



Resistência ao fogo de ligações aço- madeira-aço (S-W-S)

VÂNIA SOFIA BEXIGA DA SILVA

julho de 2020

RESISTÊNCIA AO FOGO DE LIGAÇÕES AÇO-MADEIRA-AÇO (S-W-S)

Vânia Sofia Bexiga da Silva
1150498

2020

Instituto Superior de Engenharia do Porto
Departamento de Engenharia Mecânica



RESISTÊNCIA AO FOGO DE LIGAÇÕES AÇO-MADEIRA-AÇO (S-W-S)

Vânia Sofia Bexiga da Silva
1150498

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.

2020

Instituto Superior de Engenharia do Porto
Departamento de Engenharia Mecânica



JÚRI

Presidente:

Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho
Professor Adjunto, ISEP - Instituto Superior de Engenharia do Porto

Orientadora:

Doutora Elza Maria Morais Fonseca
Professora Adjunta, ISEP - Instituto Superior de Engenharia do Porto

Arguente:

Doutor Paulo Alexandre Gonçalves Piloto
Professor Coordenador com Agregação, IPB – Instituto Politécnico de Bragança

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer à minha orientadora, Professora Doutora Elza Maria Morais Fonseca, por todo o apoio, colaboração e motivação. Todos os conhecimentos transmitidos e a ajuda que me foi dada foram essenciais para realização da dissertação.

Agradeço à minha família, em especial à minha mãe, Helena Rocha e ao meu pai, José Silva, por me proporcionarem todas as condições necessárias para seguir os meus objetivos. Obrigada por me motivarem sempre que foi necessário e por celebrarem comigo nos momentos vitoriosos. Gostaria de agradecer ao meu irmão, Carlos Rocha e à minha cunhada, Madalena Rocha, pelos bons conselhos, momentos felizes e por serem uma inspiração para mim tanto a nível pessoal, académico e profissional.

Agradeço ao meu namorado, Ying Hao, por todos os conhecimentos partilhados e por me acompanhar ao longo desta jornada. Obrigada por todo o suporte e por me encorajar a ser uma pessoa melhor.

Por fim, quero agradecer aos meus amigos por todo o companheirismo e apoio que me foi dado ao longo destes anos de amizade.

PALAVRAS CHAVE

Ligações; S-W-S; Eurocódigo; Madeira; Aço; Cavilhas; Fogo

RESUMO

As ligações são dos pontos mais frágeis de uma estrutura e por esse motivo o seu correto dimensionamento é fundamental para que sejam asseguradas as condições de segurança. As ligações que foram estudadas são do tipo aço-madeira-aço em duplo corte ligadas por cavilhas metálicas. O dimensionamento à temperatura ambiente foi baseado nas equações simplificadas presentes no Eurocódigo 5-1-1 com o intuito de determinar o número de cavilhas necessárias segundo as características das ligações.

Contudo, para obter informação sobre a influência dessas características foram estudadas ligações com diâmetros de cavilhas de 6, 8, 10 e 12 mm, madeira do tipo GL20h, GL24h, GL28h e GL32h e sob carregamento axial à tração de 10, 15 e 20 kN. Com base nos resultados obtidos, conclui-se que quanto menor o diâmetro da cavilha e maior o carregamento imposto, maior o número de cavilhas necessárias para assegurar a resistência da ligação.

Posteriormente, foi efetuado o dimensionamento das ligações a elevadas temperaturas segundo o Eurocódigo 5-1-2 e Eurocódigo 3-1-2 que têm como objetivo a determinação da espessura da proteção para uma exposição ao fogo no mínimo de 30 min. Os materiais de proteção utilizados foram a madeira lamelada colada e o gesso do tipo F. A proteção em madeira apresentou espessuras compreendidas entre 8 e 10 mm e a proteção em gesso entre 13 e 14 mm. A partir da geometria das ligações com e sem proteção, foi realizado o estudo utilizando o Método de Elementos Finitos com o auxílio do programa ANSYS *Student* 2019 R3. Foi possível observar o gradiente de temperatura na ligação e a camada carbonizada caracterizada pela linha isotérmica de 300°C e verificar desta forma, a resistência ao fogo das ligações. As velocidades da carbonização obtidas foram inferiores às estabelecidas no Eurocódigo 5-1-2. As ligações desprotegidas apresentam fraca resistência ao fogo, no entanto quando protegidas, conseguem resistir a 30 min de exposição ao fogo. Conclui-se assim, que quanto maior o diâmetro das cavilhas e maior a massa volúmica da madeira, maior a resistência ao fogo da ligação.

KEYWORDS

Connections; S-W-S; Eurocode; Wood; Steel; Dowels; Fire

ABSTRACT

The connections are the weakest parts of the structures so, it is essential the correct design to assure the safety conditions. The steel-wood-steel connections in double shear with steel dowels were studied. The connections design at room temperature were based in simplified equations present in Eurocode 5-1-1 to determine the number of dowels needed based on connection's characteristics.

However, to analyse the influence of these characteristics, connections with dowels diameters with 6, 8, 10 and 12 mm, the wood type GL20h, GL24h, GL28h and GL32h and the load of 10, 15 and 20 kN were studied. Conclusions about the results were obtained, with the decreasing of the dowels diameter and increasing the applied load, the number of the dowels is increased.

The high temperature design of the connections was based on the Eurocode 5-1-2 and Eurocode 3-1-2, to obtain the insulation thickness capable to protect the connections and to resist at least 30 min of fire exposure. The insulation materials used were the glued laminated timber and type F gypsum plasterboard. The timber protection thickness varies between 8 and 10 mm and the gypsum plasterboard thickness vary between 13 and 14 mm.

After obtaining the geometry of the connections with and without protection, a finite element method was used with software ANSYS Student 2019 R3. The numerical model allows to analyse the temperature gradient of the connections and observe the char layer formation that are characterized by 300 °C isotherm in order to verify the fire resistance. The numerical obtained charring rate was lesser than charring rate stablished in Eurocode 5-1-2. Unprotected connections presented weak fire resistance, but protected connections were capable to resist for 30 min of fire exposure.

As a general conclusion, with the increasing of the dowel diameters and increasing the wood density, it is possible to observe that the connection fire resistance increase.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

A.C.	Antes de Cristo
d	Diâmetro
<i>Glulam</i>	Madeira lamelada colada
EN	Norma europeia
GLxxh	Madeira lamelada colada homogénea
ISO	Organização Internacional de Normalização
MEF	Método de elementos finitos
min	Minutos
Resist.	Resistência
Séc.	Século
S-W-S	Ligação aço-madeira-aço
W-S-W	Ligação madeira-aço-madeira
W-W-W	Ligação madeira-madeira-madeira
3D	Três dimensões

Lista de Unidades

°C	Graus Celcius
g	Grama
h	Hora
J	Joule
K	Kelvin
m	Metro
N	Newton
Pa	Pascal
s	Segundos
W	Watt

Lista de Símbolos

%	Porcentagem
a_1	Distância entre ligadores paralela às fibras
a_2	Distância entre ligadores perpendicular às fibras
$a_{3,t}$	Distância entre ligador e a extremidade solicitada
$a_{4,c}$	Distância entre ligador e a extremidade não solicitada
a_{fi}	Aumento da espessura da madeira
A	Área
A_m	Área do elemento não protegido exposta ao fogo
A_p	Área da proteção exposta ao fogo
A_s	Área transversal
c_a	Calor específico do aço
c_p	Calor específico da proteção
d	Diâmetro do ligador
$d_{char,0}$	Espessura da camada carbonizada
$d_{char,n}$	Espessura da camada carbonizada com o efeito do arredondamento
d_p	Espessura da proteção
D	Difusividade térmica
E	Módulo de elasticidade
$E_{0,g,médio}$	Módulo de elasticidade médio paralelo às fibras de <i>glulam</i>
$E_{0,g,0,05}$	Módulo de elasticidade paralelo às fibras de <i>glulam</i> para um quantil de 5%
$E_{90,g,médio}$	Módulo de elasticidade médio perpendicular às fibras de <i>glulam</i>
$E_{90,g,0,05}$	Módulo de elasticidade perpendicular às fibras de <i>glulam</i> para um quantil de 5%
E_d	Solicitação aplicada
$E_{d,fi}$	Solicitação no projeto em situação de fogo
f_{20}	Fractil de 20% da propriedade de resistência à temperatura ambiente
$F_{ax,Rk}$	Resistência à tração axial característica do ligador
$f_{c,0,g,k}$	Resistência à compressão paralela às fibras de <i>glulam</i>
$f_{c,90,g,k}$	Resistência à compressão perpendicular às fibras de <i>glulam</i>
$f_{d,fi}$	Resistência calculada em situação de fogo
$f_{h,2,k}$	Resistência ao esmagamento característico dos membros de madeira
f_k	Resistência característica da madeira
$f_{m,g,k}$	Resistência à flexão da <i>glulam</i>
$f_{t,0,d}$	Resistência de projeto à tração
$f_{t,0,g,k}$	Resistência à tração paralela às fibras de <i>glulam</i>

$f_{t,90,g,k}$	Resistência à tração perpendicular às fibras de <i>glulam</i>
$f_{t,0,k}$	Valor da resistência à tração característica ao longo das fibras
f_u	Tensão de ruptura
$f_{u,k}$	Tensão de ruptura característica
$f_{v,g,k}$	Resistência ao corte da <i>glulam</i>
$F_{v,Rd}$	Solicitação ao corte no projeto por plano de corte e por ligador
$F_{v,Rk}$	Capacidade de carga característica por plano de corte e por ligador
f_y	Tensão de cedência
G	Módulo de corte
$G_{g,médio}$	Módulo de corte médio da <i>glulam</i>
$G_{g,0,05}$	Módulo de corte da <i>glulam</i> para um quantil de 5%
h	Coefficiente de transferência de calor por convecção
k_{fi}	Fator relativo ao tipo de madeira e ligação
k_{flux}	Coefficiente correspondente ao fluxo de calor gerado pelo ligador
k_{mod}	Fator de redução para a duração de carregamento e teor de humidade
$k_{mod,fi}$	Fator de modificação para o fogo
$M_{y,Rk}$	Momento de cedência plástico do ligador
N	Número de cavilhas
q_x	Taxa de transferência de calor por condução
q	Taxa de transferência de calor por convecção
q_e	Taxa de transferência de calor por radiação
t	Tempo
t_{req}	Tempo de resistência ao fogo pretendido
$t_{d,fi}$	Tempo resistente ao fogo da ligação
t_2	Espessura do elemento de madeira
V	Volume do elemento em aço
α	Coefficiente de expansão térmica linear
β_0	Velocidade de carbonização numa direção
β_n	Velocidade de carbonização com o efeito do arredondamento
γ_M	Fator parcial para as propriedades do material
$\gamma_{M,fi}$	Fator parcial para a madeira exposta ao fogo
ε	Emissividade
η_{fi}	Fator de redução de carga de projeto em situação de fogo
θ	Temperatura
θ_a	Temperatura do aço
$\theta_{a,t}$	Temperatura do aço no instante t
$\theta_{g,t}$	Temperatura dos gases no instante t
θ_w	Temperatura da superfície
θ_∞	Temperatura do ar ambiente
λ	Condutividade térmica

λ_a	Condutividade térmica do aço
λ_p	Condutividade térmica da proteção
ν	Coefficiente de Poisson
ρ_a	Massa volúmica do aço
$\rho_{g,k}$	Massa volúmica da <i>glulam</i>
$\rho_{g,médio}$	Massa volúmica média da <i>glulam</i>
ρ_k	Massa volúmica característica da madeira
ρ_p	Massa volúmica da proteção
σ	Coefficiente de Stefan-Boltzmann
$\sigma_{t,0,d}$	Tensão de projeto à tração
ω	Teor de água
ϕ	Quantidade de calor armazenado na proteção

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1-MASSA VOLÚMICA EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA PARA OS QUATRO TIPOS DE MADEIRA	44
FIGURA 2-ORTOTROPIA DA MADEIRA [1]	45
FIGURA 3-CONDUTIVIDADE TÉRMICA DA MADEIRA EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA [7]	46
FIGURA 4-CALOR ESPECÍFICO DA MADEIRA EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA [7]	47
FIGURA 5-CALOR ESPECÍFICO DO AÇO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA [5]	49
FIGURA 6-CONDUTIVIDADE TÉRMICA DO AÇO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA [5]	50
FIGURA 7- MASSA VOLÚMICA DO GESSO TIPO A E TIPO F [37]	51
FIGURA 8-CALOR ESPECÍFICO DO GESSO TIPO A E TIPO F [37]	52
FIGURA 9-CONDUTIVIDADE TÉRMICA DO GESSO TIPO A E TIPO F [37]	52
FIGURA 10-CAMADAS DA MADEIRA CARBONIZADA (ESQUERDA) E REDUÇÃO DA SECÇÃO (DIREITA) [38]	55
FIGURA 11-CURVA DE INCÊNDIO ISO 834 [9]	56
FIGURA 12-ESPAÇAMENTOS E DISTÂNCIAS ÀS EXTREMIDADES: A) ESPAÇAMENTOS ENTRE CAVILHAS SEGUNDO EIXO PARALELO E PERPENDICULAR ÀS FIBRAS; B) DISTÂNCIA ENTRE A CAVILHA ÀS EXTREMIDADES [6]	63
FIGURA 13-LIGAÇÃO COMPLETA (ESQUERDA) E EM CORTE (DIREITA)	64
FIGURA 14- INCREMENTO DA ESPESSURA NO MEMBRO EXTERNO EM MADEIRA [6]	65
FIGURA 15-VARIAÇÃO DO FATOR DE MASSIVIDADE ADAPTADO DE [33]	67
FIGURA 16-LIGAÇÃO EM CORTE COM PROTEÇÃO	67
FIGURA 17-TEMPERATURA DO AÇO PROTEGIDO COM MATERIAL LEVE, SUJEITO À CURVA ISO 834 PARA DIFERENTES VALORES DE FATOR DE PROTEÇÃO ADAPTADO DE [33]	68
FIGURA 18-MATERIAIS CONSTITUINTES DA LIGAÇÃO	76
FIGURA 19-ELEMENTO FINITO PLANE 77-2D-8 NODE <i>THERMAL SOLID</i> [45]	77
FIGURA 20-DIVISÃO EM ELEMENTOS FINITOS	77
FIGURA 21-GEOMETRIAS DAS LIGAÇÕES COM DIFERENTES DIÂMETROS E MATERIAIS DE PROTEÇÃO	77
FIGURA 22-CONDIÇÕES DE FRONTEIRA TÉRMICA APLICADAS NA SIMULAÇÃO NUMÉRICA	80
FIGURA 23-VARIAÇÃO DO NÚMERO DE CAVILHAS SEGUNDO A CARGA, A MASSA VOLÚMICA DA MADEIRA E DIÂMETRO DA CAVILHA	83
FIGURA 24-CARBONIZAÇÃO NUMA DIREÇÃO [7]	84
FIGURA 25-CARBONIZAÇÃO DO ELEMENTO DE MADEIRA E O EFEITO DO ARREDONDAMENTO	85
FIGURA 26-LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS ANALISADOS	86
FIGURA 27-TEMPERATURA DA LIGAÇÃO NÃO PROTEGIDA EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA GL20H E DIÂMETRO DE CAVILHA DE 6 MM	87
FIGURA 28-TEMPERATURA DA LIGAÇÃO NÃO PROTEGIDA EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA GL20H E QUATRO DIÂMETROS DISTINTOS	88
FIGURA 29-TEMPERATURA DA LIGAÇÃO NÃO PROTEGIDA EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA DIÂMETRO DE CAVILHA DE 6 MM E QUATRO MASSAS VOLÚMICAS DISTINTAS	89

FIGURA 30-TEMPERATURA DA LIGAÇÃO NÃO PROTEGIDA, COM PROTEÇÃO DE GESSO E PROTEÇÃO DE MADEIRA EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA GL20H E DIÂMETRO DE CAVILHA DE 6 MM	91
FIGURA 31-DIMENSÕES DA LIGAÇÃO	107
FIGURA 32- LIGAÇÕES DESPROTEGIDAS GL20H EXPOSTAS A 60 MIN DE FOGO	122
FIGURA 33-LIGAÇÕES DESPROTEGIDAS GL24H EXPOSTAS A 60 MIN DE FOGO	122
FIGURA 34-LIGAÇÕES DESPROTEGIDAS GL28H EXPOSTAS A 60 MIN DE FOGO	123
FIGURA 35-LIGAÇÕES DESPROTEGIDAS GL32H EXPOSTAS A 60 MIN DE FOGO	123
FIGURA 36- LIGAÇÕES GL20H COM PROTEÇÃO EM GESSO EXPOSTAS A 60 MIN DE FOGO	124
FIGURA 37- LIGAÇÕES GL24H COM PROTEÇÃO EM GESSO EXPOSTAS A 60 MIN DE FOGO	124
FIGURA 38- LIGAÇÕES GL28H COM PROTEÇÃO EM GESSO EXPOSTAS A 60 MIN DE FOGO	125
FIGURA 39- LIGAÇÕES GL32H COM PROTEÇÃO EM GESSO EXPOSTAS A 60 MIN DE FOGO	125
FIGURA 40- LIGAÇÕES GL20H COM PROTEÇÃO EM MADEIRA EXPOSTAS A 60 MIN DE FOGO	126
FIGURA 41- LIGAÇÕES GL24H COM PROTEÇÃO EM MADEIRA EXPOSTAS A 60 MIN DE FOGO	126
FIGURA 42- LIGAÇÕES GL28H COM PROTEÇÃO EM MADEIRA EXPOSTAS A 60 MIN DE FOGO	127
FIGURA 43- LIGAÇÕES GL32H COM PROTEÇÃO EM MADEIRA EXPOSTAS A 60 MIN DE FOGO	127

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1-DEFEITOS DA MADEIRA	42
TABELA 2-MASSA VOLÚMICA EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA PARA UM TEOR DE ÁGUA DE 12% [7]	43
TABELA 3-MASSA VOLÚMICA DOS QUATRO TIPOS DE MADEIRA	44
TABELA 4-PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA LAMELADA COLADA [32]	45
TABELA 5- CONDUTIVIDADE TÉRMICA EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA [7]	46
TABELA 6-CALOR ESPECÍFICO DA MADEIRA EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA [7]	47
TABELA 7-PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO S275 [4]	48
TABELA 8- FATOR DE MASSIVIDADE DAS LIGAÇÕES	67
TABELA 9-ESPESSURA DA PROTEÇÃO EM GESSO	70
TABELA 10-ESPESSURA DA PROTEÇÃO EM MADEIRA	70
TABELA 11-VELOCIDADE DE CARBONIZAÇÃO OBTIDA	85
TABELA 12-VELOCIDADE DE CARBONIZAÇÃO DE REFERÊNCIA [7]	86
TABELA 13-DIFERENTES DIÂMETROS DA LIGAÇÃO GL20H EXPOSTA AO FOGO	88
TABELA 14-DIFERENTES DIÂMETROS DA LIGAÇÃO GL20H APÓS 30 MIN DE EXPOSIÇÃO AO FOGO	89
TABELA 15-DIFERENTES MASSAS VOLÚMICAS DA LIGAÇÃO COM CAVILHAS DE DIÂMETRO 6 MM EXPOSTA AO FOGO	90
TABELA 16-DIFERENTES MASSAS VOLÚMICAS DA LIGAÇÃO COM CAVILHAS DE DIÂMETRO 6 MM APÓS 30 MIN DE EXPOSIÇÃO FOGO	90
TABELA 17- INFLUÊNCIA DA PROTEÇÃO NA LIGAÇÃO GL20H COM CAVILHA DE DIÂMETRO 6 MM EXPOSTA AO FOGO	91
TABELA 18-INFLUÊNCIA DA PROTEÇÃO NA LIGAÇÃO GL20H COM CAVILHA DE DIÂMETRO 6 MM APÓS 30 MIN DE EXPOSIÇÃO AO FOGO	92
TABELA 19-DIFERENTES MATERIAIS DE PROTEÇÃO DA LIGAÇÃO GL20H COM CAVILHA DE DIÂMETRO 6 MM APÓS 30 MIN DE EXPOSIÇÃO AO FOGO	92
TABELA 20-DIFERENTES MATERIAIS DE PROTEÇÃO DA LIGAÇÃO GL20H COM CAVILHA DE DIÂMETRO 6 MM APÓS 60 MIN DE EXPOSIÇÃO AO FOGO	93
TABELA 21-ÁBACO DO DIMENSIONAMENTO DA LIGAÇÕES S-W-S À TEMPERATURA AMBIENTE	108
TABELA 22-RESISTÊNCIA AO FOGO DAS LIGAÇÕES S-W-S	109

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	27
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO.....	27
1.2	OBJETIVOS.....	28
1.3	METODOLOGIA	28
1.4	ESTRUTURA	29
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	33
3	PROPRIEDADES DOS MATERIAIS	41
3.1	MADEIRA	41
3.1.1	PROPRIEDADES FÍSICAS	42
3.1.2	PROPRIEDADES MECÂNICAS	44
3.1.3	PROPRIEDADES TÉRMICAS	46
3.2	AÇO.....	48
3.2.1	PROPRIEDADES FÍSICAS	48
3.2.2	PROPRIEDADES MECÂNICAS	48
3.2.3	PROPRIEDADES TÉRMICAS	48
3.3	GESSO.....	50
3.3.1	PROPRIEDADES FÍSICAS	50
3.3.2	PROPRIEDADES MECÂNICAS	51
3.3.3	PROPRIEDADES TÉRMICAS	51
4	ANÁLISE TÉRMICA	55
4.1	CARBONIZAÇÃO	55
4.2	CURVA ISO 834.....	55
4.3	COMPORTAMENTO TÉRMICO DO GESSO.....	56
4.4	TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	56
4.4.1	CONDUÇÃO	57
4.4.2	CONVECÇÃO	57

4.4.3	RADIAÇÃO	58
5	DIMENSIONAMENTO DE UMA LIGAÇÃO S-W-S EM CORTE DUPLO COM CAVILHAS METÁLICAS.....	61
5.1	TEMPERATURA AMBIENTE.....	61
5.2	TEMPERATURAS ELEVADAS	64
5.2.1	EUROCÓDIGO 5-1-2.....	65
5.2.2	EUROCÓDIGO 3-1-2.....	66
6	MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS.....	75
6.1	SIMULAÇÃO NUMÉRICA.....	75
6.1.1	MATERIAIS.....	76
6.1.2	GEOMETRIA E MALHAS DE ELEMENTOS FINITOS.....	76
6.1.3	CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA.....	77
7	RESULTADOS	83
7.1	TEMPERATURA AMBIENTE.....	83
7.2	TEMPERATURAS ELEVADAS	84
8	CONCLUSÃO	97
8.1	TRABALHOS FUTUROS.....	98
9	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO.....	101
10	ANEXOS.....	107
10.1	DIMENSÕES DA LIGAÇÃO	107
10.2	DIMENSIONAMENTO DA LIGAÇÃO S-W-S À TEMPERATURA AMBIENTE.....	108
10.3	RESISTÊNCIA EM SITUAÇÃO DE FOGO DAS LIGAÇÕES S-W-S	109
10.4	TEMPERATURA NAS LIGAÇÕES	110
10.4.1	LIGAÇÕES DESPROTEGIDAS	110
10.4.2	PROTEÇÃO EM GESSO	113
10.4.3	PROTEÇÃO EM MADEIRA.....	117
10.5	GRÁFICOS DA EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA DURANTE 60 MIN.....	122
10.5.1	LIGAÇÕES DESPROTEGIDAS	122

10.5.2	PROTEÇÃO EM GESSO	124
10.5.3	PROTEÇÃO EM MADEIRA.....	126

INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

1.2 OBJETIVOS

1.3 METODOLOGIA

1.4 ESTRUTURA

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

No âmbito da dissertação do mestrado de construções mecânicas do Instituto Superior de Engenharia do Porto foi proposto que se desenvolvesse um estudo sobre a resistência ao fogo de ligações aço-madeira-aço, orientada pela Professora Doutora Elza Fonseca. A madeira está presente em diversos objetos do dia-a-dia como mobiliário, utensílios, decoração, mas quando se trata de um elemento estrutural que está sujeito a grandes esforços ou exposto a condições adversas, são colocados entraves na sua utilização. Contudo, nos países como a Noruega, Suécia, Canadá e Austrália a utilização da madeira na construção é bastante usual chegando a constituir cerca de 90% das habitações. A madeira apresenta propriedades que variam consoante a espécie de madeira e orientação das fibras, o que pode ser considerado fatores desfavoráveis para o cálculo de dimensionamento, no entanto possui uma boa relação entre resistência mecânica e massa volúmica e sua abundância na natureza, versatilidade de formas e dimensões e principalmente a preocupação em encontrar uma solução cada vez mais sustentável, faz da madeira um excelente material e uma forte alternativa de construção [1].

A possibilidade de ocorrência de incêndio é preocupante visto que a madeira é um material inflamável. Todavia, esta possui uma boa resistência ao fogo pois ao arder, cria uma camada carbonizada que protege o interior da madeira retardando o aquecimento e salvaguardando a sua função estrutural [2].

As ligações são parte fundamental da estrutura pois são responsáveis pela sustentação e estabilidade da mesma. No caso da madeira, existem várias opções de ligações e nesta dissertação serão abordadas ligações S-W-S com cavilhas metálicas. As ligações serão estudadas sob a ação do fogo para verificar a melhor solução a temperaturas elevadas, tendo em conta o efeito da carbonização e a verificação da influência do aço na duração da vida útil da ligação. As ligações S-W-S constituem um desafio pois não constam na literatura muitos estudos numéricos nesta área nem informação muito clara sobre o dimensionamento em situação de fogo e tendo em conta que as ligações são zonas críticas da estrutura, é necessário obter mais informações para realizar um correto dimensionamento e assim garantir uma boa sustentação e segurança.

Assim, há necessidade de compreender como este tipo de ligações se comportam em situações desfavoráveis para proceder a um método de projeto efetivo e estimular a utilização da madeira em diversos âmbitos estruturais, dando a conhecer o seu potencial enquanto material de construção com excelentes propriedades mecânicas e térmicas. A preocupação com o meio ambiente tem sido uma questão cada vez mais relevante e a madeira, em comparação com os materiais como o aço, alumínio e betão, é bastante

sustentável, pois de todos os materiais referidos, a madeira é o único reciclável, renovável, biodegradável e a sua transformação despende de menos energia [3].

1.2 OBJETIVOS

Esta dissertação tem como objetivos o dimensionamento de uma ligação S-W-S em corte duplo com cavilhas metálicas à temperatura ambiente e a temperaturas elevadas, segundo as normas europeias de projeto de estruturas de madeira e estruturas de aço. As normas europeias que serão utilizadas são:

- Eurocódigo 3 – Projeto de estruturas de aço – Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios [4];
- Eurocódigo 3 – Projeto de estruturas de aço – Parte 1-2: Verificação de resistência ao fogo [5];
- Eurocódigo 5 – Projeto de estruturas em madeira – Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios [6];
- Eurocódigo 5 – Projeto de estruturas em madeira – Parte 1-2: Verificação de resistência ao fogo [7].

O dimensionamento à temperatura ambiente tem como objetivo obter a geometria da ligação e o número de cavilhas necessárias para os diferentes tipos de ligações. As variantes são os diâmetros das cavilhas, o tipo de madeira e a carga aplicada. Após o dimensionamento, será gerado um ábaco com as informações resumidas sobre as características geométricas das ligações. Quanto ao dimensionamento a temperaturas elevadas, será verificada a resistência ao fogo das ligações e determinada a espessura de materiais de proteção necessária para a sua segurança. Será realizado um estudo numérico com base no Método de Elementos Finitos, para analisar a resistência ao fogo das ligações com e sem proteção, e calcular a velocidade de carbonização das ligações desprotegidas, comparando-a com a estabelecida pelo Eurocódigo 5-1-2 [7].

1.3 METODOLOGIA

A metodologia adotada para elaboração da dissertação baseou-se na pesquisa bibliográfica sobre temas relacionados com o propósito de conhecer o comportamento da madeira e do aço quando submetidos a diferentes solicitações, com propriedades e geometrias distintas, e sob a ação do fogo. A análise da pesquisa contribuiu também para conhecer as ligações do tipo W-W-W e W-S-W, quais as melhores opções de materiais de proteção e como estes atuam em contacto com o fogo. Quanto ao dimensionamento da ligação à temperatura ambiente, este seguiu as regras ditadas pelo Eurocódigo 5-1-1 [6] e com base em equações simplificadas, obteve-se o número de cavilhas para cada tipo de ligação e quais os espaçamentos a cumprir no projeto. No dimensionamento a temperaturas elevadas, seguiram-se as informações fornecidas pelo Eurocódigo 5-1-2 [7] para a determinação da espessura da proteção que, por sua vez, sugere que se verifique o Eurocódigo 3-1-2 [5] para informações mais detalhadas.

Após obter as geometrias de todas as ligações, realizou-se um estudo numérico por Método de Elementos Finitos utilizando o programa *ANSYS Student 2019 R3* [8] para realizar a análise térmica em regime transiente não-linear material para as ligações em estudo, com e sem proteção.

1.4 ESTRUTURA

A dissertação é composta por oito capítulos, nomeadamente:

1. Introdução;
2. Revisão bibliográfica;
3. Propriedades dos materiais;
4. Análise térmica;
5. Dimensionamento de uma ligação S-W-S em corte duplo com cavilhas metálicas;
6. Método de Elementos Finitos;
7. Resultados;
8. Conclusões.

A pesquisa bibliográfica contém informação recolhida de livros, artigos e trabalhos realizados no âmbito da resistência ao fogo, ligações, carbonização e materiais de proteção. Incluí estudos realizados por diferentes autores e quais as conclusões retiradas. Ao realizar a pesquisa bibliográfica, os conceitos são mais facilmente assimilados para melhor interpretação e realização do desenvolvimento da dissertação. As propriedades dos materiais são imprescindíveis para conhecer os materiais que vão ser estudados e prever o seu comportamento, de modo a interpretar de forma correta os resultados obtidos. Os materiais estudados neste capítulo são a madeira, o aço e o gesso, cujas propriedades físicas, mecânicas e térmicas se encontram presentes no capítulo em questão. A massa volúmica, a condutividade térmica e o calor específico são em função da temperatura, sofrendo por isso uma degradação das propriedades quando expostos ao fogo. Esses valores serão introduzidos no programa *ANSYS Student 2019 R3* [8] tratando-se assim de uma análise não linear do material.

No tema sobre a análise térmica encontram-se descritas noções como a carbonização, a curva ISO 834 [9] e a transferência de calor, incluindo a condução, convecção e radiação. A compreensão destes conceitos é importante para um bom entendimento dos fenómenos térmicos a ocorrer nas ligações quando expostas ao fogo.

No capítulo do dimensionamento de uma ligação S-W-S em corte duplo com cavilhas metálicas estão descritos todos os procedimentos de cálculo para o dimensionamento das ligações tanto à temperatura ambiente como a elevadas temperaturas.

O método de elementos finitos é uma ferramenta essencial para a resolução de problemas complexos, como é o caso da análise térmica das ligações expostas ao fogo. Deste modo, é possível prever o comportamento da ligação em função do tempo e da temperatura e proceder à análise em diferentes fases.

Nos resultados, encontram-se as informações obtidas do dimensionamento à temperatura ambiente, e o número de cavilhas necessárias. Em relação ao dimensionamento a elevadas temperaturas é apresentada a velocidade de carbonização das ligações desprotegidas, imagens e gráficos relativos às ligações estudadas e quais os parâmetros que mais influenciam na resistência ao fogo.

Nas conclusões serão expostos quais os objetivos que foram devidamente cumpridos, será feita uma análise sobre os resultados obtidos e trabalhos futuros.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A madeira é o material de construção mais antigo utilizado pelo Homem. Isto deve-se ao facto de ser um material de fácil acesso, proporcionando assim a sua utilização para a construção dos primeiros abrigos por volta dos 120000-40000 A.C. Estes abrigos eram ramos entrelaçados dispostos em círculo e cobertos com relva. Entre 4500-3000 A.C. surgiram as primeiras casas de madeira construídas por agricultores cuja durabilidade não ultrapassava os 20 anos, pois os suportes e as ligações eram os pontos fracos dessas estruturas. Entre os séc. XIII a XV, começaram a surgir outros materiais de construção, como a pedra e o barro. Por outro lado, as uniões entre os diversos elementos passam a ter um papel relevante e fundamental na estrutura, começando assim a surgir diferentes técnicas de ligações mecânicas. Nessa altura, consistiam em sobrepor toros de madeira na horizontal em que as extremidades continham um entalhe, fazendo com que os diferentes constituintes ficassem unidos entre si [1].

Em 1997, M. Tavakkol-khah e W. Klingsch propuseram uma simulação das estruturas em madeira, em caso de incêndio, através do método das diferenças finitas. Este método permitiu desenvolver um programa de computador com o objetivo de analisar termicamente as estruturas, como colunas e vigas expostas ao fogo. Este estudo foi também efetuado com cargas de compressão a atuar nas estruturas referidas. O modelo criado considerou como dados de entrada, fatores importantes como, massa volúmica, teor de água, geometria, carga térmica e mecânica, entre outros imprescindíveis para a caracterização da estrutura. Comparando os resultados com os obtidos experimentalmente, concluíram que o programa prevê com rigor o comportamento das estruturas expostas ao fogo [10].

Em 1998, Elza Fonseca e Paulo Vila Real estudaram o comportamento termo-elastoplástico de componentes metálicos através de um programa desenvolvido de elementos finitos FEMSEF – “*Finite Element Modelling of Structures Exposed to Fire*”. O caso de estudo utilizado foi um tubo cilindro de aço submetido à ação do fogo tendo como base a curva de incêndio padrão ISO 834 [9]. Seguindo as considerações do Eurocódigo 3-1-2 [5], foram contabilizadas as variações das propriedades mecânicas e térmicas consoante a variação da temperatura. Através do programa desenvolvido, foi possível estudar diferentes malhas de elementos finitos e como estas influenciam a determinação do campo de tensões. Os resultados obtidos para a resolução do problema termo-mecânico, em regime transiente não-linear, com o programa FEMSEF foram muito semelhantes aos obtidos com o programa comercial COSMOSM, o que permitiu concluir que os resultados são bastante precisos. Com as propriedades do aço

em função da temperatura e as restantes condições fronteira, foi possível obter as tensões térmicas instaladas na geometria [11].

Em 2006, Karine Laplanche, Dhionis Dhima e Patrick Racher focaram-se na análise termo-mecânica de ligações sob ação do fogo usando um modelo 3D de elementos finitos. Os casos de estudo escolhidos pelos autores foram as ligações W-W-W e W-S-W ligados por cavilhas metálicas. O modelo utilizado teve em conta a variação das propriedades em função do aumento da temperatura, como também a plasticidade da madeira no contorno do elemento de ligação. Depois de serem efetuados os testes experimentais, verificaram uma diferença inferior a 10% em relação aos valores previstos pelos modelos mecânicos e termo-mecânicos na obtenção da resistência ao fogo da ligação. Os resultados obtidos mostram a influência da espessura da madeira e dos diâmetros dos ligadores na resistência ao fogo das ligações [12].

Em 2007, Carla Austruy utilizou as equações de Johansen para estudar a possibilidade de prever a resistência ao fogo de ligações de madeira aparafusadas. As temperaturas foram obtidas com base numa análise experimental e numérica, de modo a obter uma comparação de valores. A análise numérica possibilitou ainda um estudo mais aprofundado das zonas de ligação em relação ao aquecimento junto aos parafusos. Apesar dos valores obtidos numericamente serem aceitáveis, ainda se notam algumas discrepâncias quando comparados com os resultados experimentais, sendo por isso aconselhado efetuar mais testes, de modo a complementar os resultados numéricos [13].

Em 2010, Andrea Frangi *et al.* realizaram um estudo experimental e numérico do comportamento de painéis de gesso sob a ação do fogo. Sendo um material de proteção, foi necessário realizar estudos que verifiquem como este reage em situação de incêndio e se as funções de proteção não ficam comprometidas. A análise dos resultados permitiu o desenvolvimento de um modelo de dimensionamento para a verificação do isolamento e da integridade da estrutura em madeira leve. O estudo concluiu que diferentes tipos de gesso apresentam desempenhos semelhantes e que para além disso, o reforço do núcleo não contribuiu para uma melhoria significativa das propriedades térmicas, mas reforçaram as propriedades mecânicas do material como a fissuração, contração, degradação, entre outros. A camada de suporte dos painéis de gesso tem grande influência no seu comportamento térmico. Usando como referência a curva de incêndio padrão ISO 834 [9] efetuaram uma análise através do MEF onde obtiveram novas equações para calcular o nível de proteção e de isolamento do gesso [14].

Em 2010, Paulo Cachim e Jean-Marc Franssen propuseram uma melhoria das equações já apresentadas no Eurocódigo 5-1-2 [7], que consistiu na utilização de uma nova expressão da taxa de carbonização, função da massa volúmica e da permeabilidade da madeira. O Eurocódigo 5-1-2 [7] possui algumas fórmulas para calcular a resistência ao fogo de estruturas de madeira. No entanto, as equações existentes para o cálculo da

taxa de carbonização e do modelo de condutividade são simplistas relativamente aos diferentes fatores que influenciam o material, tais como, a massa volúmica da madeira, a permeabilidade, a composição, a humidade e a direção do fogo. Aos 300°C, começa a ser contabilizado o avanço da carbonização e a madeira perde a sua capacidade de carga, pondo em causa a segurança estrutural. Deste modo foi obtida uma previsão mais realista da resistência ao fogo de estruturas em madeira [15].

Em 2010, Andrea Frangi, Carsten Erchinger e Mario Fontana realizaram um estudo experimental de ligações aço-madeira com pregos e cavilhas sob a ação do fogo. Este artigo apresenta a análise da influência de diferentes tipos de ligação e como resistem ao fogo, utilizando a curva ISO 834 [9]. As ligações que foram estudadas são para múltiplo corte com cavilhas metálicas e chapas aço no interior, e com chapas externas de aço com pregos. Para cada tipo de ligação foram realizados vários exemplos com diferentes dimensões de modo a verificar a melhor estratégia de dimensionamento. Numa primeira fase, foi verificada a resistência das diferentes ligações dimensionadas à temperatura ambiente, verificando que as ligações com chapas de aço no interior resistiam ao fogo cerca de 30 min e com proteção de madeira ou gesso, a resistência aumentava para 60 min. Relativamente ao dimensionamento para elevadas temperaturas, as ligações de chapas externas de aço somente foram asseguradas por 12 min e ao proteger a chapa externa com tinta intumescente, a ligação resistiu 30 min ao fogo [16].

Em 2011, E. Fonseca, D. Coelho e L. Barreira propuseram um estudo experimental e numérico para determinar a camada carbonizada da madeira de pinho sujeita a elevadas temperaturas. Na análise experimental foi utilizado uma fonte de calor gerada por resistências cerâmicas para imposição das elevadas temperaturas. O método numérico teve como objetivo comparar os resultados obtidos experimentalmente e concluíram que estes apresentam uma boa concordância. Verificou-se que as elevadas temperaturas reduzem a secção transversal bem como a sua rigidez [17].

Em 2011, Lei Peng *et al.* usaram o método de elementos finitos para efetuar uma análise do desempenho térmico de ligações aparafusadas W-S-W expostas ao fogo. Começaram por analisar a transferência de calor num modelo 3D da ligação exposta ao fogo, com base na curva ISO 834 [9]. Usando propriedades adequadas da madeira a diferentes temperaturas e com o auxílio de método de elementos finitos, foi possível obter bons resultados em comparação com os testes ao fogo efetuados. Concluíram que as ligações W-S-W têm um comportamento ao fogo semelhante às ligações W-W-W devido às faces externas serem as mais expostas, e por serem de madeira. A espessura da madeira tem uma maior influência na capacidade de carga da ligação sob ação do fogo do que o diâmetro dos ligadores. A fórmula apresentada pode ser uma alternativa para o cálculo da resistência ao fogo de ligações W-S-W, tendo em conta a carga aplicada, o diâmetro do ligador e a espessura da madeira [18].

Em 2011, Lei Peng *et al.* fizeram uma análise de alguns modelos de cálculo já existentes baseados em dados relativos à resistência ao fogo de ligações em corte duplo e foram criadas correlações para essas ligações. As correlações permitiram verificar a resistência ao fogo de ligações W-W-W, W-S-W e S-W-S não protegidas usando parafusos ou cavilhas, apenas tendo em conta a carga aplicada, a espessura da madeira e o diâmetro da ligação. Comparando com os resultados experimentais, verificaram que o método utilizado traduz uma precisão de 15% nas ligações W-W-W e W-S-W e de 10% na ligação S-W-S. Concluíram que, para uma mesma ligação, a escolha de cavilhas em detrimento do uso de parafusos traduz uma maior resistência ao fogo [19].

Em 2012, E. Fonseca, D. Coelho e L. Barreira tinham como objetivo identificar métodos de cálculo analítico capazes de traduzir a tensão instalada em vigas de madeira simplesmente apoiadas sob carga mecânica e térmica. Para o estudo foram utilizadas duas espécies de madeira com secção transversal diferentes. Através do MEF, foi possível determinarem a resistência ao fogo, a carbonização na camada mais profunda e a taxa de carbonização das diferentes madeiras. Para caracterizar o estado de tensão nas vigas, os elementos foram sujeitos a uma carga externa concentrada ou distribuída e considerada a redução da secção, influenciada pelas ações térmicas. Concluíram que, através do MEF, a secção em madeira *Fir subalpine* apresenta maior resistência ao fogo que na madeira *Redwood*, e que as temperaturas elevadas provocam redução da secção, diminuição da força, diminuição da rigidez na zona termicamente afetada e que na zona carbonizada a tensão instalada diminui. Quando a viga está exposta ao fogo em 3 faces, o eixo neutro diverge da posição original, no entanto mantém-se na mesma posição quando exposta nas 4 faces. Neste trabalho foram apresentadas fórmulas que permitiram avaliar a resistência ao fogo e a área resistente em vigas de madeira simplesmente apoiadas. Estas fórmulas podem ser usadas para verificar a dimensão da secção que garanta um tempo de resistência ao fogo, sem requerer sistemas especiais de proteção [20].

Em 2012, Azree Mydin propôs-se estudar as propriedades térmicas de painéis de gesso quando expostos a elevadas temperaturas e até mesmo em situação de fogo. O estudo focou-se em analisar os resultados obtidos por diferentes investigadores ao longo dos anos, com diferentes propriedades térmicas, como o calor específico, a condutividade térmica, a massa volúmica, entre outros, em função da temperatura. Concluiu que apesar da extensa pesquisa sobre o tema, os resultados ainda são muitos discrepantes. As propriedades térmicas podiam ser implementadas em modelos numéricos, de maneira a que os fabricantes possam obter resultados para novos produtos sem a necessidade de realizar testes experimentais ao fogo, por serem dispendiosos [21].

Em 2012, Filipe Ferreira apresentou alguns casos de estudo em que foram necessários recuperar partes da cobertura ou integral. Existem edifícios antigos, cujas coberturas foram construídas em madeira, e que possuem um grande valor patrimonial e cultural que necessita ser preservado. No entanto, com o passar dos anos, a estrutura vai-se

tornando frágil, principalmente quando o clima interfere diretamente com partes estruturais em madeira. Sendo um material suscetível à humidade, a madeira tende a deteriorar-se devido ao apodrecimento. Por esse motivo, é necessário fazer a recuperação parcial ou total das coberturas, consoante a gravidade dos casos. Quando a madeira apenas apresenta defeitos à superfície aplicam-se tratamentos como o desbaste e a pulverização com produtos adequados na restauração. No caso da Igreja Matriz de Caminha, uma determinada parte da estrutura construída em betão, acabou por ser substituída por madeira, por ser uma zona que interfere pouco estruturalmente. Outros edifícios também foram recuperados como a Sé do Porto, Casa do Coro da Sé do Porto e de um edifício localizado no “Parque da Boavista” em Braga [22].

Em 2013, E. Fonseca *et al.* realizaram uma análise numérica térmica de perfis híbridos de madeira-aço quando submetidas ao fogo tendo em conta as propriedades não lineares dos materiais, através do programa ANSYS. Utilizaram dois modelos para comparar os resultados obtidos. O primeiro foi totalmente feito em aço e o segundo com aço e madeira no exterior. Em ambos, a estrutura foi submetida à ação do fogo em 3 faces e foram analisados 4 pontos ao longo da estrutura. Os resultados mostraram que no primeiro caso (só aço) o perfil no interior aquece rapidamente ao fim de uma hora de exposição ao fogo. Isto deve-se ao facto de o aço ser um bom condutor de calor. No perfil híbrido, o seu interior encontra-se a uma temperatura menor. Apesar da madeira ser um material vulnerável sob a ação do fogo por ser inflamável, também possui propriedades isolantes mantendo o perfil em aço no seu interior a uma temperatura mais baixa. Concluíram que os perfis híbridos de madeira-aço demonstraram um melhor desempenho quando comparados com perfis simples em aço [23].

Em 2014, Calabrese *et al.* focaram-se em avaliar a metodologia utilizada para condutividade térmica equivalente da tinta intumescente quando sujeita à ação do calor proveniente de um aparelho próprio para o efeito. A tinta intumescente é bastante utilizada como proteção passiva contra o fogo e é constituída por componentes inorgânicos presentes numa matriz polimérica que expande quando exposta a elevadas temperaturas. É no processo de expansão que as propriedades térmicas são difíceis de determinar. Através da abordagem inversa da condução de calor obtiveram a condutividade térmica equivalente a partir dos valores da temperatura medidos em determinados pontos da camada de tinta durante a expansão. Concluíram assim que a condutividade equivalente depende bastante com temperatura e que a espessura inicial da camada de tinta praticamente não afeta a condutividade térmica do material [24].

Em 2016, Cristiano Loss, Maurizio Piazza e Riccardo Zandonini apresentaram um artigo que tinha como principal objetivo o desenvolvimento de edifícios modulares pré-fabricados com múltiplos andares utilizando ligações híbridas de madeira e aço. Segundo a pesquisa feita, verificaram que estas ligações são mais sustentáveis e uma solução leve de construção anti-sísmica. Foram realizados testes experimentais em diferentes tipos de ligações, bem como uma análise de elementos finitos em

componentes estruturais. Foi desenvolvido também um protótipo com ligações industrializadas de componentes de parede e piso, sujeitos ao corte [25].

Em 2016, Antonio Bilotta, Donatella de Silva e Emidio Nigro realizaram ensaios para testar a proteção do aço através de tinta intumescente em diferentes circunstâncias. A tinta intumescente é utilizada quando se pretende proteger do fogo estruturas em que a estética é um fator a preservar. Quando a tinta intumescente está exposta a elevadas temperaturas ou ao fogo, o seu volume expande e a massa volúmica diminui de modo a formar uma barreira capaz de retardar a taxa de transferência de calor e a degradação das propriedades do aço. Foram analisadas três condições distintas: a primeira consistiu em verificar a resistência de uma estrutura com tinta intumescente com trinta anos, a segunda condição era substituir a tinta antiga e aplicar uma camada nova e por fim reaplicar a tinta sobre a já existente. Os resultados obtidos mostraram que a tinta intumescente com trinta anos apresentou um fraco desempenho, em relação aos restantes ensaios. No entanto, tanto a tinta substituída como a aplicada sobre a mais antiga apresentaram resultados semelhantes. Concluíram também que as maiores espessuras de tinta correspondiam a uma força de ligação menor [26].

Em 2019, Pedro Leite, Lino Silva e Elza Fonseca realizaram um estudo para verificar a resistência ao fogo de ligações W-W-W protegidos por diferentes tipos de gesso. Para observar o efeito do gesso de tipo A, H ou F nas ligações em madeira de diferentes massas volúmicas, utilizaram modelos numéricos de modo a prever a resistência ao fogo. Ambos os gessos resistiram a 60 min de exposição ao fogo, no entanto, o gesso do tipo A foi dimensionado para 23 mm enquanto que o gesso do tipo F apresentava uma espessura de 18 mm. Concluíram assim que o gesso é um bom material isolante e é capaz de reduzir bastante a camada carbonizada quando comparada com ligações desprotegidas [27].

Em 2019, Lino Silva, Pedro Leite e Elza Fonseca estudaram o efeito da massa volúmica nas ligações W-S-W com chapa interna de aço e com proteção passiva contra o fogo. O principal objetivo deste artigo é verificar o comportamento da ligação na ausência de qualquer tipo de material de proteção e compará-lo com o efeito da proteção do gesso. Com o auxílio do Eurocódigo 5-1-1 [6] foi possível dimensionar a ligação, tendo em conta diferentes massas volúmicas correspondentes às espécies de *glulam* GL20h, GL24h e GL32h. Em conclusão, verificaram que a propagação do calor e a evolução da carbonização é maior na ligação com menor massa volúmica. Pelo facto de a ligação conter elementos metálicos tais como as cavilhas e a chapa interna, estas promovem um aquecimento no interior da ligação mesmo depois da exposição ao fogo. Assim sendo, a proteção da ligação com um material isolante como o gesso é necessária para garantir uma maior resistência ao fogo [28].

PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

3.1 MADEIRA

3.2 AÇO

3.3 GESSO

3 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

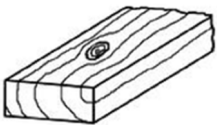
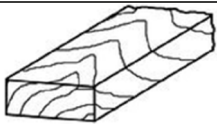
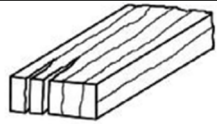
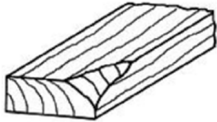
3.1 MADEIRA

A madeira é um material do conhecimento comum e durante muitos séculos foi exaustivamente utilizado com diferentes propósitos. Uma das grandes evoluções desse material foi a criação das primeiras ligações em construções. Inicialmente, as ligações consistiam em amarrar lianas nas extremidades e numa fase mais avançada, tiras em pele. Com domínio dos metais, começaram a surgir ferramentas próprias para trabalhar a madeira capazes de criar ligações por entalhes. Por fim, desenvolveu-se uma técnica de ligação, a partir de elementos metálicos como o prego e posteriormente o parafuso que continuam a ser utilizados até aos dias de hoje [29]. No início do séc. XXI surgiram novos materiais derivados da madeira, em sistemas construtivos mais atualizados com regras de dimensionamento próprias, que fizeram despoletar o crescimento da utilização deste tipo de produtos na construção. Atualmente, existe uma grande variedade de subprodutos, com propriedades bastante atrativas e com versatilidade de formas e dimensões. No entanto, a sua durabilidade é um fator que se pretende ampliar e tendo em vista essa preocupação, é importante a utilização de métodos de preservação e tratamento [30].

A madeira é um material natural, orgânico e celular que se apresenta na natureza no estado sólido. Sendo um composto natural, é constituído por uma complexa combinação de celulose, hemicelulose, lenhina e extratos e as suas células são longas e alinhadas no sentido axial do tronco. Estudos recentes afirmam que as condições em que a árvore cresce e a sua localização, afetam diretamente nas propriedades da madeira. A variação das características e da sua estrutura celular, influenciam nas propriedades físicas e mecânicas, mesmo dentro da mesma espécie, logo, espécies diferentes são utilizadas para um determinado propósito e no qual apresentam melhor desempenho. Madeiras mais resistentes e duras são usadas para a construção de barcos, pontes, estruturas, entre outros, enquanto que madeiras menos resistentes são comumente utilizadas para fabricar peças de mobiliário, por exemplo. Comercialmente, este material divide-se em duas grandes categorias conhecidas por madeiras estruturais (angiospérmicas) e madeiras macias (gimnospérmicas). No entanto, estas designações podem eventualmente gerar alguma confusão visto que existem madeiras macias com uma dureza superior às madeiras estruturais e vice-versa [1][2]. O pinheiro, o abeto e o cedro são alguns exemplos de madeiras macias utilizadas na indústria. Quanto às madeiras estruturais, são normalmente de carvalho, castanheiro, faia, eucalipto, entre outras espécies tropicais [30].

Como um material natural, a madeira é suscetível a ter defeitos que correspondem a uma diminuição da resistência mecânica e interferem negativamente na estética da peça. Alguns dos defeitos mais importantes encontram-se na Tabela 1 com a sua respetiva ilustração e definição.

Tabela 1-Defeitos da madeira

Defeito	Imagem [31]	Definição [30]
Nós		Base de um ramo inserida no tronco da árvore cujas fibras encontram-se aproximadamente na perpendicular contribuindo para a diminuição da resistência mecânica.
Fio inclinado		Ângulo entre as fibras da madeira e a direção longitudinal da peça. Pode ter origem no crescimento inadequado ou serragem oblíqua.
Fendas		Aberturas no material lenhoso. Pode ser causado pela secagem da madeira ou pelo descolamento das camadas.
Descaio		Falha de material na superfície da peça causada por erro no processo de fabrico. Aumenta a dificuldade de fixação, apoio ou colagem.

A degradação da madeira causada por fatores químicos e físicos é mais uma das preocupações da utilização deste material. Os agentes atmosféricos como incidência frequente de luz solar e precipitação, a exposição ao fogo, os agentes biológicos como a presença de fungos, térmitas e outras espécies de insetos são as principais causas da deterioração da madeira. No entanto, existem formas de colmatar este problema nomeadamente a utilização de produtos químicos de proteção adequados ao problema em questão [30].

3.1.1 PROPRIEDADES FÍSICAS

A madeira é um material higroscópico, isto é, o teor de água presente na madeira varia com a humidade relativa e temperatura do ar em que se encontra. Os fenómenos de absorção e dessorção deixam de ocorrer quando é atingido o equilíbrio entre a madeira e o meio [30]. O teor de água é a relação entre a massa de água existente na madeira sobre a massa da madeira seca. O teor de água afeta outras propriedades como peso, contração, resistência e quando este atinge o ponto de saturação da fibra, as alterações nas propriedades físicas e mecânicas deixam de ocorrer. A resistência mecânica e a elasticidade diminuem com o aumento da humidade e isto deve-se ao facto de quando a água penetra nas paredes das células, enfraquecem as ligações de hidrogénio que mantêm a união das células. Os fatores que influenciam diretamente na massa da madeira são a massa volúmica e o teor de água. A massa volúmica é bastante relevante tendo em conta que está relacionada com a maioria das propriedades mecânicas.

Apesar da massa volúmica variar de espécie para espécie, não contabilizando a presença de água, pode-se considerar um valor entre 320 e 720 kg.m⁻³. No entanto, a água presente na madeira não pode ser ignorada pois representa uma parte significativa da sua massa. Contudo, o teor de água pode ter diferentes valores entre espécies ou dentro da mesma. Uma forma de colmatar esta discrepância é utilizar a densidade relativa. Esta propriedade permite comparar as espécies de madeira de forma uniformizada através do rácio entre a massa volúmica da madeira seca e massa volúmica da água a 4,4°C considerando um volume com um determinado teor de água [1][2]. Segundo o Eurocódigo 5-1-2 [7], a massa volúmica em função da temperatura da madeira com 12% de teor de água (ω), encontra-se na Tabela 2.

Tabela 2-Massa volúmica em função da temperatura para um teor de água de 12% [7]

Temperatura [°C]	Massa volúmica [kg.m ⁻³]
20	1+ ω
99	1+ ω
99	1+ ω
120	1
120	1
200	1
250	0,93
300	0,76
350	0,52
400	0,38
600	0,28
800	0,26
1200	0

A massa volúmica varia em função da temperatura. Numa primeira fase, a madeira é afetada pela presença da humidade, daí o incremento do teor de água de 12% até aproximadamente aos 100°C, ponto de ebulição da água. Entretanto, esta estabiliza no valor de referência e volta a sofrer alterações quando se aproxima dos 300°C, temperatura à qual a madeira começa a carbonizar.

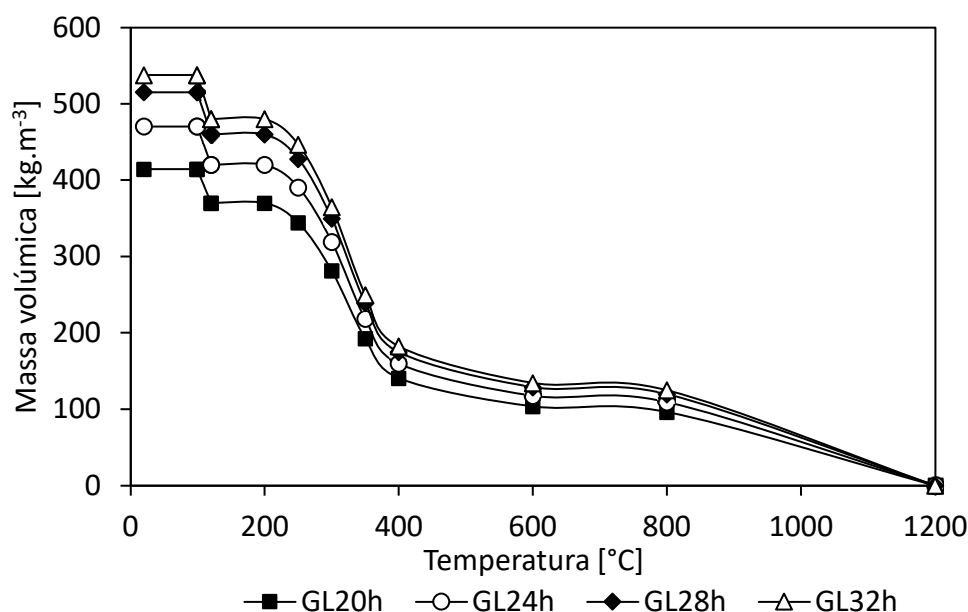
Neste trabalho, efetua-se o estudo de quatro tipos de madeira lamelada colada homogénea diferentes para uma melhor análise de resultados e verificação da sua influência na resistência das ligações. Assim, os quatro tipos de madeira selecionados foram a GL20h, GL24h, GL28h e GL32h com uma massa volúmica de 370, 420, 460 e 480 kg.m⁻³ respetivamente.

Através dos valores presentes na Tabela 2, foram calculadas as massas volúmicas para os diferentes tipos de madeira em estudo, em função da temperatura, como está representado na Tabela 3.

Tabela 3-Massa volúmica dos quatro tipos de madeira

Temperatura [°C]	GL20h	GL24h	GL28h	GL32h
20	414,4	470,4	515,2	537,6
99	414,4	470,4	515,2	537,6
120	370	420	460	480
200	370	420	460	480
250	344,1	390,6	427,8	446,4
300	281,2	319,2	349,6	364,8
350	192,4	218,4	239,2	249,6
400	140,6	159,6	174,8	182,4
600	103,6	117,6	128,8	134,4
800	96,2	109,2	119,6	124,8
1200	0	0	0	0

A partir dos valores obtidos da Tabela 3, o gráfico com a relação entre a massa volúmica e a temperatura está representada na Figura 1.



3.1.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS

A madeira é considerada um material ortotrópico, ou seja, possui propriedades mecânicas distintas na direção dos três eixos. O eixo longitudinal é paralelo à direção das fibras e é essa direção que apresenta maior resistência mecânica. Sendo a madeira um material natural e não isento de defeitos, não é possível garantir que as propriedades não variem ao longo da peça, podendo apresentar zonas com mais resistência, dureza e rigidez como também zonas mais frágeis e menos resistentes [2]. A Figura 2 representa a ortotropia da madeira (fibras).

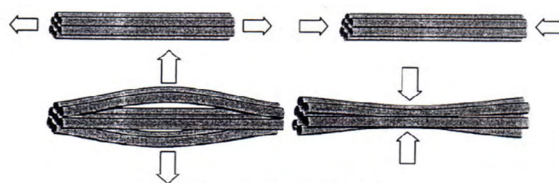


Figura 2-Ortotropia da madeira [1]

O tipo de madeira que irá ser estudado é a madeira lamelada colada e o seu fabrico consiste em laminar a madeira e secá-la de forma controlada e de seguida prosseguir para a adesão de tiras individuais com a mesma orientação das fibras. Este produto pode ser fabricado em diferentes formas e dimensões, obtendo até uma maior resistência e rigidez que na madeira sólida estrutural. No entanto, a rigidez varia com o ângulo entre a carga e a direção do grão, teor de água e a duração do carregamento. A madeira possui também uma boa relação entre resistência mecânica e o peso, chegando a ser superior à do aço. Este material é bastante utilizado no fabrico de vigas, pórticos, coberturas comuns e em forma de arco [1]. A designação *GLxxh* significa que é uma madeira lamelada colada (*glulam*), o número representa o valor da resistência à flexão e a letra *h* simboliza que a madeira é homogénea, ou seja, todas as camadas são da mesma classe de resistência. No caso de ser a letra *c*, este material apresenta camadas combinadas, logo possuem camadas com diferentes classes de resistência. Na Tabela 4 estão presentes as propriedades mecânicas da madeira lamelada colada. Valores característicos da resistência e rigidez estão em $N.mm^{-2}$ e da massa volúmica em $kg.m^{-3}$ [32].

Tabela 4-Propriedades mecânicas da madeira lamelada colada [32]

Designação	Simbologia	GL20h	GL24h	GL28h	GL32h
Resist. flexão	$f_{m,g,k}$	20	24	28	32
Resist. tração paralela à fibra	$f_{t,0,g,k}$	16	19,2	22,3	25,6
Resist. tração perpendicular a fibra	$f_{t,90,g,k}$			0,5	
Resist. compressão paralela à fibra	$f_{c,0,g,k}$	20	24	28	32
Resist. compressão perpendicular à fibra	$f_{c,90,g,k}$			2,5	
Resist. Corte	$f_{v,g,k}$			3,5	
Módulo elasticidade paralelo à fibra	$E_{0,g,médio}$	8400	11500	12600	14200
	$E_{0,g,0,05}$	7000	9600	1 500	11800
Módulo de elasticidade perpendicular a fibra	$E_{90,g,médio}$			300	
	$E_{90,g,0,05}$			250	
Módulo de distorção	$G_{g,médio}$			650	
	$G_{g,0,05}$			540	
Massa volúmica	$\rho_{g,k}$	340	385	425	440
	$\rho_{g,médio}$	370	420	460	480

3.1.3 PROPRIEDADES TÉRMICAS

A condutividade das madeiras mais comuns é muito inferior à dos metais com os quais fazem ligação. A madeira macia serrada com 12% de teor de água tem uma condutividade térmica compreendida entre 0,1 e 1,4 $W.m^{-1}K^{-1}$, enquanto o aço apresenta uma condutividade muito superior. Quanto maior a massa volúmica, teor de água, teor de extratos e temperatura, maior será a condutividade. Já o calor específico não varia com a massa volúmica nem com espécie, no entanto aumenta com temperatura e teor de água. Tal como a condutividade, a difusidade térmica tende a ser muito menor na madeira do que dos metais. Relativamente ao coeficiente de expansão térmica, sabe-se que a madeira aumenta o seu volume com o incremento da temperatura [2]. O valor da emissividade da madeira é de 0,8 [7]. A Tabela 5 apresenta a condutividade térmica da madeira em função da temperatura segundo o Eurocódigo 5-1-2 [7].

Tabela 5- Condutividade térmica em função da temperatura [7]

Temperatura [°C]	Condutividade térmica [$W.m^{-1}K^{-1}$]
20	0,12
200	0,15
350	0,07
500	0,09
800	0,35
1200	1,5

A partir dos valores obtidos da Tabela 5, o gráfico com a condutividade térmica da madeira em função da temperatura está representado na Figura 3.

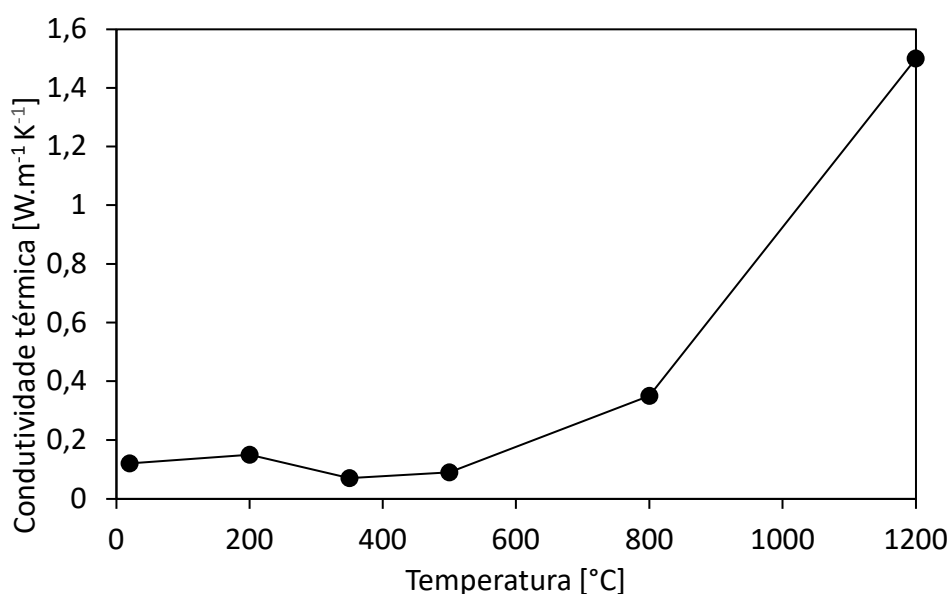


Figura 3-Condutividade térmica da madeira em função da temperatura [7]

A Tabela 6 apresenta os valores do calor específico da madeira em função da temperatura segundo o Eurocódigo 5-1-2 [7].

Tabela 6-Calor específico da madeira em função da temperatura [7]

Temperatura [°C]	Calor específico [kJ.kg ⁻¹ K ⁻¹]
20	1,53
99	1,77
99	13,6
120	13,5
120	2,12
200	2
250	1,62
300	0,71
350	0,85
400	1
600	1,4
800	1,65
1200	1,65

A partir dos valores obtidos da Tabela 6, o gráfico com o calor específico da madeira em função da temperatura está representado na Figura 4.

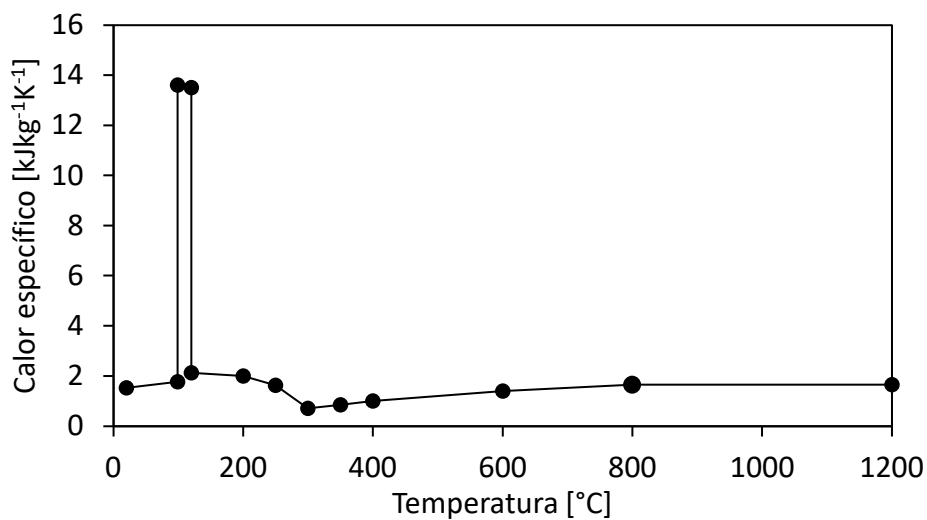


Figura 4-Calor específico da madeira em função da temperatura [7]

3.2 AÇO

O aço é um dos materiais extensamente estudados pela engenharia mecânica devido às suas excelentes propriedades e aos vastos estudos realizados ao longo dos anos. O estudo do aço neste trabalho debruça-se sobretudo no seu comportamento a elevadas temperaturas. Com o aumento da temperatura, como acontece em caso de incêndio, a resistência mecânica do aço diminui de forma repentina, o que pode traduzir num elevado risco para a estrutura metálica e conseqüentemente para os seus ocupantes, se for o caso. À partida, sabe-se que uma estrutura não suporta 30 min de temperaturas elevadas sem qualquer tipo de proteção contra incêndio. Por esse motivo, é importante dimensionar segundo as normas existente pois estas apresentam os requisitos e soluções viáveis para a segurança dos elementos [33].

3.2.1 PROPRIEDADES FÍSICAS

O aço é um material cuja massa volúmica não se altera com o aumento da temperatura, logo assume um valor constante de 7850 kg.m⁻³ [5].

3.2.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS

O aço escolhido para o estudo das ligações é o S275. As propriedades mecânicas do aço para uma espessura nominal de elementos inferior a 40 mm encontram-se apresentadas na Tabela 7, conforme o Eurocódigo 3-1-1 [4].

Tabela 7-Propriedades mecânicas do aço S275 [4]

Designação	Simbologia	S275
Tensão de cedência	f_y	275 MPa
Tensão de rutura	f_u	430 MPa
Módulo de elasticidade	E	210 000 MPa
Módulo de corte	G	81 000 MPa
Coefficiente de Poisson	ν	0,3
Coefficiente de expansão térmica linear	α	12×10^{-6} por K (para $T \leq 100^\circ\text{C}$)
Massa volúmica	ρ	7850 kg.m ⁻³

3.2.3 PROPRIEDADES TÉRMICAS

O aço possui fraca resistência em situação de incêndio e conseqüentemente sofre deformações permanentes causadas pelo carregamento contínuo a elevadas temperaturas, fenómeno denominado por fluência. O valor da emissividade do aço é de 0,8 [34]. Segundo o Eurocódigo 3-1-2 [5], a relação entre o calor específico c_a e a temperatura do aço θ_a são dadas pelas equações (1), (2), (3) e (4).

Para $20^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 600^{\circ}\text{C}$:

$$c_a = 425 + 7,73 \times 10^{-1} \theta_a - 1,69 \times 10^{-2} \theta_a^2 + 2,22 \times 10^{-6} \theta_a^3 \quad (1)$$

Para $600^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 735^{\circ}\text{C}$:

$$c_a = 666 + \frac{13002}{738 - \theta_a} \quad (2)$$

Para $735^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 900^{\circ}\text{C}$:

$$c_a = 545 + \frac{17820}{\theta_a - 731} \quad (3)$$

Para $900^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 1200^{\circ}\text{C}$:

$$c_a = 650 \quad (4)$$

Através das equações (1) à (4) obtém-se o gráfico correspondente ao calor específico do aço em função da temperatura representado na Figura 5.

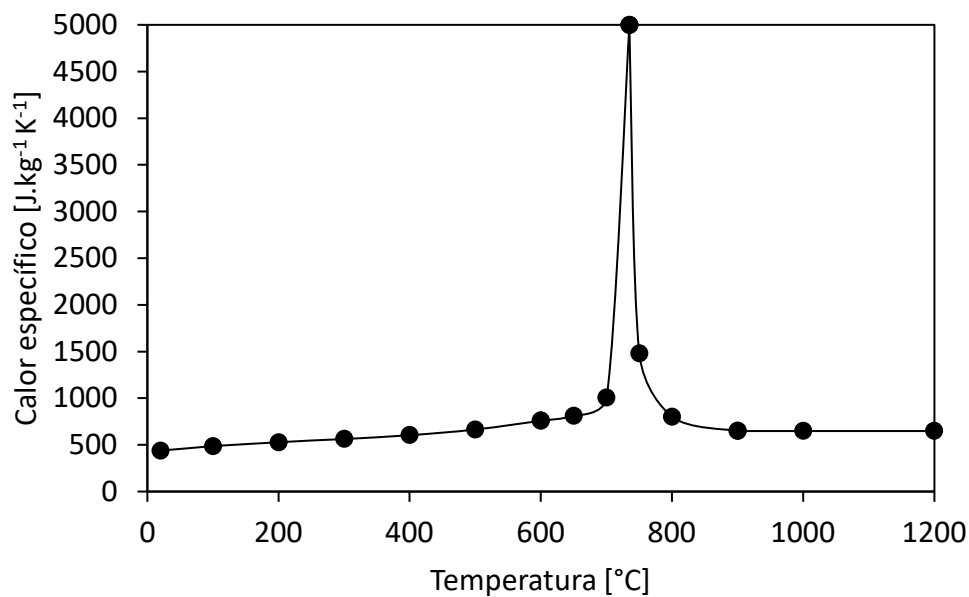


Figura 5-Calor específico do aço em função da temperatura [5]

A relação entre a condutividade térmica λ_a e a temperatura do aço θ_a é dado pelas equações (5) e (6).

Para $20^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 800^{\circ}\text{C}$:

$$\lambda_a = 54 - 3,33 \times 10^{-2} \theta_a \quad (5)$$

Para $800^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 1200^{\circ}\text{C}$:

$$\lambda_a = 27,3 \quad (6)$$

Através das equações (5) e (6) obtém-se o gráfico correspondente à condutividade térmica do aço em função da temperatura representado na Figura 6.

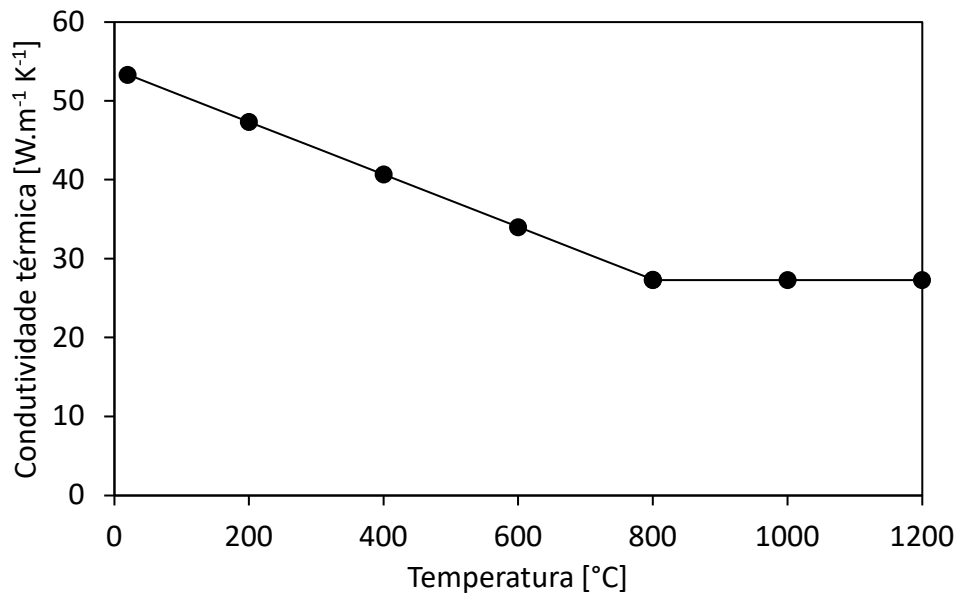


Figura 6-Condutividade térmica do aço em função da temperatura [5]

3.3 GESSO

O sulfato de cálcio pode ser denominado de gesso natural e encontra-se na natureza de diversas formas e as mais comuns são o sulfato de cálcio di-hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e desidratado (CaSO_4). A composição química do sulfato de cálcio di-hidratado expressa em massa de óxidos é 32,5% de CaO , 46,6% de SO_3 e 20,9% de H_2O , no entanto, dificilmente estes minerais atingem elevados níveis de pureza. A evaporação total ou parcial da água forma estruturas cristalinas sendo uma delas o gesso. Os painéis de gesso são possivelmente a forma mais comum de proteção passiva contra o fogo de construções em madeira ou aço [35]. Este material é usado na proteção de paredes e tetos de construções leves e possuem a grande vantagem de flexibilidade de construção e montagem das diferentes partes, tanto em edifícios comerciais, como na habitação a um custo aceitável. A espessura a utilizar está diretamente ligada aos requisitos necessários para uma determinada construção [21]. O gesso absorve grande quantidade calor através da libertação de água e ainda retarda o aumento de temperatura [35]. Segundo o Eurocódigo 5-1-2 [7], os tipos de gesso utilizados para a proteção da madeira são os do tipo A ou H e do tipo F. Apesar de tanto o gesso do tipo A como F serem apropriados para fins decorativos, o tipo F contém ainda aditivos ou fibras minerais com o intuito de melhorar as suas propriedades a elevadas temperaturas [36].

3.3.1 PROPRIEDADES FÍSICAS

O gesso contém água na sua composição e estando este perante um aumento da temperatura, a água presente evapora e a massa volúmica tende a diminuir [37]. Na

Figura 7 está representada a massa volúmica do gesso do tipo A e do tipo F em função da temperatura.

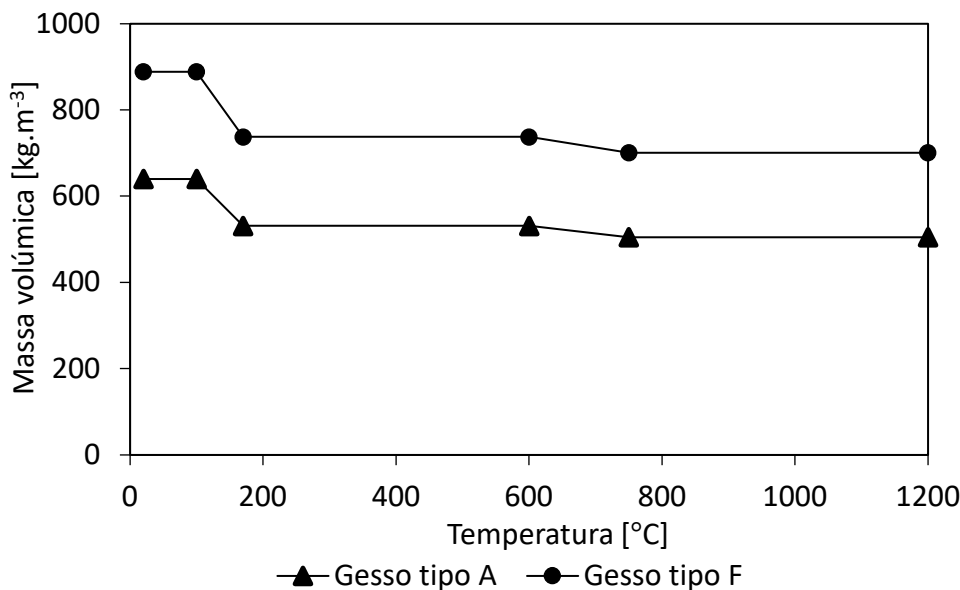


Figura 7- Massa volúmica do gesso tipo A e tipo F [37]

3.3.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS

A resistência mecânica do gesso está diretamente ligada à sua cristalização, mais propriamente com o crescimento e a interligação entre os cristais existentes no gesso. Outros fatores importantes são a qualidade do gesso e adesivos, a relação água/gesso, validade do produto e condições de armazenagem. Com o aumento da relação água/gesso a resistência do gesso diminui. Esta atinge o seu máximo quando a quantidade de água atinge os 17%, o suficiente para o processo de cristalização [35].

3.3.3 PROPRIEDADES TÉRMICAS

A expansão térmica do gesso é de $20 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ cerca do dobro do betão armado. Por ser um material poroso, possui boas propriedades isolantes, no entanto, para melhorar o isolamento térmico, as propriedades de resistência ficam comprometidas [35]. O calor específico do gesso em função da temperatura apresenta dois picos, que correspondem à energia necessária para dissociar e evaporar a água e a sua movimentação nas regiões mais frias do gesso [37]. O valor da emissividade do gesso é de 0,8 [7]. Na Figura 8 está representado o calor específico do gesso do tipo A e tipo F.

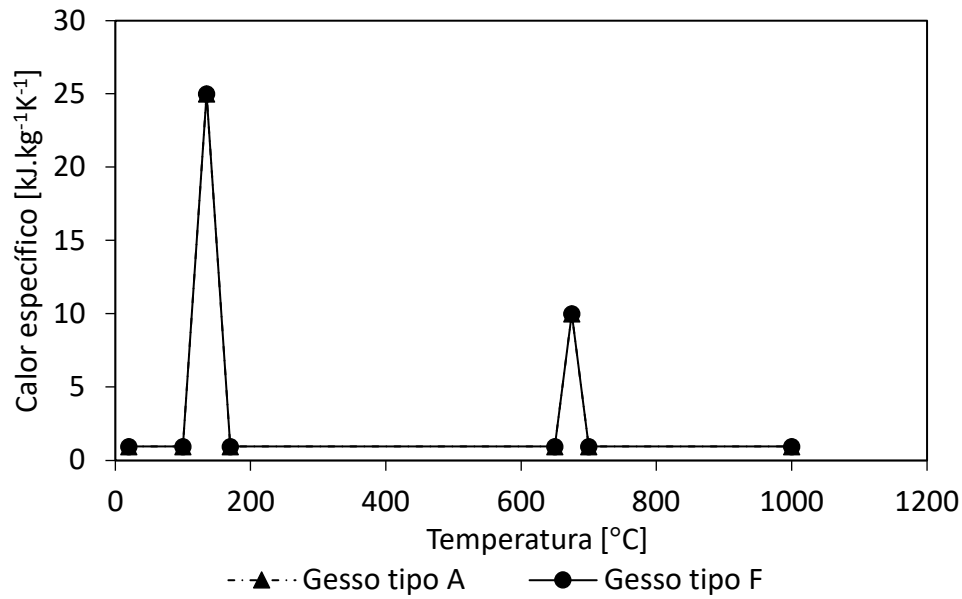


Figura 8-Calor específico do gesso tipo A e tipo F [37]

A condutividade térmica do gesso é influenciada por diversos fatores tais como a massa volúmica, teor de água, porosidade e entre outros [37]. A Figura 9 representa a condutividade térmica do gesso do tipo A e tipo F.

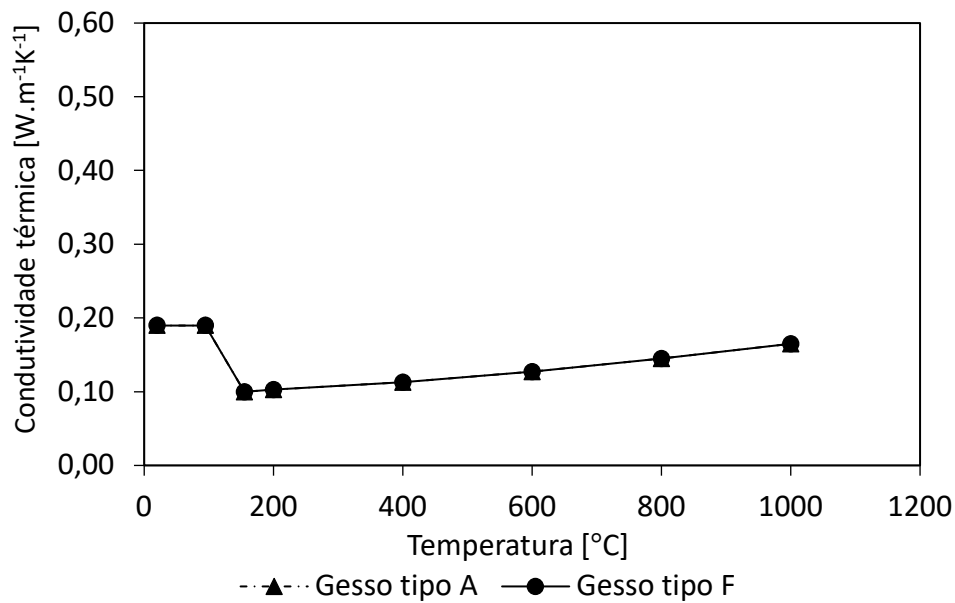


Figura 9-Condutividade térmica do gesso tipo A e tipo F [37]

ANÁLISE TÉRMICA

4.1 CARBONIZAÇÃO

4.2 CURVA ISO 834

4.3 COMPORTAMENTO TÉRMICO DO GESSO

4.4 TRANSFERÊNCIA DE CALOR

4 ANÁLISE TÉRMICA

4.1 CARBONIZAÇÃO

A carbonização é um efeito natural causado pela presença de altas temperaturas na superfície da madeira. Este fenômeno reflete o mau desempenho da madeira em situação de incêndio, visto que a camada carbonizada é considerada degradada. Quando exposta ao calor e ao atingir valores de temperatura próximos de 280°C, a madeira entra em combustão e inicia-se o processo de degradação [30]. A madeira decompõe-se através do processo de pirólise em que voláteis são libertados juntamente com o início da fase de carbonização. Ao carbonizar, é formada uma camada isolante com a função de retardar a propagação do calor e conseqüentemente, a degradação do restante material. Sendo a capacidade de carga um fator que varia de acordo com a dimensão da secção transversal, a quantidade da camada carbonizada afeta a resistência da madeira [2]. Por outro lado, como a camada carbonizada impede o avanço do fogo, o restante material intacto não sofre qualquer tipo de alteração das suas propriedades físicas e mecânicas, podendo assim exercer as suas funções estruturais [30]. Na Figura 10 estão representadas as diferentes camadas resultantes do efeito da carbonização e a redução da secção causada pelo fogo.

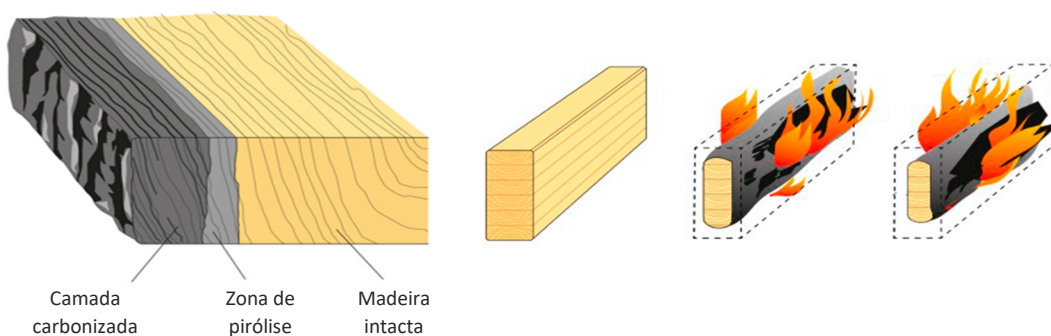


Figura 10-Camadas da madeira carbonizada (esquerda) e redução da secção (direita) [38]

4.2 CURVA ISO 834

De modo a determinar a resistência ao fogo de elementos de construção, os materiais são testados segundo as condições *standard* da curva de fogo ISO 834 [9]. Assim é possível comparar valores segundo os mesmos critérios e até mesmo compará-los com outros materiais. A curva de fogo ISO 834 [9] segue uma função logarítmica e descreve a evolução da temperatura do incêndio ao longo de um período de tempo. A equação (

7) possibilita a representação da curva do fogo ISO 834 [9], que traduz a temperatura θ (°C) em função do tempo t (min).

$$\theta = 345 \log_{10}(8t + 1) + 20 \quad (7)$$

A Figura 11 representa o gráfico da curva de incêndio ISO 834 [9].

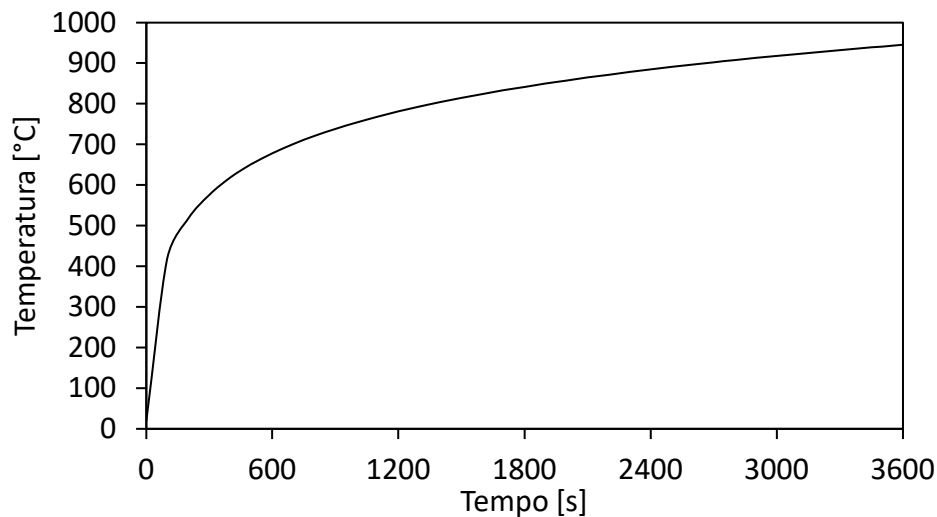


Figura 11-Curva de incêndio ISO 834 [9]

4.3 COMPORTAMENTO TÉRMICO DO GESSO

O gesso é um material não inflamável que pode ser utilizado em ligações submetidas ao fogo para proteção da madeira e dos elementos constituintes em aço. A resistência ao fogo do gesso resulta do teor de água proveniente da cristalização, correspondente a cerca de 17% do seu peso. À medida que o gesso é aquecido, liberta vapor de água fazendo com que a taxa de aumento de temperatura diminua. [35]. A transferência de calor no gesso pode ocorrer por condução ao longo do material, convecção e radiação ao longo dos poros [37].

4.4 TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Quando duas substâncias a diferentes temperaturas estão em contacto, estas tendem em atingir um equilíbrio, ou seja, a substância mais quente diminui a temperatura e a substância mais fria aumenta a temperatura. Isto deve-se à ocorrência de um fluxo de energia, da substância mais quente para a mais fria, denominado de transferência de calor. A ciência que estuda a transferência de calor pretende identificar os fatores que interferem na taxa de transferência de energia entre diferentes substâncias e assim prever o comportamento de sistemas termodinâmicos ou equipamentos. A transferência de calor pode ocorrer por três processos diferentes: condução, convecção e radiação [39].

4.4.1 CONDUÇÃO

A transferência de calor por condução é a transferência de energia a nível molecular através de um sólido ou fluido, onde se verifica a presença de um gradiente dentro da substância. Um dos critérios é que não haja movimentação macroscópica das partículas que a constitui, e que seja caracterizado pela transferência de energia da região mais quente para a mais fria. A propriedade do material que afeta bastante a transferência de energia é a sua condutividade térmica. No caso dos metais, sendo bons condutores de calor possuem uma condutividade térmica elevada. Os materiais isolantes têm uma condutividade térmica inferior, como é o caso da borracha e da madeira. A transferência de calor por condução é responsável pela mudança de fase dos materiais [39], [40]. A lei de Fourier é a lei que expressa a transferência de calor por condução, equação (8):

$$q_x = -\lambda A \frac{d\theta}{dx} \quad (8)$$

Onde q_x é a taxa de transferência de calor por condução, λ é a condutividade térmica, A é a área através da qual ocorre a transferência e $\frac{d\theta}{dx}$ é o gradiente de temperatura na direção do fluxo de calor [41].

4.4.2 CONVECÇÃO

A transferência de calor por convecção é a transferência de energia entre um fluido e um sólido. Neste processo ocorrem dois acontecimentos em simultâneo. Observa-se transferência de calor por condução visto que dentro do fluido está presente um gradiente de temperatura e a transferência de calor dentro do próprio fluido, em que este se movimenta no espaço devido à diferença de temperatura existente. Quando nenhum equipamento interfere na movimentação do fluido e este se move apenas por ação da diferença de temperatura, denomina-se de convecção natural. Quando o ar se encontra em contacto com a superfície aquecida, a temperatura do ar aumenta bem como o seu volume específico. No entanto, a massa específica diminui, o que resulta na movimentação vertical ascendente do ar e cria-se assim um ciclo. Quando o movimento do fluido é imposto por algum equipamento, como uma bomba ou ventilador, é chamada de convecção forçada [39], [40]. A expressão que traduz a transferência de calor por convecção é dada pela equação (9):

$$q = hA(\theta_w - \theta_\infty) \quad (9)$$

Em que q é a taxa de transferência de calor por convecção, h é o coeficiente de transferência de calor por convecção, θ_w é a temperatura da superfície e θ_∞ é a temperatura do ar ambiente [41].

4.4.3 RADIAÇÃO

A transferência de calor por radiação é obtida através de ondas eletromagnéticas e pode ocorrer entre um gás e um sólido como também entre dois ou mais sólidos. A transferência de calor por radiação pode surgir em simultâneo com condução e convecção [39]. Qualquer superfície com temperatura superior a zero absoluto transmite radiação que depende das características da superfície [40]. Por exemplo, um corpo negro é todo aquele que emite energia de forma ideal e irradia o mais próximo da taxa proporcional à quarta potência da temperatura [41]. A equação (10) representa a transferência de calor por radiação:

$$q_e = \sigma A \theta^4 \quad (10)$$

Em que q_e é a taxa de transferência de calor por radiação, σ é o coeficiente de Stefan-Boltzmann de valor $5,67 \times 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}\text{K}^{-4}$ e θ é a temperatura da superfície radiante.

No caso de não se tratar de um corpo negro, a taxa de emissão desse corpo para a vizinhança diminui e para representar esse fenómeno é introduzido um novo termo na equação (10), a emissividade que dependendo do material pode adotar valores superiores a zero até à unidade. A equação (11) apresenta a equação da transferência de calor por radiação de um corpo real:

$$q_e = \varepsilon \sigma A \theta^4 \quad (11)$$

Em que ε é emissividade do corpo relativo ao seu material [41].

DIMENSIONAMENTO DE UMA LIGAÇÃO S-W-S EM CORTE DUPLO COM CAVILHAS METÁLICAS

5.1 TEMPERATURA AMBIENTE

5.2 TEMPERATURAS ELEVADAS

5 DIMENSIONAMENTO DE UMA LIGAÇÃO S-W-S EM CORTE DUPLO COM CAVILHAS METÁLICAS

5.1 TEMPERATURA AMBIENTE

Neste capítulo irá ser apresentado o método de dimensionamento de ligações S-W-S em corte duplo com cavilhas metálicas à temperatura ambiente. Segundo as equações simplificadas do Eurocódigo 5-1-1 [6] é possível efetuar o projeto da ligação, e dessa forma elaborar uma tabela de cálculo (por exemplo no *Microsoft Excel*) capaz de obter valores correspondentes ao número de cavilhas necessárias, tendo em conta outras variáveis tais como o diâmetro da cavilha, carga aplicada e o tipo da madeira utilizada, para qualquer outra ligação.

Para elaboração deste estudo foram consideradas quatro massas volúmicas diferentes de madeira lamelada colada entre 370 e 480 kg.m⁻³. Para cada valor de massa volúmica serão considerados três valores de carga axial imposta de 10, 15 e 20 kN. Por sua vez, para cada solicitação imposta irão ser estudados quatro diâmetros de cavilhas diferentes, nomeadamente 6, 8, 10 e 12 mm. Deste modo, é possível visualizar de forma clara a influência de cada um destes fatores e como interferem com o número de cavilhas necessárias na ligação e a combinação mais favorável. A tabela de cálculo tem como base as equações de dimensionamento que são apresentadas de seguida.

A resistência de projeto à tração $f_{t,0,d}$ deve ser maior ou igual que a tensão de tração ao longo das fibras. De forma a reduzir o valor da resistência à tração característica ao longo das fibras $f_{t,0,k}$, é necessário considerar fatores de segurança como fator de redução para a duração de carregamento e o teor de humidade k_{mod} bem como o fator parcial para as propriedades do material γ_M como mostra a equação (12).

$$f_{t,0,d} = \frac{k_{mod} \times f_{t,0,k}}{\gamma_M} \quad (12)$$

Segundo o Eurocódigo 5-1-1 [6], o valor de γ_M para a madeira lamelada colada é de 1,25. Relativamente ao fator k_{mod} é necessário ter em conta a duração de utilização e a classe de serviço adequada. No caso a estudar, considerou-se uma duração de utilização média e a classe de serviço 1 que corresponde a um teor de humidade para uma temperatura de 20°C, que para madeira macia não excede os 12% e que a humidade relativa do ar circundante poderá exceder os 65% somente algumas semanas por ano. Para estas condições, o valor do fator k_{mod} de acordo com o Eurocódigo 5-1-1 [6] é de 0,80.

A tensão de projeto à tração $\sigma_{t,0,d}$ é dada pela solicitação aplicada E_d e a área transversal A_s como mostra a equação (13).

$$\sigma_{t,0,d} = \frac{E_d}{A_s} \quad (13)$$

Para determinar a capacidade de carga característica por plano de corte e por ligador $F_{v,Rk}$ é necessário obter o menor valor de duas equações possíveis representadas nas equações (14) e (15). Estas equações são utilizadas na situação em que os membros exteriores são de aço. A equação (14) tem em conta a resistência característica ao esmagamento dos membros de madeira $f_{h,2,k}$, a espessura do elemento central de madeira t_2 e o diâmetro do ligador d . A equação (15) tem em consideração, para além das variáveis já referidas, o momento de cedência plástica do ligador $M_{y,Rk}$ e a resistência à tração axial característica do ligador $F_{ax,Rk}$.

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} 0,5 f_{h,2,k} t_2 d \\ 1,15 \sqrt{2 M_{y,Rk} f_{h,2,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \end{array} \right. \quad (14)$$

$$(15)$$

Para todos os casos, considerou-se t_2 de 45 mm. $F_{ax,Rk}$, o valor característico da capacidade à tração do ligador em projeto foi considerado nulo.

Através da tensão de rutura característica $f_{u,k}$ e o diâmetro da cavilha d e possível obter o momento de cedência plástica do ligador $M_{y,Rk}$, presente na equação (16).

$$M_{y,Rk} = 0,3 f_{u,k} d^{2,6} \quad (16)$$

A resistência característica ao esmagamento em elementos de madeira $f_{h,2,k}$ é calculada através do diâmetro da cavilha d e a massa volúmica característica da madeira ρ_k conforme mostra a equação (17).

$$f_{h,2,k} = 0,082(1 - 0,01d)\rho_k \quad (17)$$

O número de cavilhas N necessárias para assegurar a ligação é dado pela solicitação aplicada E_d e a solicitação ao corte de projeto por plano de corte e por ligador $F_{v,Rd}$ presente na equação (18).

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

Para um resultado coerente assumiu-se o arredondamento por excesso no número de cavilhas. Fixou-se o número de colunas em três para todos os casos variando somente o número de linhas consoante o número total de cavilhas. Deste modo, torna-se mais fácil padronizar a ligação visto que o plano de corte a ser estudado na análise térmica irá sempre incidir nas três cavilhas.

Uma ligação com múltiplos ligadores terá de respeitar a disposição do Eurocódigo 5-1-1 [6] que consiste em atribuir distâncias mínimas entre os ligadores e entre o ligador e a extremidade. Quanto às distâncias a serem respeitadas, a Figura 12 representa o esquema dos espaçamentos mínimos a serem considerados para o projeto da ligação, de modo a garantir que esta suporte os esforços que serão exercidos.

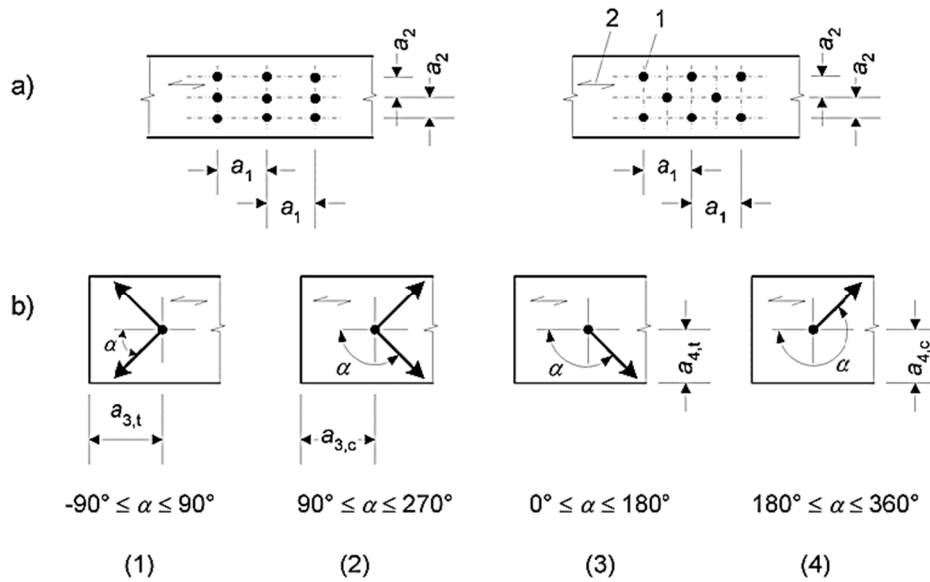


Figura 12-Espaçamentos e distâncias às extremidades: a) Espaçamentos entre cavilhas segundo eixo paralelo e perpendicular às fibras; b) Distância entre a cavilha às extremidades [6]

Os elementos 1 e 2 dizem respeito ao ligador e à direção das fibras, respetivamente. O caso (1) e (3) representam a distância à extremidade carregada, enquanto que o caso (2) e (4) representam a distância à extremidade não carregada.

A distância entre os ligadores paralelos às fibras a_1 é dada pelo ângulo α e o diâmetro da cavilha d como mostra a equação (19):

$$a_1 = (3 + 2|\cos \alpha|)d \tag{ 19 }$$

Em que α é igual a zero pois o carregamento ocorre paralelamente à direção das fibras.

A distância entre ligadores perpendicular às fibras a_2 é dada somente pelo diâmetro da cavilha d como representado na equação (20):

$$a_2 = 3d \tag{ 20 }$$

A distância entre o ligador e a extremidade solicitada $a_{3,t}$ apenas depende do diâmetro da cavilha d presente na equação (21):

$$a_{3,t} = 7d \geq 80 \tag{ 21 }$$

A distância entre o ligador e a extremidade não solicitada $a_{4,c}$ depende do diâmetro da cavilha d presente na equação (22):

$$a_{4,c} = 3d \quad (22)$$

A Figura 13 representa a geometria da ligação S-W-S em duplo corte e a secção da ligação que será estudada. O exemplo de ligação apresentado é constituído por madeira GL20h com uma carga a aplicar de 10 kN e cavilhas de 6 mm.

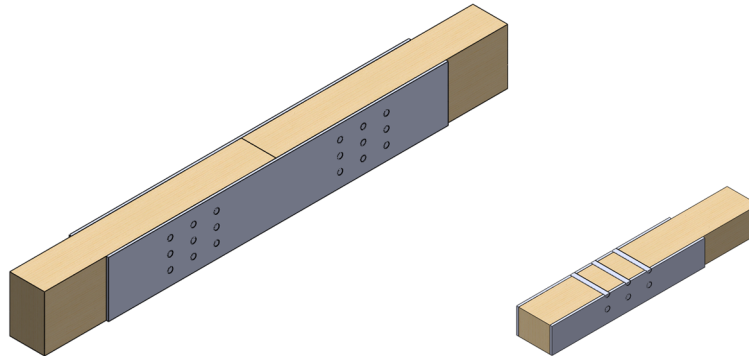


Figura 13-Ligação completa (esquerda) e em corte (direita)

Através das equações referidas anteriormente neste capítulo, é possível elaborar um ábaco com todas as informações referentes à massa volúmica da madeira, carga e diâmetros utilizados, obtendo assim o número de cavilhas necessárias para cada caso. O ábaco encontra-se no Anexo 10.2. Quanto às dimensões das ligações, estas encontram-se demonstradas no anexo 10.1.

5.2 TEMPERATURAS ELEVADAS

No que diz respeito às temperaturas elevadas, nomeadamente na presença de um incêndio, duas abordagens serão tidas em conta. A primeira diz respeito à resistência da ligação S-W-S projetada quando submetida ao fogo segundo o Eurocódigo 5-1-2 [7].

A resistência da ligação, calculada em situação de incêndio $f_{d,fi}$ é obtida através do fator de modificação para o fogo $k_{mod,fi}$, fractil de 20% da propriedade de resistência à temperatura ambiente f_{20} e o fator de segurança parcial para madeira exposta ao fogo $\gamma_{M,fi}$ como apresentado na equação (23).

$$f_{d,fi} = k_{mod,fi} \frac{f_{20}}{\gamma_{M,fi}} \quad (23)$$

Em que $k_{mod,fi}$ e $\gamma_{M,fi}$ correspondem a um valor unitário segundo as recomendações do Eurocódigo 5-1-2 [7].

O valor de f_{20} é obtido a partir de k_{fi} que diz respeito ao tipo de madeira e de ligação e f_k que está relacionado com a propriedade de resistência característica da madeira conforme a equação (24).

$$f_{20} = k_{fi} f_k \quad (24)$$

O valor de k_{fi} é 1,25 para a madeira lamelada colada.

O $E_{d,fi}$ é calculado através do fator de redução de carga de projeto para situação de fogo η_{fi} como mostra a equação (25).

$$E_{d,fi} = \eta_{fi} E_d \quad (25)$$

Em relação ao η_{fi} , é recomendado o valor de 0,6.

Para a verificação da resistência, a solicitação no projeto em situação de fogo incluindo efeitos de expansão e deformações $E_{d,fi}$ sobre a área da secção A_s necessita ser menor ou igual à resistência calculada em situação de fogo $f_{d,fi}$ como está representado na inequação (26).

$$\frac{E_{d,fi}}{A_s} \leq f_{d,fi} \quad (26)$$

Todos os valores obtidos no cálculo da resistência das ligações expostas ao fogo encontram-se no Anexo 10.3.

5.2.1 EUROCÓDIGO 5-1-2

Para ligações não protegidas cujos membros externos são de madeira, o Eurocódigo 5-1-2 [7] prevê um incremento da espessura do membro de modo a suportar o requisito mínimo de tempo em situação de fogo. Na Figura 14 está representada a aplicação do incremento da espessura em membros externos em madeira a_{fi} .

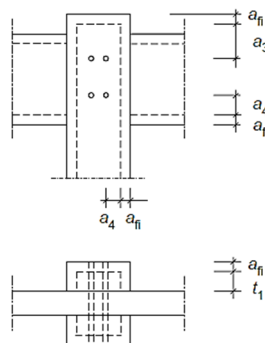


Figura 14- Incremento da espessura no membro externo em madeira [6]

Porém, sendo o caso a ser estudado uma ligação cujos membros externos são em aço, não é recomendado a exposição direta ao fogo sem uma proteção. Para as ligações

protegidas, o sugerido é a utilização de madeira como material de proteção em que a sua espessura é obtida através do incremento de espessura do membro de madeira exposto ao fogo. Neste caso não será feito um aumento da espessura do membro intermédio, mas será aplicado na parte externa da ligação pois trata-se de uma ligação protegida.

Esse aumento da espessura da madeira a_{fi} é dado pela velocidade de carbonização com efeito do arredondamento β_n , o coeficiente correspondente ao fluxo de calor gerado pelo ligador k_{flux} , o tempo de resistência ao fogo pretendido t_{req} e o tempo resistente ao fogo da ligação $t_{d,fi}$, conforme representado na equação (27).

$$a_{fi} = \beta_n k_{flux}(t_{req} - t_{d,fi}) \quad (27)$$

Em que β_n é considerado 0,7 mm/min para *glulam* com massa volúmica igual ou superior a 290 kg.m⁻³ cuja espécie pertence ao grupo das madeiras macias. As espécies de madeira disponíveis para a produção de *glulam* segundo o fabricante Hasslacher Norica Timber [42], são o Abeto (*Picea Abies*), Larício (*Larix*) e Pinho (*Pinus*) e todas pertencem ao grupo das madeiras macias [43]. O k_{flux} é de 1,5 e para a ligação com membros externos em aço, o $t_{d,fi}$ é 5 min. Para ligações com cavilhas, o Eurocódigo 5-1-2 [7] assume um valor de exposição fogo de 20 min, porém, caso se pretenda aumentar o tempo de exposição, este pode ser até no máximo por 30 min. Por esse motivo, o t_{req} pretendido é de 30 min. Para os valores estabelecidos, a espessura da madeira a_{fi} é 27 mm para qualquer tipo de madeira e/ou diâmetro de cavilha.

Caso se pretenda utilizar outro material de proteção, o Eurocódigo 5-1-2 [7] prevê que se verifique no Eurocódigo 3-1-2 [5] que contem o método para obter outras soluções possíveis com diferentes materiais de proteção e o respetivo dimensionamento.

5.2.2 EUROCÓDIGO 3-1-2

Apesar de se tratar de uma ligação com elementos de madeira, o Eurocódigo 5-1-2 [7] não fornece toda a informação sobre a ligação com membros externos em aço, pois o primeiro elemento em contacto com as elevadas temperaturas são as cavilhas e a chapa de aço. O Eurocódigo 3-1-2 [5] propõem-se a fornecer as regras necessárias para o dimensionamento de estruturas em aço sob ação do fogo. Posto isto, os materiais de proteção escolhidos são o gesso do tipo F pelas suas excelentes propriedades de isolamento e a madeira (*glulam*) para que seja possível analisar e comparar com o método sugerido na equação (27).

Primeiramente, é fundamental dar a conhecer o conceito de fator de massividade para melhor entendimento das fórmulas a utilizar. O fator de massividade A_m/V corresponde à relação entre a área do elemento não protegido exposta ao fogo A_m e o seu volume V . Sabe-se que quanto maior for o fator de massividade, maior será o aumento de temperatura no elemento exposto ao fogo. A Figura 15 representa a variação do fator de massividade em função da geometria e o tipo de aquecimento associado.

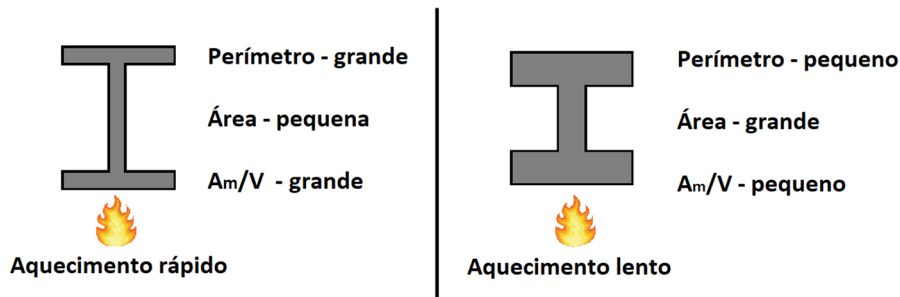


Figura 15-Variação do fator de massividade adaptado de [33]

No que toca a elementos isolados por meio de material de proteção contra incêndio, é possível obter o fator de massividade apropriado. Este é dado pela área da proteção exposta ao fogo A_p e o volume do elemento em aço V [33]. A proteção irá ser colocada na superfície do aço correspondente à face exposta ao fogo como mostra a Figura 16.



Figura 16-Ligação em corte com proteção

Visto que as cavilhas e a chapa de aço possuem as mesmas propriedades, considerou-se os dois elementos como um só para efeito de cálculo e que o fator de massividade apenas considerou um dos lados da ligação, nomeadamente o lado protegido com o material de proteção que corresponde à face exposta ao fogo. O valor do fator de massividade A_p/V obtido a partir da geometria caracterizada pelo diâmetro das cavilhas e dos seus respetivos espaçamentos está representada na Tabela 8.

Tabela 8- Fator de massividade das ligações

Diâmetro [mm]	6	8	10	12
A_p/V [m^{-1}]	95	92	89	88

Para determinar a espessura de proteção necessária vão ser utilizadas duas abordagens. A primeira corresponde a um método analítico baseado em nomogramas presentes no livro *Incêndio em Estruturas Metálicas: Cálculo Estrutural* [33] que têm por base a expressão de cálculo do aumento temperatura do aço segundo o Eurocódigo 3-1-2 [5] e a segunda abordagem é a própria expressão do aumento temperatura do aço que servirá para comparar e confirmar o método analítico.

Segundo o método analítico descrito pelo autor Paulo Vila Real [33], é feita uma distinção entre material de proteção leve e pesado. Um material de proteção leve é aquele cuja capacidade térmica não é superior à metade da capacidade térmica do aço conforme a equação (28).

$$d_p A_p c_p \rho_p < \frac{c_a \rho_a V}{2} \quad (28)$$

Em que d_p é a espessura da proteção, c_p é o calor específico da proteção à temperatura ambiente, ρ_p é a massa volúmica da proteção à temperatura ambiente, c_a é o calor específico do aço em função da temperatura, ρ_a é a massa volúmica do aço de valor 7850 kg.m^{-3} . A distinção entre o tipo material de proteção é feita pois em cada caso são utilizados métodos de resolução diferentes.

A partir do nomograma da temperatura em elementos de aço protegidos por material leve sujeitos ao incêndio padrão ISO 834 [9] presente na Figura 17 é possível intercetar os valores da temperatura do aço com o tempo de exposição ao fogo para obter o fator de proteção.

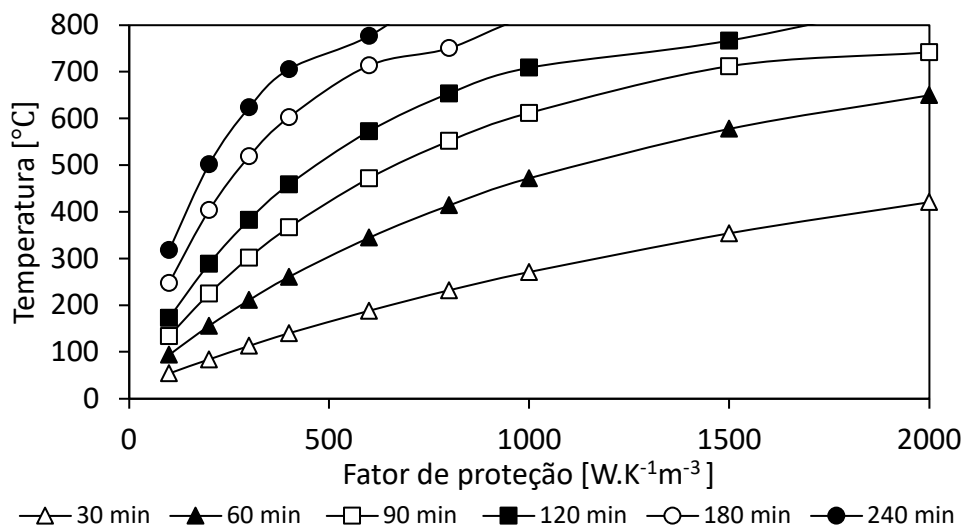


Figura 17-Temperatura do aço protegido com material leve, sujeito à curva ISO 834 para diferentes valores de fator de proteção adaptado de [33]

A temperatura limite do aço é de 300°C devido à sua elevada condutividade. Por transmitir rapidamente o calor e estando o aço em contacto direto com a madeira, esta atinge os 300°C com facilidade e leva à carbonização da madeira, situação que se pretende evitar. Para que haja conformidade com os resultados obtidos pelo Eurocódigo 5-1-2 [7], estipulou-se que o tempo de exposição ao fogo seria de 30 min. No caso de se tratar de um material leve, o fator de proteção é diretamente retirado do nomograma, resultando no valor de $1150 \text{ W.K}^{-1}\text{m}^{-3}$. A desvantagem do nomograma é que apenas considera a evolução de temperatura segundo a curva de fogo ISO 834 [9]. O fator de proteção representa um fator de massividade modificado pois tem em conta a condutividade térmica e espessura do material de proteção. A fórmula do fator de proteção encontra-se presente na equação (29).

$$\text{Fator de proteção} = \frac{A_p}{V} \cdot \frac{\lambda_p}{d_p} \quad (29)$$

Em que a λ_p é a condutividade térmica do material de proteção, à temperatura ambiente. Deste modo, obtém-se a espessura da proteção d_p necessária visto que as restantes variáveis são conhecidas.

Caso se verifique que se trata de uma proteção pesada, faz-se uma correção no fator de proteção conforme a equação (30).

$$\text{Fator de proteção corrigido} = \frac{A_p}{V} \cdot \frac{\lambda_p}{d_p} \left(\frac{1}{1 + \frac{\phi}{2}} \right) \quad (30)$$

Em que a quantidade de calor armazenada na proteção ϕ é dada pela equação (31).

$$\phi = \frac{c_p d_p \rho_p}{c_a \rho_a} \cdot \frac{A_p}{V} \quad (31)$$

Como se pode verificar, o fator de proteção corrigido contém na sua fórmula mais variáveis das propriedades do aço e da proteção devido à presença do novo membro que inclui a quantidade de calor armazenada na proteção ϕ . Para materiais de proteção leves, considera-se $\phi = 0$. No entanto, dentro das proteções leves, há uma vasta gama de valores possíveis, podendo mesmo encontrar-se próximos do limiar entre proteção leve e pesada. Por isso, considerar $\phi = 0$ pode ser limitativo ou até mesmo induzir em erro. Para promover um resultado mais próximo do real, determinou-se que todas as proteções iriam ser consideradas proteções pesadas visto que a equação tem em conta a influência das propriedades térmicas do aço e da proteção. Tanto na proteção em madeira como em gesso verificou-se uma variação de espessuras dentro do próprio material e para confirmar os valores obtidos, irá ser realizada a verificação de acordo com a equação presente na Eurocódigo 3-1-2 [5].

Para elementos protegidos, o aumento da temperatura do aço $\Delta\theta_{a,t}$ durante um intervalo de tempo Δt é dado pela equação (32).

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p A_p / V (\theta_{g,t} - \theta_{a,t})}{d_p c_a \rho_a (1 + \phi/3)} \Delta t - \left(e^{\frac{\phi}{10}} - 1 \right) \Delta\theta_{g,t} \quad (32)$$

$$\text{Mas } \Delta\theta_{a,t} \geq 0 \text{ se } \Delta\theta_{g,t} > 0$$

Em que Δt é o intervalo de tempo que deverá ser igual ou inferior a 30 s, $\theta_{a,t}$ é a temperatura do aço no instante t , $\theta_{g,t}$ é a temperatura ambiente dos gases no instante t e $\Delta\theta_{g,t}$ é o aumento da temperatura ambiente dos gases durante o intervalo de tempo Δt . Quanto à temperatura ambiente dos gases, esta segue os valores de referência da curva de fogo ISO 834 [9] e o intervalo de tempo definido foi de 5 s. O objetivo é que a ligação não fique afetada termicamente e que a madeira não atinja o estado de carbonização caracterizado por 300°C durante, pelo menos, 30 min de exposição ao fogo. Através da equação (32) caracterizada por um método iterativo elaborado a partir de uma tabela de cálculo no Microsoft Excel, obtém-se a espessura necessária de proteção de modo que, ao fim de 30 min, a temperatura do aço seja 300°C.

As espessuras das proteções calculadas tanto pelo método analítico como pelo método iterativo do Eurocódigo 3-1-2 [5] estão em concordância, o que significa que as fórmulas apresentadas pelo autor Paulo Vila Real [33] podem ser aplicadas para a determinação da espessura de proteção de ligações S-W-S.

A espessura da chapa apresenta um valor fixo de 3 mm e na Tabela 9 encontra-se o valor da espessura da proteção em gesso relativamente ao diâmetro da cavilha.

Tabela 9-Espessura da proteção em gesso

Diâmetro das cavilhas [mm]	Espessura da proteção [mm]
6	14
8	14
10	13
12	13

É de realçar que a madeira utilizada para a proteção corresponde ao tipo de madeira presente no membro central da ligação. Ou seja, se o membro central for constituído por madeira GL20h, a proteção terá de ser idêntica. Na Tabela 10 encontra-se o valor da espessura da proteção em madeira relativamente ao diâmetro da cavilha e ao tipo de *glulam*.

Tabela 10-Espessura da proteção em madeira

Diâmetro das cavilhas [mm]	Tipo de madeira	Espessura da proteção [mm]
6	GL20h	10
	GL24h	10
	GL28h	10
	GL32h	10
8	GL20h	9
	GL24h	9
	GL28h	9
	GL32h	9
10	GL20h	9
	GL24h	9
	GL28h	9
	GL32h	9
12	GL20h	9
	GL24h	8
	GL28h	8
	GL32h	8

Como forma de verificação dos resultados obtidos relativamente às espessuras dos diferentes materiais, recorreu-se à expressão da difusidade térmica. Esta propriedade permite prever se o material é mais suscetível a atingir temperatura elevadas mais rapidamente. Deste modo, quanto maior for o valor da difusidade térmica, maiores serão as temperaturas e maior terá de ser a espessura da proteção. A difusidade térmica D é obtida através da condutividade térmica λ_p , massa volúmica ρ_p e calor específico c_p , todas à temperatura ambiente, como representado na equação (33).

$$D = \frac{\lambda_p}{\rho_p c_p} \quad (33)$$

A difusidade térmica das diferentes espécies de madeira varia entre $1,6 \times 10^{-7}$ e $2,1 \times 10^{-7}$ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ e a difusidade térmica do gesso do tipo F é de $2,2 \times 10^{-7}$ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Deste modo é possível verificar que sendo a difusidade térmica do gesso superior à da madeira, é espectável que a espessura do gesso seja superior, conforme é mostrado pelos métodos analítico e iterativo.

MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

6.1 SIMULAÇÃO NUMÉRICA

6 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Quando certos problemas apresentam um determinado nível de complexidade e a resolução é difícil de ser obtida, ou até mesmo impossível através de métodos analíticos, o método de elementos finitos apresenta-se como uma ótima alternativa. Este método consiste na resolução de um conjunto de problemas mais simples com resultado exato ou aproximado que, quando agrupados, formam a solução global pretendida. O método de elementos finitos surgiu explicitamente pela primeira vez em 1960 e aplicado por Ray Clough na análise de problemas de elasticidade em estado plano de tensão. No entanto, alguns exemplos de trabalhos de Courant, na década de 40, já apresentavam exemplos de metodologias de discretização em elementos triangulares para a resolução numérica. Desde os primeiros trabalhos realizados até aos dias de hoje, diversas publicações foram divulgadas e trabalhos desenvolvidos de modo a fornecer cada vez mais informação aplicada em diferentes áreas da mecânica estrutural [44].

6.1 SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Ao realizar uma simulação por MEF é fundamental ter em mente que se trata de um método com base numa solução aproximada e por isso, devem-se evitar erros de aproximação durante o processo, de modo a obter o resultado mais rigoroso. É importante ter o conhecimento amplo de todas as variáveis tais como a geometria, propriedades dos materiais e meio envolvente, condições fronteira e solicitações externas. Com base no MEF é possível resolver uma vasta gama de problemas de engenharia para obter um conjunto de comportamentos do sistema, como por exemplo:

- Análise de fenómenos vibratórios;
- Comportamento de materiais;
- Condução de calor;
- Mecânica dos fluídos;
- Eletricidade;
- Magnetismo;
- Impacto;
- Conformação plástica de materiais;
- Análise das estruturas metálicas e não-metálicas;
- Dimensionamento de grandes estruturas;
- Hidrodinâmica;
- Aerodinâmica entre outros fenómenos [44].

Quando todas as variáveis são definidas corretamente, a simulação numérica é uma mais valia pois permite analisar a solução e quando necessário, refazer o método as vezes que forem necessárias até obter a solução desejada com elevado rigor. O mesmo já não acontece com os ensaios experimentais, que apesar de serem estudos muito próximos da realidade, estes acabam por ser mais dispendiosos, principalmente quando há necessidade de refazer ensaios inúmeras vezes.

6.1.1 MATERIAIS

As propriedades dos materiais são definidas tendo em conta o seu comportamento ao longo do tempo e em função da temperatura, logo o método não linear e transiente é o mais apropriado. As propriedades dos materiais (aço, madeira e proteção) introduzidas no programa de elementos finitos são térmicas e isotrópicas, nomeadamente a condutividade térmica, o calor específico, a massa volúmica e a emissividade. No aço e na madeira foram consideradas as suas propriedades não lineares e no material de proteção utilizaram-se propriedades térmicas constantes, para que os modelos se encontrassem em conformidade com os métodos de cálculo da espessura da proteção apresentados, onde apenas foram admitidas propriedades à temperatura ambiente. Na Figura 18 encontra-se representado um modelo geométrico, um corte da ligação em estudo, com os diferentes materiais constituintes.

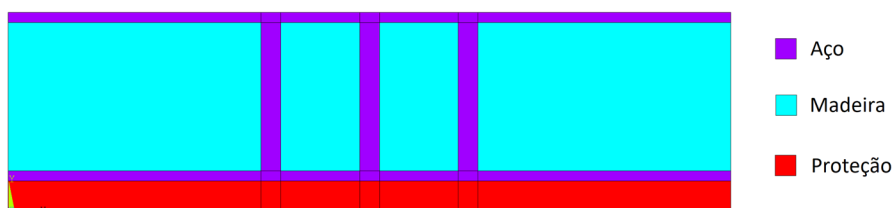


Figura 18-Materiais constituintes da ligação

6.1.2 GEOMETRIA E MALHAS DE ELEMENTOS FINITOS

Com o objetivo de prever o comportamento térmico das diferentes ligações, com e sem proteção, expostas ao fogo ao longo do tempo, foi utilizado o programa de elementos finitos ANSYS *Student* 2019 R3 [8]. Devido à limitação de graus de liberdade estabelecido pelo programa na versão académica, a geometria da ligação vai ser realizada a duas dimensões, representando uma seção em corte do modelo em estudo. Assim, o modelo em análise bidimensional representa $\frac{1}{4}$ da ligação, uma vez que apresenta dois planos de simetria. Relativamente à geometria, esta varia consoante o diâmetro das cavilhas, fazendo por isso variar os espaçamentos entre cavilhas e entre as cavilhas e as extremidades da ligação. As ligações com proteção também têm uma geometria diferente, pois terão um acréscimo de outro material, e dependendo do tipo de proteção, terá espessuras distintas. O elemento finito escolhido no programa ANSYS *Student* 2019 R3 [8] foi o PLANE 77-2D-8 Node *Thermal Solid* que corresponde a um elemento bidimensional com 8 nós e cada nó possui um grau de liberdade relativo à

temperatura. Este elemento finito de 8 nós têm funções de forma quadráticas, o que confere uma melhor aproximação de resultados. Na Figura 19 está representado o elemento finito PLANE 77-2D-8 Node *Thermal Solid* [45].

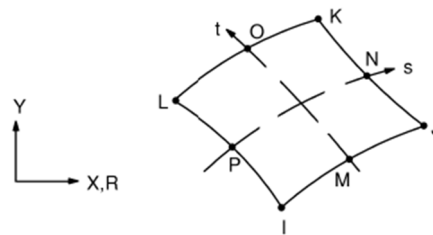


Figura 19-Elemento finito PLANE 77-2D-8 Node *Thermal Solid* [45]

Na Figura 20 encontra-se um corte da seção da ligação a ser estudada, utilizando elementos finitos cuja dimensão da aresta é de 2 mm.

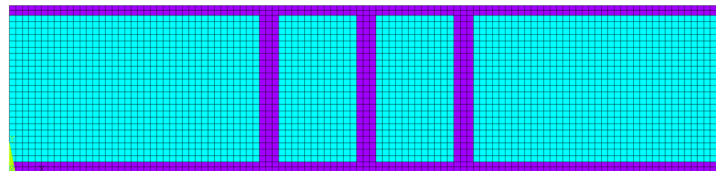


Figura 20-Divisão em elementos finitos

Com um elemento finito de 2 mm de dimensão é garantido que cada componente em estudo inclua pelo menos dois elementos na largura da sua seção reta. A Figura 21 representa a variação das dimensões dos diversos tipos de ligações a serem estudadas e as respectivas malhas de elementos finitos.

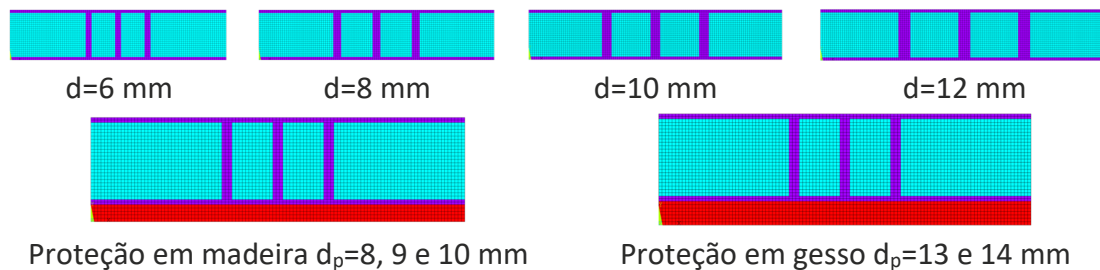


Figura 21-Geometrias das ligações com diferentes diâmetros e materiais de proteção

6.1.3 CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA

A caracterização térmica é importante para determinar todas as condições e variações que vão ocorrer ao longo do tempo e que podem ocorrer por condução, convecção e radiação. A expressão que caracteriza o diferencial da condução de calor para domínios bidimensionais é dada pela equação (34).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \dot{Q} = \rho c_p \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (34)$$

Em que \dot{Q} é o calor gerado internamente por unidade de volume e de tempo.

O campo de temperaturas que satisfaz a equação (34) no domínio Ω devem também satisfazer as condições fronteira do sistema que podem seguir as temperaturas prescritas numa parte Γ_θ da fronteira conforme sugere a condição de Dirichlet, um fluxo de calor prescrito Γ_q segundo a condição de Newman ou uma fronteira convectiva que implica a transmissão de calor por convecção Γ_c de acordo com a condição de Cauchy. Para além dessas, ainda podem seguir a fronteira radiativa em que há trocas de calor por radiação entre parte Γ_r da fronteira e a envolvente e por fim trocas por convecção e radiação em simultâneo Γ_{cr} [46].

O método dos resíduos pesados é aplicado às condições fronteira e à equação (34), usando elementos finitos Ω^e para discretizar o domínio, é aplicada uma formulação fraca e o método de Galerkin, e assim obtém-se a equação (35).

$$K\theta + C\dot{\theta} = F \quad (35)$$

Em que as matrizes K e C e o vetor F estão expressos nas equações (36), (37) e (38) respetivamente.

$$K_{lm} = \sum_{e=1}^E \int_{\Omega^e} \left(\frac{\partial N_l}{\partial x} \lambda \frac{\partial N_m}{\partial x} \lambda + \frac{\partial N_l}{\partial y} \lambda \frac{\partial N_m}{\partial y} \lambda \right) d\Omega^e + \sum_{e=1}^H \int_{\Gamma_c^e} \alpha_{cr} N_l N_m d\Gamma_c^e \quad (36)$$

$$C_{lm} = \sum_{e=1}^E \int_{\Omega^e} \rho c_p N_l N_m d\Omega^e \quad (37)$$

$$F_l = \sum_{e=1}^E \int_{\Omega^e} N_l \dot{Q} d\Omega^e - \sum_{e=1}^Q \int_{\Gamma_q^e} N_l \bar{q} d\Gamma_q^e - \sum_{e=1}^H \int_{\Gamma_c^e} N_l \alpha_{cr} \theta_\infty d\Gamma_c^e \quad (38)$$

Em que E é o número total de elementos, Q é o número de elementos com fronteira tipo Γ_q , H é o número de elementos com fronteiras do tipo Γ_c e/ou Γ_r , N_l e N_m são as habituais funções de forma e α_{cr} é o coeficiente de transmissão de calor por convecção e/ou radiação.

Através da discretização do tempo a partir das diferenças finitas, o sistema de equações diferenciais ordinárias (35), obtém-se a equação (39).

$$\widehat{K}_{n+\alpha} \theta_{n+\alpha} = \widehat{F}_{n+\alpha} ; 0 < \alpha \leq 1 \quad (39)$$

Em que $\widehat{K}_{n+\alpha}$ e $\widehat{F}_{n+\alpha}$ são dadas pelas equações (40) e (41).

$$\widehat{K}_{n+\alpha} = K_{n+\alpha} + \frac{1}{\alpha \Delta t} C_{n+\alpha} ; 0 < \alpha \leq 1 \quad (40)$$

$$\hat{F}_{n+\alpha} = F_{n+\alpha} + \frac{1}{\alpha \Delta t} C_{n+\alpha} \theta_n ; 0 < \alpha \leq 1 \quad (41)$$

Para o instante $t_{n+\alpha}$, o valor de θ no fim do intervalo Δt é dada pela equação (42).

$$\theta_{n+1} = \frac{1}{\alpha} \theta_{n+\alpha} + \left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \theta_n \quad (42)$$

O parâmetro α varia e com isso, obtém-se diversos esquemas de integração no tempo. Os valores mais comuns são $\alpha = 1/2$ (Crank-Nicolson), $\alpha = 2/3$ (Galerkin) e $\alpha = 1$ (Euler Backward).

Nos problemas não-lineares, as propriedades variam em função do tempo e da temperatura. Deste modo, a equação (35) pode ser transcrita na equação (43).

$$K_{(\theta,t)} \theta_{(t)} + C_{(\theta,t)} \dot{\theta}_{(t)} = F_{(\theta,t)} \quad (43)$$

Agora, as matrizes $K_{n+\alpha}$ e $C_{n+\alpha}$ e o vetor $F_{n+\alpha}$ pertencentes às equações (40) e (41) são dadas pelas equações (44), (45) e (46).

$$K_{n+\alpha} = K(\theta_{n+\alpha}, t_{n+\alpha}) \quad (44)$$

$$C_{n+\alpha} = C(\theta_{n+\alpha}, t_{n+\alpha}) \quad (45)$$

$$F_{n+\alpha} = F(\theta_{n+\alpha}, t_{n+\alpha}) \quad (46)$$

Ainda é necessário impor um processo iterativo de modo a obter a convergência. A equação (47) apresenta um sistema de forças residuais do tipo:

$$\psi_{n+\alpha}^i = \hat{F}_{n+\alpha}^i - \hat{K}_{n+\alpha}^i \theta_{n+\alpha}^i \neq 0 \quad (47)$$

Através das devidas alterações de simplificação realizadas, obtém-se a equação (48).

$$\Delta \theta_{n+\alpha}^i = [\hat{K}_{n+\alpha}^i]^{-1} \psi_{n+\alpha}^i \quad (48)$$

Assim a solução em cada iteração pode ser determinada pela equação (49).

$$\theta_{n+\alpha}^{i+1} = \theta_{n+\alpha}^i + \Delta \theta_{n+\alpha}^i \quad (49)$$

De forma a verificar a convergência, utiliza-se a equação (50).

$$\frac{\|\Delta \theta_{n+\alpha}^i\|}{\|\theta_{n+\alpha}^{i+1}\|} = \frac{\|\theta_{n+\alpha}^{i+1} - \theta_{n+\alpha}^i\|}{\|\theta_{n+\alpha}^{i+1}\|} < TOL \quad (50)$$

Em que TOL é a tolerância exigida, $\|\cdot\|$ é a norma euclidiana, $\Delta\theta_{n+\alpha}^i$ é a alteração ao campo de temperaturas na iteração i e $\theta_{n+\alpha}^{i+1}$ é a temperatura atual.

Relativamente ao processo de simulação, mais propriamente à análise térmica, o primeiro passo foi definir as condições iniciais, ou seja, a que temperatura se encontra a ligação antes do fogo começar. A temperatura inicial considerada foi 20°C em toda a geometria. De seguida, o modelo da ligação vai sofrer a variação de temperatura imposta pela presença da ação do fogo numa das suas faces, utilizando-se a curva de fogo normalizada ISO 834 [9]. A transferência de calor ocorre por condução ao longo da ligação, e convecção e radiação na face exposta da ligação. A convecção ocorre do meio envolvente para a face de ligação e o coeficiente de transmissão de calor por convecção adotado foi de 25 W.m⁻²K⁻¹ e a radiação gerada pelo fogo e libertada para o meio ambiente assume um valor de emissividade 1, ambos conforme o Eurocódigo 1-1-2 [34]. As restantes faces apresentam um fluxo de calor nulo, ou seja, não há trocas com o exterior da ligação. A Figura 22 apresenta de forma esquemática as condições de fronteira térmica da ligação a ser estudada.

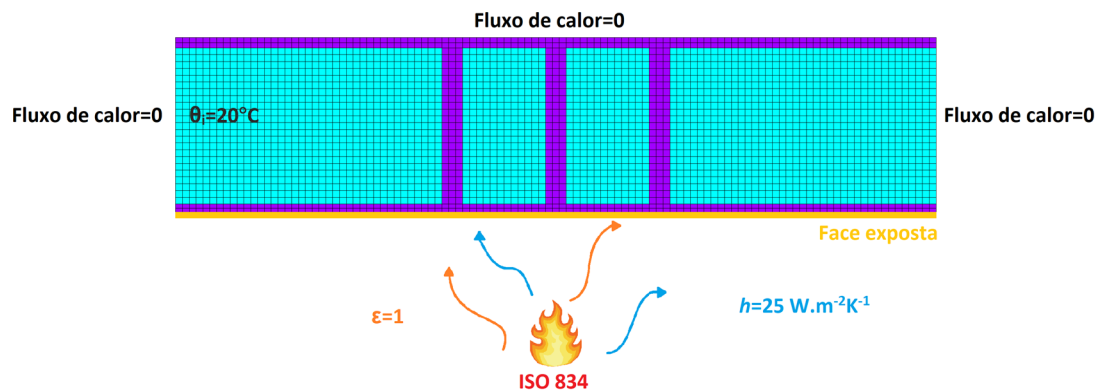


Figura 22-Condições de fronteira térmica aplicadas na simulação numérica

RESULTADOS

7.1 TEMPERATURA AMBIENTE

7.2 TEMPERATURAS ELEVADAS

7 RESULTADOS

Nesta dissertação foram testadas quatro massas volúmicas de madeira lamelada colada, quatro diâmetros diferentes e para esta combinação foram simuladas ligações desprotegidas, com proteção em madeira e proteção em gesso. No total foram realizadas quarenta e oito simulações com o intuito de verificar com clareza a influência de cada variável presente. Após a elaboração das simulações, é necessário analisar os resultados obtidos e quais os fatores que influenciam de forma determinante e os que não alteraram o comportamento da ligação em situação de exposição ao fogo. Neste capítulo, serão apresentados os resultados obtidos para a temperatura ambiente e em situação de incêndio.

7.1 TEMPERATURA AMBIENTE

Com base nas ligações dimensionadas à temperatura ambiente, foi possível criar um ábaco presente no anexo 10.2 com as diferentes variáveis em estudo, com objetivo de fornecer o número de cavilhas necessárias, tendo em conta o tipo de madeira, o diâmetro dessas cavilhas e a carga aplicada na ligação. Na Figura 23 verificam-se os resultados obtidos para o número de cavilhas necessárias, em função das variáveis envolvidas.

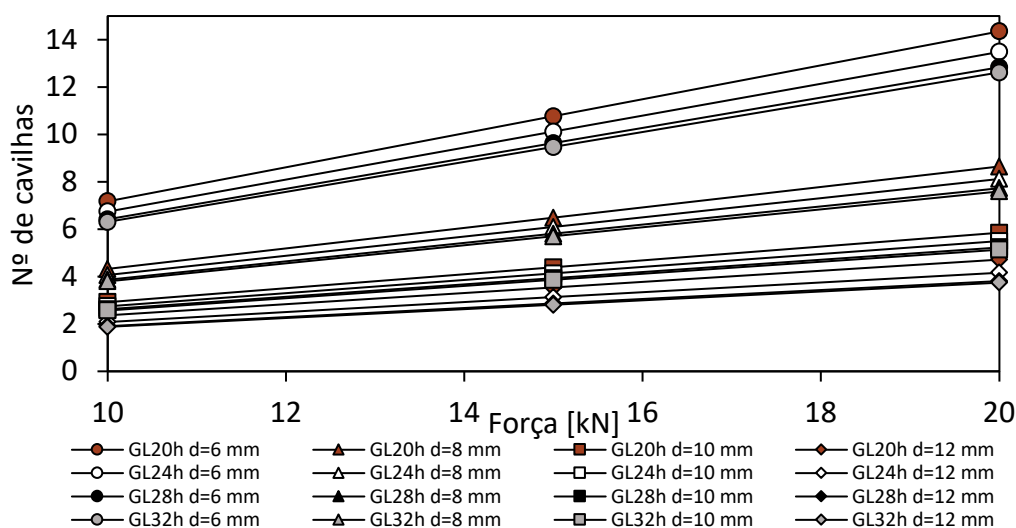


Figura 23-Variação do número de cavilhas segundo a carga, a massa volúmica da madeira e diâmetro da cavilha

Por observação da Figura 23 é perceptível que quanto menor for o diâmetro do ligador e quanto maior for a carga, maior é o número de cavilhas a serem utilizadas numa ligação. De um modo geral, a massa volúmica da madeira não afeta consideravelmente o

número de cavilhas necessárias e à medida que o diâmetro da cavilha vai aumentando, a influência da massa volúmica da madeira vai sendo cada vez menor. Recentes publicações sobre o dimensionamento de ligações de madeira segundo o Eurocódigo 5-1-1 [6], nomeadamente em ligações do tipo W-W-W [27] e W-S-W [28] obtiveram resultados semelhantes.

7.2 TEMPERATURAS ELEVADAS

Numa primeira análise, verificou-se a velocidade de carbonização da madeira nas ligações desprotegidas. Apesar da madeira não estar diretamente exposta ao fogo devido à presença da chapa de aço, a velocidade de carbonização vai ser contabilizada desde o instante $t = 0$ s. Desta forma, comparam-se os valores obtidos com a velocidade de carbonização estabelecida pelo Eurocódigo 5-1-2 [7] para ligações cujos membros externos são em madeira, e verifica-se se a chapa de aço retarda o processo de carbonização ou se prejudica na resistência ao fogo. Sabe-se que, segundo o Eurocódigo 5-1-2 [7], a velocidade de carbonização é considerada constante para *glulam* de madeira macia com massa volúmica igual ou superior a 290 kg.m^{-3} . O Eurocódigo 5-1-2 [7] prevê fórmulas de cálculo para obter a velocidade de carbonização para diferentes situações. Na Figura 24 está representada a espessura de carbonização em superfícies expostas ao fogo numa direção.

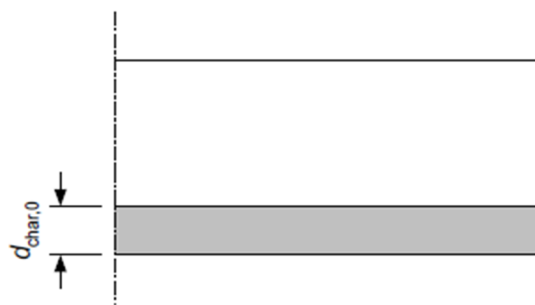


Figura 24-Carbonização numa direção [7]

A espessura de carbonização $d_{char,0}$ é obtida através da velocidade de carbonização numa direção β_0 e o tempo de exposição ao fogo t como mostra a equação (51).

$$d_{char,0} = \beta_0 t \quad (51)$$

Contudo, verificou-se que a carbonização em torno da madeira incluía arredondamentos devido à condução de calor da chapa para as cavilhas e para contabilizar esse efeito, foi calculada a velocidade de carbonização com o efeito do arredondamento β_n , a partir da espessura de carbonização com o efeito do arredondamento $d_{char,n}$ conforme a equação (52).

$$d_{char,n} = \beta_n t \quad (52)$$

Na Figura 25 é possível observar o efeito do arredondamento no elemento de madeira devido à presença dos elementos de aço tanto na parte inferior como nas laterais da madeira.

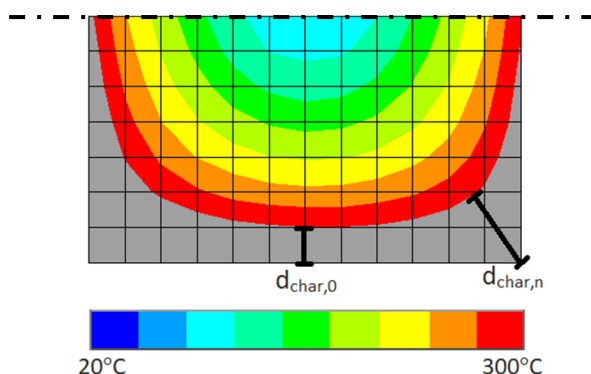


Figura 25-Carbonização do elemento de madeira e o efeito do arredondamento

Através da observação direta dos modelos numéricos, impondo a condição isotérmica de 300°C como limite da temperatura na formação da camada carbonizada, analisou-se a quantidade de carbonização para um determinado intervalo de tempo. Para obter a evolução da velocidade de carbonização, foram verificados três intervalos de tempo, nomeadamente para 600, 700 e 800 s. Os elementos finitos a cinza, representam a espessura de carbonização numa direção $d_{char,0}$ e a espessura de carbonização com o efeito do arredondamento $d_{char,n}$. O tamanho de cada elemento finito é de 2 mm. Com base nesses cálculos é possível determinar a velocidade de carbonização, conforme se representa na Tabela 11.

Tabela 11-Velocidade de carbonização obtida

Glulam	d [mm]	β_0 [mm.min ⁻¹]			β_n [mm.min ⁻¹]		
		600 s	700 s	800 s	600 s	700 s	800 s
GL20h	6	0,20	0,34	0,54	0,45	0,66	0,77
	8	0,20	0,27	0,38	0,41	0,62	0,70
	10	0,20	0,29	0,33	0,40	0,58	0,68
	12	0,20	0,29	0,33	0,43	0,59	0,71
GL24h	6	0,20	0,33	0,45	0,44	0,60	0,73
	8	0,18	0,26	0,30	0,41	0,56	0,66
	10	0,18	0,26	0,30	0,38	0,55	0,65
	12	0,20	0,27	0,30	0,38	0,42	0,64
GL28h	6	0,18	0,29	0,39	0,40	0,55	0,67
	8	0,18	0,24	0,30	0,34	0,63	0,63
	10	0,18	0,24	0,29	0,31	0,50	0,60
	12	0,20	0,22	0,20	0,33	0,49	0,44
GL32h	6	0,16	0,26	0,38	0,40	0,51	0,65
	8	0,16	0,22	0,29	0,34	0,49	0,59
	10	0,18	0,22	0,29	0,32	0,48	0,44
	12	0,20	0,22	0,27	0,27	0,38	0,50

A velocidade de carbonização aumenta à medida que o tempo avança, no entanto diminui com o aumento do diâmetro das cavilhas e com o aumento da massa volúmica da madeira. Os valores presentes no Eurocódigo 5-1-2 [7] relativamente à velocidade de carbonização encontram-se na Tabela 12.

Tabela 12-Velocidade de carbonização de referência [7]

Eurocódigo 5-1-2	β_0 [mm.min ⁻¹]	β_n [mm.min ⁻¹]
	0,65	0,7

Comparando os resultados obtidos com os valores estipulados na Tabela 12 é perceptível verificar que a presença da chapa retarda a velocidade de carbonização da ligação em 97% dos casos de estudo. Nos casos em que a velocidade de carbonização ultrapassou os valores de referência, correspondiam ao maior intervalo de exposição ao fogo (800 s) e conseqüentemente aos maiores valores de velocidade de carbonização com efeito do arredondamento. O erro de leitura dos valores pôde também ter influenciado nos resultados da velocidade de carbonização. Os erros são originados pela subjetividade da observação e leitura das espessuras a partir dos modelos computacionais. Quanto aos valores de referência do Eurocódigo 5-1-2 [7] para *glulam* de madeira macia com massa volúmica igual ou superior a 290 kg.m⁻³ podem ser considerados valores pouco abrangentes, face a diferentes situações visto que não têm em consideração outras variáveis como a massa volúmica exata da madeira, o diâmetro dos ligadores e o tipo de ligação, pois os valores de referência somente representam ligações com membros externos em madeira.

Para analisar a evolução da temperatura na ligação ao longo do tempo, recorreu-se a três pontos distintos K1, K2 e K3. O ponto K1 encontra-se na superfície da cavilha de aço exposta ao fogo, K2 está posicionado na cavilha, mas ao nível da interface da madeira com a chapa e K3 encontra-se na interface da madeira e chapa. Nas ligações protegidas foi acrescentado mais um ponto na superfície da proteção exposta ao fogo, K4. Na Figura 26 estão presentes a localização dos pontos referidos anteriormente.

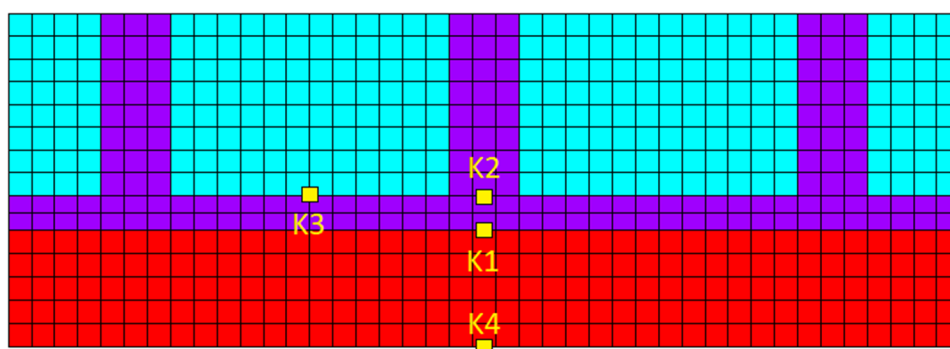


Figura 26-Localização dos pontos analisados

A partir dos pontos assinalados, foram retirados os valores de temperatura durante uma hora de exposição ao fogo. Assim, analisa-se a evolução da temperatura em locais distintos, quais os mais afetados pelo fogo e verificam-se os resultados em diferentes

ligações. A Figura 27 representa a evolução da temperatura dos diferentes pontos durante uma hora para ligação GL20h com cavilhas metálicas de 6 mm.

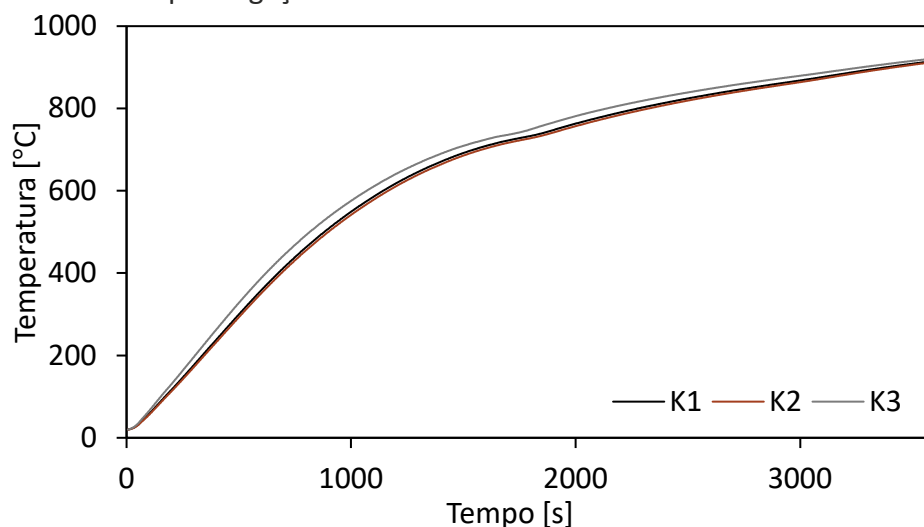


Figura 27-Temperatura da ligação não protegida em função do tempo para GL20h e diâmetro de cavilha de 6 mm

A Figura 27 refere-se a um caso em estudo, em que o objetivo é comparar o comportamento da ligação em termos da evolução da temperatura em pontos distintos da ligação. Como é possível verificar, os valores de temperatura para a ligação em questão encontram-se bastante próximos, principalmente os pontos K1 e K2, ambos localizados na cavilha. Já a curva relativa ao ponto K3 está ligeiramente afastada e apresenta temperatura superior aos restantes pontos durante praticamente todo o intervalo de tempo, por se encontrar na fronteira entre a chapa de aço e o membro central de madeira. Para entender este fenómeno é preciso ter em consideração a transferência de calor por condução, que para um mesmo instante de tempo, a variação de temperatura é distinta em diferentes pontos da ligação. Comparando a cavilha com a chapa, é possível verificar que a chapa apresenta uma área superior de exposição ao fogo, uma espessura menor e encontra-se em contacto com a madeira que apresenta propriedades isolantes. Todos esses fatores contribuem para que na fronteira com a madeira, a temperatura seja superior à da cavilha.

Para o conhecimento do comportamento ao fogo no interior da ligação, e para cada diâmetro de cavilha, massa volúmica da madeira e tipo de proteção, foram obtidos gráficos semelhantes ao da Figura 27 para comparar os diferentes pontos assinalados em diferentes ligações. Nos Anexos 10.4 e 10.5 estão presentes todos os resultados obtidos nas diferentes ligações. Neste capítulo serão utilizados, como exemplo, as ligações GL20h e ligações com 6 mm de diâmetro de cavilhas. Na comparação das proteções, é utilizada a ligação GL20h com 6 mm de diâmetro de cavilha. A Figura 28 apresenta, para a madeira GL20h, a influência do diâmetro da cavilha na evolução da temperatura quando a ligação é exposta ao fogo durante 1 hora.

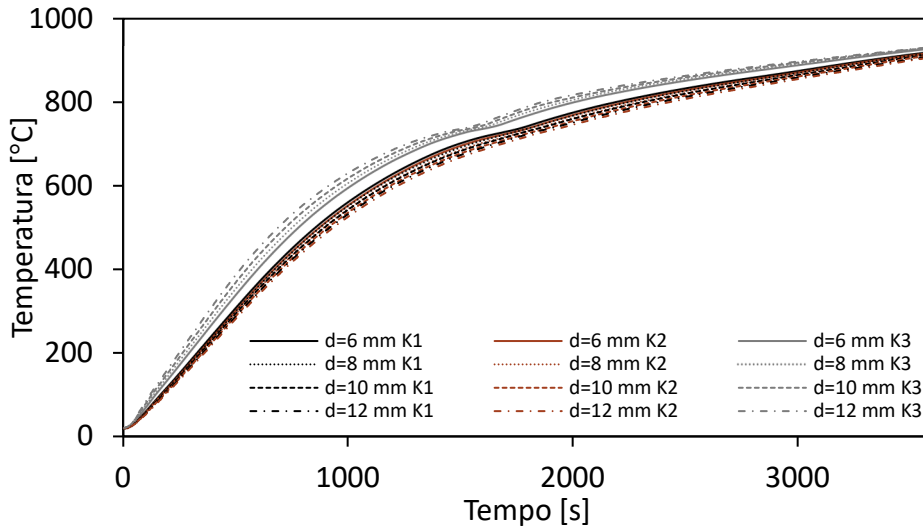
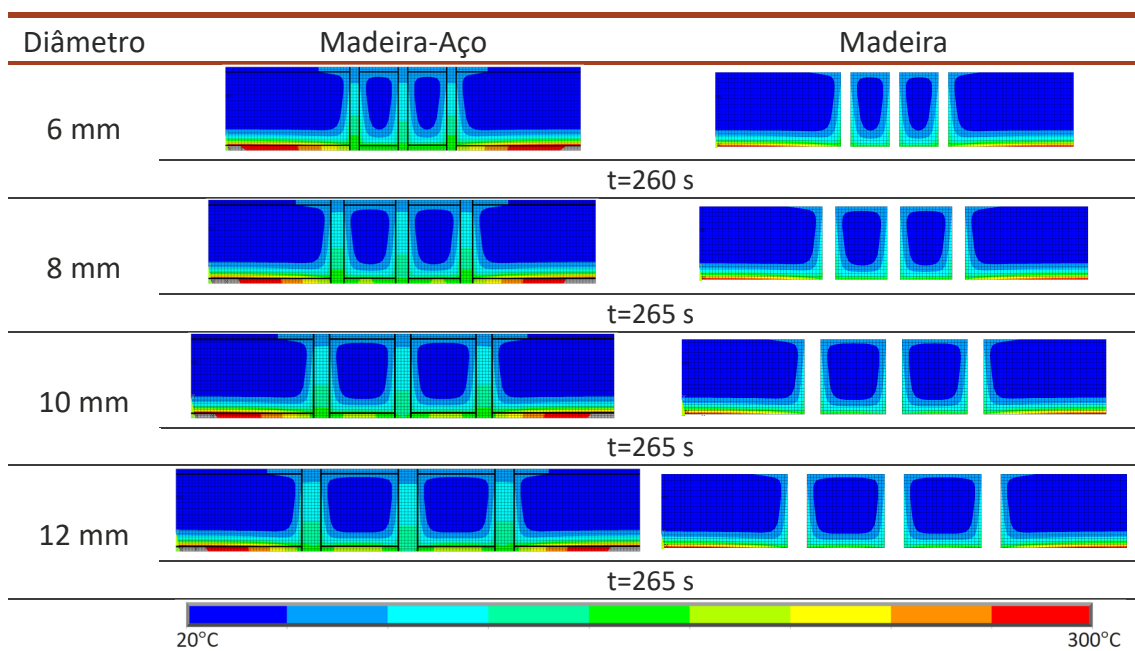


Figura 28-Temperatura da ligação não protegida em função do tempo para GL20h e quatro diâmetros distintos

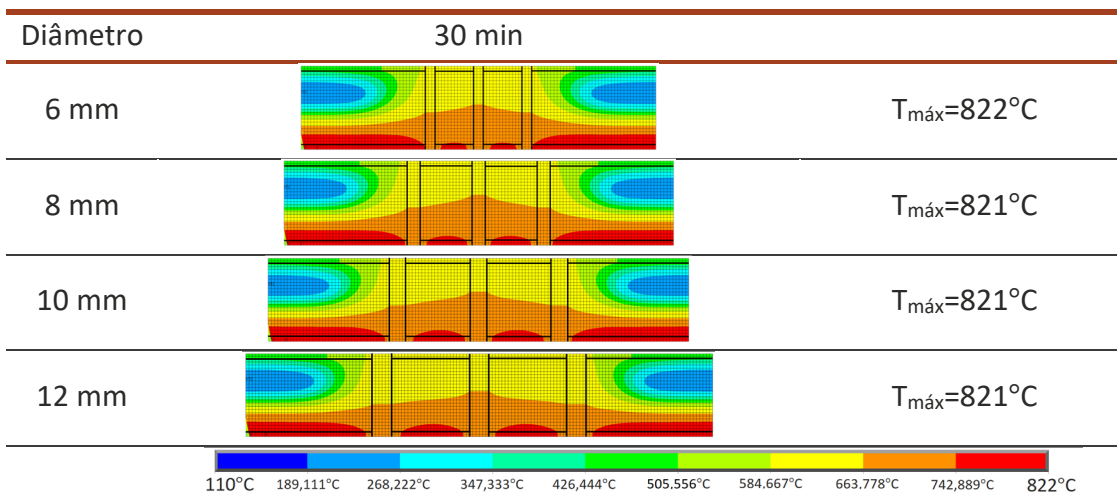
Na Figura 28, para os pontos K1 e K2, à medida que o diâmetro da cavilha aumenta, a temperatura nesses pontos diminui. Embora a área de exposição ao fogo aumente 2 mm, o que supostamente deveria fazer com que a temperatura aumentasse, esse aumento acaba por não ser muito significativo devido ao aumento do espaçamento entre cavilhas. O espaçamento entre cavilhas aumenta 8 mm, quatro vezes mais que o diâmetro e quanto mais próximas estas se encontram, maior a temperatura pois o calor segue o percurso que lhe oferece menos resistência. À medida que o espaçamento aumenta, o percurso do fluxo de calor torna-se cada vez mais longo, logo haverá mais perdas de calor para a chapa e para a madeira. No ponto K3, quanto maior for o espaçamento entre cavilhas, maior a temperatura nesse ponto pelo motivo referido anteriormente. Na Tabela 13 constam as ligações GL20h de diferentes diâmetros para 300°C na interface do aço com a madeira.

Tabela 13-Diferentes diâmetros da ligação GL20h exposta ao fogo



Conforme já verificado, com o aumento do diâmetro da cavilha, a temperatura no seu interior decresce embora não haja uma diferença significativa. As extremidades são os primeiros pontos a atingir os 300°C por se encontrarem mais afastados das cavilhas e a ligação de 6 mm é a que atinge os 300°C mais rapidamente, no entanto a diferença em relação aos outros diâmetros é pouco relevante, com uma diferença de 5 segundos. Na Tabela 14 encontra-se as ligações GL20h para os diferentes diâmetros de ligação após 30 min de exposição ao fogo.

Tabela 14-Diferentes diâmetros da ligação GL20h após 30 min de exposição ao fogo



Em todos os diâmetros de cavilhas, ao fim de 30 min de exposição ao fogo, a ligação fica carbonizada e apenas uma pequena porção de madeira consegue resistir às elevadas temperaturas. No entanto, é visível o aumento da temperatura entre cavilhas a partir da chapa em direção à madeira. Para além do diâmetro das cavilhas, outro fator que influencia na resistência ao fogo é a massa volúmica da madeira na ligação. Na Figura 29 é apresentada a influência da massa volúmica para o diâmetro de 6 mm.

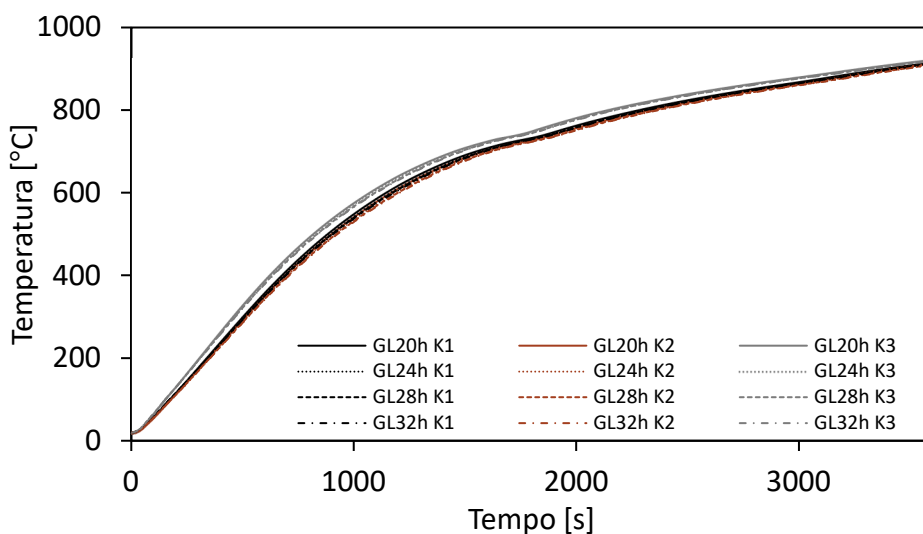
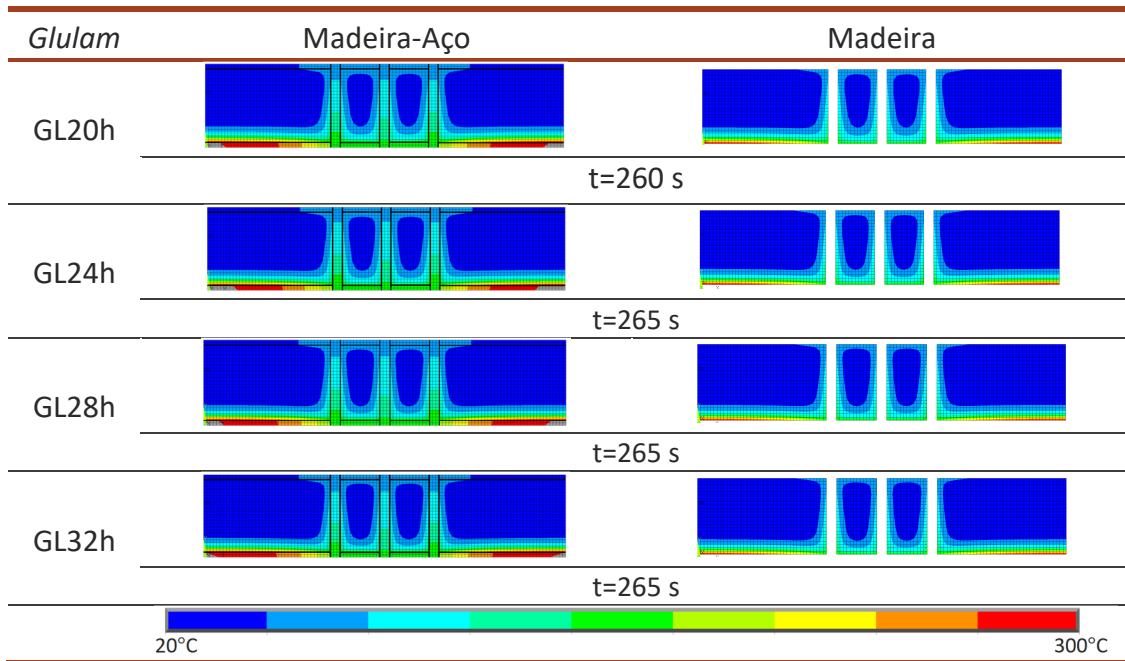


Figura 29-Temperatura da ligação não protegida em função do tempo para diâmetro de cavilha de 6 mm e quatro massas volúmicas distintas

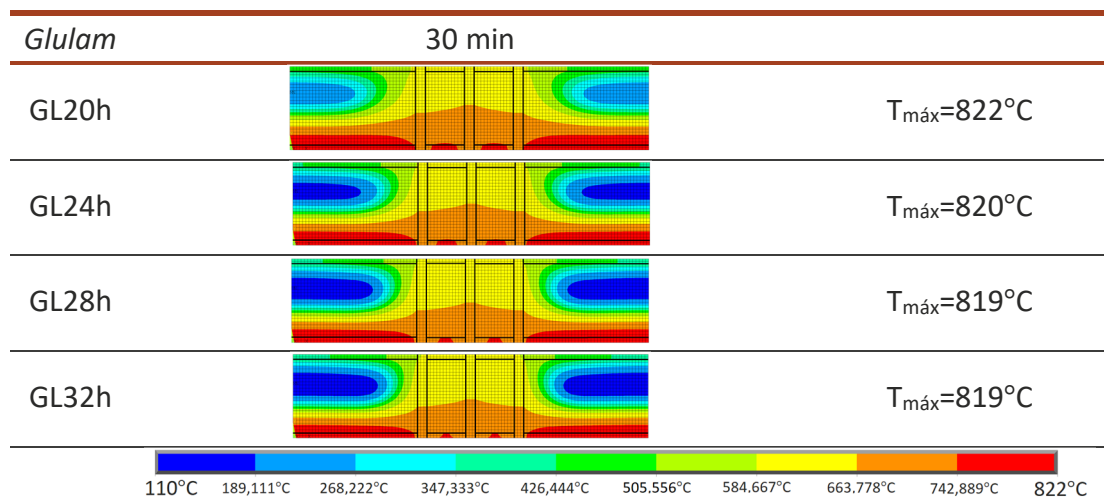
De um modo geral, os valores para as diferentes massas volúmicas andam bastante próximos, no entanto é possível verificar que o aumento da massa volúmica faz com que a temperatura da ligação diminua. Isto acontece porque a madeira com maior massa volúmica contém maior quantidade de matéria para arder durante a combustão, o que contribui para um aumento da resistência ao fogo. Na Tabela 15 estão presentes ligações com cavilhas de 6 mm com diferentes massas volúmicas expostas ao fogo.

Tabela 15-Diferentes massas volúmicas da ligação com cavilhas de diâmetro 6 mm exposta ao fogo



A influência da massa volúmica na resistência ao fogo é pouco perceptível nesta análise, conforme representado, uma vez que a análise incidiu na determinação da temperatura de 300°C na interface da chapa e da madeira. A Tabela 16 apresenta ligações com cavilhas de 6 mm para as diferentes massas volúmicas após 30 min de exposição ao fogo.

Tabela 16-Diferentes massas volúmicas da ligação com cavilhas de diâmetro 6 mm após 30 min de exposição fogo



Após 30 min de fogo, embora as ligações se encontrem termicamente afetadas, à medida que a massa volúmica aumenta, menores são as temperaturas na ligação. Na Figura 30 encontra-se a evolução da temperatura para a ligação não protegida, com proteção de gesso e de madeira.

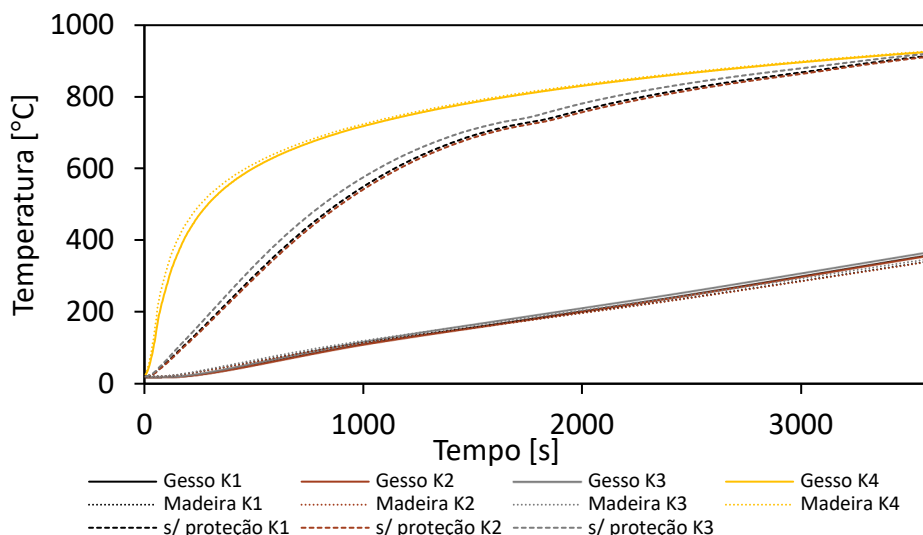
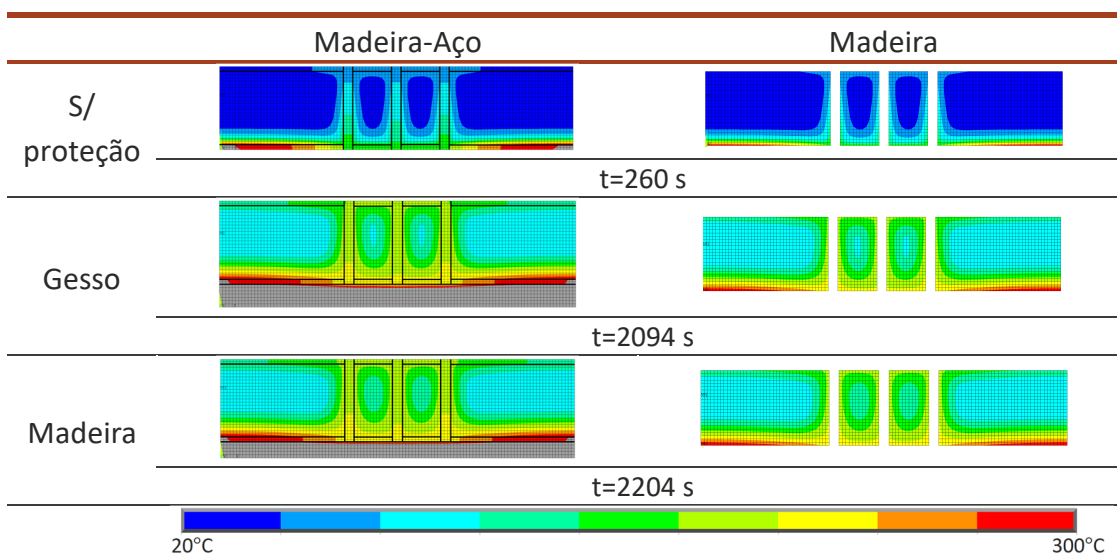


Figura 30-Temperatura da ligação não protegida, com proteção de gesso e proteção de madeira em função do tempo para GL20h e diâmetro de cavilha de 6 mm

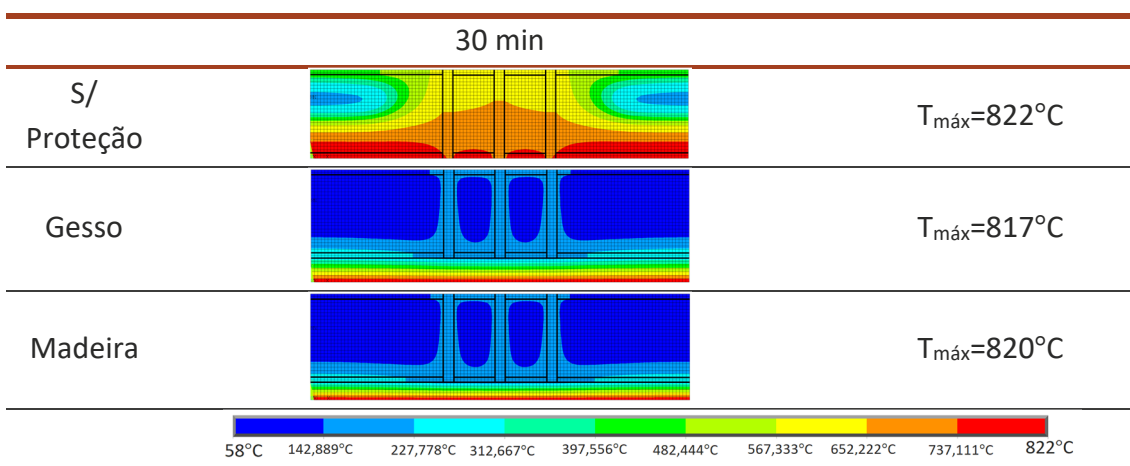
Como seria de esperar, a ligação protegida não sofre grande variação de temperatura em comparação com a ligação sem proteção pois sendo materiais isolantes têm como função proteger a ligação das elevadas temperaturas. Já os pontos K4 têm um comportamento próximo da curva de fogo ISO 834 [9]. Quanto às ligações protegidas, os pontos K1 e K2 dos diferentes materiais apresentam comportamentos semelhantes pois ambos foram dimensionados para que ao fim de 30 min, o aço atingisse os 300°C. Na Tabela 17 é apresentada a influência da proteção nas ligações GL20h com cavilha de diâmetro 6 mm expostas ao fogo.

Tabela 17- Influência da proteção na ligação GL20h com cavilha de diâmetro 6 mm exposta ao fogo



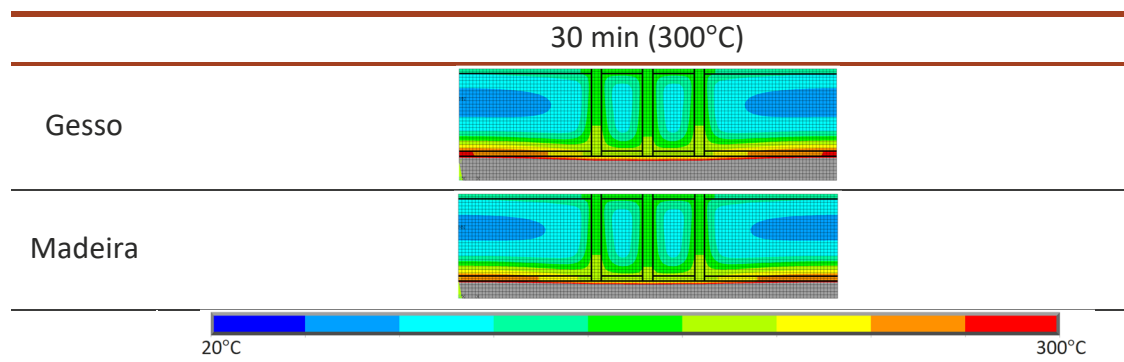
Em menos de 5 min de exposição ao fogo, as extremidades da chapa e consequentemente a interface entre a chapa e a madeira atingiram os 300°C, o que significa que ligações S-W-S desprotegidas não são uma opção segura do ponto de vista da resistência ao fogo conforme referido pelo Eurocódigo 5-1-2 [7]. Com a presença da proteção, a durabilidade da ligação aumenta substancialmente chegando até aos 35 min no gesso e aos 37 min na madeira. Na Tabela 18 é apresentada a influência da proteção ao fim de 30 min de exposição ao fogo em ligações GL20h com cavilhas de 6 mm de diâmetro.

Tabela 18-Influência da proteção na ligação GL20h com cavilha de diâmetro 6 mm após 30 min de exposição ao fogo



A presença da proteção faz com que após 30 min de exposição ao fogo, a ligação se mantenha em boas condições, logo a proteção cumpre com a sua função para o tempo determinado pelo dimensionamento segundo o Eurocódigo 3-1-2 [5]. Na Tabela 19 encontram-se ligações GL20h com cavilhas de 6 mm de diâmetro expostas a 30 min ao fogo.

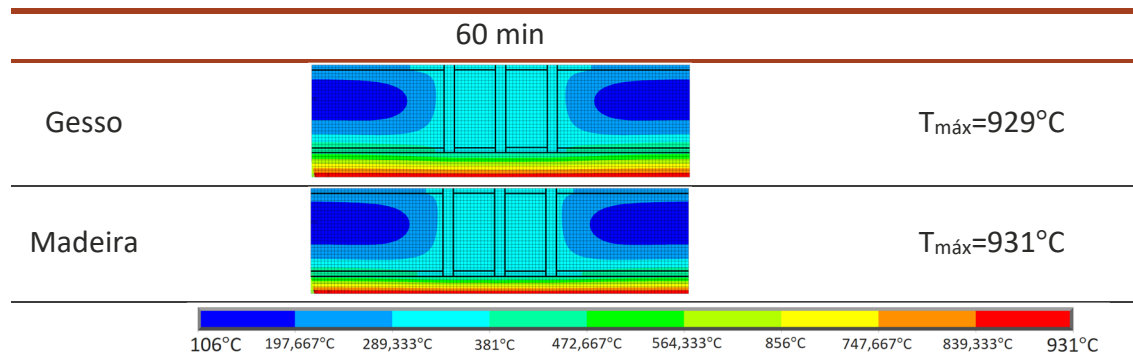
Tabela 19-Diferentes materiais de proteção da ligação GL20h com cavilha de diâmetro 6 mm após 30 min de exposição ao fogo



Apesar de serem materiais muito diferentes e com espessuras distintas, a madeira e o gesso possuem comportamentos semelhantes. No entanto, é possível verificar que nas extremidades da chapa na ligação com proteção em gesso, apresenta maior temperatura que a ligação com proteção em madeira. Ao fim de 30 min de exposição ao

fogo, na interface entre a proteção e o aço, ambas as proteções atingiram os 300°C, valores estipulados pelo dimensionamento. Na Tabela 20 é apresentado o comportamento dos materiais de proteção nas ligações GL20h com cavilhas de 6 mm de diâmetro, ao fim de 1 hora de exposição ao fogo.

Tabela 20-Diferentes materiais de proteção da ligação GL20h com cavilha de diâmetro 6 mm após 60 min de exposição ao fogo



Ao fim de 1 hora, parte da madeira já se encontra acima dos 300°C em ambas as ligações pois o tempo útil das ligações rondam 35 a 37 min conforme referido anteriormente. É de notar que no caso do gesso, a temperatura propagou-se com mais facilidade que na madeira devido à condutividade térmica e espessura superior.

Conforme o estudo realizado sobre ligações S-W-S expostas ao fogo [47] e os resultados obtidos neste capítulo, a melhor combinação de parâmetros para obter uma resistência ao fogo superior é a ligação com cavilhas de maior diâmetro e madeira com maior massa volúmica. No entanto, os dois fatores referidos, por si só não fazem da ligação um elemento seguro. Esta deve ser protegida para que seja considerada uma ligação capaz de suportar pelo menos 30 min de fogo. Comparativamente aos artigos sobre ligações W-S-W [28] e W-W-W [27], quando protegidas com gesso do tipo A e F, ambas conseguem suportar 60 min de exposição ao fogo sem prejudicar termicamente a ligação. Contudo, a espessura do gesso do tipo A é de 23 mm e a espessura do gesso do tipo F é de 18 mm, valores bastante superiores aos utilizados neste estudo.

CONCLUSÃO

8.1 TRABALHOS FUTUROS

8 CONCLUSÃO

A dissertação tinha como objetivos o dimensionamento de uma ligação S-W-S em duplo corte com cavilhas metálicas à temperatura ambiente e a temperaturas elevadas, juntamente com a análise da resistência ao fogo das ligações, objetivos esses que foram devidamente concluídos.

O Eurocódigo 5-1-1 fornece todas as equações e regras para o devido dimensionamento das ligações S-W-S à temperatura ambiente tendo sido possível a criação de um ábaco com toda a informação necessária tendo em conta o tipo de madeira, o diâmetro das cavilhas e do carregamento aplicado na ligação. Assim, a análise dos diferentes parâmetros e como estes influenciam na ligação, pôde ser estudada de forma mais clara. Deste modo, conclui-se que a diminuição do diâmetro das cavilhas e o aumento da carga aplicada contribuem para o aumento do número de cavilhas na ligação. Por outro lado, verificou-se que a massa volúmica tem pouca influência no número de cavilhas e à medida que o diâmetro da cavilha aumenta, essa influência tende a ser cada vez menor. O grande desafio da dissertação foi o dimensionamento das ligações segundo o Eurocódigo 5-1-2 pois este foca-se principalmente em ligações cujos membros externos são de madeira. No que diz respeito às ligações com membros externos em aço, as informações são pouco aprofundadas e adaptadas de outros casos. O cálculo da espessura da proteção foi baseada numa equação existente, relativa ao caso específico de ligações com membros externos em madeira. Para outros materiais de proteção, é sugerido que se verifique o Eurocódigo 3-1-2, onde é apresentado um método iterativo para a determinação da temperatura do aço, num intervalo de tempo, atendendo à temperatura dos gases e das características da proteção. Embora este método seja tipicamente usado em perfis em aço, mostrou-se como uma excelente alternativa para a determinação da espessura da proteção. Contudo, um método analítico descrito pelo autor Paulo Vila Real presente no livro *Incêndio em Estruturas Metálicas: Cálculo Estrutural* baseado no método anteriormente referido demonstrou ser um processo de resolução mais expedito para a determinação da espessura da proteção.

Após a análise dos resultados obtidos pelo MEF através do programa ANSYS Student 2019 R3, conclui-se que as ligações desprotegidas têm uma fraca resistência ao fogo, reforçando assim a sugestão do Eurocódigo 5-1-2 referente à não utilização das ligações desprotegidas quando sujeitas a temperaturas elevadas. O Eurocódigo 5-1-2 apresenta velocidades de carbonização para ligações cujos membros externos são em madeira macia, com massa volúmica igual ou superior a 290 kg.m^{-3} , como sendo o caso mais próximo ao estudado na dissertação. No entanto, o facto do membro externo ser em aço e da utilização de quatro massas volúmicas diferentes, faz com que haja uma grande variação de valores de velocidade de carbonização e que os valores de referência

apresentados no Eurocódigo 5-1-2 sejam pouco representativos face aos inúmeros fatores que influenciam a carbonização.

Do ponto de vista das características das ligações, verificou-se que a ligação com maior diâmetro e a madeira com a maior massa volúmica, apresentava uma resistência ao fogo superior. Contudo, somente a utilização da proteção confere a resistência suficiente para suportar a exposição ao fogo em pelo menos 30 min. O gesso necessita de uma espessura maior para garantir esse requisito tornando assim, a madeira a melhor opção de proteção. Conclui-se também que o cálculo da espessura da proteção, adaptado das ligações com membros externos em madeira, segundo Eurocódigo 5-1-2, estava sobredimensionado. No que diz respeito a diferentes tipos de ligações estudadas por outros autores, embora algumas características não sejam as mesmas, as ligações W-W-W e W-S-W conseguem suportar uma hora de exposição ao fogo, no entanto, as espessuras das proteções utilizadas são superiores em comparação com as ligações do tipo S-W-S.

8.1 TRABALHOS FUTUROS

Relativamente a trabalhos futuros, a análise do plano de simetria que contem a linha de cavilhas para avaliar a influência do número de cavilhas na resistência ao fogo das ligações seria um complemento ao estudo já realizado.

A verificação da resistência ao fogo de ligações através de uma análise termomecânica e a realização de ensaios experimentais, seriam temas de trabalho importantes.

Por fim, para obter uma comparação com outro tipo de ligações já estudadas (ligações W-W-W e W-S-W) por outros autores, seria interessante verificar a resistência ao fogo no mesmo intervalo de tempo de uma hora, utilizando ainda as mesmas espessuras de proteção.

**BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES
DE INFORMAÇÃO**

9 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

- [1] K. Bell *et al.* (2008), “Handbook 1-Timber Structures” *Leonardo da Vinci Pilot Projects: Educational Materials for Designing and Testing of Timber Structures – TEMTIS*.
- [2] R. J. Ross (2010), *Wood handbook: wood as an engineering material*, Centennial, vol. 190, Wisconsin, ISBN: 9781484859704.
- [3] L. Marques (2008), “O Papel da Madeira na Sustentabilidade da Construção”, Universidade do Porto-FEUP.
- [4] CEN, EN 1993-1-1, “Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules”, *Brussels*, 2005.
- [5] CEN, EN 1993-1-2, “Eurocode 3: Design of steel structures Part 1-2: General rules Structural fire design”, *Brussels*, 2010.
- [6] CEN, EN 1995-1-1, “Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1 : General - Common rules and rules for buildings”, *Brussels*, 2004.
- [7] CEN, EN 1995-1-2, “Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-2: General - Structural fire design”, *Brussels*, 2004.
- [8] “ANSYS Mechanical APDL 2019 R3” Release 2019, Build 19.5.
- [9] ISO 834-1:1999, “Fire-resistance tests-Elements of building construction-Part 1:General requirements”, 1999.
- [10] M. Tavakkol-khah and W. Klingsch (1997), “Calculation model for predicting fire resistance time of timber members”, *Fire Safety Science*, vol. 5, pp. 1201–1211.
- [11] E. M. M. Fonseca and P. M. M. Vila Real (1998), “Modelação Numérica do Comportamento Termo-Mecânico de Componentes Metálicos Sujeitas ao Fogo” *Série Estudos*, Edição: IPB, pp. 1–10.
- [12] K. Laplanche, D. Dhima, and P. Racher (2006), “Thermo-mechanical analysis of the timber connection under fire using 3D finite element model”, *9th world conference on timber engineering WCTE, Portland/Oregon, USA*, vol. 1, pp. 279–286, ISBN: 978-1622762859.
- [13] C. Austruy, M. Fragiaco, P. Moss, and A. Buchanan (2007), “Fire resistance of timber connections”, *Ecole Normale Supérieure de Cachan, Cachan, France*, pp. 1–34.
- [14] A. Frangi, V. Schleifer, M. Fontana, and E. Hugi (2010), “Experimental and numerical analysis of gypsum plasterboards in fire”, *Fire Technology*, vol. 46, no. 1, pp. 149–167, ISBN: 1069400900975.
- [15] P. B. Cachim and J.M. Franssen (2010), “Assessment of eurocode 5 charring rate calculation methods”, *Fire Technology*, vol. 46, pp. 676–686.

- [16] A. Frangi, C. Erchinger, and M. Fontana (2010), "Experimental fire analysis of steel-to-timber connections using dowels and nails", *Fire and Materials: An International Journal*, vol. 34, no. 1, pp. 1–19.
- [17] E. M. M. Fonseca and L. M. S. Barreira (2011), "Experimental and Numerical Method for Determining Wood Char-Layer at High Temperatures Due to An Anaerobic Heating", *International Journal of Safety and Security Engineering*, vol. 1, no. 1, pp. 65–76.
- [18] L. Peng, G. Hadjisophocleus, J. Mehaffey, and M. Mohammad (2011), "Predicting the Fire Resistance of Wood-Steel-Wood Timber Connections", *Fire Technology*, vol. 47, no. 4, pp. 1101–1119.
- [19] L. Peng, G. Hadjisophocleus, J. Mehaffey, and M. Mohammad (2011), "On the Fire Performance of Double-shear Timber Connections", *Fire Safety Science - Proceedings of the tenth International Symposium*, pp. 1207–1218.
- [20] E. M. M. Fonseca, D. C. S. Coelho, and L. M. S. Barreira (2012), "Structural safety in wooden beams under thermal and mechanical loading conditions", *International Journal of Safety and Security Engineering*, vol. 2, no. 3, pp. 242–255.
- [21] A. O. Mydin (2012), "Gypsum Board Thermal Properties Exposed To High Temperature and Fire Condition", *Buletinul Institutului Politehnic din Iasi. Sectia Constructii, Arhitectura*, vol. 58, no. 4, pp. 31–43.
- [22] F. Ferreira (2012), "Recuperação de estruturas de coberturas tradicionais de madeira – análise de alguns exemplos", *Seminário Coberturas de Madeira*, pp. 73–86.
- [23] E. M. M. Fonseca, H. M. E. Ramos, H. J. G. Silva, and D. R. S. M. Ferreira (2013), "Thermal Analysis of Wood-Steel Hybrid Construction", *4th International Conference on Integrity, Reliability and Failure (IRF2013)*, vol. 1, pp. 1–5.
- [24] L. Calabrese, F. Bozzoli, G. Bochicchio, B. Tessadri, S. Rainieri, and G. Pagliarini (2014), "Thermal characterization of intumescent fire retardant paints", *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 547, pp. 1–10.
- [25] C. Loss, M. Piazza, and R. Zandonini (2016), "Connections for steel–timber hybrid prefabricated buildings. Part II: Innovative modular structures", *Construction and Building Materials*, vol. 122, pp. 796–808.
- [26] A. Bilotta, D. de Silva, and E. Nigro (2016), "Tests on intumescent paints for fire protection of existing steel structures", *Construction and Building Materials*, vol. 121, pp. 410–422.
- [27] P. A. S. Leite (2019), "The fire resistance of (W-W-W) wood-to-wood connections protected with different types of gypsum plasterboard", *5º Congresso Ibero-Latino-Americano em Segurança Contra Incêndios-CILASCI 5*, pp. 543–552, ISBN:978-989-97210-4-3.
- [28] L. Silva, P. A. S. Leite, and E. M. M. Fonseca (2019), "The density effect in (W-S-W) wood connections with internal steel plate and passive protection under fire",

- 5º Congresso Ibero-Latino-Americano em Segurança Contra Incêndios-CILASCI 5, pp. 563–571, ISBN:978-989-97210-4-3.
- [29] P. B. Lourenço and J. Branco (2012), “Dos abrigos da pré-história aos edifícios de madeira do século XXI”, *História da Construção: Arquiteturas e Técnicas Construtiva*, pp. 202–213.
- [30] H. Cruz and L. Nunes (2005), “A madeira como material de construção”, *Núcleo de Estruturas de madeira, LNEC, Lisboa*, pp. 1–27.
- [31] J. Porteous and A. Kermani (2013), *Structural timber design to Eurocode 5*, 2nd ed. Wiley-Blackwell, ISBN: 978-0470675007.
- [32] EN 14080:2013, “Timber structures — Glued laminated timber and glued solid timber — Requirements”, 2015.
- [33] P. V. Real (2003), *Incêndio em Estruturas Metálicas: Cálculo Estrutural*. Edições Orion, ISBN: 972-8620-04-7.
- [34] CEN, EN 1991-1-2, “Eurocode 1 : Actions on structures - Part 1-2 : General actions - Actions on structures exposed to fire,” 2002.
- [35] J. Karni and E. Karni (1995), “Gypsum in construction: origin and properties”, *Materials and Structures*, vol. 28, no. 2, pp. 92–100.
- [36] BS EN520:2004+A1:2009, “Gypsum plasterboards — Definitions , requirements and test methods,” *BSI British Standards, London, United Kingdom*, vol. 3. 2004.
- [37] I. Rahmanian and Y. Wang (2009), “Thermal Conductivity of Gypsum at High Temperatures – A Combined Experimental and Numerical Approach”, *Acta Polytechnica*, vol. 49, no. 1, pp. 16–20.
- [38] “Setra Group” [Online]. Available: <https://www.setragroup.com/en/glulam/om-limtra/fire-safety/>. [Accessed: 20-Apr-2020].
- [39] C. H. W. Frank W. Schmidt, Robert E. Henderson (1996), *Introdução às ciências térmicas: termodinâmica, mecânica dos fluidos*. Editora Blucher, ISBN: 978-85-212-0082-6.
- [40] J. C. M. Coelho (2016), *Energia e fluidos: transferência de calor*, vol. 3. Editora Blucher, ISBN: 978-85-212-0950-8.
- [41] J. P. Holman (1986), *Heat Transfer*, 6th ed. McGraw-hill, ISBN: 0-07-029620-0.
- [42] HASSLACHER NORICA TIMBER (2020), “Glued Laminated Timber (Catalogue)”.
- [43] A. Praciak (2013), *The CABI encyclopedia of forest trees (CABI, Oxfordshire, UK)*. Cabi, ISBN: 9781780642369.
- [44] F. Teixeira-Dias, J. A. Cruz, R. Valente, and R. Sousa (2010), *Método dos Elementos Finitos: Técnicas de Simulação Numérica em Engenharia*, 1st ed. Lisboa, ISBN: 978-972-304180/09.
- [45] P. Kohnke (1999), “ANSYS Theory Reference-Release 5.6,” *Ansys, Inc. ANSYS, Incorporated*.

- [46] E. Fonseca and P. V. Real (1999), "Análise não-linear do comportamento termomecânico de componentes em aço sujeitas ao fogo", pp. 1–41, ISBN: 9727450601.
- [47] E. M. M. Fonseca, V. Silva, and P. A. G. Piloto (2020), "*Load-carrying capacity of hybrid steel-wood-steel dowel connections in double-shear under fire*", INEGI-FEUP, ISBN: 978-989-54756-1-2.

ANEXOS

ANEXO 10.1

ANEXO 10.2

ANEXO 10.3

ANEXO 10.4

ANEXO 10.5

10 ANEXOS

10.1 DIMENSÕES DA LIGAÇÃO

A Figura 31 representa as dimensões da ligação incluindo os espaçamentos entre cavilhas e extremidades.

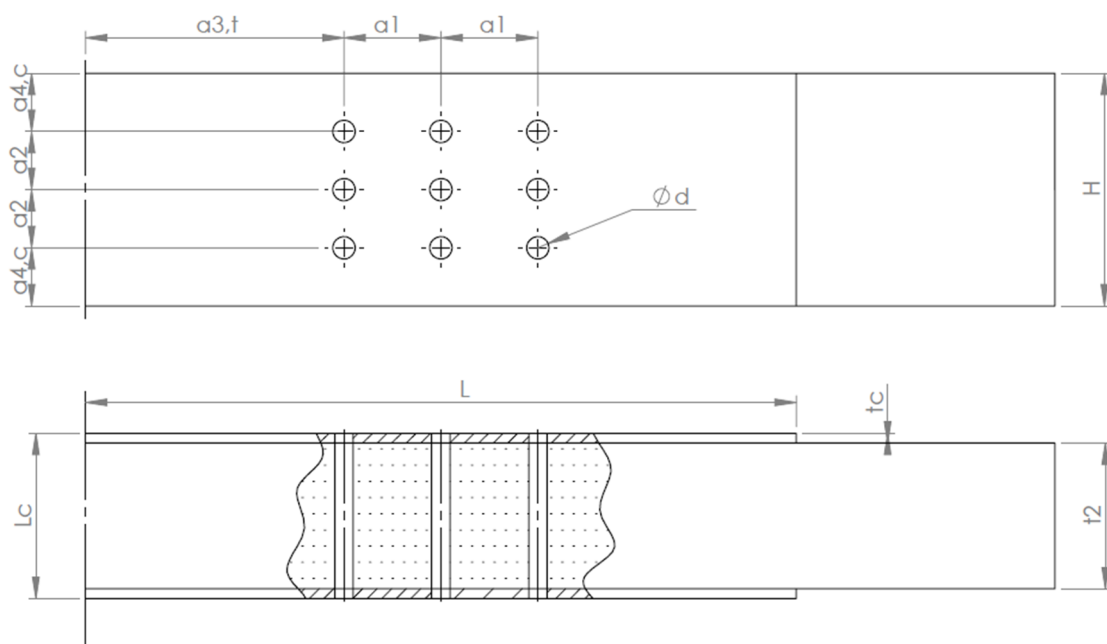


Figura 31-Dimensões da ligação

10.2 DIMENSIONAMENTO DA LIGAÇÃO S-W-S À TEMPERATURA AMBIENTE

Na Tabela 21 encontram-se as informações sobre o dimensionamento das ligações à temperatura ambiente.

Tabela 21-Ábaco do dimensionamento da ligações S-W-S à temperatura ambiente

Glulam	Carga	Cavilhas			Disposição			Espaçamento				Madeira			Chapa	Resistência de projeto à tração	Solicitação ao corte de projeto
	F_d [kN]	d [mm]	L_c [mm]	n_t	n_c	n_l	a_1 [mm]	a_2 [mm]	$a_{3,t}$ [mm]	$a_{4,c}$ [mm]	t_2 [mm]	L [mm]	H [mm]	t_c [mm]	$f_{t,0,d}$ [N.mm ⁻²]	$F_{v,rd}$ [N]	
GL20h	10	6	51	9	3	3	30	18	80	18	45	440	72	3	10,24	1393,12	
		8	51	6	3	2	40	24	80	24	45	480	72	3	10,24	2313,17	
		10	51	3	3	1	50	30	80	30	45	520	60	3	10,24	3418,79	
		12	51	3	3	1	60	36	84	36	45	576	72	3	10,24	4239,54	
	15	6	51	12	3	4	30	18	80	18	45	440	90	3	10,24	1393,12	
		8	51	9	3	3	40	24	80	24	45	480	96	3	10,24	2313,17	
		10	51	6	3	2	50	30	80	30	45	520	90	3	10,24	3418,79	
		12	51	6	3	2	60	36	84	36	45	576	108	3	10,24	4239,54	
	20	6	51	15	3	5	30	18	80	18	45	440	108	3	10,24	1393,12	
		8	51	9	3	3	40	24	80	24	45	480	96	3	10,24	2313,17	
		10	51	6	3	2	50	30	80	30	45	520	90	3	10,24	3418,79	
		12	51	6	3	2	60	36	84	36	45	576	108	3	10,24	4239,54	
GL24h	10	6	51	9	3	3	30	18	80	18	45	440	72	3	12,29	1482,44	
		8	51	6	3	2	40	24	80	24	45	480	72	3	12,29	2461,49	
		10	51	3	3	1	50	30	80	30	45	520	60	3	12,29	3638,00	
		12	51	3	3	1	60	36	84	36	45	576	72	3	12,29	4800,66	
	15	6	51	12	3	4	30	18	80	18	45	440	90	3	12,29	1482,44	
		8	51	9	3	3	40	24	80	24	45	480	96	3	12,29	2461,49	
		10	51	6	3	2	50	30	80	30	45	520	90	3	12,29	3638,00	
		12	51	6	3	2	60	36	84	36	45	576	108	3	12,29	4800,66	
	20	6	51	15	3	5	30	18	80	18	45	440	108	3	12,29	1482,44	
		8	51	9	3	3	40	24	80	24	45	480	96	3	12,29	2461,49	
		10	51	6	3	2	50	30	80	30	45	520	90	3	12,29	3638,00	
		12	51	6	3	2	60	36	84	36	45	576	108	3	12,29	4800,66	
GL28h	10	6	51	9	3	3	30	18	80	18	45	440	72	3	14,27	1557,55	
		8	51	6	3	2	40	24	80	24	45	480	72	3	14,27	2586,20	
		10	51	3	3	1	50	30	80	30	45	520	60	3	14,27	3822,32	
		12	51	3	3	1	60	36	84	36	45	576	72	3	14,27	5247,76	
	15	6	51	12	3	4	30	18	80	18	45	440	90	3	14,27	1557,55	
		8	51	6	3	2	40	24	80	24	45	480	72	3	14,27	2586,20	
		10	51	6	3	2	50	30	80	30	45	520	90	3	14,27	3822,32	
		12	51	3	3	1	60	36	84	36	45	576	72	3	14,27	5247,76	
	20	6	51	15	3	5	30	18	80	18	45	440	108	3	14,27	1557,55	
		8	51	9	3	3	40	24	80	24	45	480	96	3	14,27	2586,20	
		10	51	6	3	2	50	30	80	30	45	520	90	3	14,27	3822,32	
		12	51	6	3	2	60	36	84	36	45	576	108	3	14,27	5247,76	
GL32h	10	6	51	9	3	3	30	18	80	18	45	440	72	3	16,38	1584,80	
		8	51	6	3	2	40	24	80	24	45	480	72	3	16,38	2631,44	
		10	51	3	3	1	50	30	80	30	45	520	60	3	16,38	3889,19	
		12	51	3	3	1	60	36	84	36	45	576	72	3	16,38	5339,56	
	15	6	51	12	3	4	30	18	80	18	45	440	90	3	16,38	1584,80	
		8	51	6	3	2	40	24	80	24	45	480	72	3	16,38	2631,44	
		10	51	6	3	2	50	30	80	30	45	520	90	3	16,38	3889,19	
		12	51	3	3	1	60	36	84	36	45	576	72	3	16,38	5339,56	
	20	6	51	15	3	5	30	18	80	18	45	440	108	3	16,38	1584,80	
		8	51	9	3	3	40	24	80	24	45	480	96	3	16,38	2631,44	
		10	51	6	3	2	50	30	80	30	45	520	90	3	16,38	3889,19	
		12	51	6	3	2	60	36	84	36	45	576	108	3	16,38	5339,56	

10.3 RESISTÊNCIA EM SITUAÇÃO DE FOGO DAS LIGAÇÕES S-W-S

A Tabela 22 contem as informações relativas à resistência em situação das ligações.

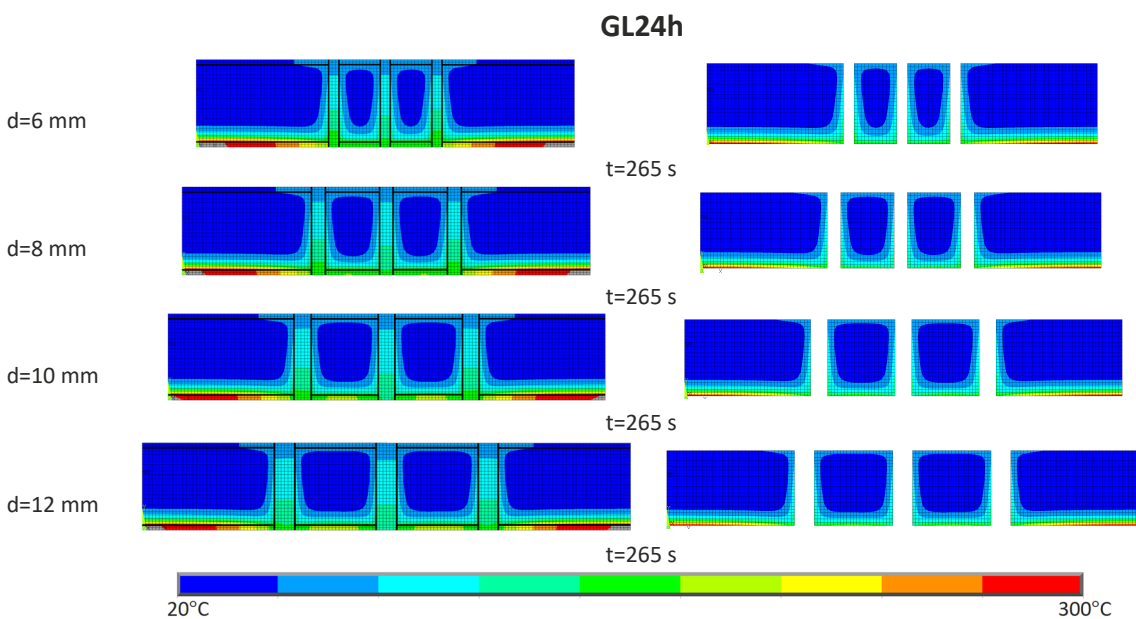
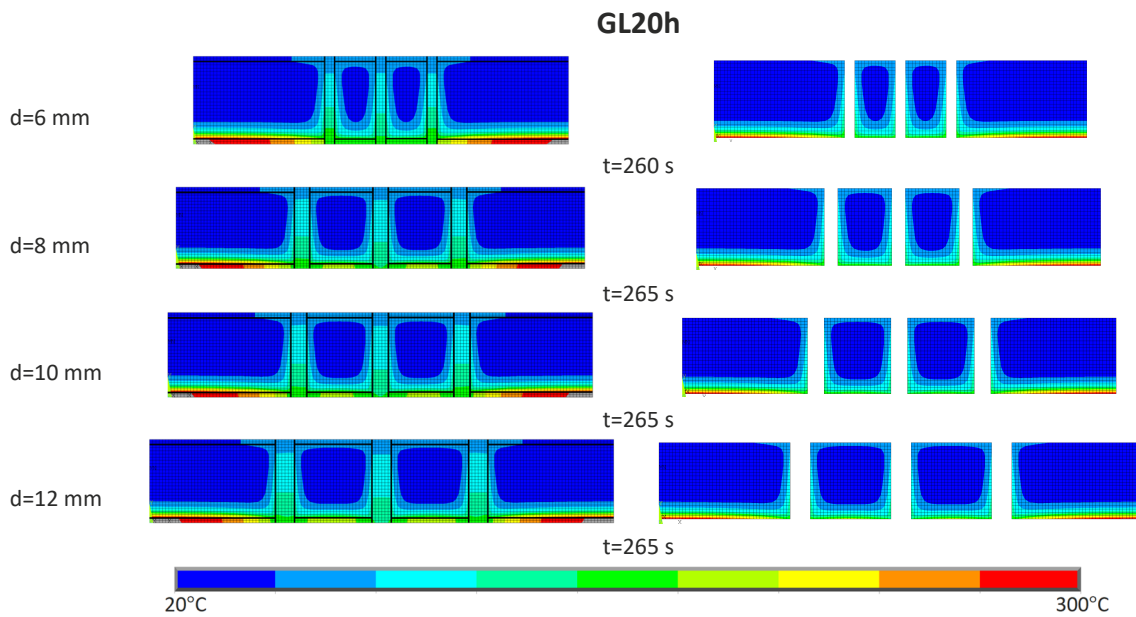
Tabela 22-Resistência ao fogo das ligações S-W-S

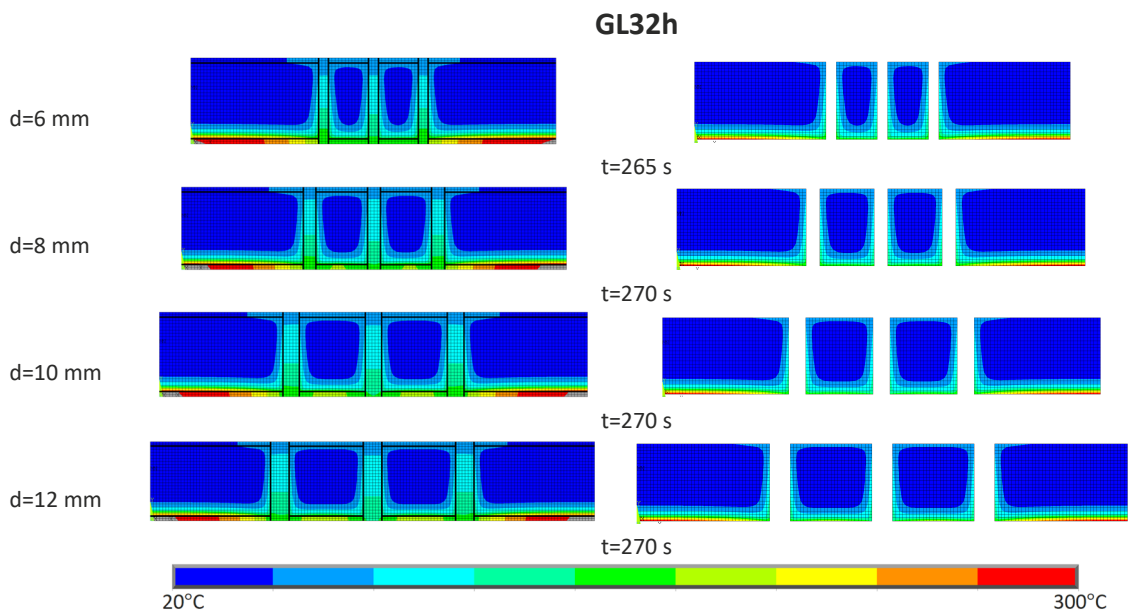
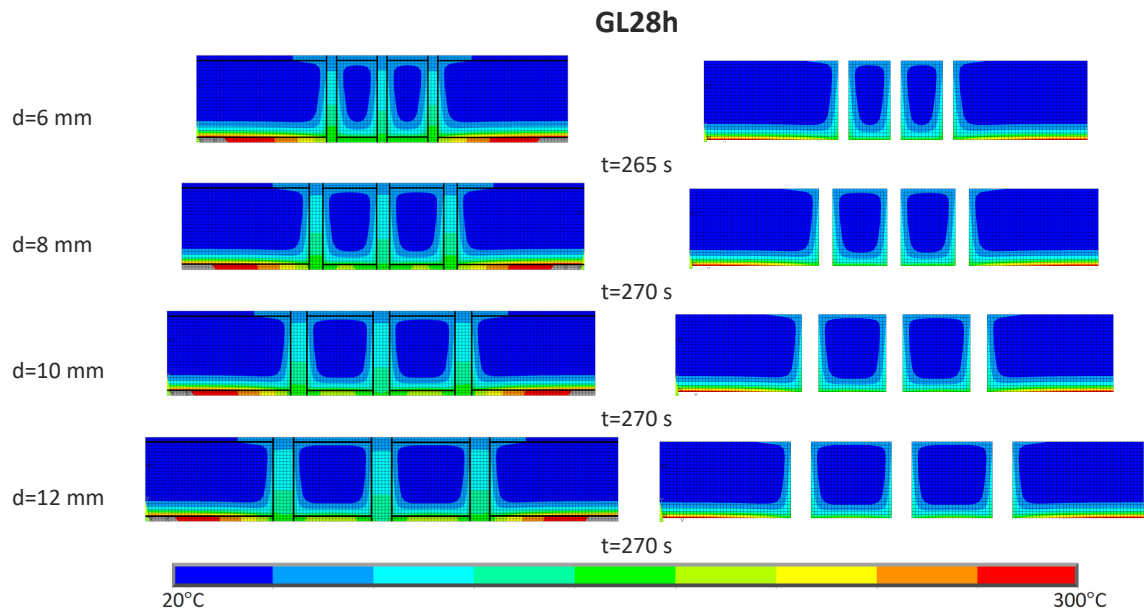
	Carga	Cavilhas	Resistência característica da madeira	Resistência calculada em situação de fogo	Resistência de projeto em situação de fogo	Verificação
Glulam	F_d [kN]	d [mm]	f_k [N.mm ⁻²]	$f_{d,fi}$ [N.mm ⁻²]	$\frac{E_{d,fi}}{A_s}$ [N.mm ⁻²]	$\frac{E_{d,fi}}{A_s} \leq f_{d,fi}$
GL20h	10	6	16	18,4	6,14	✓
		8	16	18,4	6,14	✓
		10	16	18,4	6,14	✓
		12	16	18,4	6,14	✓
	15	6	16	18,4	6,14	✓
		8	16	18,4	6,14	✓
		10	16	18,4	6,14	✓
		12	16	18,4	6,14	✓
	20	6	16	18,4	6,14	✓
		8	16	18,4	6,14	✓
		10	16	18,4	6,14	✓
		12	16	18,4	6,14	✓
GL24h	10	6	19,2	22,08	7,37	✓
		8	19,2	22,08	7,37	✓
		10	19,2	22,08	7,37	✓
		12	19,2	22,08	7,37	✓
	15	6	19,2	22,08	7,37	✓
		8	19,2	22,08	7,37	✓
		10	19,2	22,08	7,37	✓
		12	19,2	22,08	7,37	✓
	20	6	19,2	22,08	7,37	✓
		8	19,2	22,08	7,37	✓
		10	19,2	22,08	7,37	✓
		12	19,2	22,08	7,37	✓
GL28h	10	6	22,3	25,645	8,56	✓
		8	22,3	25,645	8,56	✓
		10	22,3	25,645	8,56	✓
		12	22,3	25,645	8,56	✓
	15	6	22,3	25,645	8,56	✓
		8	22,3	25,645	8,56	✓
		10	22,3	25,645	8,56	✓
		12	22,3	25,645	8,56	✓
	20	6	22,3	25,645	8,56	✓
		8	22,3	25,645	8,56	✓
		10	22,3	25,645	8,56	✓
		12	22,3	25,645	8,56	✓
GL32h	10	6	25,6	29,44	9,83	✓
		8	25,6	29,44	9,83	✓
		10	25,6	29,44	9,83	✓
		12	25,6	29,44	9,83	✓
	15	6	25,6	29,44	9,83	✓
		8	25,6	29,44	9,83	✓
		10	25,6	29,44	9,83	✓
		12	25,6	29,44	9,83	✓
	20	6	25,6	29,44	9,83	✓
		8	25,6	29,44	9,83	✓
		10	25,6	29,44	9,83	✓
		12	25,6	29,44	9,83	✓

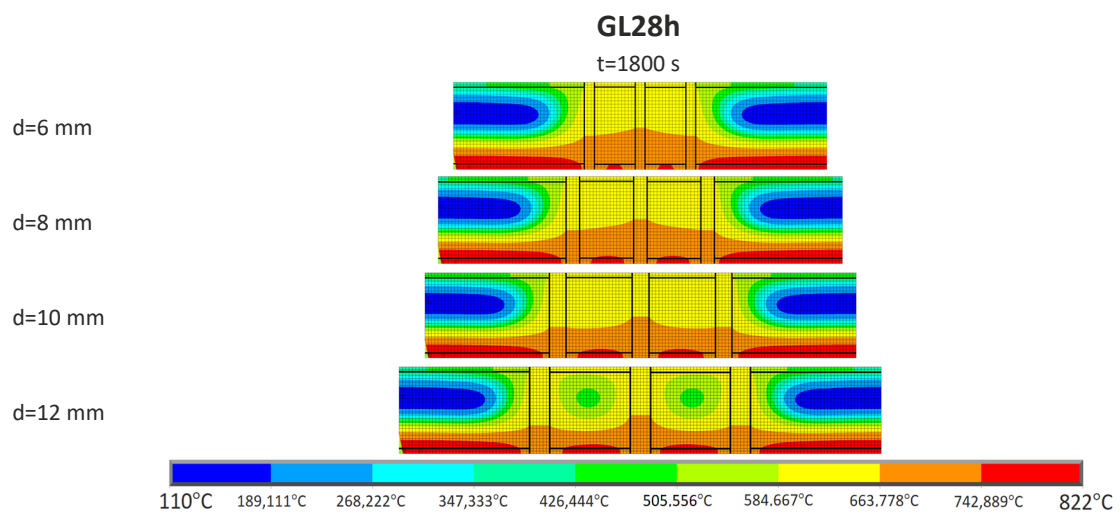
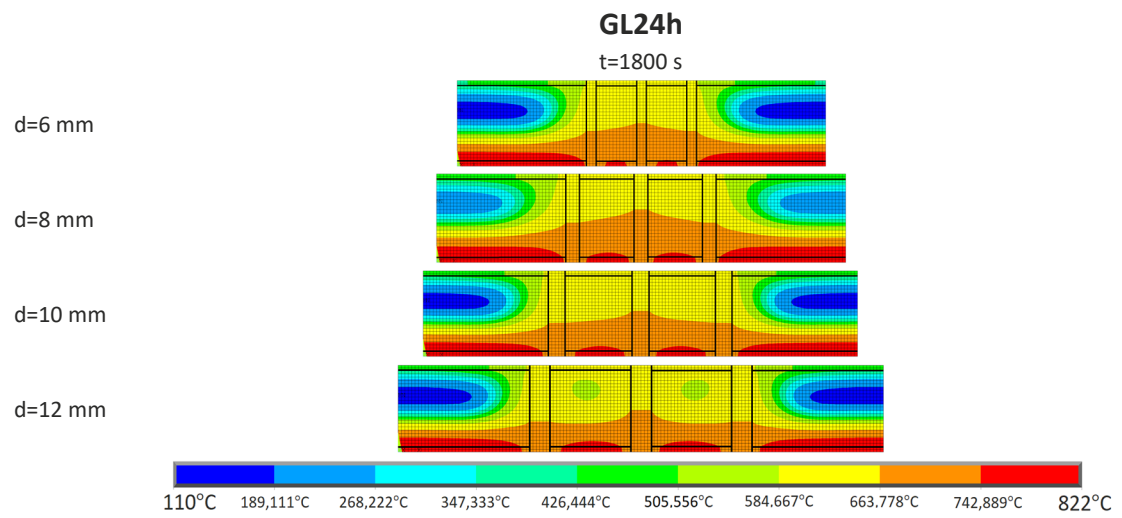
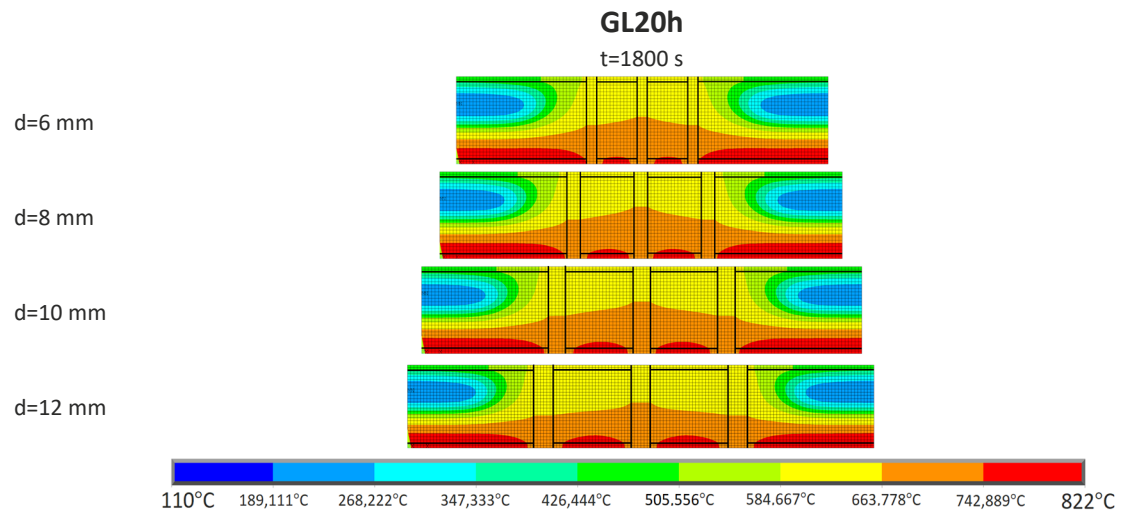
10.4 TEMPERATURA NAS LIGAÇÕES

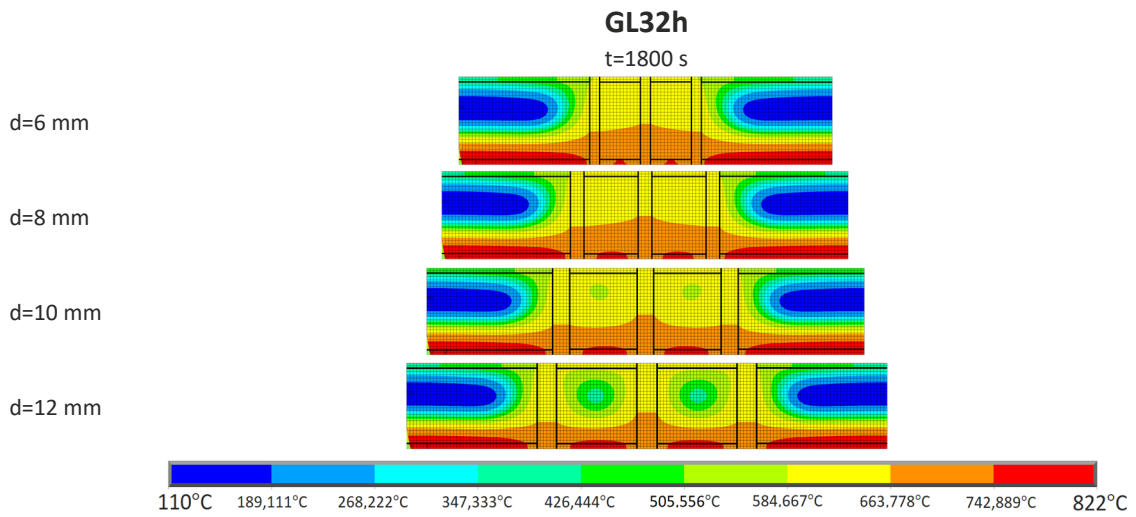
Neste capítulo encontram-se as figuras relativas ao estudo das ligações expostas ao fogo com o limite de temperatura a 300°C, o limite de tempo referente a 30 min e limite de tempo de 60 min para verificar o avanço da carbonização nas situações descritas.

10.4.1 LIGAÇÕES DESPROTEGIDAS

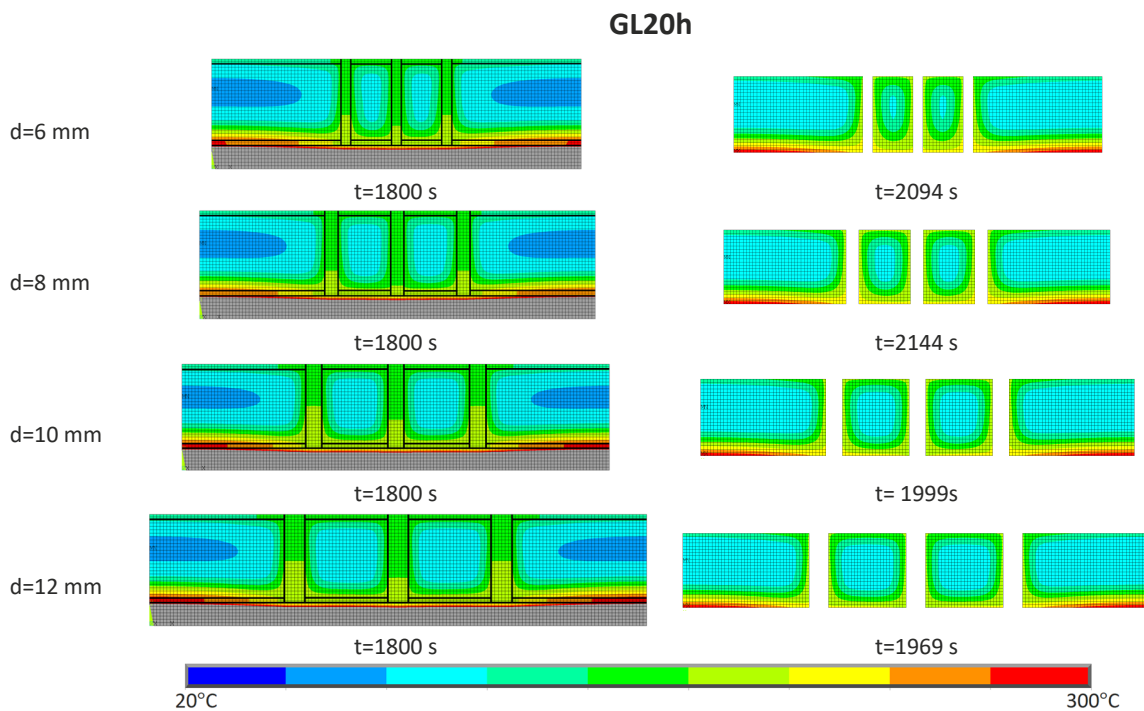




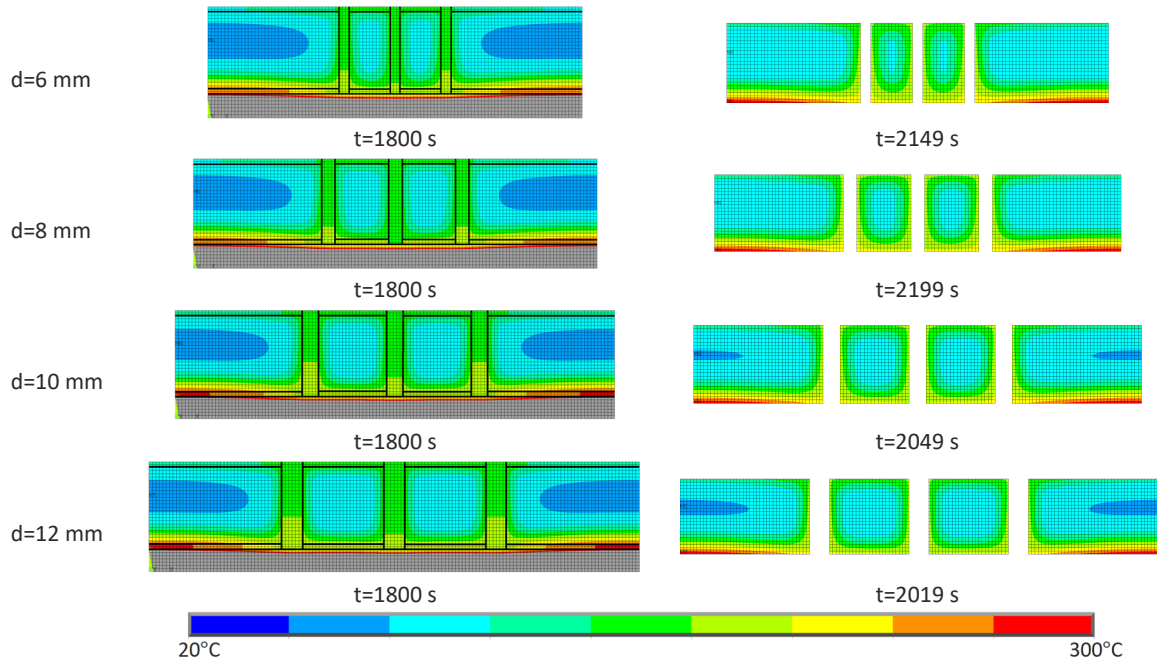




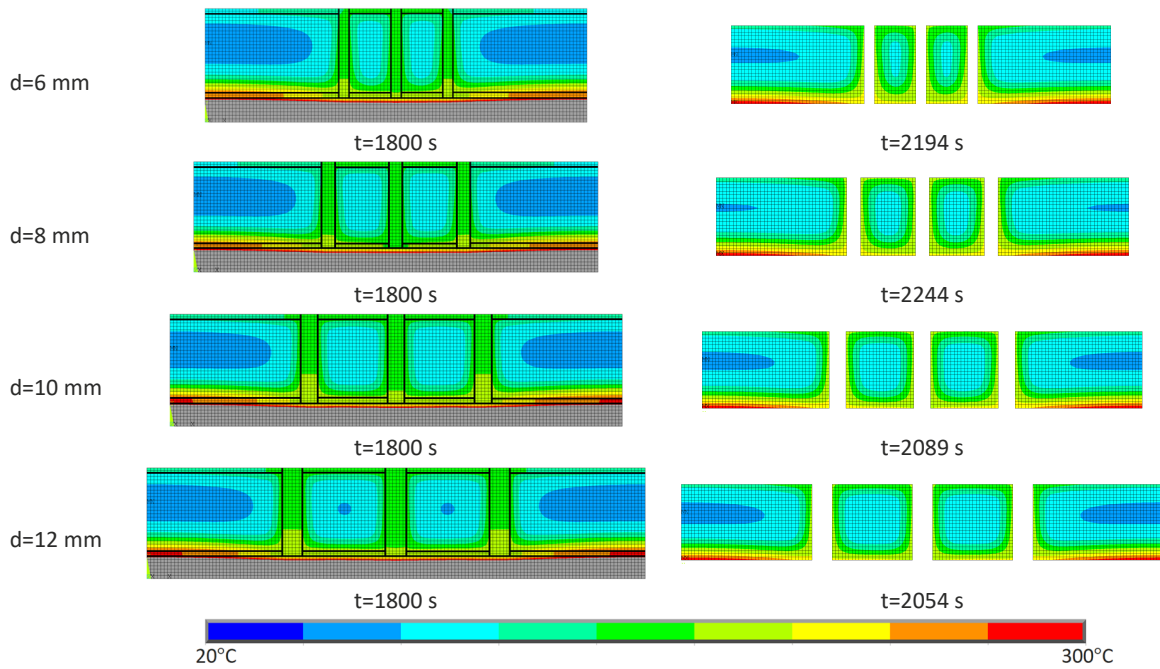
10.4.2 PROTEÇÃO EM GESSO



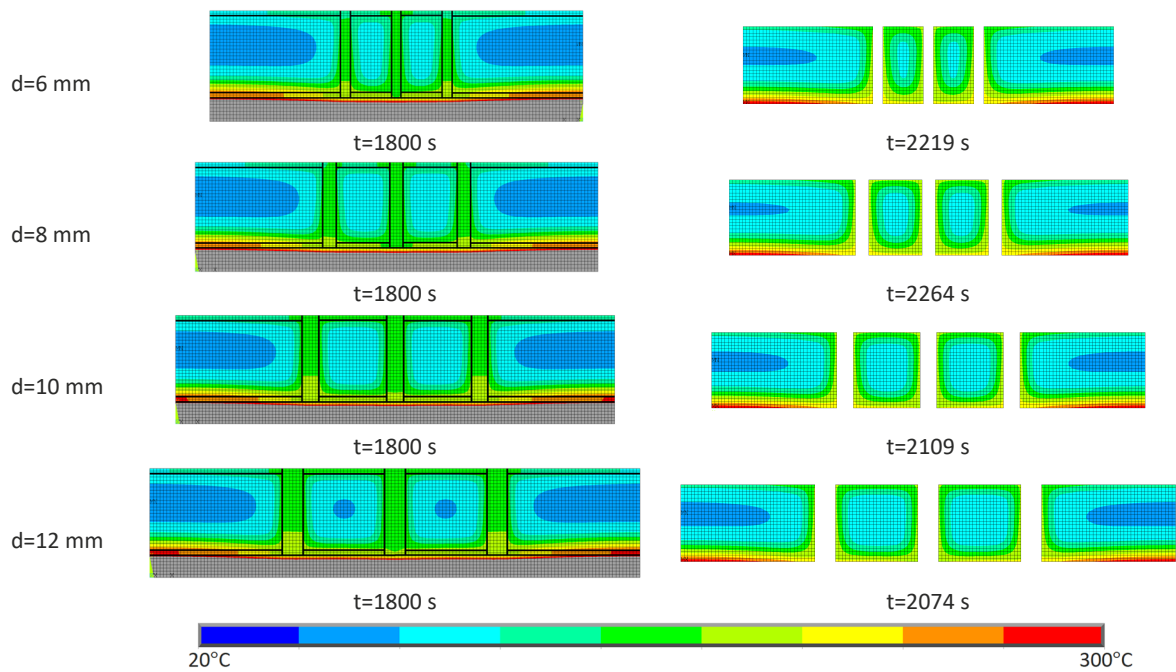
GL24h



GL28h

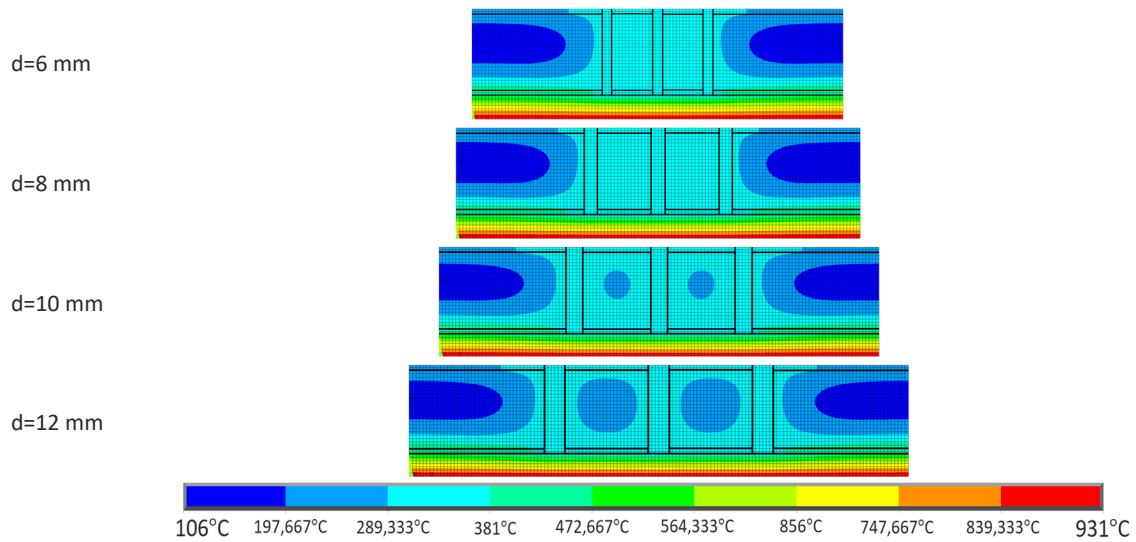


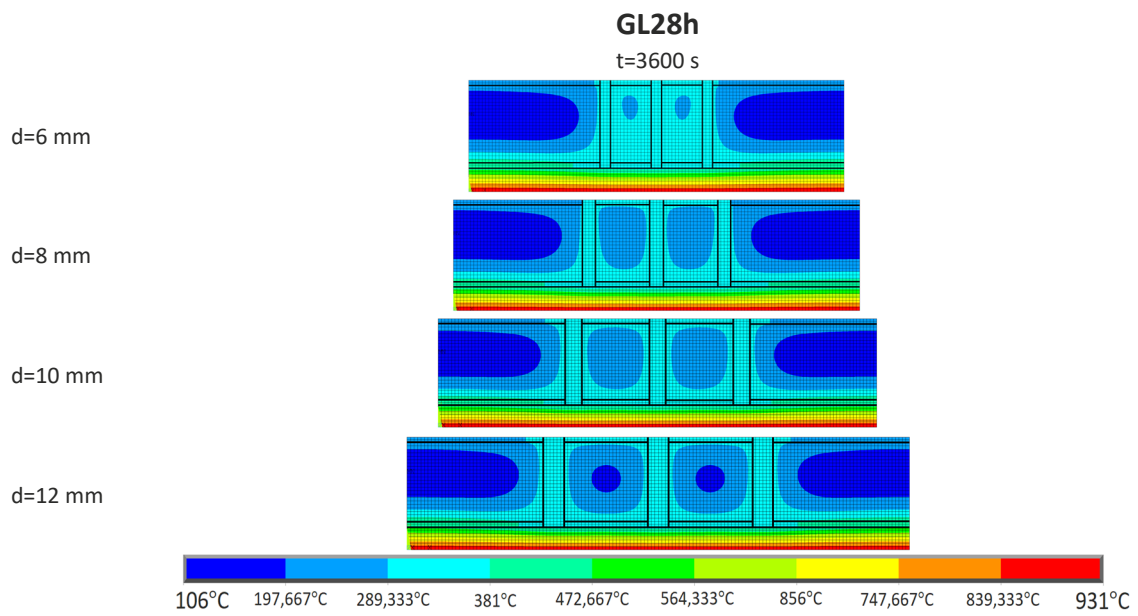
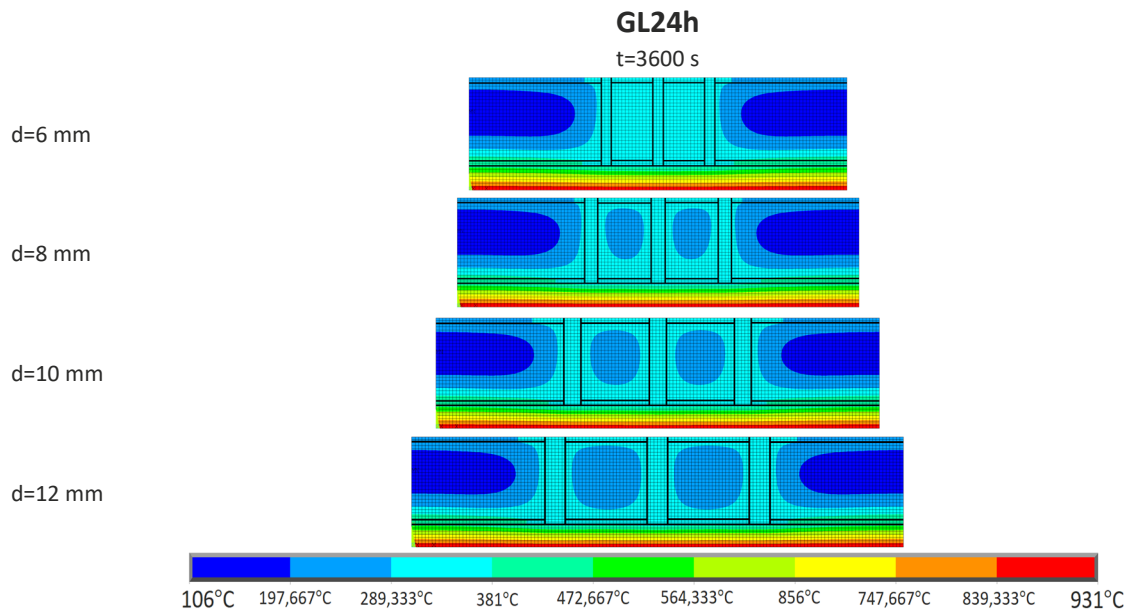
GL32h

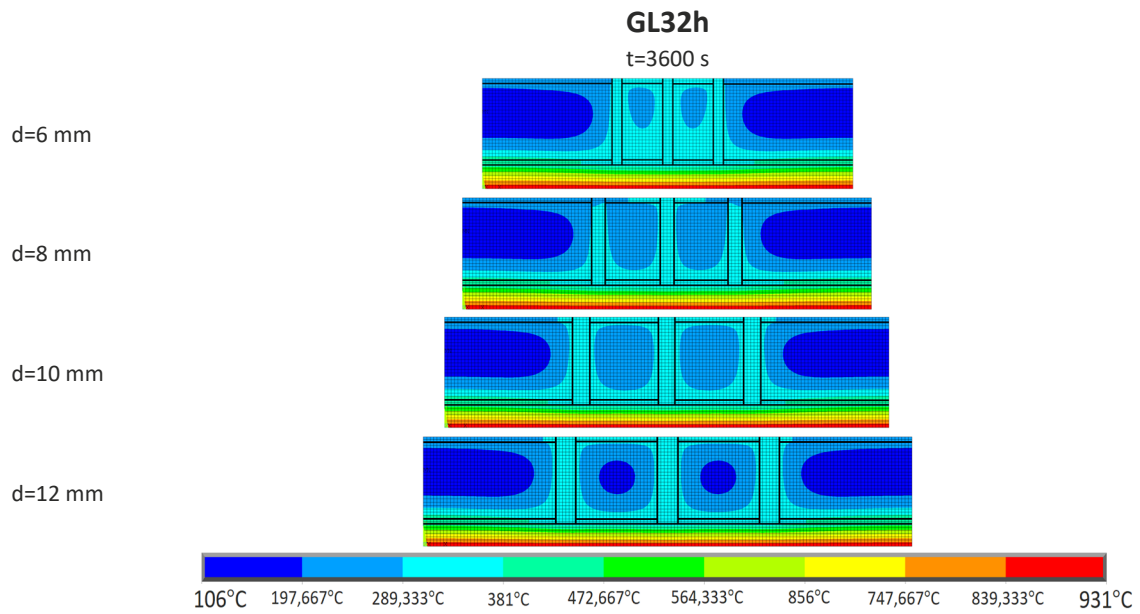


GL20h

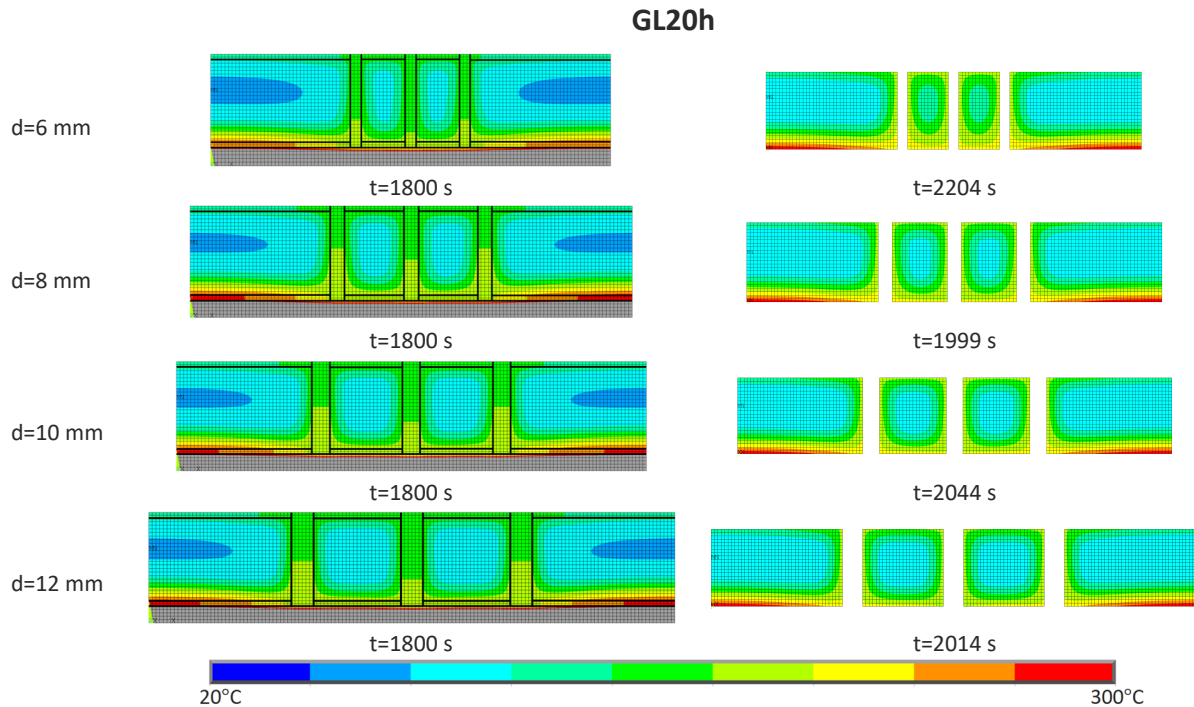
t=3600 s



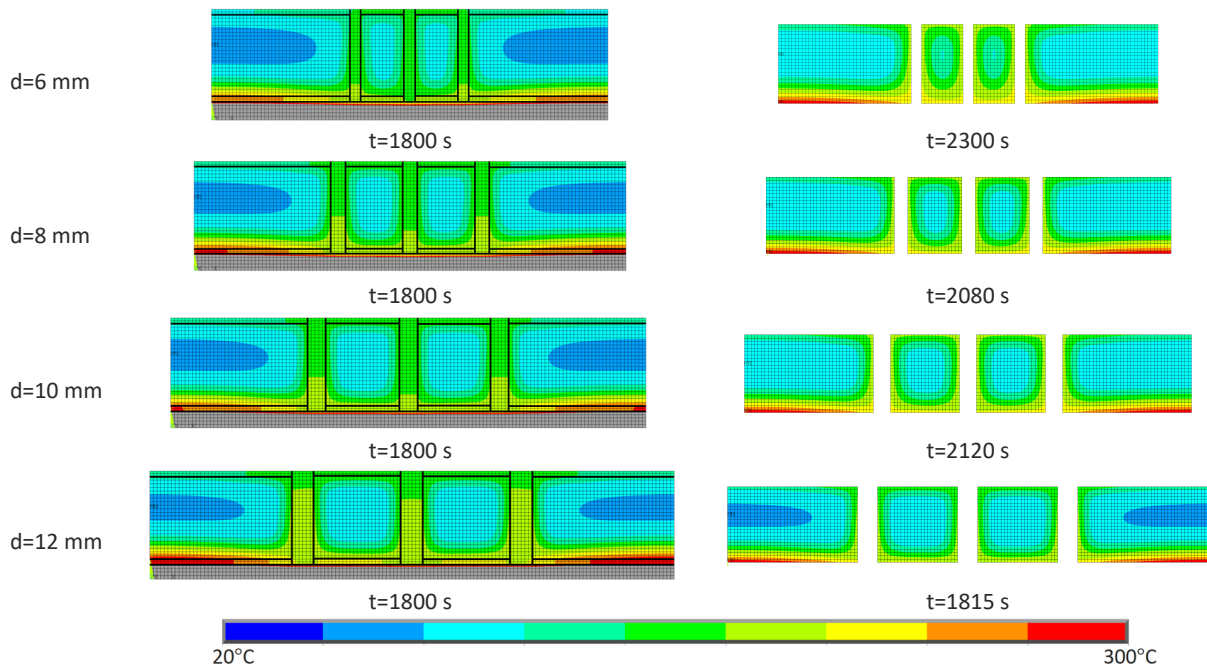




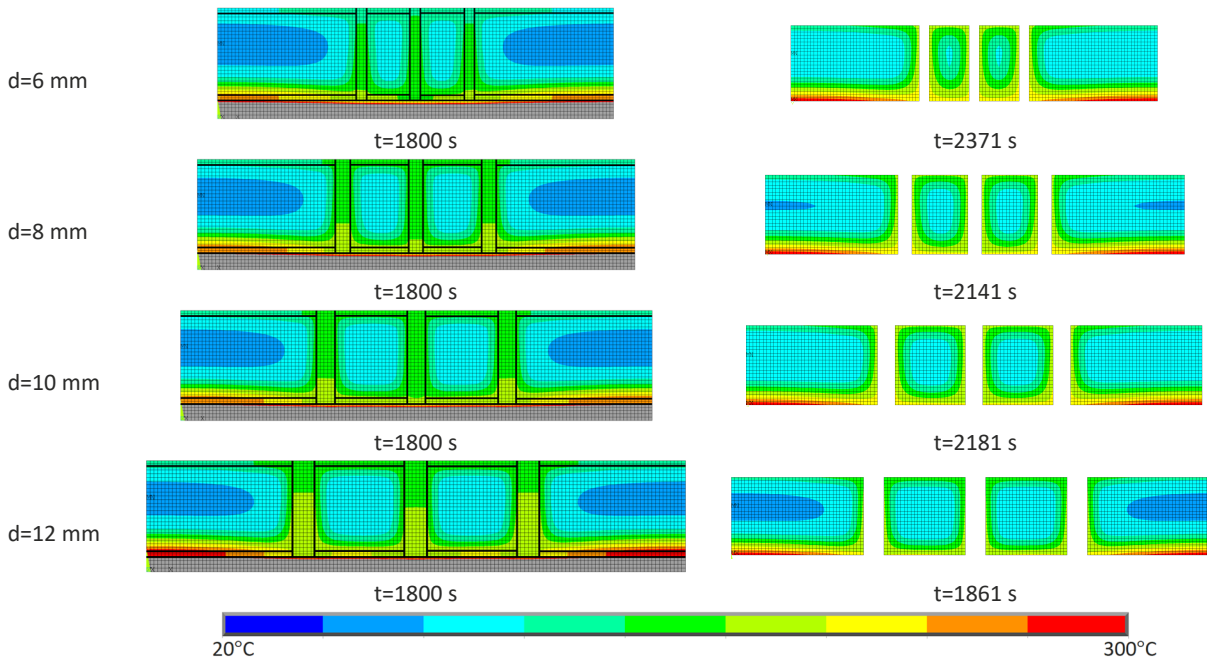
10.4.3 PROTEÇÃO EM MADEIRA



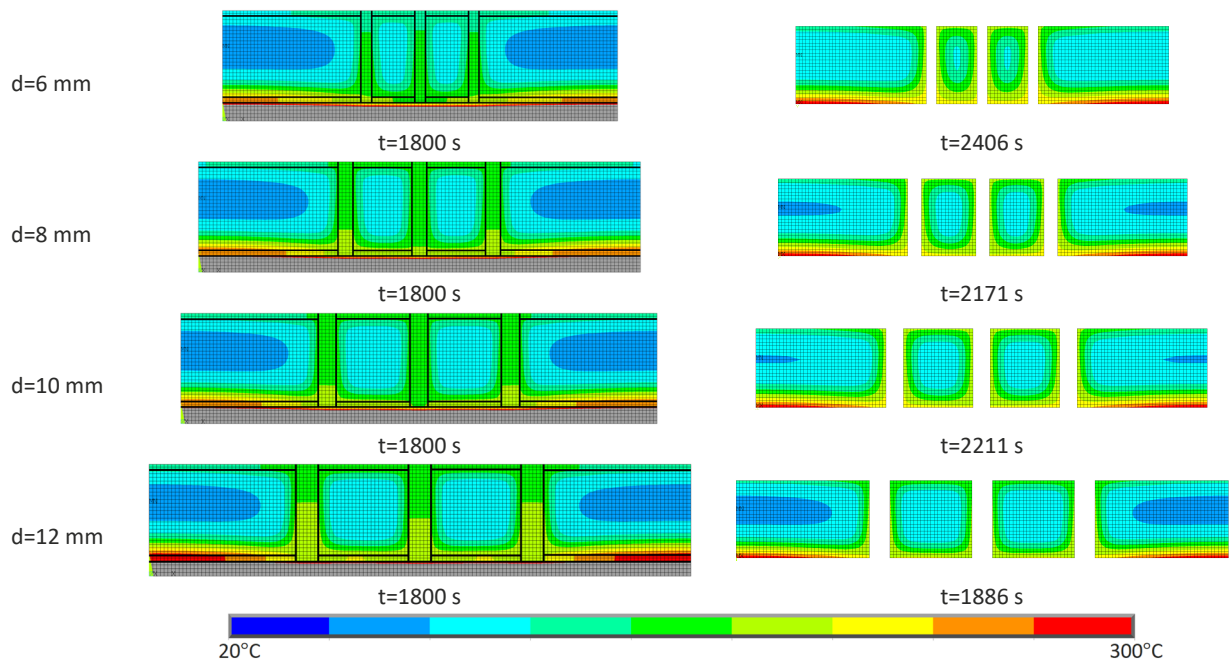
GL24h



GL28h

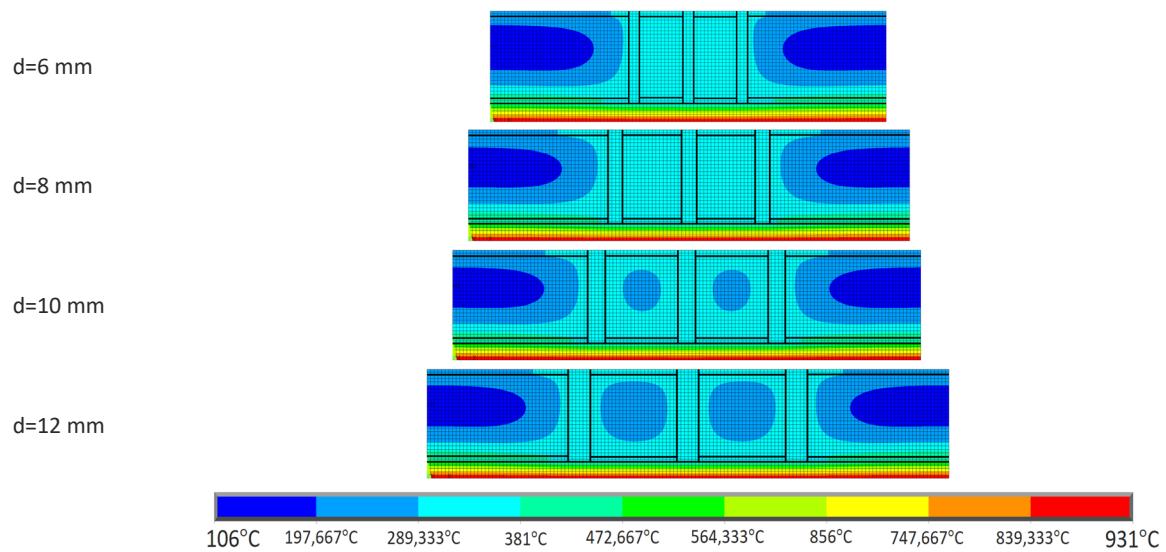


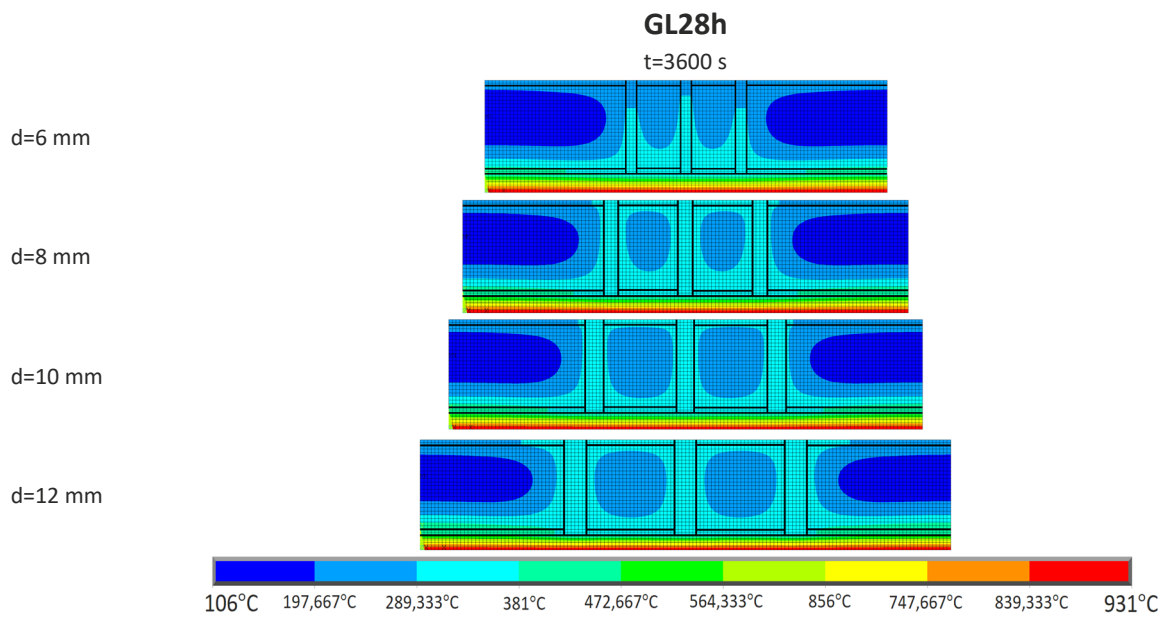
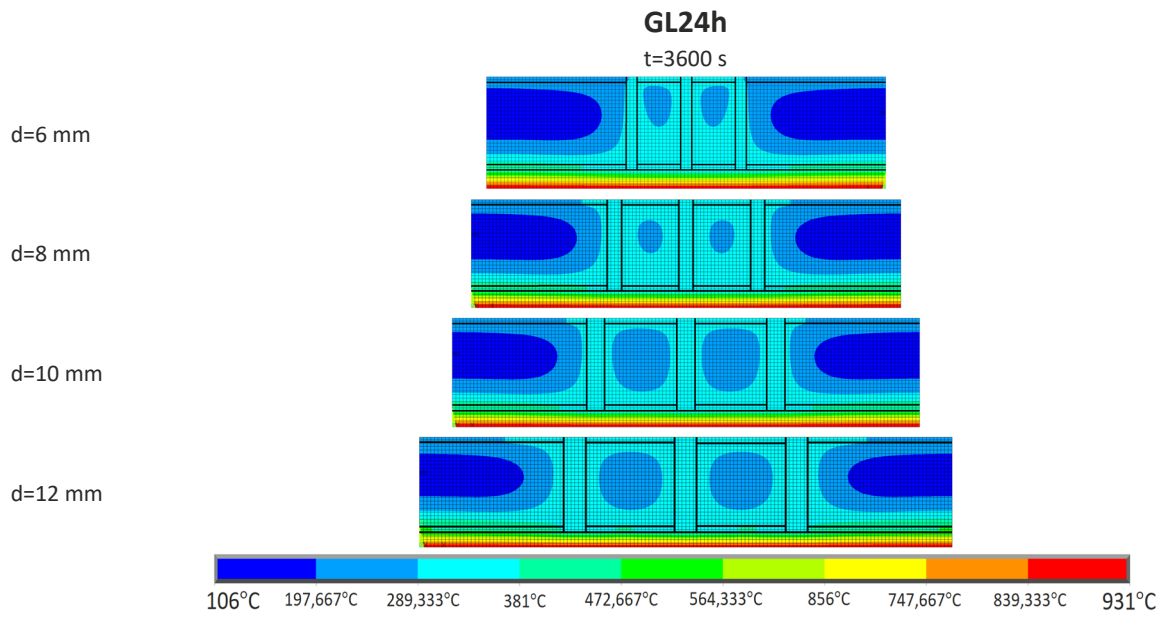
GL32h

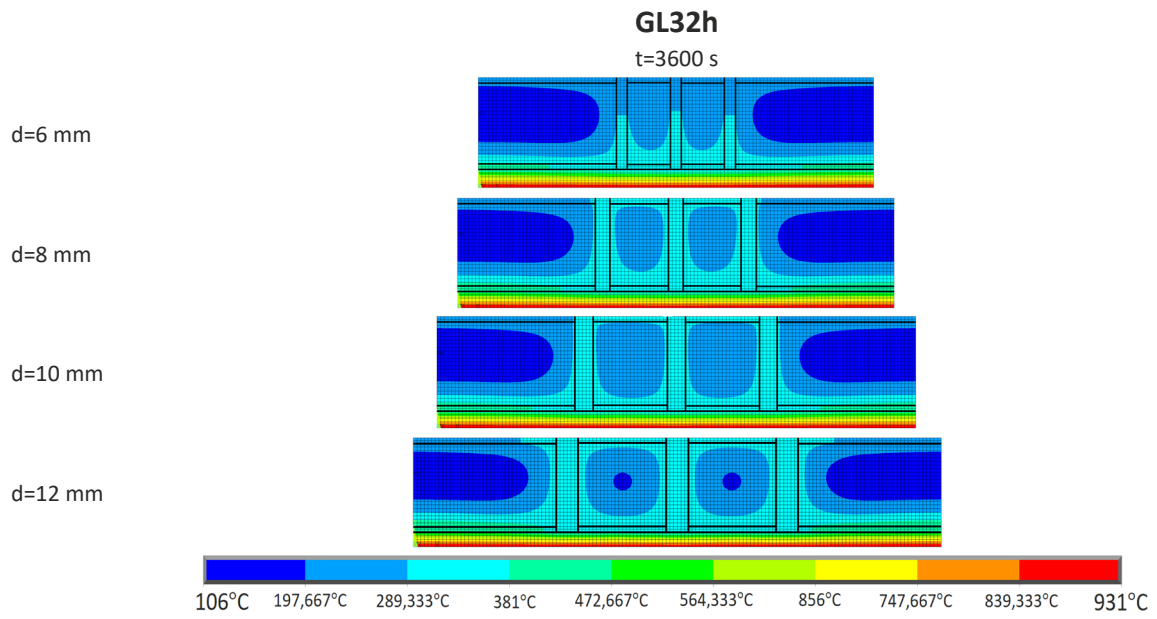


GL20h

t=3600 s







10.5 GRÁFICOS DA EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA DURANTE 60 MIN

Os gráficos mostram a evolução das ligações durante 60 min de exposição ao fogo.

10.5.1 LIGAÇÕES DESPROTEGIDAS

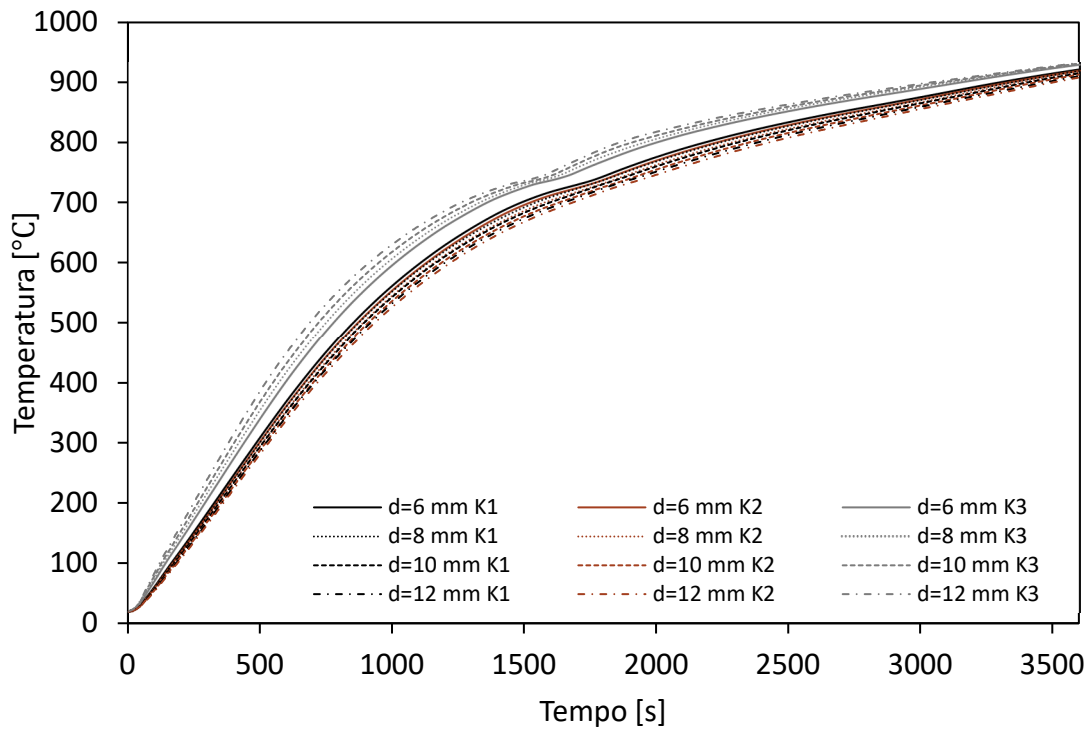


Figura 32- Ligações desprotegidas GL20h expostas a 60 min de fogo

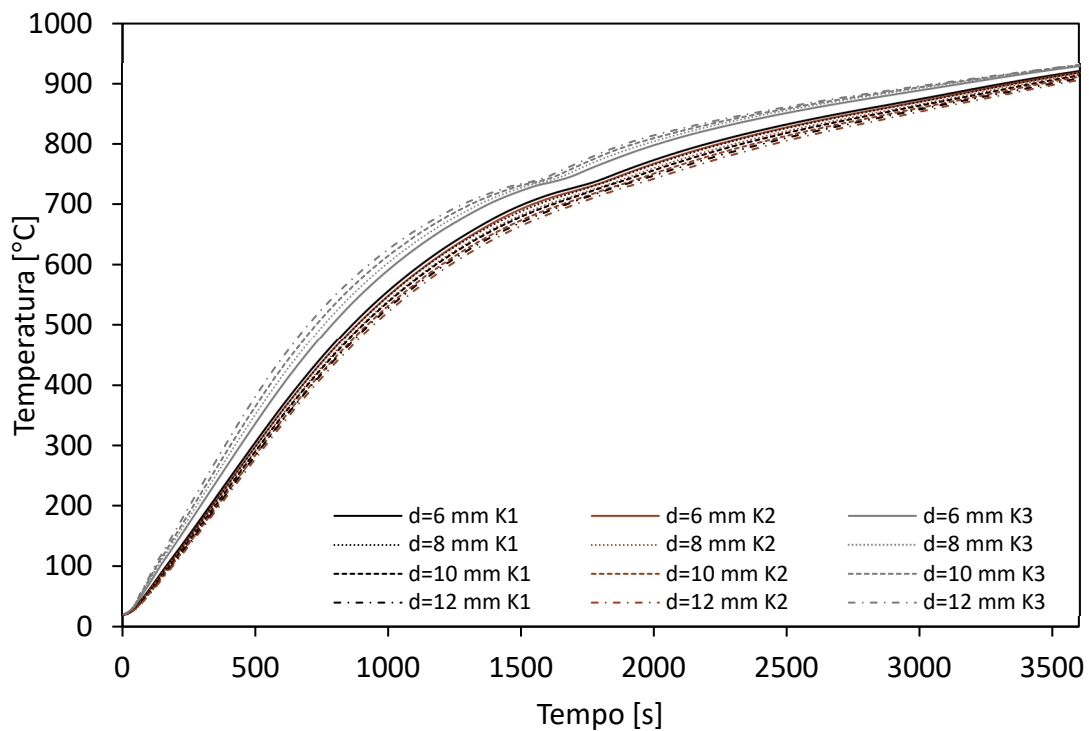


Figura 33- Ligações desprotegidas GL24h expostas a 60 min de fogo

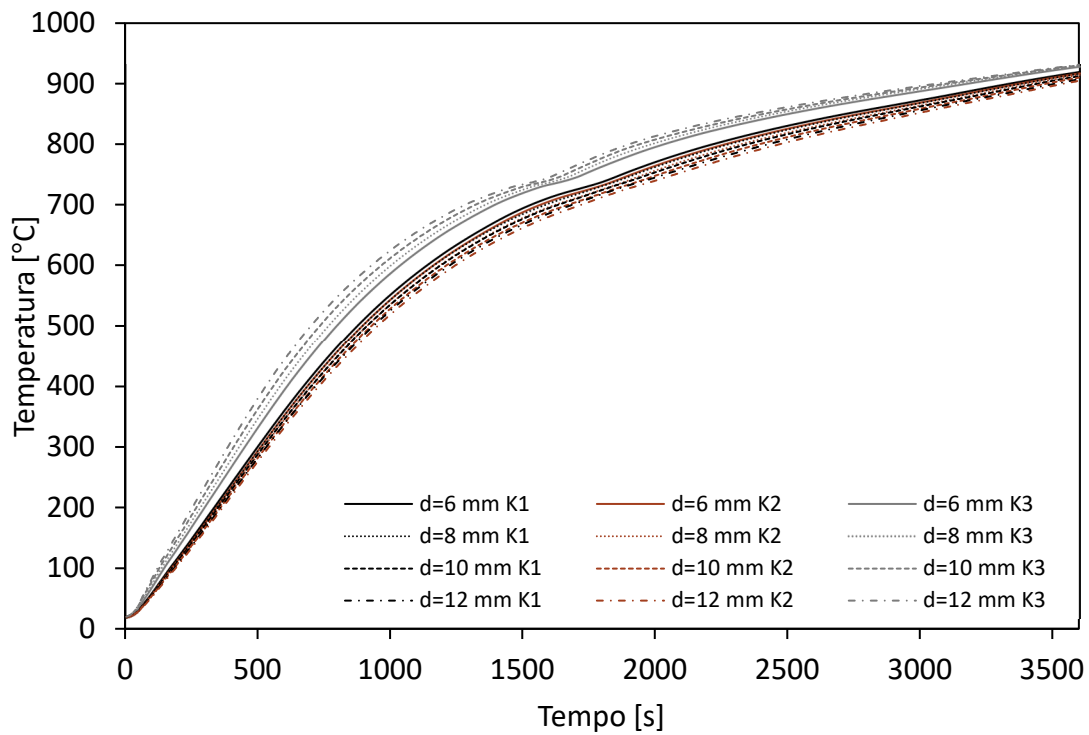


Figura 34-Ligações desprotegidas GL28h expostas a 60 min de fogo

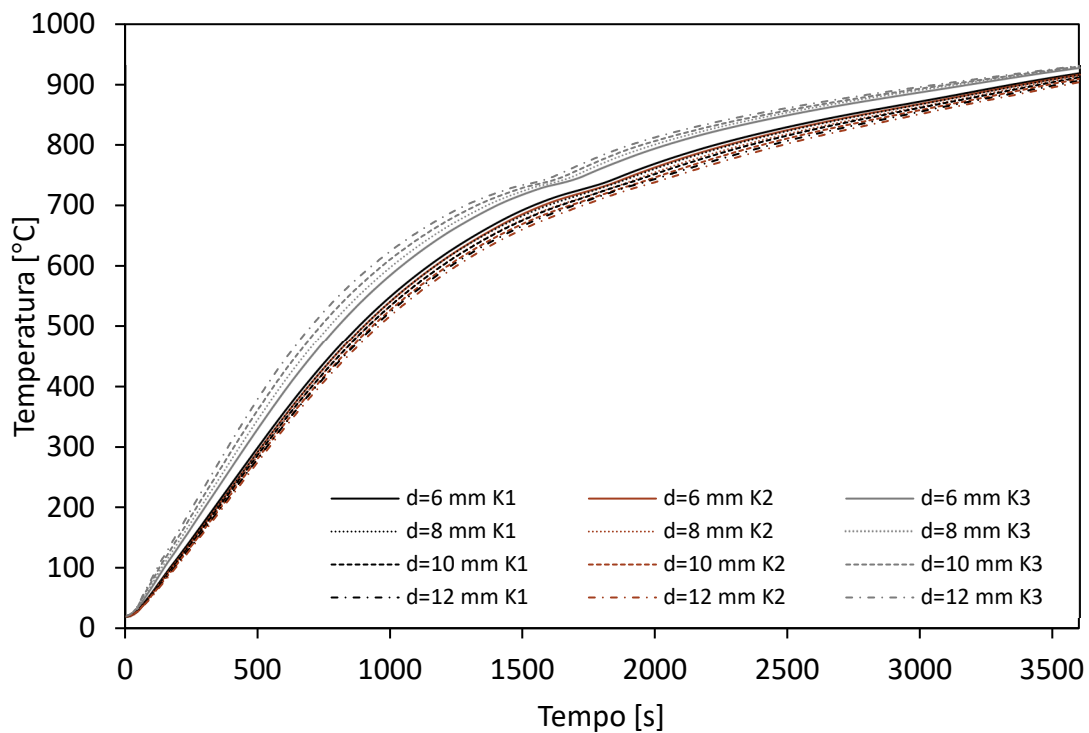


Figura 35-Ligações desprotegidas GL32h expostas a 60 min de fogo

10.5.2 PROTEÇÃO EM GESSO

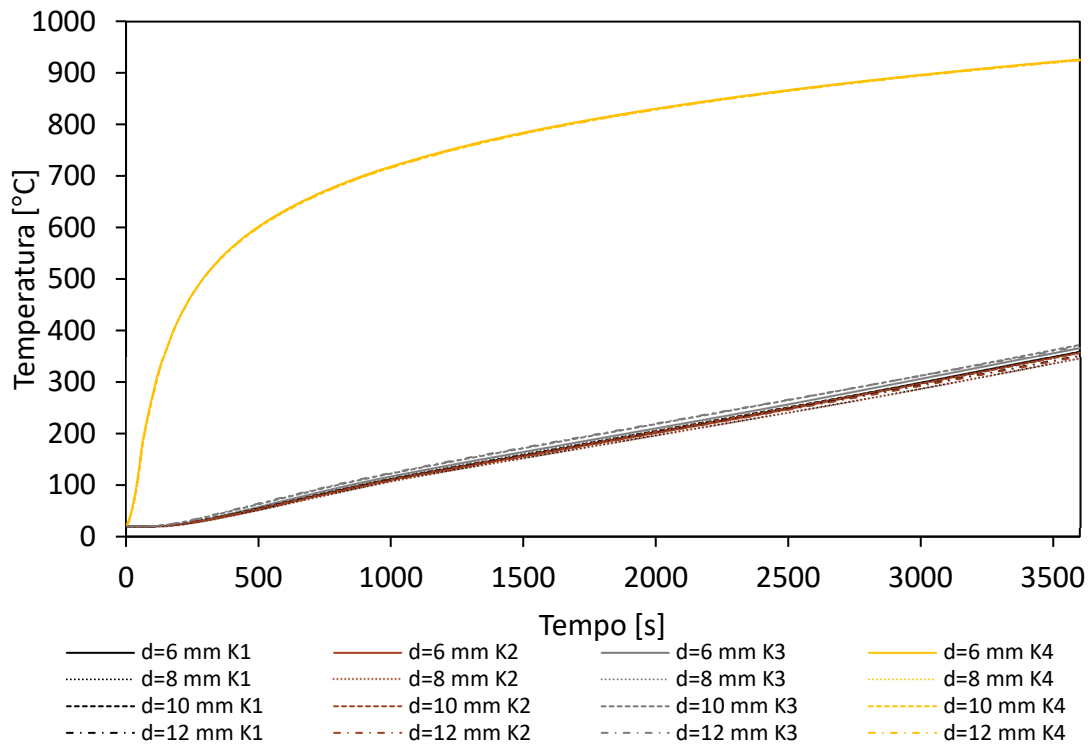


Figura 36- Ligações GL20h com proteção em gesso expostas a 60 min de fogo

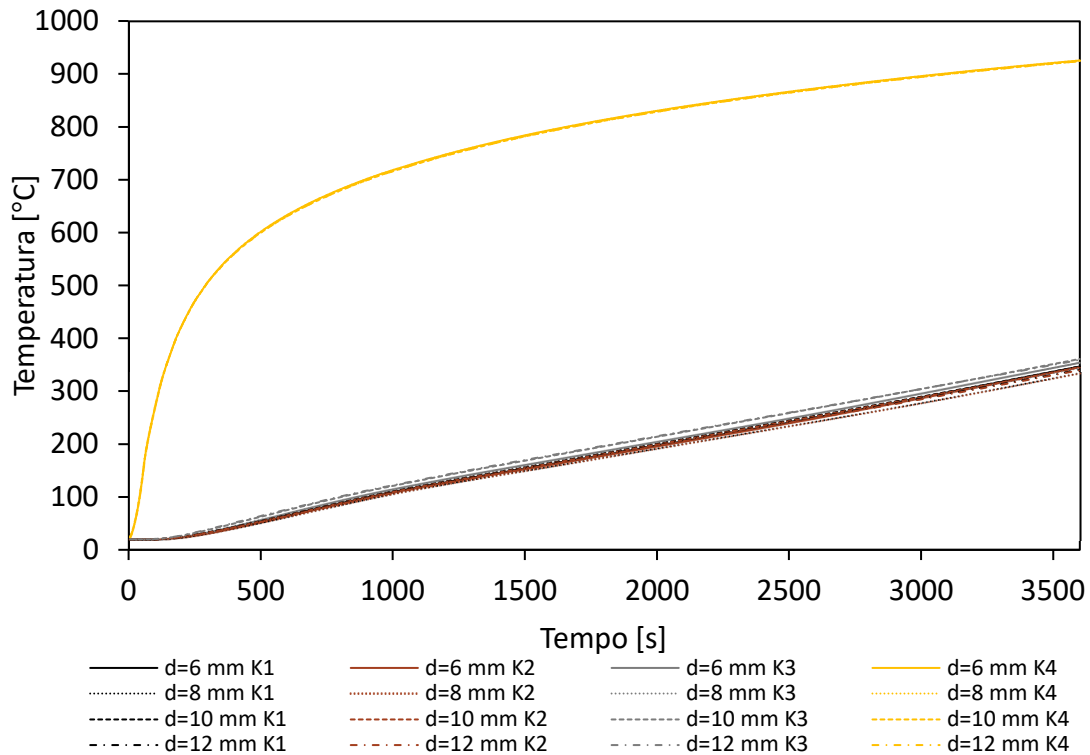


Figura 37- Ligações GL24h com proteção em gesso expostas a 60 min de fogo

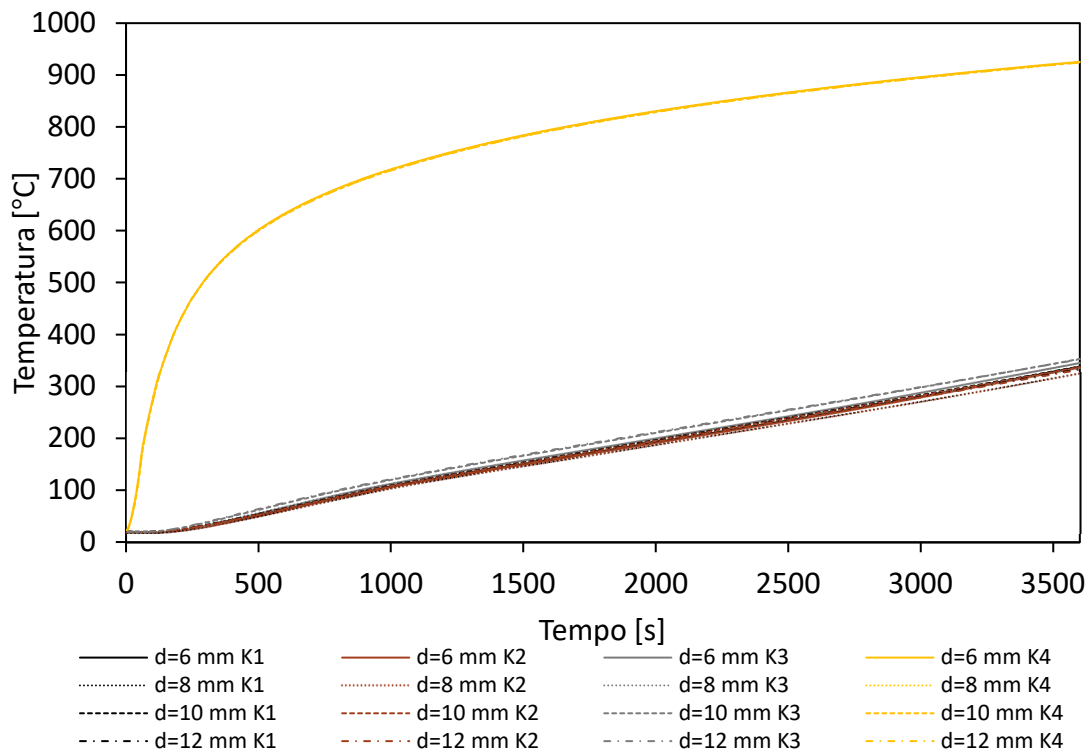


Figura 38- Ligações GL28h com proteção em gesso expostas a 60 min de fogo

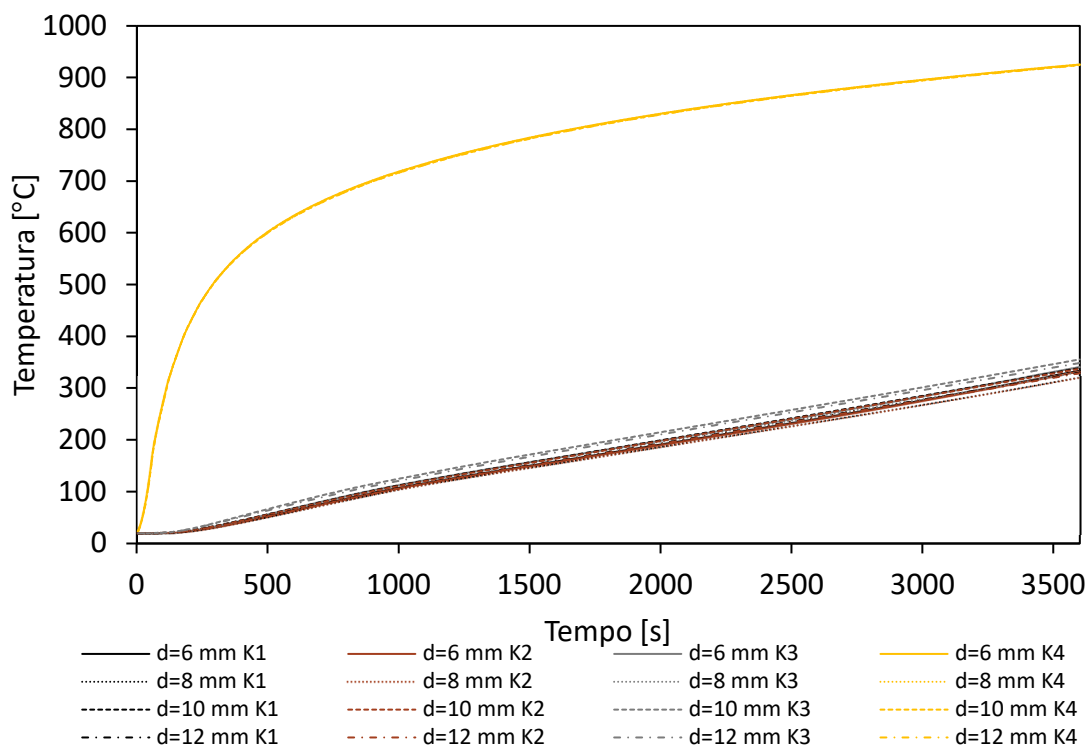


Figura 39- Ligações GL32h com proteção em gesso expostas a 60 min de fogo

10.5.3 PROTEÇÃO EM MADEIRA

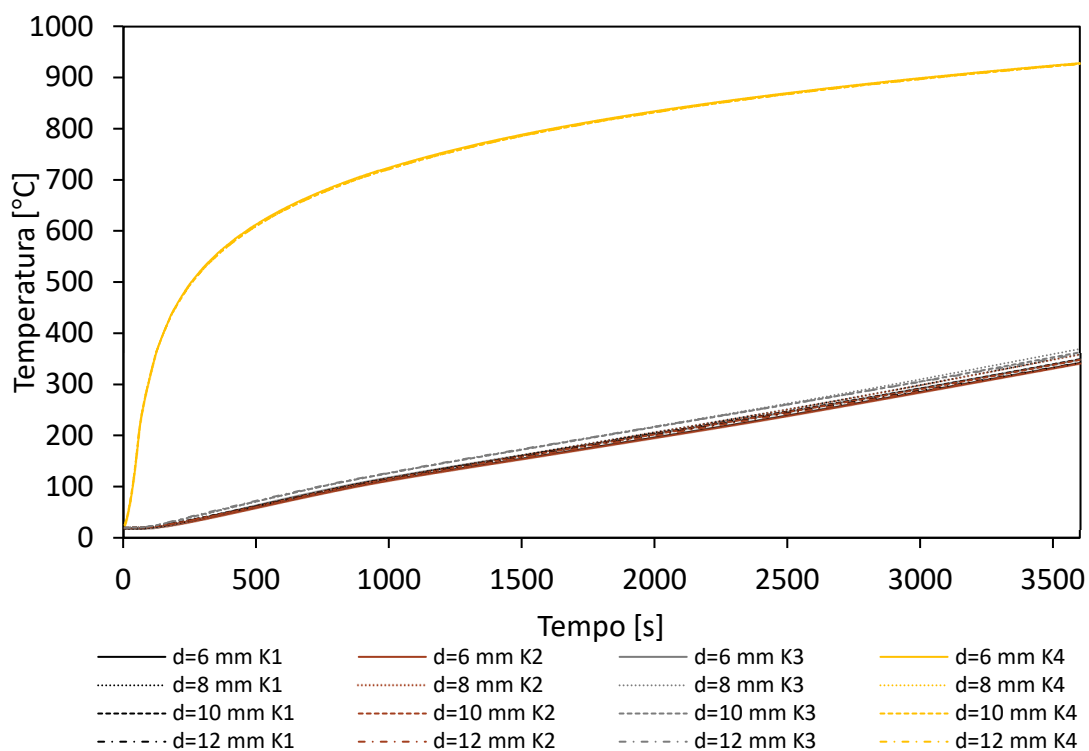


Figura 40- Ligações GL20h com proteção em madeira expostas a 60 min de fogo

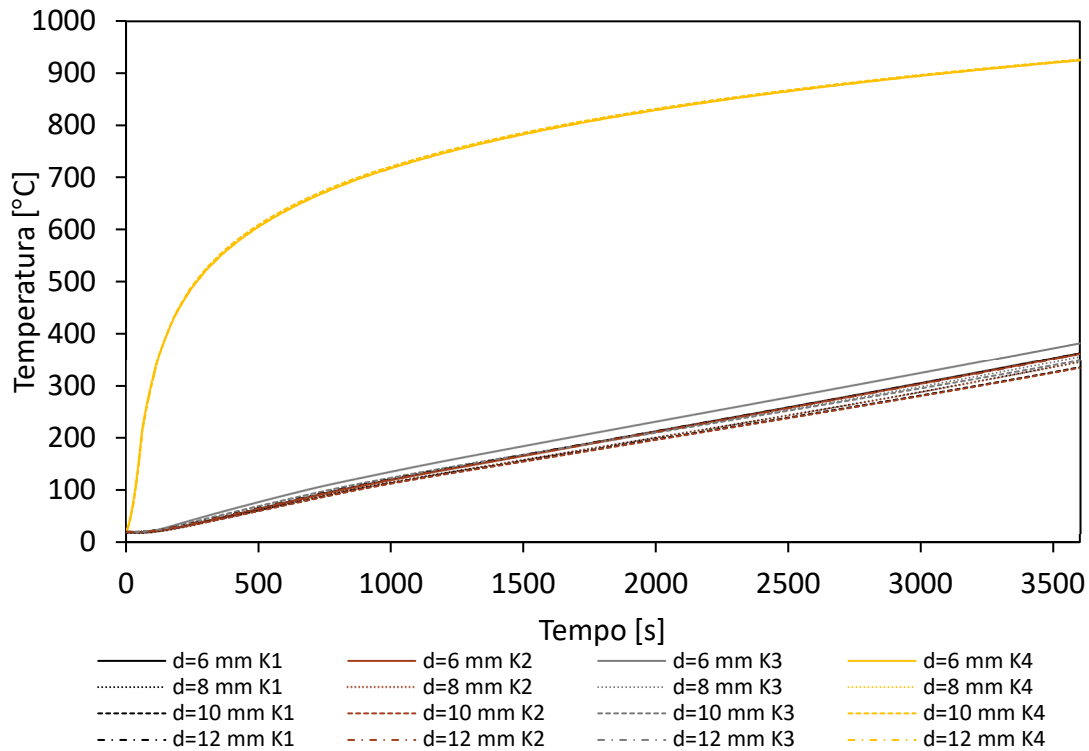


Figura 41- Ligações GL24h com proteção em madeira expostas a 60 min de fogo

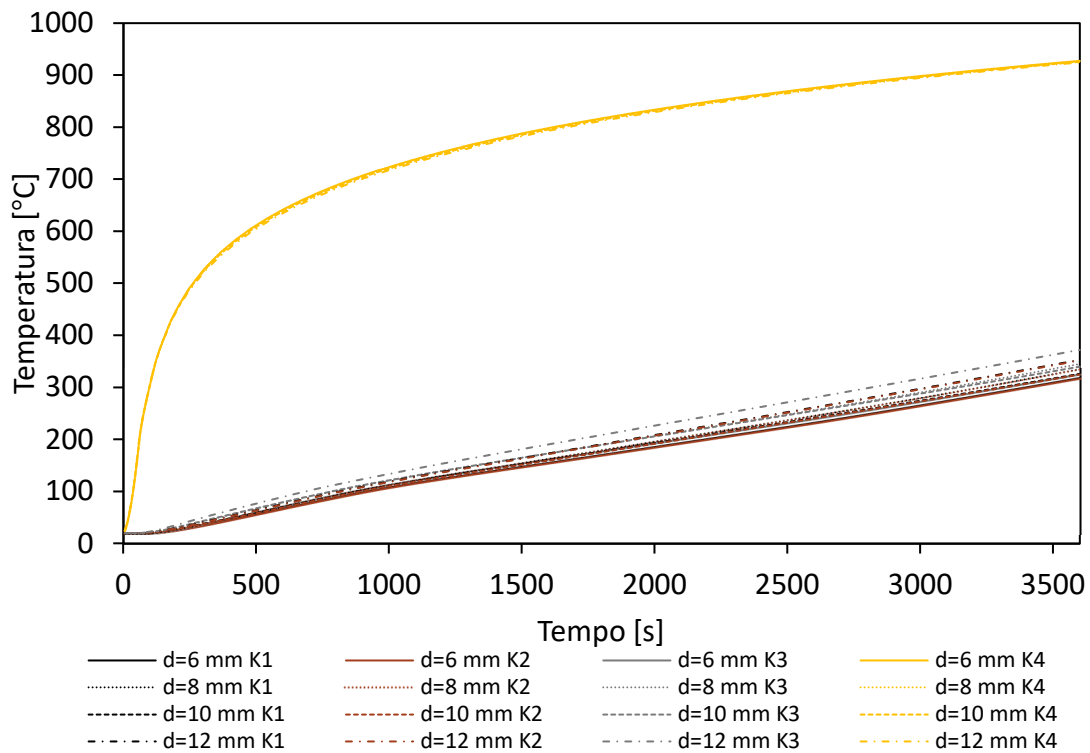


Figura 42- Ligações GL28h com proteção em madeira expostas a 60 min de fogo

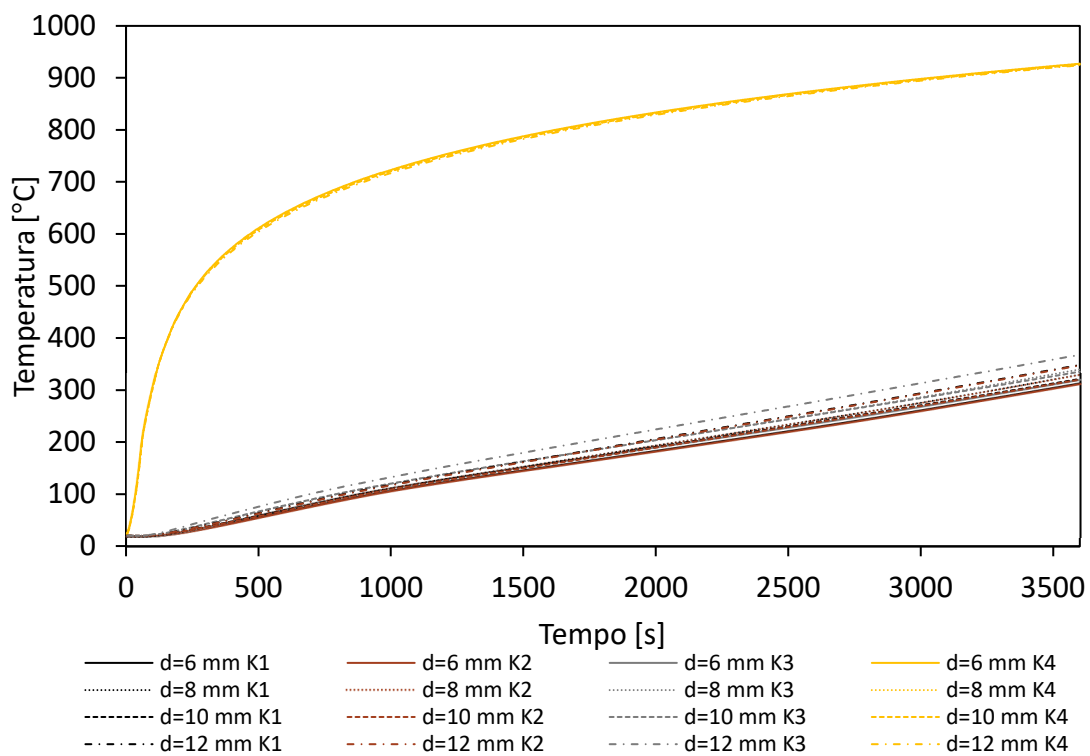


Figura 43- Ligações GL32h com proteção em madeira expostas a 60 min de fogo

