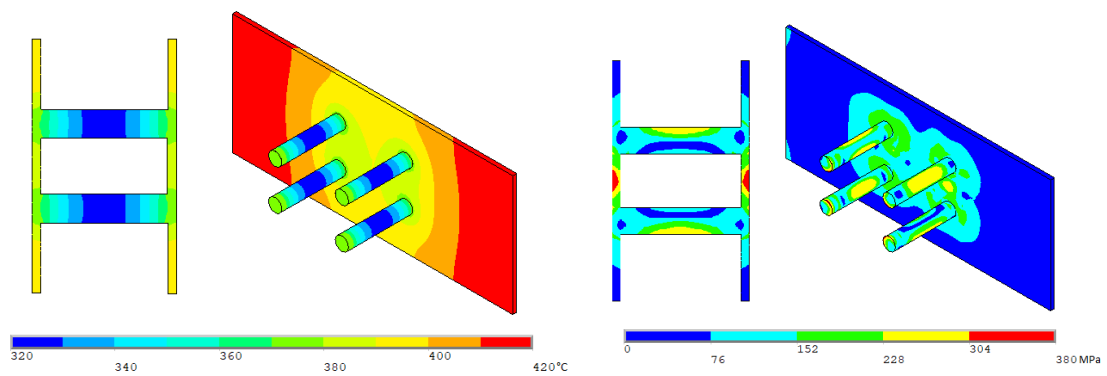


Figura 44 - Campo de temperaturas e tensão equivalente de Von Mises no aço da ligação SWS a 400s

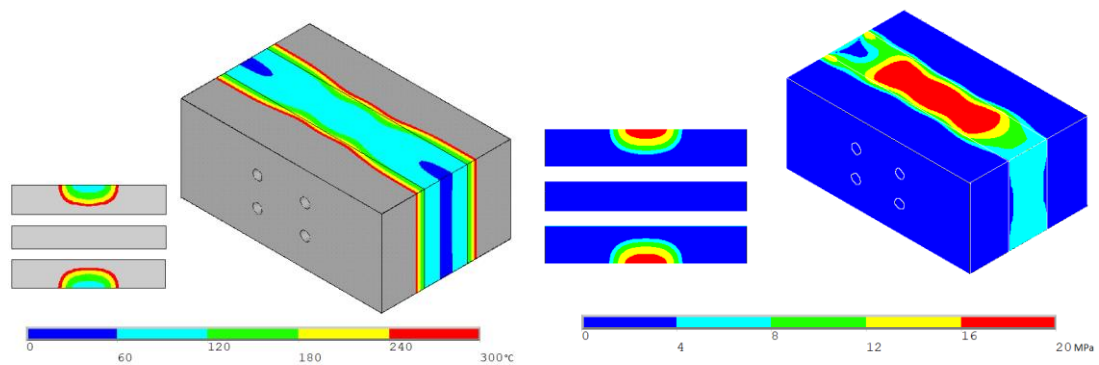


Figura 45 – Campo de temperaturas e tensão equivalente de Von Mises na madeira GL32h da ligação WWW a 3600s

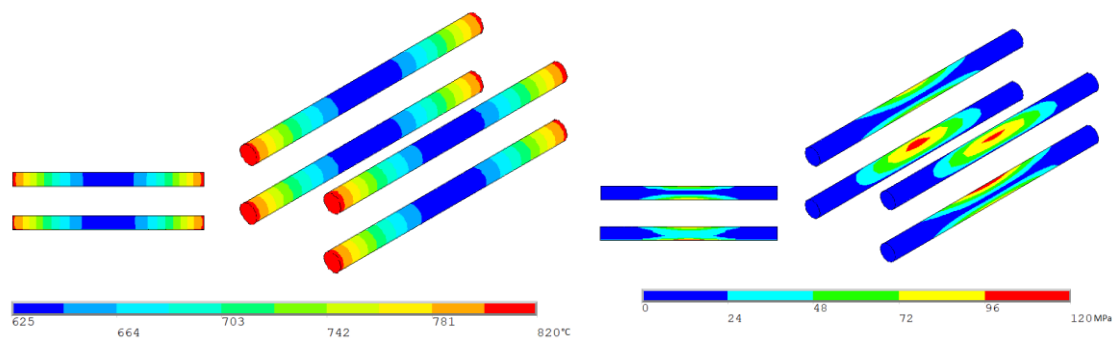


Figura 46 - Campo de temperaturas e tensão equivalente de Von Mises nas cavilhas da ligação WWW a 3600s

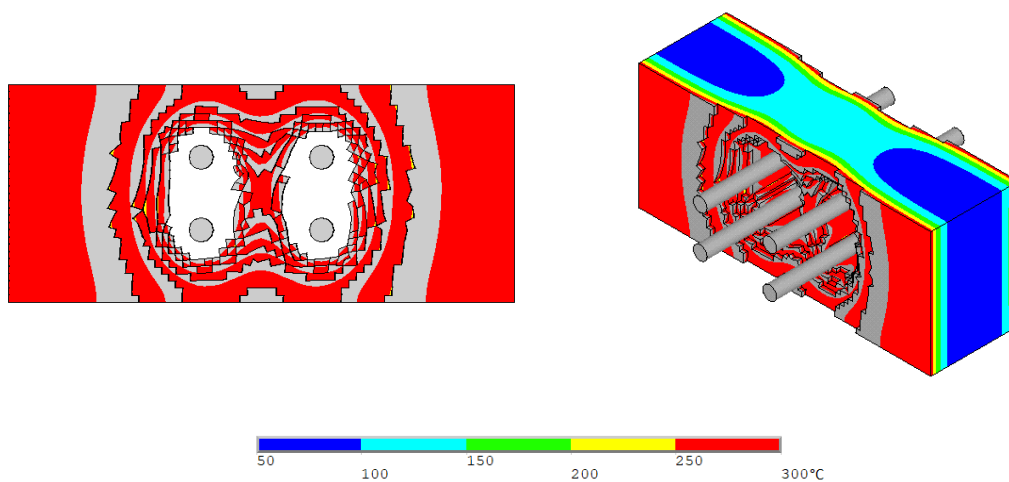


Figura 47 – Madeira da classe GL32h não carbonizada na ligação WWW a 3600s

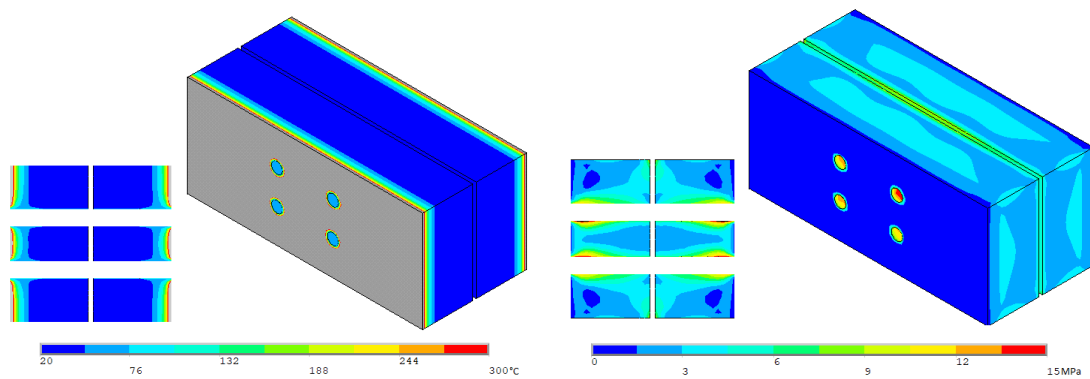


Figura 48 – Campo de temperaturas e tensão equivalente de Von Mises na madeira GL32h da ligação WWW a 180s

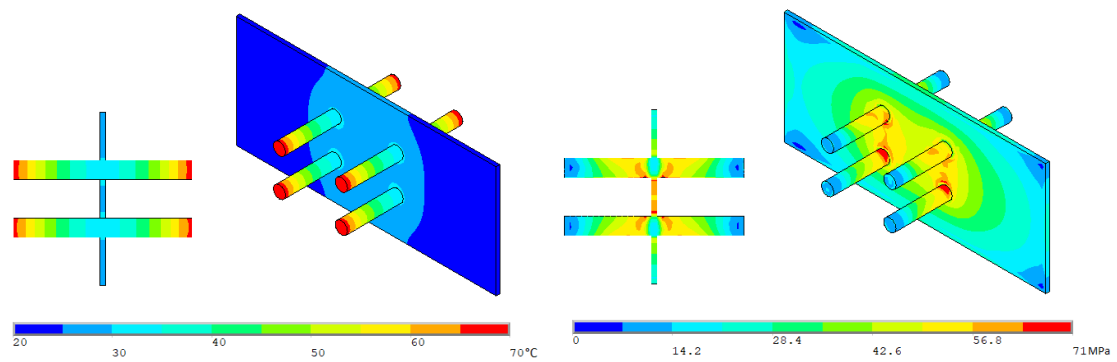


Figura 49 - Campo de temperaturas e tensão equivalente de Von Mises nas cavilhas da ligação WSW a 180s

CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

- 8.1 Conclusões
- 8.2 Propostas de trabalhos futuros

8 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

8.1 Conclusões

O estudo de ligações em madeira aplicadas na construção e na engenharia em geral, é ainda um tema pouco abordado pela comunidade científica, especialmente sob ação do fogo. Apesar de nos últimos anos terem sido efetuados esforços para contrariar esse facto, o aço continua a ser um material dominante no estudo de ligações.

A madeira é um material sustentável, podendo contribuir para o combate do problema atual das alterações climáticas, em detrimento do uso de outros materiais. Para além destas características a madeira demonstra boa resistência ao fogo e grande abrangência em aplicações de construção. Por estes e outros motivos, o interesse desta matéria no âmbito da comunidade científica tem aumentado, tornando-se muito útil na avaliação da segurança estrutural destes elementos e atualização dos atuais regulamentos, em particular o Eurocódigo 5, que se regem por equações simplificadas que pode levar ao sobredimensionamento de elementos.

Pelos resultados observados da análise termomecânica, o tempo de exposição ao fogo altera a capacidade de carga das ligações pelo facto das propriedades da madeira e do aço também se alterarem com o aumento da temperatura. Ou seja, a carga influencia o comportamento resistente da ligação em conjunto com a degradação das propriedades mecânicas dos materiais, por influência das altas temperaturas.

Observando o efeito da massa volúmica da madeira, nas análises numéricas realizadas, conclui-se que a madeira com maior massa volúmica (GL32h) demonstrou melhores resultados ao nível da resistência mecânica das ligações em comparação com as restantes, devido ao menor calor transferido para a ligação.

A ligação WSW demonstrou menores temperaturas no interior devido ao efeito de absorção do calor das cavilhas pela placa de aço no interior, como também concluído por [44, 45]. Em contrapartida, pelo facto de a carga ser aplicada nos elementos de madeira expostos ao fogo, demonstrou piores resultados na análise termomecânica devido à carbonização da madeira.

8.2 Propostas de trabalhos futuros

Como proposta para trabalhos futuros, seria interessante continuar a realizar novos modelos numéricos tridimensionais para estudos termomecânicos fazendo variar outros parâmetros de análise, como por exemplo, o diâmetro das cavilhas, a espessura das placas de aço, o posicionamento e o alinhamento das cavilhas.

Também seria importante considerar a realização de ensaios experimentais de resistência ao fogo em modelos de ligações com outras dimensões e até inseridas num projeto mais global de uma estrutura.

Ainda atendendo à necessidade de encontrar alternativas e na aplicação destes elementos na construção para que reúnam os requisitos de segurança, nomeadamente em situações de ação acidental, seria importante a continuação do estudo em modelos de ligações protegidas.

BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

9 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

- [1] S. K. Nath, "Use Wood—Combat Climate Change," em *Wood is Good*, K. K. Pandey *et al.*, Eds. Singapore: Springer, 2017, doi: 10.1007/978-981-10-3115-1_44.
- [2] C. Lucas dos Santos, "Comportamento mecânico de ligações do tipo cavilha em estruturas de madeira," Tese de Doutorado, UBI, Covilhã, Portugal, 2013.
- [3] H. Cruz, D. Jones, e L. Nunes, "Wood," em *Materials for Construction and Civil Engineering*, Gonçalves M. e M. F., Eds. Berlim, Alemanha: Springer, 2015, doi: 10.1007/978-3-319-08236-3_12.
- [4] *EN 1995-1-1: Eurocode 5: "Design of Timber Structures—Part 1-1: General—Common Rules and Rules for Buildings"*, CEN, Bruxelas, Bélgica, 2004.
- [5] *EN 1995-1-2: Eurocode 5: "Design of Timber Structures, Part 1–2: General Rules—Structural Fire Design"*, CEN, Bruxelas, Bélgica, 2004.
- [6] *ISO 834:1999: Fire resistance tests—elements of building construction*, ISO, Genebra, Suíça, 1999.
- [7] *EN 1991-1-2: Eurocode 1: "Actions on structures - Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire"*, CEN, Bruxelas, Bélgica, 2002.
- [8] B.-H. Xu, A. Bouchaïr, M. Taazount, e P. Racher, "Numerical simulation of embedding strength of glued laminated timber for dowel-type fasteners," *Journal of Wood Science*, vol. 59, no. 1, pp. 17-23, 2013, doi: 10.1007/s10086-012-1296-0.
- [9] 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 Technology*, vol. 55, no. 1, pp. 1-49, 2019, doi: 10.1007/s10694-018-0787-y.
- [10] R. Qin, A. Zhou, C. L. Chow, e D. Lau, "Structural performance and charring of loaded wood under fire," *Engineering Structures*, vol. 228, p. 111491, 2021, doi: 10.1016/j.engstruct.2020.111491.
- [11] A. F. e. J. Negrão, *Projecto de Estruturas de Madeira* Publindústria, 2009.
- [12] M. Yurrita e J. M. Cabrero, "On the need of distinguishing ductile and brittle failure modes in timber connections with dowel-type fasteners," *Engineering Structures*, vol. 242, 2021, doi: 10.1016/j.engstruct.2021.112496.
- [13] L. Peng, G. Hadjisophocleous, J. Mehaffey, e M. Mohammad, "On the fire performance of double-shear timber connections," *Fire Safety Science*, vol. 10, pp. 1207-1218, 2011.
- [14] C. Maraveas, K. Miamis, e C. E. Matthaiou, "Performance of Timber Connections Exposed to Fire: A Review," *Fire Technology*, vol. 51, no. 6, pp. 1401-1432, 2015, doi: 10.1007/s10694-013-0369-y.
- [15] L. Peng, G. Hadjisophocleous, J. Mehaffey, e M. Mohammad, "Fire resistance performance of unprotected wood—wood—wood and wood—steel—wood

- connections: A literature review and new data correlations," *Fire Safety Journal*, vol. 45, no. 6, pp. 392-399, 2010, doi: 10.1016/j.firesaf.2010.08.003.
- [16] 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 Safety Journal*, vol. 107, pp. 217-234, 2019, doi: 10.1016/j.firesaf.2019.102905.
- [17] M. Khelifa, A. Khennane, M. El Ganaoui, e Y. Rogaume, "Analysis of the behavior of multiple dowel timber connections in fire," *Fire Safety Journal*, vol. 68, pp. 119-128, 2014, doi: 10.1016/j.firesaf.2014.05.024.
- [18] P. Palma e A. Frangi, "Modelling the fire resistance of steel-to-timber dowelled connections loaded perpendicularly to the grain," *Fire Safety Journal*, vol. 107, pp. 54-74, 2019, doi: 10.1016/j.firesaf.2017.12.001.
- [19] A. Szász, V. Hlavička, É. Lublőy, e A. Biró, "Numerical modelling of the fire resistance of double sheared steel-to-timber connections," *Journal of Building Engineering*, vol. 37, p. 102150, 2021, doi: 10.1016/j.job.2021.102150.
- [20] C. C. J. L.D. Brito, "Manual de Projeto e Construção de Estruturas Com Peças Rolijas de Madeira de Reflorestamento," 2010.
- [21] R. B. Miller, "Characteristics and Availability of Commercially Important Woods, Chapter 1," em *Wood Handbook—Wood as an Engineered Material*, F. P. Laboratory, Ed. Madison WI, USA: University Press of the Pacific, 1999.
- [22] *NP 180: Anomalias e defeitos da madeira*, IPQ, Lisboa, 1962.
- [23] J. Porteous, *Structural timber design to Eurocode 5*. Oxford, Inglaterra: Blackwell Pub., 2007.
- [24] D. W. Green, J. E. Winandy, e D. E. Kretschmann, "Mechanical properties of wood, Chapter 4," em *Wood Handbook—Wood as an Engineered Material*, F. P. Laboratory, Ed. Madison WI, USA: University Press of the Pacific, 1999.
- [25] C. B. Ong, "Glue-laminated timber (Glulam)," *Wood Composites*, pp. 123-140, 2015.
- [26] M. Augustin, "Structural Timber," em *Handbook 1-Timber Structures*, L. d. V. P. Project, Ed. República Checa: TEMTIS, 2008, pp. 28-39.
- [27] S. Fusion. "Glued Laminated Timber." <https://www.structurefusion.com/en/products/glued-laminated-timber/> (Acedido em 2021/12/19).
- [28] *BS EN 1194:1999 Timber structures, Glued laminated timber, Strength classes and determination of characteristic values*, BSI, Reino Unido, 1999.
- [29] *EN 1480: Timber structures - Glued laminated timber and glued solid timber - Requirements*, CEN, Bruxelas, Bélgica, 2013.
- [30] H. group. *Glued Laminated Timber (catalogue)*, Austria, 2022. <https://www.hasslacher.com/data/dateimanager/broschuere/HNT-Brettschichtholz-EN.pdf> (Acedido em 2022/02/20).
- [31] A. H. Buchanan e A. Kwabena Abu, "Timber Structures," em *Structural Design for Fire Safety*, Nova Jersey, EUA: Wiley, 2016, pp. 257-300, doi: 10.1002/9781118700402.ch9.
- [32] S. Group. "Fire Safety." <https://www.setragroup.com/en/glulam/om-limtra/fire-safety/> (Acedido em 2021/12/20).

- [33] F. S. F. P. Laboratory, *Wood handbook : wood as an engineering material*, Centenária ed. Madison, EUA: U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, 2010.
- [34] *EN 1993-1-1: Eurocode 3: "Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings"*, CEN, Bruxelas, Bélgica, 2010.
- [35] *BS EN 10025-2. Hot Rolled Products of Structural Steels—Part 2: Technical Delivery Conditions for non-Alloy Structural Steels*, CEN, Bruxelas, Bélgica, 2004.
- [36] *EN 1993-1-2: Eurocode 3: "Design of Steel Structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design."*, CEN, Bruxelas, Bélgica, 2010.
- [37] R. Colaço, "Steel for Civil Construction," em *Materials for Construction and Civil Engineering*, Gonçalves M. e M. F., Eds. Berlim, Alemanha: Springer, 2015, doi: 10.1007/978-3-319-08236-3_12.
- [38] D. Drysdale, *An Introduction to Fire Dynamics*, 2ª ed. Nova Jersey, EUA: Wiley, 2011, doi: 10.1002/9781119975465.ch1. Acedido em: 2021/12/21.
- [39] J. Franssen e P. Vila Real, *Fire Design of Steel Structures*, 2ª ed. Nova Jersey, EUA: Wiley, 2015.
- [40] T. L. Bergman, F. P. Incropera, D. P. DeWitt, e A. S. Lavine, *Fundamentals of heat and mass transfer*, 7ª ed. Nova Jersey, EUA: Wiley, 2011.
- [41] E. Madenci e I. Guven, "The finite element method and applications in engineering using ANSYS®", second edition," em *The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS, Second Edition*: Springer US, 2015, pp. 1-657, doi: 10.1007/978-1-4899-7550-8.
- [42] M. K. Thompson e J. M. Thompson, *ANSYS Mechanical APDL for Finite Element Analysis*. Elsevier Science, 2017.
- [43] J. Sjödin, E. Serrano, e B. Enquist, "An experimental and numerical study of the effect of friction in single dowel joints," *Holz als Roh- und Werkstoff*, vol. 66, no. 5, pp. 363-372, 2008, doi: 10.1007/s00107-008-0267-z.
- [44] E. M. Fonseca, L. Silva, e P. A. Leite, "Numerical model to predict the effect of wood density in wood–steel–wood connections with and without passive protection under fire," vol. 38, no. 2, pp. 122-135, 2020, doi: 10.1177/0734904119884706.
- [45] K. A. Harman, J. R. Lawson, N. I. o. Standards, e Technology, *A study of metal truss plate connectors when exposed to fire*. U.S. Department of Commerce, Technology Administration, National Institute of Standards and Technology, 2007.

ANEXOS

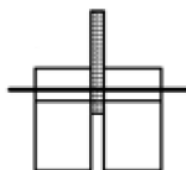
- 10.1 Tabelas de dimensionamento das ligações à temperatura ambiente com modos de rotura
- 10.2 Código APDL da curva ISO 834
- 10.3 Código APDL da geometria das ligações
- 10.4 Código APDL dos materiais das ligações
- 10.5 Evolução da temperatura ao longo do tempo da ligação SWS
- 10.6 Evolução da temperatura ao longo do tempo da ligação WSW
- 10.7 Evolução da temperatura ao longo do tempo da ligação WWW

10 ANEXOS

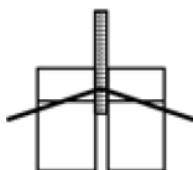
10.1 Tabelas de dimensionamento das ligações à temperatura ambiente com modos de rotura

WSW

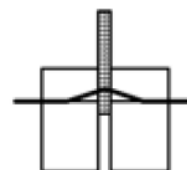
	Carregamento	Dimensões cavilhas	Disposição cavilhas		Espaçamentos entre cavilhas				Dimensões da ligação				Tensão admissível na madeira	Capacidade de carga por ligador e por plano de corte	
Glulam	Fd [kN]	d [mm]	Coluna	Linha	a1 [mm]	a2 [mm]	a3,t [mm]	a4,c [mm]	t1 [mm]	L [mm]	H [mm]	ts [mm]	ft,0,d [MPa]	Fv,rd [N]	Modo de rotura
GH20h	5	6	2	2	30	18	80	18	45	380	54	3	10,24	2166,42	(h)
		8	1	2	40	24	80	24	45	320	72	3	10,24	3186,72	(g)
		10	1	2	50	30	80	30	45	320	90	3	10,24	4180,03	(g)
	10	6	3	2	30	18	80	18	45	440	54	3	10,24	2166,42	(h)
		8	2	2	40	24	80	24	45	400	72	3	10,24	3186,72	(g)
		10	2	2	50	30	80	30	45	420	90	3	10,24	4180,03	(g)
	15	6	4	2	30	18	80	18	45	500	54	3	10,24	2166,42	(h)
		8	3	2	40	24	80	24	45	480	72	3	10,24	3186,72	(g)
		10	2	2	50	30	80	30	45	420	90	3	10,24	4180,03	(g)
GL24h	5	6	2	2	30	18	80	18	45	380	54	3	12,29	2308,16	(h)
		8	1	2	40	24	80	24	45	320	72	3	12,29	3548,40	(g)
		10	1	2	50	30	80	30	45	320	90	3	12,29	4624,47	(g)
	10	6	3	2	30	18	80	18	45	440	54	3	12,29	2308,16	(h)
		8	2	2	40	24	80	24	45	400	72	3	12,29	3548,40	(g)
		10	2	2	50	30	80	30	45	420	90	3	12,29	4624,47	(g)
	15	6	4	2	30	18	80	18	45	500	54	3	12,29	2308,16	(h)
		8	3	2	40	24	80	24	45	480	72	3	12,29	3548,40	(g)
		10	2	2	50	30	80	30	45	420	90	3	12,29	4624,47	(g)
GH32h	5	6	2	2	30	18	80	18	45	380	54	3	16,38	2467,53	(h)
		8	1	2	40	24	80	24	45	320	72	3	16,38	3981,97	(g)
		10	1	2	50	30	80	30	45	320	90	3	16,38	5156,69	(g)
	10	6	3	2	30	18	80	18	45	440	54	3	16,38	2467,53	(h)
		8	2	2	40	24	80	24	45	400	72	3	16,38	3981,97	(g)
		10	1	2	50	30	80	30	45	320	90	3	16,38	5156,69	(g)
	15	6	4	2	30	18	80	18	45	500	54	3	16,38	2467,53	(h)
		8	2	2	40	24	80	24	45	400	72	3	16,38	3981,97	(g)
		10	2	2	50	30	80	30	45	420	90	3	16,38	5156,69	(g)



(f)



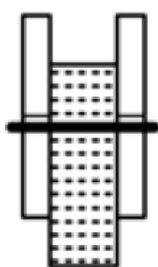
(g)



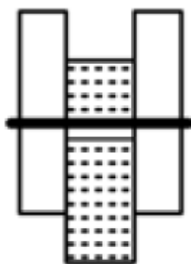
(h)

WWW

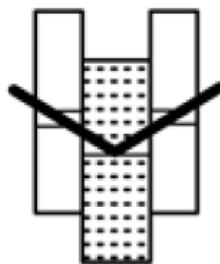
Glulam	Carregamento	Diâmetro das cavilhas	Disposição cavilhas		Espaçamentos entre cavilhas				Dimensões da ligação			Tensão admissível na madeira	Capacidade de carga por ligador e por plano de corte	Modo de rotura
	Fd [kN]	d [mm]	Coluna	Linha	a1 [mm]	a2 [mm]	a3,t [mm]	a4,c [mm]	t1 e t2 [mm]	L [mm]	H [mm]	ft,0,d [MPa]	Fv,rd [N]	
GH20h	5	6	2	2	30	18	80	18	45	380	54	10,24	1531,89	(g)
		8	1	2	40	24	80	24	45	320	72	10,24	2543,59	(g)
		10	1	2	50	30	80	30	45	320	90	10,24	3424,45	(f)
	10	6	4	2	30	18	80	18	45	500	54	10,24	1531,89	(g)
		8	2	2	40	24	80	24	45	400	72	10,24	2543,59	(g)
		10	2	2	50	30	80	30	45	420	90	10,24	3424,45	(f)
	15	6	5	2	30	18	80	18	45	560	54	10,24	1531,89	(g)
		8	3	2	40	24	80	24	45	480	72	10,24	2543,59	(g)
		10	3	2	50	30	80	30	45	520	90	10,24	3424,45	(f)
GL24h	5	6	2	2	30	18	80	18	45	380	54	12,29	1632,12	(g)
		8	1	2	40	24	80	24	45	320	72	12,29	2710,01	(g)
		10	1	2	50	30	80	30	45	320	90	12,29	3800,78	(f)
	10	6	4	2	30	18	80	18	45	500	54	12,29	1632,12	(g)
		8	2	2	40	24	80	24	45	400	72	12,29	2710,01	(g)
		10	2	2	50	30	80	30	45	420	90	12,29	3800,78	(f)
	15	6	5	2	30	18	80	18	45	560	54	12,29	1632,12	(g)
		8	3	2	40	24	80	24	45	480	72	12,29	2710,01	(g)
		10	2	2	50	30	80	30	45	420	90	12,29	3800,78	(f)
GH32h	5	6	2	2	30	18	80	18	45	380	54	16,38	1744,81	(g)
		8	1	2	40	24	80	24	45	320	72	16,38	2897,12	(g)
		10	1	2	50	30	80	30	45	320	90	16,38	4251,26	(f)
	10	6	3	2	30	18	80	18	45	440	54	16,38	1744,81	(g)
		8	2	2	40	24	80	24	45	400	72	16,38	2897,12	(g)
		10	2	2	50	30	80	30	45	420	90	16,38	4251,26	(f)
	15	6	5	2	30	18	80	18	45	560	54	16,38	1744,81	(g)
		8	3	2	40	24	80	24	45	480	72	16,38	2897,12	(g)
		10	2	2	50	30	80	30	45	420	90	16,38	4251,26	(f)



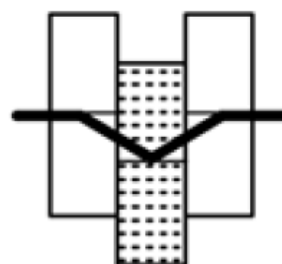
(g)



(h)



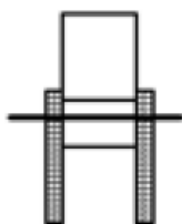
(j)



(k)

SWS

	Carregamento	Dimensões cavilhas		Disposição cavilhas	Espaçamentos entre cavilhas				Dimensões da ligação				Tensão admissível na madeira	Capacidade de carga por ligador e por plano de corte	
Glulam	Fd [kN]	d [mm]	Coluna	Linha	a1 [mm]	a2 [mm]	a3,t [mm]	a4,c [mm]	t1 [mm]	L [mm]	H [mm]	ts [mm]	ft,0,d [MPa]	Fv,rd [N]	Modo de rotura
GH20h	5	6	2	2	30	18	80	18	45	380	54	3	10,24	1393,12	(k)
		8	2	2	40	24	80	24	45	400	72	3	10,24	2313,17	(k)
		10	1	2	50	30	80	30	45	320	90	3	10,24	3418,79	(k)
	10	6	3	3	30	18	80	18	45	440	72	3	10,24	1393,12	(k)
		8	3	2	40	24	80	24	45	480	72	3	10,24	2313,17	(k)
		10	2	2	50	30	80	30	45	420	90	3	10,24	3418,79	(k)
	15	6	6	2	30	18	80	18	45	620	54	3	10,24	1393,12	(k)
		8	4	2	40	24	80	24	45	560	72	3	10,24	2313,17	(k)
		10	3	2	50	30	80	30	45	520	90	3	10,24	3418,79	(k)
GL24h	5	6	2	2	30	18	80	18	45	380	54	3	12,29	1482,44	(k)
		8	2	2	40	24	80	24	45	400	72	3	12,29	2461,49	(k)
		10	1	2	50	30	80	30	45	320	90	3	12,29	3638,00	(k)
	10	6	4	2	30	18	80	18	45	500	54	3	12,29	1482,44	(k)
		8	3	2	40	24	80	24	45	480	72	3	12,29	2461,49	(k)
		10	2	2	50	30	80	30	45	420	90	3	12,29	3638,00	(k)
	15	6	6	2	30	18	80	18	45	620	54	3	12,29	1482,44	(k)
		8	4	2	40	24	80	24	45	560	72	3	12,29	2461,49	(k)
		10	3	2	50	30	80	30	45	520	90	3	12,29	3638,00	(k)
GH32h	5	6	2	2	30	18	80	18	45	380	54	3	16,38	1584,80	(k)
		8	1	2	40	24	80	24	45	320	72	3	16,38	2631,44	(k)
		10	1	2	50	30	80	30	45	320	90	3	16,38	3889,19	(k)
	10	6	4	2	30	18	80	18	45	500	54	3	16,38	1584,80	(k)
		8	2	2	40	24	80	24	45	400	72	3	16,38	2631,44	(k)
		10	2	2	50	30	80	30	45	420	90	3	16,38	3889,19	(k)
	15	6	5	2	30	18	80	18	45	560	54	3	16,38	1584,80	(k)
		8	3	2	40	24	80	24	45	480	72	3	16,38	2631,44	(k)
		10	2	2	50	30	80	30	45	420	90	3	16,38	3889,19	(k)



(j)



(k)

10.2 Código APDL da curva ISO 834

```
*DIM,ISO834,TABLE,61,1,1,,  
*SET,ISO834(1,0,1),0  
*SET,ISO834(1,1,1),20  
*SET,ISO834(2,0,1),60  
*SET,ISO834(2,1,1),349.2  
*SET,ISO834(3,0,1),120  
*SET,ISO834(3,1,1),444.5  
*SET,ISO834(4,0,1),180  
*SET,ISO834(4,1,1),502.3  
*SET,ISO834(5,0,1),240  
*SET,ISO834(5,1,1),543.9  
*SET,ISO834(6,0,1),300  
*SET,ISO834(6,1,1),576.4  
*SET,ISO834(7,0,1),360  
*SET,ISO834(7,1,1),603.1  
*SET,ISO834(8,0,1),420  
*SET,ISO834(8,1,1),625.8  
*SET,ISO834(9,0,1),480  
*SET,ISO834(9,1,1),645.5  
*SET,ISO834(10,0,1),540  
*SET,ISO834(10,1,1),662.8  
*SET,ISO834(11,0,1),600  
*SET,ISO834(11,1,1),678.4  
...  
*SET,ISO834(56,0,1),3300  
*SET,ISO834(56,1,1),932.3  
*SET,ISO834(57,0,1),3360  
*SET,ISO834(57,1,1),935.0  
*SET,ISO834(58,0,1),3420  
*SET,ISO834(58,1,1),937.7  
*SET,ISO834(59,0,1),3480  
*SET,ISO834(59,1,1),940.3  
*SET,ISO834(60,0,1),3540  
*SET,ISO834(60,1,1),942.8  
*SET,ISO834(61,0,1),3600  
*SET,ISO834(61,1,1),945.3
```

10.3 Código APDL da geometria das ligações

SWS	
L=210	ASEL,A,,,66
H=90	ASEL,A,,,67
tw=45	ASEL,A,,,68
ts=3	VEXT,ALL,,,0,0,-t1
D=10	ASEL,,,,69
t1= ts	ASEL,A,,,74
t2= tw	ASEL,A,,,79
t3= ts	ASEL,A,,,84
ELEXT= 2	VEXT,ALL,,,0,0,-t2
ELINT= 1	ASEL,,,,89
/PREP7	ASEL,A,,,94
K,1,0,0,0	ASEL,A,,,99
K,2,L,0,0	ASEL,A,,,104
K,3,L,H,0	VEXT,ALL,,,0,0,-t3
K,4,0,H,0	VSEL,,,,1
LSTR,1,2	VSEL,A,,,3
LSTR,2,3	VATT,ELEXT,,1,0
LSTR,3,4	VSEL,,,,2
LSTR,4,1	VATT,ELINT,,1,0
ALLSEL,ALL	VSEL,,,,4
AL,1,2,3,4	VSEL,A,,,5
CYL4,80,30,D/2	VSEL,A,,,6
CYL4,80,60,D/2	VSEL,A,,,7
CYL4,130,30,D/2	VSEL,A,,,8
CYL4,130,60,D/2	VSEL,A,,,9
ASBA,1,2	VSEL,A,,,10
ASBA,6,3	VSEL,A,,,11
ASBA,1,4	VSEL,A,,,12
ASBA,2,5	VSEL,A,,,13
VEXT,1,,,0,0,-t1	VSEL,A,,,14
VEXT,2,,,0,0,-t2	VSEL,A,,,15
VEXT,23,,,0,0,-t3	VATT,2,,1,0
CYL4,80,30,D/2	ALLSEL,ALL
CYL4,80,60,D/2	VPLOT
CYL4,130,30,D/2	/VIEW,1,1,1,1
CYL4,130,60,D/2	/PNUM,MAT,1
ASEL,,,,65	/REPLOT

WSW

L=210	ASEL,A,,,66
H=90	ASEL,A,,,67
tw=45	ASEL,A,,,68
ts=3	VEXT,ALL,,,0,0,-t1
D=10	ASEL,,,,69
t1= tw	ASEL,A,,,74
t2= ts	ASEL,A,,,79
t3= tw	ASEL,A,,,84
ELEXT= 1	VEXT,ALL,,,0,0,-t2
ELINT= 2	ASEL,,,,89
/PREP7	ASEL,A,,,94
K,1,0,0,0	ASEL,A,,,99
K,2,L,0,0	ASEL,A,,,104
K,3,L,H,0	VEXT,ALL,,,0,0,-t3
K,4,0,H,0	VSEL,,,,1
LSTR,1,2	VSEL,A,,,3
LSTR,2,3	VATT,ELEXT,,1,0
LSTR,3,4	VSEL,,,,2
LSTR,4,1	VATT,ELINT,,1,0
ALLSEL,ALL	VSEL,,,,4
AL,1,2,3,4	VSEL,A,,,5
CYL4,80,30,D/2	VSEL,A,,,6
CYL4,80,60,D/2	VSEL,A,,,7
CYL4,130,30,D/2	VSEL,A,,,8
CYL4,130,60,D/2	VSEL,A,,,9
ASBA,1,2	VSEL,A,,,10
ASBA,6,3	VSEL,A,,,11
ASBA,1,4	VSEL,A,,,12
ASBA,2,5	VSEL,A,,,13
VEXT,1,,,0,0,-t1	VSEL,A,,,14
VEXT,2,,,0,0,-t2	VSEL,A,,,15
VEXT,23,,,0,0,-t3	VATT,2,,1,0
CYL4,80,30,D/2	ALLSEL,ALL
CYL4,80,60,D/2	VPLOT
CYL4,130,30,D/2	/VIEW,1,1,1,1
CYL4,130,60,D/2	/PNUM,MAT,1
ASEL,,,,65	/REPLOT

WWW

L=210	ASEL,A,,,67
H=90	ASEL,A,,,68
tw=45	VEXT,ALL,,,0,0,-t1
D=10	ASEL,,,,69
t1= tw	ASEL,A,,,74
t2= tw	ASEL,A,,,79
t3= tw	ASEL,A,,,84
ELEXT= 1	VEXT,ALL,,,0,0,-t2
ELINT= 1	ASEL,,,,89
/PREP7	ASEL,A,,,94
K,1,0,0,0	ASEL,A,,,99
K,2,L,0,0	ASEL,A,,,104
K,3,L,H,0	VEXT,ALL,,,0,0,-t3
K,4,0,H,0	VSEL,,,,1
LSTR,1,2	VSEL,A,,,3
LSTR,2,3	VATT,ELEXT,,1,0
LSTR,3,4	VSEL,,,,2
LSTR,4,1	VATT,ELINT,,1,0
ALLSEL,ALL	VSEL,,,,4
AL,1,2,3,4	VSEL,A,,,5
CYL4,80,30,D/2	VSEL,A,,,6
CYL4,80,60,D/2	VSEL,A,,,7
CYL4,130,30,D/2	VSEL,A,,,8
CYL4,130,60,D/2	VSEL,A,,,9
ASBA,1,2	VSEL,A,,,10
ASBA,6,3	VSEL,A,,,11
ASBA,1,4	VSEL,A,,,12
ASBA,2,5	VSEL,A,,,13
VEXT,1,,,0,0,-t1	VSEL,A,,,14
VEXT,2,,,0,0,-t2	VSEL,A,,,15
VEXT,23,,,0,0,-t3	VATT,2,,1,0
CYL4,80,30,D/2	ALLSEL,ALL
CYL4,80,60,D/2	VPLOT
CYL4,130,30,D/2	/VIEW,1,1,1,1
CYL4,130,60,D/2	/PNUM,MAT,1
ASEL,,,,65	/REPLOT
ASEL,A,,,66	

10.4 Código APDL dos materiais das ligações

GL20h

```

/NOP
TBDEL,ALL,_MATL
MPDEL,ALL,_MATL
MPTEMP,R5.0,3,1, 0.00000000 , 100.000000 , 300.000000
MPDATA,R5.0,3,EX,_MATL , 1, 8400.00000 , 4200.00000 , 84.0000000
MPTEMP,R5.0,3,1, 0.00000000 , 100.000000 , 300.000000
MPDATA,R5.0,3,NUXY,_MATL , 1, 0.400000000 , 0.400000000 , 0.400000000
MPTEMP,R5.0,1,1, 0.00000000 ,
MPDATA,R5.0,1,ALPX,_MATL , 1, 4.000000000E-06,
MPTEMP,R5.0,11,1, 0.00000000 , 99.0000000 , 120.000000
MPTEMP,R5.0,11,4, 200.000000 , 250.000000 , 300.000000
MPTEMP,R5.0,11,7, 350.000000 , 400.000000 , 600.000000
MPTEMP,R5.0,11,10, 800.000000 , 1200.00000 ,
MPDATA,R5.0,11,DENS,_MATL , 1, 4.144000000E-07, 4.144000000E-07, 3.700000000E-07
MPDATA,R5.0,11,DENS,_MATL , 4, 3.700000000E-07, 3.441000000E-07, 2.812000000E-07
MPDATA,R5.0,11,DENS,_MATL , 7, 1.924000000E-07, 1.406000000E-07, 1.036000000E-07
MPDATA,R5.0,11,DENS,_MATL , 10, 9.620000000E-08, 1.000000000E-08,
MPTEMP,R5.0,1,1, 0.00000000 ,
MPDATA,R5.0,1,MU,_MATL , 1, 0.300000000 ,
MPTEMP,R5.0,6,1, 0.00000000 , 200.000000 , 350.000000
MPTEMP,R5.0,6,4, 500.000000 , 800.000000 , 1200.00000
MPDATA,R5.0,6,KXX,_MATL , 1, 1.200000000E-04, 1.500000000E-04, 7.000000000E-05
MPDATA,R5.0,6,KXX,_MATL , 4, 9.000000000E-05, 3.500000000E-04, 1.500000000E-03
MPTEMP,R5.0,13,1, 0.00000000 , 99.0000000 , 110.000000
MPTEMP,R5.0,13,4, 120.000000 , 130.000000 , 200.000000
MPTEMP,R5.0,13,7, 250.000000 , 300.000000 , 350.000000
MPTEMP,R5.0,13,10, 400.000000 , 600.000000 , 800.000000
MPTEMP,R5.0,13,13, 1200.00000 ,
MPDATA,R5.0,13,C,_MATL , 1, 1530.00000 , 1770.00000 , 13600.0000
MPDATA,R5.0,13,C,_MATL , 4, 13500.0000 , 2120.00000 , 2000.00000
MPDATA,R5.0,13,C,_MATL , 7, 1620.00000 , 710.000000 , 850.000000
MPDATA,R5.0,13,C,_MATL , 10, 1000.00000 , 1400.00000 , 1650.00000
MPDATA,R5.0,13,C,_MATL , 13, 1650.00000 ,
MPTEMP,R5.0,1,1, 0.00000000 ,
MPDATA,R5.0,1,EMIS,_MATL , 1, 0.800000000 ,
MPTEMP,R5.0,3,1, 0.00000000 , 100.000000 , 300.000000
MPDATA,R5.0,3,PRXY,_MATL , 1, 0.400000000 , 0.400000000 , 0.400000000
TB,MISO,_MATL , 3, 2
TBTEM, 0.00000000 , 1
TBPT,, 1.904800000E-03, 16.0000000
TBPT,, 6.500000000E-03, 16.1000000
TBTEM, 100.000000 , 2
TBPT,, 2.476000000E-03, 10.4000000
TBPT,, 6.500000000E-03, 10.5000000
TBTEM, 300.000000 , 3
TBPT,, 1.904800000E-03, 0.160000000
TBPT,, 6.500000000E-03, 0.170000000
/GO

```

GL24h

```

/NOP
TBDEL,ALL,_MATL
MPDEL,ALL,_MATL
MPTEMP,R5.0,3,1, 0.00000000 , 100.000000 , 300.000000
MPDATA,R5.0,3,EX,_MATL , 1, 11500.0000 , 5750.00000 , 115.000000
MPTEMP,R5.0,3,1, 0.00000000 , 100.000000 , 300.000000
MPDATA,R5.0,3,NUXY,_MATL , 1, 0.400000000 , 0.400000000 , 0.400000000
MPTEMP,R5.0,1,1, 0.00000000 ,
MPDATA,R5.0,1,ALPX,_MATL , 1, 4.000000000E-06,
MPTEMP,R5.0,11,1, 0.00000000 , 99.0000000 , 120.000000
MPTEMP,R5.0,11,4, 200.000000 , 250.000000 , 300.000000
MPTEMP,R5.0,11,7, 350.000000 , 400.000000 , 600.000000
MPTEMP,R5.0,11,10, 800.000000 , 1200.00000 ,
MPDATA,R5.0,11,DENS,_MATL , 1, 4.704000000E-07, 4.704000000E-07, 4.200000000E-07
MPDATA,R5.0,11,DENS,_MATL , 4, 4.200000000E-07, 3.906000000E-07, 3.192000000E-07
MPDATA,R5.0,11,DENS,_MATL , 7, 2.184000000E-07, 1.596000000E-07, 1.176000000E-07
MPDATA,R5.0,11,DENS,_MATL , 10, 1.092000000E-07, 1.000000000E-09,
MPTEMP,R5.0,1,1, 0.00000000 ,
MPDATA,R5.0,1,MU,_MATL , 1, 0.300000000 ,
MPTEMP,R5.0,6,1, 0.00000000 , 200.000000 , 350.000000
MPTEMP,R5.0,6,4, 500.000000 , 800.000000 , 1200.00000
MPDATA,R5.0,6,KXX,_MATL , 1, 1.200000000E-04, 1.500000000E-04, 7.000000000E-05
MPDATA,R5.0,6,KXX,_MATL , 4, 9.000000000E-05, 3.500000000E-04, 1.500000000E-03
MPTEMP,R5.0,13,1, 0.00000000 , 99.0000000 , 110.000000
MPTEMP,R5.0,13,4, 120.000000 , 130.000000 , 200.000000
MPTEMP,R5.0,13,7, 250.000000 , 300.000000 , 350.000000
MPTEMP,R5.0,13,10, 400.000000 , 600.000000 , 800.000000
MPTEMP,R5.0,13,13, 1200.00000 ,
MPDATA,R5.0,13,C,_MATL , 1, 1530.00000 , 1770.00000 , 13600.0000
MPDATA,R5.0,13,C,_MATL , 4, 13500.0000 , 2120.00000 , 2000.00000
MPDATA,R5.0,13,C,_MATL , 7, 1620.00000 , 710.000000 , 850.000000
MPDATA,R5.0,13,C,_MATL , 10, 1000.00000 , 1400.00000 , 1650.00000
MPDATA,R5.0,13,C,_MATL , 13, 1650.00000 ,
MPTEMP,R5.0,1,1, 0.00000000 ,
MPDATA,R5.0,1,EMIS,_MATL , 1, 0.800000000 ,
MPTEMP,R5.0,3,1, 0.00000000 , 100.000000 , 300.000000
MPDATA,R5.0,3,PRXY,_MATL , 1, 0.400000000 , 0.400000000 , 0.400000000
TB,MISO,_MATL , 3, 2
TBTEM, 0.00000000 , 1
TBPT,, 1.669600000E-03, 19.2000000
TBPT,, 6.500000000E-03, 19.3000000
TBTEM, 100.000000 , 2
TBPT,, 2.454500000E-03, 14.1141000
TBPT,, 6.500000000E-03, 14.5000000
TBTEM, 300.000000 , 3
TBPT,, 1.669600000E-03, 0.192000000
TBPT,, 6.500000000E-03, 0.292000000
/GO

```

GL32h

```

/NOP
TBDEL,ALL,_MATL
MPDEL,ALL,_MATL
MPTEMP,R5.0,3,1, 0.00000000 , 100.000000 , 300.000000
MPDATA,R5.0,3,EX,_MATL , 1, 14200.0000 , 7100.00000 , 142.000000
MPTEMP,R5.0,3,1, 0.00000000 , 100.000000 , 300.000000
MPDATA,R5.0,3,NUXY,_MATL , 1, 0.400000000 , 0.400000000 , 0.400000000
MPTEMP,R5.0,1,1, 0.00000000 ,
MPDATA,R5.0,1,ALPX,_MATL , 1, 4.000000000E-06,
MPTEMP,R5.0,11,1, 0.00000000 , 99.0000000 , 120.000000
MPTEMP,R5.0,11,4, 200.000000 , 250.000000 , 300.000000
MPTEMP,R5.0,11,7, 350.000000 , 400.000000 , 600.000000
MPTEMP,R5.0,11,10, 800.000000 , 1200.00000 ,
MPDATA,R5.0,11,DENS,_MATL , 1, 5.376000000E-07, 5.376000000E-07, 4.800000000E-07
MPDATA,R5.0,11,DENS,_MATL , 4, 4.800000000E-07, 4.464000000E-07, 3.648000000E-07
MPDATA,R5.0,11,DENS,_MATL , 7, 2.496000000E-07, 1.824000000E-07, 1.344000000E-07
MPDATA,R5.0,11,DENS,_MATL , 10, 1.248000000E-07, 1.000000000E-09,
MPTEMP,R5.0,1,1, 0.00000000 ,
MPDATA,R5.0,1,MU,_MATL , 1, 0.300000000 ,
MPTEMP,R5.0,6,1, 0.00000000 , 200.000000 , 350.000000
MPTEMP,R5.0,6,4, 500.000000 , 800.000000 , 1200.00000
MPDATA,R5.0,6,KXX,_MATL , 1, 1.200000000E-04, 1.500000000E-04, 7.000000000E-05
MPDATA,R5.0,6,KXX,_MATL , 4, 9.000000000E-05, 3.500000000E-04, 1.500000000E-03
MPTEMP,R5.0,13,1, 0.00000000 , 99.0000000 , 110.000000
MPTEMP,R5.0,13,4, 120.000000 , 130.000000 , 200.000000
MPTEMP,R5.0,13,7, 250.000000 , 300.000000 , 350.000000
MPTEMP,R5.0,13,10, 400.000000 , 600.000000 , 800.000000
MPTEMP,R5.0,13,13, 1200.00000 ,
MPDATA,R5.0,13,C,_MATL , 1, 1530.00000 , 1770.00000 , 13600.0000
MPDATA,R5.0,13,C,_MATL , 4, 13500.0000 , 2120.00000 , 2000.00000
MPDATA,R5.0,13,C,_MATL , 7, 1620.00000 , 710.000000 , 850.000000
MPDATA,R5.0,13,C,_MATL , 10, 1000.00000 , 1400.00000 , 1650.00000
MPDATA,R5.0,13,C,_MATL , 13, 1650.00000 ,
MPTEMP,R5.0,1,1, 0.00000000 ,
MPDATA,R5.0,1,EMIS,_MATL , 1, 0.800000000 ,
MPTEMP,R5.0,3,1, 0.00000000 , 100.000000 , 300.000000
MPDATA,R5.0,3,PRXY,_MATL , 1, 0.400000000 , 0.400000000 , 0.400000000
TB,MISO,_MATL , 3, 2
TBTEM, 0.00000000 , 1
TBPT,, 1.802800000E-03, 25.6000000
TBPT,, 6.500000000E-03, 27.0000000
TBTEM, 100.000000 , 2
TBPT,, 2.400000000E-03, 17.0400000
TBPT,, 6.500000000E-03, 18.0000000
TBTEM, 300.000000 , 3
TBPT,, 1.802800000E-03, 0.256000000
TBPT,, 6.500000000E-03, 0.300000000
/GO
/NOP
/GO

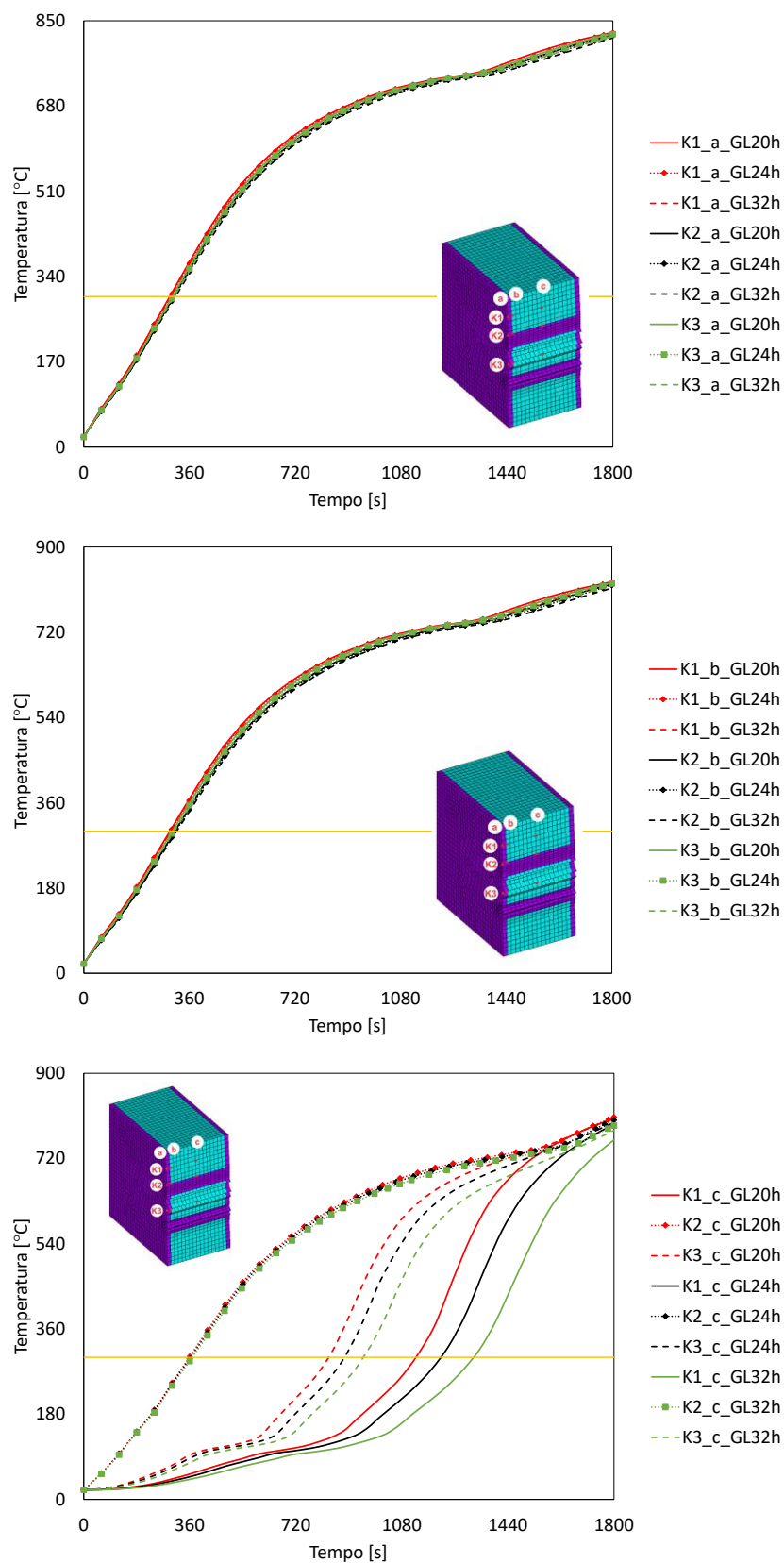
```

Aço 275

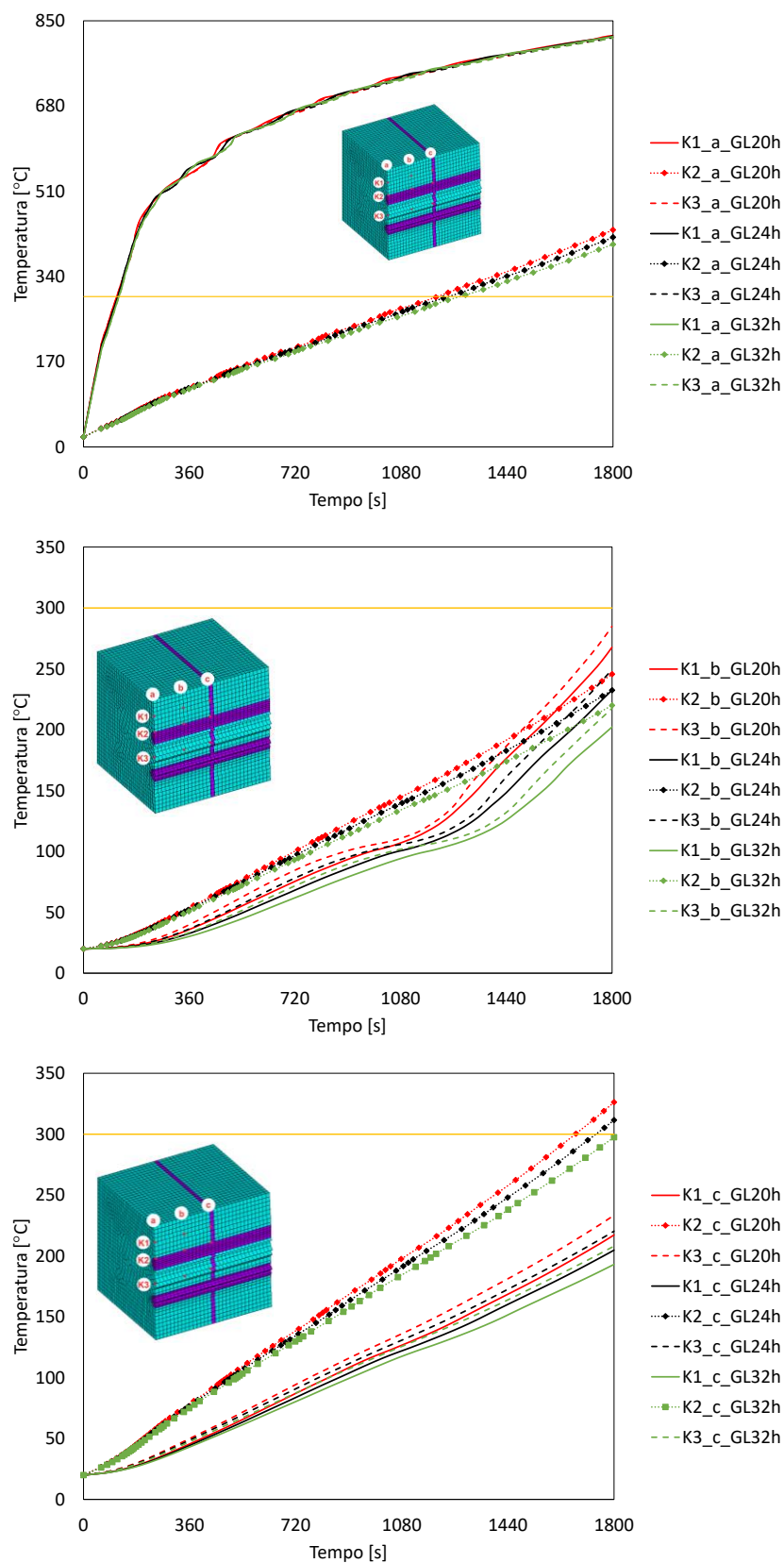
```
/COM,ANSYS® RELEASE 2020 R2      BUILD 20.2   UP20200601   18:16:46
/NOP
/COM,Internal UNITS set at file creation time = SI  (MKS)
TBDEL,ALL,_MATL
MPDEL,ALL,_MATL
MPTEMP,R5.0,12, 1, 0.00000000 , 200.000000 , 300.000000
MPTEMP,R5.0,12, 4, 400.000000 , 500.000000 , 600.000000
MPTEMP,R5.0,12, 7, 700.000000 , 800.000000 , 900.000000
MPTEMP,R5.0,12,10, 1000.00000 , 1100.00000 , 1200.00000
MPDATA,R5.0,12,EX ,_MATL , 1, 210000.000 , 189000.000 , 168000.000
MPDATA,R5.0,12,EX ,_MATL , 4, 147000.000 , 126000.000 , 65100.0000
MPDATA,R5.0,12,EX ,_MATL , 7, 27300.0000 , 18900.0000 , 14175.0000
MPDATA,R5.0,12,EX ,_MATL ,10, 9450.00000 , 5040.00000 , 21.0000000
MPTEMP,R5.0,12, 1, 0.00000000 , 200.000000 , 300.000000
MPTEMP,R5.0,12, 4, 400.000000 , 500.000000 , 600.000000
MPTEMP,R5.0,12, 7, 700.000000 , 800.000000 , 900.000000
MPTEMP,R5.0,12,10, 1000.00000 , 1100.00000 , 1200.00000
MPDATA,R5.0,12,NUXY,_MATL , 1, 0.300000000 , 0.300000000 , 0.300000000
MPDATA,R5.0,12,NUXY,_MATL , 4, 0.300000000 , 0.300000000 , 0.300000000
MPDATA,R5.0,12,NUXY,_MATL , 7, 0.300000000 , 0.300000000 , 0.300000000
MPDATA,R5.0,12,NUXY,_MATL ,10, 0.300000000 , 0.300000000 , 0.300000000
MPTEMP,R5.0, 1, 1, 0.00000000 ,
MPDATA,R5.0, 1,ALPX,_MATL , 1, 1.400000000E-05,
MPTEMP,R5.0, 1, 1, 0.00000000 ,
MPDATA,R5.0, 1,DENS,_MATL , 1, 7.850000000E-06,
MPTEMP,R5.0, 3, 1, 0.00000000 , 799.000000 , 1200.00000
MPDATA,R5.0, 3,KXX ,_MATL , 1, 5.333400000E-02, 2.739300000E-02, 2.730000000E-02
MPTEMP,R5.0,24, 1, 0.00000000 , 50.0000000 , 100.000000
MPTEMP,R5.0,24, 4, 150.000000 , 200.000000 , 250.000000
MPTEMP,R5.0,24, 7, 300.000000 , 350.000000 , 400.000000
MPTEMP,R5.0,24,10, 450.000000 , 500.000000 , 550.000000
MPTEMP,R5.0,24,13, 600.000000 , 650.000000 , 700.000000
MPTEMP,R5.0,24,16, 730.000000 , 735.000000 , 750.000000
MPTEMP,R5.0,24,19, 785.000000 , 800.000000 , 825.000000
MPTEMP,R5.0,24,22, 850.000000 , 890.000000 , 1200.00000
MPDATA,R5.0,24,C ,_MATL , 1, 439.800000 , 459.700000 , 487.620000
MPDATA,R5.0,24,C ,_MATL , 4, 510.420000 , 529.760000 , 547.310000
MPDATA,R5.0,24,C ,_MATL , 7, 564.740000 , 583.710000 , 605.880000
MPDATA,R5.0,24,C ,_MATL ,10, 632.920000 , 666.500000 , 708.280000
MPDATA,R5.0,24,C ,_MATL ,13, 760.220000 , 813.750000 , 1008.20000
MPDATA,R5.0,24,C ,_MATL ,16, 2291.30000 , 5000.00000 , 1482.90000
MPDATA,R5.0,24,C ,_MATL ,19, 875.000000 , 803.260000 , 734.570000
MPDATA,R5.0,24,C ,_MATL ,22, 694.750000 , 657.080000 , 650.000000
MPTEMP,R5.0, 1, 1, 0.00000000 ,
MPDATA,R5.0, 1,EMIS,_MATL , 1, 0.700000000 ,
MPTEMP,R5.0,12, 1, 0.00000000 , 200.000000 , 300.000000
MPTEMP,R5.0,12, 4, 400.000000 , 500.000000 , 600.000000
MPTEMP,R5.0,12, 7, 700.000000 , 800.000000 , 900.000000
MPTEMP,R5.0,12,10, 1000.00000 , 1100.00000 , 1200.00000
MPDATA,R5.0,12,PRXY,_MATL , 1, 0.300000000 , 0.300000000 , 0.300000000
MPDATA,R5.0,12,PRXY,_MATL , 4, 0.300000000 , 0.300000000 , 0.300000000
MPDATA,R5.0,12,PRXY,_MATL , 7, 0.300000000 , 0.300000000 , 0.300000000
MPDATA,R5.0,12,PRXY,_MATL ,10, 0.300000000 , 0.300000000 , 0.300000000
```

TB,MISO,_MATL , 12, 2
TBTEM, 0.00000000 , 1
TBPT,, 1.309500000E-03, 275.000000
TBPT,, 5.000000000E-03, 430.000000
TBTEM, 200.000000 , 2
TBPT,, 1.455000000E-03, 275.000000
TBPT,, 5.000000000E-02, 430.000000
TBTEM, 300.000000 , 3
TBPT,, 1.636900000E-03, 275.000000
TBPT,, 5.000000000E-02, 430.000000
TBTEM, 400.000000 , 4
TBPT,, 1.870700000E-03, 275.000000
TBPT,, 5.000000000E-02, 430.000000
TBTEM, 500.000000 , 5
TBPT,, 1.702400000E-03, 214.500000
TBPT,, 5.000000000E-02, 244.500000
TBTEM, 600.000000 , 6
TBPT,, 2.000000000E-03, 130.200000
TBPT,, 5.000000000E-02, 159.250000
TBTEM, 700.000000 , 7
TBPT,, 2.300000000E-03, 62.7900000
TBPT,, 5.000000000E-02, 93.2500000
TBTEM, 800.000000 , 8
TBPT,, 1.760000000E-03, 33.2640000
TBPT,, 5.000000000E-02, 60.2500000
TBTEM, 900.000000 , 9
TBPT,, 1.000000000E-03, 14.1750000
TBPT,, 5.000000000E-02, 46.5000000
TBTEM, 1000.00000 , 10
TBPT,, 1.200000000E-03, 11.3400000
TBPT,, 5.000000000E-02, 41.0000000
TBTEM, 1100.00000 , 11
TBPT,, 1.100000000E-03, 5.54400000
TBPT,, 5.000000000E-02, 35.5000000
TBTEM, 1200.00000 , 12
TBPT,, 1.309500000E-04, 2.750000000E-03
TBPT,, 5.000000000E-02, 5.000000000E-02
/GO
/NOP
/GO

10.5 Evolução da temperatura ao longo do tempo da ligação SWS



10.6 Evolução da temperatura ao longo do tempo da ligação WSW



10.7 Evolução da temperatura ao longo do tempo da ligação WWW

