



LIGAÇÕES (W-W-W) MADEIRA-MADEIRA EM CORTE DUPLO, À TEMPERATURA AMBIENTE E A ELEVADAS TEMPERATURAS

PEDRO ANTÓNIO DA SILVA LEITE

julho de 2019

LIGAÇÕES (W-W-W) MADEIRA-MADEIRA EM CORTE DUPLO, À TEMPERATURA AMBIENTE E A ELEVADAS TEMPERATURAS

Pedro António da Silva Leite

1170021

2019

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



LIGAÇÕES (W-W-W) MADEIRA-MADEIRA EM CORTE DUPLO, À TEMPERATURA AMBIENTE E A ELEVADAS TEMPERATURAS

Pedro António da Silva Leite

1170021

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.

2019

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, IPB – Instituto Politécnico de Bragança Engenharia Mecânica

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer todo o apoio incondicional da minha família, especialmente aos meus pais, Rosa Mouquinho e João Leite, pelos bons valores que me transmitiram e por quererem sempre o meu melhor. À minha irmã Mónica por me ter proporcionado uma infância feliz e ao meu irmão Paulo por ser o modelo que eu sempre quis seguir.

Agradeço à minha mulher, Edna Pinto, por estar sempre ao meu lado, nos momentos mais difíceis, assim como nos melhores momentos. Por me apoiar no meu crescimento profissional e dar forças para ultrapassar os obstáculos. Por ser uma inspiração para ser uma melhor pessoa e um melhor profissional.

Agradeço aos meus amigos em geral, especialmente aqueles que contribuíram para ser uma pessoa mais feliz.

Agradeço à minha orientadora, Professora Doutora Elza Fonseca, toda a ajuda que proporcionou ao partilhar os seus conhecimentos. Por ser a excelente profissional que é, enquanto professora. Pela sua dedicação aos alunos e por contagiar com o seu entusiasmo pela área da engenharia mecânica.

PALAVRAS CHAVE

Ligação W-W-W; Eurocódigos; madeira; cavilhas de aço; fogo; método dos elementos finitos

RESUMO

O comportamento da madeira varia com a temperatura, apresentando esta um efeito negativo, com conseqüente degradação progressiva das suas propriedades. Após a exposição ao fogo, é possível determinar a espessura da camada carbonizada da madeira e avaliar a área resistente remanescente.

Com base em modelos numéricos e computacionais é possível estudar o nível de proteção aquando da ação do fogo sobre este tipo de ligações, o que permite verificar o campo de temperaturas, na madeira e nas cavilhas em aço.

As ligações madeira-madeira (W-W-W), podem ser protegidas com a adição de painéis em madeira, painéis à base de madeira ou painéis de gesso tipo A, H ou F.

O objetivo principal do trabalho consistiu na avaliação da resistência ao fogo de ligações W-W-W ligadas por cavilha em aço solicitadas por corte duplo, e posterior comparação com os resultados de ligações protegidas com placas de gesso.

Foram utilizadas metodologias analíticas (com base no Eurocódigo 1995, partes 1-1 e 1-2) e modelos computacionais, de forma a prever a exposição ao fogo e a capacidade dos componentes que compõem a ligação W-W-W, resistirem à ação do mesmo.

A madeira alvo de estudo foi a espécie bétula do tipo madeira lamelada colada GL20h, GL24h e GL32h. Os diâmetros de cavilhas estudados foram 6 mm, 8 mm, 10 mm e 12 mm. As ligações foram projetadas para três tipos de cargas diferentes: 10 kN, 15 kN e 20 kN.

Inicialmente as ligações foram projetadas para a temperatura ambiente, com base no Eurocódigo 1995 parte 1-1, seguindo-se do cálculo da proteção das ligações para situações de exposição ao fogo, segundo o Eurocódigo 1995 parte 1-2.

Para formular conclusões relativas à aplicação de diferentes tipos de painéis de gesso nas ligações W-W-W, projetadas com madeiras de diferentes massas volúmicas, foram desenvolvidos modelos numéricos, representativos de seções retas bidimensionais, para a simulação térmica em regime transiente.

Foram estudados os resultados dos campos de temperaturas das ligações sobre a ação do fogo, assim como a espessura de camada carbonizada e velocidade de carbonização para ligações não protegidas. Seguiu-se a comparação dos resultados com os valores propostos pelo Eurocódigo 1995 parte 1-2, entre a proteção de diferentes tipos de gesso e a sua eficácia, e por fim, o estudo do campo de temperaturas ao longo do comprimento das cavilhas de aço, após exposição ao fogo.

De acordo com o Eurocódigo 1995 parte 1-2, a madeira em estudo apresenta uma velocidade de carbonização de 0.70 mm/min. Os resultados revelaram que para um diâmetro de cavilha de 6 mm, a velocidade de carbonização medida num ponto entre as cavilhas de aço foi de 1.83 mm/min, 1.33 mm/min e 1.03 mm/min, para GL20h, GL24h e GL32h, respetivamente. Relativamente à variação da velocidade de carbonização, esta aumentou com a proximidade às cavilhas de aço, como se verificou para a madeira GL20h e diâmetro de cavilha 8mm, com velocidades 0.78 mm/min, 1.00 mm/min e 1.13 mm/min, nos pontos afastado das cavilhas, próximo das cavilhas, e entre as cavilhas, respetivamente.

Com base nos métodos analíticos, calculou-se a proteção da ligação W-W-W para um período de exposição ao fogo de 1 hora, sendo necessária uma espessura de gesso tipo A ou H de 23 mm e de gesso tipo F de 18 mm.

De forma geral, a velocidade de carbonização na madeira diminuiu com o aumento da sua massa volúmica e aumentou com a proximidade às cavilhas de aço. A proteção de gesso mostrou ser uma ótima solução para o isolamento ao fogo das ligações W-W-W, verificando-se que o gesso tipo F necessita de menor espessura que o gesso tipo A ou H, para oferecer o mesmo tipo de proteção.

KEYWORDS

W-W-W connection; Eurocodes; steel dowels; fire; finite element method

ABSTRACT

The wood behaviour varies with temperature, which has a negative effect, being verified by progressive properties degradation. After fire exposure, it's possible to measure the wood char layer and the remaining resistant cross-section area.

Based on numerical and computational models, it's possible to study the protection level of wood connections, during fire exposure, and evaluate wood and steel dowels temperature fields.

Wood-Wood connections (W-W-W) can be protected by wood panels, wood-based panels or gypsum plasterboards type A, H or F.

The study aim was to evaluate the fire resistance of W-W-W connections on double shear steel dowels and compare the results with protected connections using gypsum plasterboards.

It was used analytical methodologies (Eurocode 1995, part 1-1 and 1-2) and computational models to predict the fire exposure and the ability of the corresponding components that composing the W-W-W connection to resist that action.

Birch was the studied wood specie, produced in glue laminated timber, grades GL20h, GL24h and GL32h. Studied dowels diameters were 6 mm, 8 mm, 10 mm and 12 mm. The connections were designed for three different loads, including 10 kN, 15 kN and 20 kN.

The connections were designed at room temperature, based on Eurocode 1995, part 1.1, followed by connections fire exposure calculations, accordingly with Eurocode 1995, part 1-2.

Numerical models, using a two-dimensional and transient thermal analysis, were developed in order to evaluate gypsum plasterboards cladding on W-W-W connections, which were designed with different wood densities.

For unprotected connections under fire exposure, fields temperatures were evaluated, as well, the char layer and charring rate. That was followed by a comparison to Eurocode 1995 part 1-2 results in relation to different gypsum plasterboards studied, and at the

end, steel dowels fields temperatures along the length were analyzed, after fire exposure.

As described on Eurocode 1995 part 1-2, the studied wood has a charring rate of 0.70 mm/min. The results showed that charring rate, measured between steels dowels, for 6 mm dowels diameter, was 1.83 mm/min, 1.33 mm/min and 1.03 mm/min, for GL20h, GL24h and GL32h, respectively. The charring rate increased in the steel dowels vicinity, as shown for GL20h and 8 mm diameter connection, with the results, 0.78 mm/min, 1.00 mm/min and 1.13 mm/min, at measuring key points, far from dowels, close to the dowels and between steel dowels, respectively.

For W-W-W connection protection, during 1 hour of fire exposure, a 23 mm type A or H and 18 mm type F gypsum plasterboards thickness were calculated, based on analytic methodology.

In summary, the wood charring rate decreased with its rising density and it increased with steel dowels vicinity. Gypsum plasterboards showed to be a good solution to protect W-W-W connection exposed to fire, and type F gypsum was associated to a lower thickness compared to type A or H, for the same protection period.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

A.C.	Antes de Cristo
BS	Norma inglesa
CC	Plano com cavilha
Comp.	Comprimento
CS	Plano sem cavilha
Desprot.	Ligação não protegida
Diâ. ou d	Diâmetro
DIN	Norma alemã
EN	Norma europeia
GLxxc	Madeira lamelada combinada
GLxxh	Madeira lamelada homogénea
ISO	Norma internacional
MEF	Método dos elementos finitos
min	Minutos
Séc.	Século
S-W-S	Ligação aço-madeira-aço
t	Tempo
T	Temperatura
TGA	Análise Termo Gravimétrica
W-S-W	Ligação madeira-aço-madeira
W-W-W	Ligação madeira-madeira-madeira

Lista de Unidades

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

Lista de Símbolos

%	Percentagem
a_1	Espaçamento entre ligadores numa linha, paralelo à fibra
a_2	Espaçamento entre duas linhas de ligadores, perpendicular à fibra
$a_{3,t}$	Distância entre o ligador e a zonal final solicitada
$a_{4,c}$	Distância entre o ligador e a zonal final não solicitada
a_{fi}	Espessura extra nos membros de madeira para aumentar a resistência ao fogo
A_s	Área resistente transversal
d	Diâmetro
$E_{0,g,mean}$	Valor médio do módulo da elasticidade paralelo à fibra da madeira lamelada colada
$E_{0,g,05}$	Módulo de elasticidade paralelo à fibra da madeira lamelada colada correspondente ao quantil 5%
$E_{90,g,mean}$	Valor médio do módulo da elasticidade perpendicular à fibra da madeira lamelada colada
$E_{90,g,05}$	Módulo de elasticidade perpendicular à fibra da madeira lamelada colada correspondente ao quantil de 5%
E_d	Módulo de elasticidade de projeto

$E_{d,fi}$	Módulo de elasticidade de projeto em situação de fogo
f_{20}	Resistência à temperatura ambiente correspondente ao quantil de 20%
$F_{ax,Rk}$	Valor característico da capacidade à tração do ligador em projeto
$f_{c,0,g,k}$	Valor característico de resistência à compressão paralelo à fibra para madeira lamelada colada
$f_{c,90,g,k}$	Valor característico de resistência à compressão perpendicular à fibra para madeira lamelada colada
F_d	Carga de projeto
$f_{d,fi}$	Resistência à tração de projeto ao fogo
$f_{h,i,k}$	Resistência ao esmagamento característica do membro
f_k	Resistência característica
$f_{m,g,k}$	Valor característico de resistência à flexão para madeira lamelada colada
$f_{t,0,d}$	Resistência à tração ao longo da fibra de projeto
$f_{t,0,g,k}$	Valor característico de resistência à tração paralelo à fibra para madeira lamelada colada
$f_{t,90,g,k}$	Valor característico de resistência à tração perpendicular à fibra para madeira lamelada colada
$f_{t,0,k}$	Resistência à tração ao longo da fibra característica
f_u	Resistência à tração do ligador
$f_{u,k}$	Resistência à tração característica do ligador
$f_{v,g,k}$	Valor característico de resistência ao corte para madeira lamelada colada
$F_{v,Rd}$	Capacidade de carga por plano de corte e por ligador
$F_{v,Rk}$	Capacidade de carga por plano de corte e por ligador característico
f_y	Tensão de cedência
$G_{g,05}$	Módulo ao corte para o 05-percentil da madeira lamelada colada
$G_{g,mean}$	Valor médio do módulo ao corte da madeira lamelada colada
h_p	Espessura de material isolador
k_{fi}	Coefficiente
k_{flux}	Coefficiente do fluxo de calor para ligadores

k_{mod}	Fator de modificação para a duração do carregamento e conteúdo de humidade
$k_{mod,fi}$	Fator de modificação ao fogo
$M_{y,Rk}$	Momento de cedência característico do ligador
t_{ch}	Período em que os membros protegidos começam a carbonizar
$t_{d,fi}$	Período em que a ligação não protegida resiste ao fogo
t_i	Espessura dos membros de madeira
α	Expansão térmica linear
β	Relação entre a resistência ao esmagamento dos membros estruturais
β_n	Velocidade de carbonização sob exposição ao fogo normalizado
γ_M	Fator de parcial para as propriedades do material, tendo em conta incertezas e variações geométricas
$\gamma_{M,fi}$	Fator parcial para a madeira ao fogo
η_{fi}	Fator de redução para o fogo
ν	Coefficiente de Poisson
ρ_a	Massa volúmica
$\rho_{g,k}$	Valor característico da massa volúmica da madeira lamelada colada
$\rho_{g,mean}$	Valor médio da massa volúmica da madeira lamelada colada
ρ_k	Massa volúmica característica da madeira
$\sigma_{t,0,d}$	Tensão à tração paralela à fibra de projeto
σ_y	Tensão de cedência

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1 – ARRANJO TÍPICO DE UMA LIGAÇÃO W-W-W COM CAVILHAS METÁLICAS, SOLICITADA À TRAÇÃO EM DUPLO CORTE (IMAGEM ADAPTADA DE [3])	27
FIGURA 2.1 - EXEMPLO DE ABRIGO DO HOMEM PRIMITIVO CONSTRUÍDO COM RAMOS DE ÁRVORES (120 000 - 40 000 A.C.) [4]	33
FIGURA 2.2 - CASA COMPRIDA CONSTRUIDA POR VOLTA DE 4 500 A.C. [4]	33
FIGURA 2.3 - TIPO DE JUNTA <i>MORTISE-AND-TENON</i> [5].....	34
FIGURA 2.4 - DETALHES DE ENTALHES. À ESQUERDA, TRONCOS REDONDOS, AO CENTRO MADEIRA PLANA, E À DIREITA, ENTALHES <i>DOVE TAIL</i> [4].....	34
FIGURA 2.5 - DOIS TIPOS DE SOALHOS CONSTRUÍDOS EM MADEIRA. À ESQUERDA, SOALHO CONSTRUÍDO COM TRONCOS E À DIREITA, SOALHO CONSTRUÍDO COM TÁBUAS DE MADEIRA [4].....	35
FIGURA 2.6 - LIGAÇÕES EM DUPLO CORTE: (A) LIGAÇÃO W-W-W; (B) LIGAÇÃO W-S-W; (C) LIGAÇÃO S-W-S [7]	35
FIGURA 2.7 - MODOS DE FALHA TÍPICOS NUMA LIGAÇÃO COM CAVILHA EM MADEIRA: A) FALHA FRÁGIL - DUAS FISSURAS B) FALHA FRÁGIL - UMA FISSURA E C) FALHA DÚCTIL [8].....	36
FIGURA 2.8 - RESULTADOS OBTIDOS POR MEF PARA Σ_V (MPA), EM UMA DAS CONFIGURAÇÕES UTILIZADAS [8].....	36
FIGURA 2.9 - FORMULAÇÃO UTILIZADA NO MEF EM CADA UM DOS COMPONENTES [9]	37
FIGURA 2.10 – MALHA DE ELEMENTOS REPRODUZINDO A FALHA DEVIDO A TRAÇÃO (ESQ.) E FALHA POR CORTE (DIR.) [9]	37
FIGURA 2.11 - CAMPO DE TEMPERATURAS: (A) SEÇÃO DOS PARAFUSOS; (B) SEÇÃO DAS CAVILHAS; (C) SEÇÃO ENTRE PARAFUSOS E CAVILHAS [11].....	38
FIGURA 3.1 – EXEMPLO DE MADEIRA LAMELADA COLADA [20].....	44
FIGURA 3.2 – RELAÇÃO ENTRE A TEMPERATURA E A CONDUTIVIDADE TÉRMICA PARA A MADEIRA E CAMADA CARBONIZADA.....	47
FIGURA 3.3 – RELAÇÃO ENTRE A TEMPERATURA E O CALOR ESPECÍFICO PARA A MADEIRA E A CAMADA CARBONIZADA	47
FIGURA 3.4 – RELAÇÃO ENTRE TEMPERATURA E MASSA VOLÚMICA NAS CLASSES DE MADEIRA LAMELADA GL20H, GL24H, GL32H	48
FIGURA 3.5 – CALOR ESPECÍFICO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA PARA O AÇO-CARBONO	49
FIGURA 3.6 – CONDUTIVIDADE TÉRMICA EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA PARA O AÇO-CARBONO	49
FIGURA 3.7 – EXEMPLO DE PAINÉIS DE GESSO [28].....	50
FIGURA 3.8 – MASSA VOLÚMICA DO GESSO TIPO A E F EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA	52
FIGURA 3.9 – CALOR ESPECÍFICO DO GESSO TIPO A E F EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA	52
FIGURA 3.10 – CONDUTIVIDADE TÉRMICA DO GESSO TIPO A E F EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA	52
FIGURA 4.1 – ZONAS DE DEGRADAÇÃO DA MADEIRA (ADAPTADO) [30]	55
FIGURA 4.2 – CURVA DE FOGO ISO 834. TEMPERATURA EM FUNÇÃO DO TEMPO.....	57
FIGURA 5.1 – ESPAÇAMENTO E DISTÂNCIAS PARA LIGADORES [1]	64

FIGURA 5.2 – REPRESENTAÇÃO DAS DIMENSÕES DA LIGAÇÃO W-W-W E DISTRIBUIÇÃO DOS LIGADORES	65
FIGURA 5.3 – ISOMÉTRICA DA LIGAÇÃO W-W-W PARA CAVILHAS DE 8 MM COM CARREGAMENTO DE 20 KN.....	66
FIGURA 5.4 – COMPARAÇÃO ENTRE O NÚMERO DE CAVILHAS E O CARREGAMENTO APLICADO, PARA OS TRÊS TIPOS DE MADEIRA E OS QUATRO DIÂMETROS DE CAVILHAS NAS LIGAÇÕES W-W-W	67
FIGURA 5.5 – COMPARAÇÃO ENTRE O NÚMERO E OS DIÂMETROS DE CAVILHAS, PARA OS TRÊS TIPOS DE MADEIRA E TRÊS CARREGAMENTOS APLICADOS NAS LIGAÇÕES W-W-W	67
FIGURA 5.6 – EXEMPLO DO LOCAL ONDE APLICAR O AUMENTO DE ESPESSURA <i>afi</i> NOS MEMBROS LATERAIS [2].....	70
FIGURA 6.1 - SIMETRIA DA LIGAÇÃO W-W-W, USADA PARA AS SIMULAÇÕES TÉRMICAS. A VERDE, O PLANO COM CAVILHAS CC; A VERMELHO, O PLANO SEM CAVILHAS SC	76
FIGURA 6.2 – À ESQUERDA, ELEMENTO PLANE77 COM 8 NÓS [38]; À DIREITA, MALHA DA LIGAÇÃO PROTEGIDA COM GESSO.....	78
FIGURA 6.3 - FRETE DE FOGO NA LIGAÇÃO W-W-W. À ESQUERDA, LIGAÇÃO NÃO PROTEGIDA E À DIREITA, LIGAÇÃO PROTEGIDA COM PLACAS DE GESSO	78
FIGURA 7.1 – VELOCIDADE DE CARBONIZAÇÃO EM MADEIRA NÃO PROTEGIDA – PLANO SEM CAVILHAS E D=8 MM	84
FIGURA 7.2 – VELOCIDADE DE CARBONIZAÇÃO EM MADEIRA NÃO PROTEGIDA – D=8 MM LEGENDA: CC - PLANO COM CAVILHAS; SC - PLANO SEM CAVILHAS	85
FIGURA 7.3 – VELOCIDADE DE CARBONIZAÇÃO EM MADEIRA NÃO PROTEGIDA – PLANO COM CAVILHAS	86
FIGURA 7.4 - EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA AO LONGO DE 30 MIN, À SUPERFÍCIE E NO INTERIOR DA MADEIRA E CAVILHA, EM LIGAÇÃO NÃO PROTEGIDA EXPOSTA AO FOGO - GL20H, CAVILHA D=8 MM	88
FIGURA 7.5 - EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA AO LONGO DE 30 MIN AFASTADO DA CAVILHA, À SUPERFÍCIE E NO INTERIOR DA MADEIRA, EM LIGAÇÕES NÃO PROTEGIDAS EXPOSTAS AO FOGO – D=6 MM ..	88
FIGURA 7.6 – EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA AO LONGO DE 30 MIN, NO INTERIOR DA CAVILHA E MADEIRA, EM LIGAÇÃO NÃO PROTEGIDA EXPOSTA AO FOGO – GL20H	89
FIGURA 7.7 - EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA AO LONGO DE 60 MIN, NA SUPERFÍCIE DA MADEIRA, EM LIGAÇÕES NÃO PROTEGIDAS E PROTEGIDAS COM GESSO TIPO A, EXPOSTAS AO FOGO – LIGAÇÃO “6CC20D”	90
FIGURA 7.8 - EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA AO LONGO DE 60 MIN, NO INTERIOR DA MADEIRA EM LIGAÇÕES NÃO PROTEGIDAS E PROTEGIDAS COM GESSO TIPO A, EXPOSTAS AO FOGO – LIGAÇÃO “6CC20D”	91
FIGURA 7.9 - EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA AO LONGO DE 60 MIN, À SUPERFÍCIE DA MADEIRA EM LIGAÇÕES PROTEGIDAS EXPOSTAS AO FOGO - LIGAÇÃO "6CC20D".....	92
FIGURA 7.10 - EVOLUÇÃO DAS TEMPERATURAS AO LONGO DE 60 MIN, NO INTERIOR DA MADEIRA EM LIGAÇÕES PROTEGIDAS EXPOSTAS AO FOGO - LIGAÇÃO "6CC20D".....	92
FIGURA 7.11 – TEMPERATURA AO LONGO DO COMPRIMENTO DAS CAVILHAS, APÓS EXPOSIÇÃO AO FOGO – GL20H E D=6 MM	93
FIGURA 7.12 – TEMPERATURA AO LONGO DO COMPRIMENTO DAS CAVILHAS, APÓS 30 MIN DE EXPOSIÇÃO AO FOGO – GL20H NÃO PROTEGIDA.....	94
FIGURA 7.13 – TEMPERATURA AO LONGO DO COMPRIMENTO DAS CAVILHAS, APÓS 30 MIN DE EXPOSIÇÃO AO FOGO – GL32H NÃO PROTEGIDA.....	94

FIGURA 7.14 – TEMPERATURA AO LONGO DO COMPRIMENTO DAS CAVILHAS, APÓS 60 MIN DE EXPOSIÇÃO AO FOGO – GL20H PROTEGIDA COM GESSO TIPO A.....	95
FIGURA 10.1 – EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA AO LONGO DE 60 MIN, NA SUPERFÍCIE DA MADEIRA, EM LIGAÇÕES NÃO PROTEGIDAS E PROTEGIDAS COM GESSO TIPO A, EXPOSTAS AO FOGO - GL20H, CAVILHA D=6 MM	125
FIGURA 10.2 – EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA AO LONGO DE 60 MIN, NA SUPERFÍCIE DA MADEIRA, EM LIGAÇÕES NÃO PROTEGIDAS E PROTEGIDAS COM GESSO TIPO A, EXPOSTAS AO FOGO - GL24H, CAVILHA D=6 MM	125
FIGURA 10.3 – EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA AO LONGO DE 60 MIN, NA SUPERFÍCIE DA MADEIRA, EM LIGAÇÕES NÃO PROTEGIDAS E PROTEGIDAS COM GESSO TIPO A, EXPOSTAS AO FOGO – GL32H, CAVILHA D=6 MM	126
FIGURA 10.4 – EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA AO LONGO DE 60 MIN, NA SUPERFÍCIE DA MADEIRA, EM LIGAÇÕES NÃO PROTEGIDAS E PROTEGIDAS COM GESSO TIPO A, EXPOSTAS AO FOGO - GL20H, CAVILHA D=12 MM	126
FIGURA 10.5 – EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA AO LONGO DE 60 MIN, NA SUPERFÍCIE DA MADEIRA, EM LIGAÇÕES NÃO PROTEGIDAS E PROTEGIDAS COM GESSO TIPO A, EXPOSTAS AO FOGO - GL24H, CAVILHA D=12 MM	126
FIGURA 10.6 – EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA AO LONGO DE 60 MIN, NA SUPERFÍCIE DA MADEIRA, EM LIGAÇÕES NÃO PROTEGIDAS E PROTEGIDAS COM GESSO TIPO A, EXPOSTAS AO FOGO – GL32H, CAVILHA D=12 MM	127
FIGURA 10.7 – EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA AO LONGO DE 60 MIN, NO INTERIOR DA MADEIRA EM LIGAÇÕES NÃO PROTEGIDAS E PROTEGIDAS COM GESSO TIPO A, EXPOSTAS AO FOGO – GL20H, CAVILHA D=6 MM	127
FIGURA 10.8 – EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA AO LONGO DE 60 MIN, NO INTERIOR DA MADEIRA EM LIGAÇÕES NÃO PROTEGIDAS E PROTEGIDAS COM GESSO TIPO A, EXPOSTAS AO FOGO – GL24H, CAVILHA D=6 MM	127
FIGURA 10.9 – EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA AO LONGO DE 60 MIN, NO INTERIOR DA MADEIRA EM LIGAÇÕES NÃO PROTEGIDAS E PROTEGIDAS COM GESSO TIPO A, EXPOSTAS AO FOGO – GL32H, CAVILHA D=6 MM	128
FIGURA 10.10 – EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA AO LONGO DE 60 MIN, NO INTERIOR DA MADEIRA EM LIGAÇÕES NÃO PROTEGIDAS E PROTEGIDAS COM GESSO TIPO A, EXPOSTAS AO FOGO – GL20H, CAVILHA D=12 MM	128
FIGURA 10.11 – EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA AO LONGO DE 60 MIN, NO INTERIOR DA MADEIRA EM LIGAÇÕES NÃO PROTEGIDAS E PROTEGIDAS COM GESSO TIPO A, EXPOSTAS AO FOGO – GL24H, CAVILHA D=12 MM	128
FIGURA 10.12 – EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA AO LONGO DE 60 MIN, NO INTERIOR DA MADEIRA EM LIGAÇÕES NÃO PROTEGIDAS E PROTEGIDAS COM GESSO TIPO A, EXPOSTAS AO FOGO – GL32H, CAVILHA D=12 MM	129
FIGURA 10.13 – EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA AO LONGO DE 60 MIN, À SUPERFÍCIE DA MADEIRA EM LIGAÇÕES PROTEGIDAS EXPOSTAS AO FOGO – GL20H, CAVILHA D=6 MM	129
FIGURA 10.14 – EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA AO LONGO DE 60 MIN, À SUPERFÍCIE DA MADEIRA EM LIGAÇÕES PROTEGIDAS EXPOSTAS AO FOGO – GL24H, CAVILHA D=6 MM	129
FIGURA 10.15 – EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA AO LONGO DE 60 MIN, À SUPERFÍCIE DA MADEIRA EM LIGAÇÕES PROTEGIDAS EXPOSTAS AO FOGO – GL32H, CAVILHA D=6 MM	130
FIGURA 10.16 – EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA AO LONGO DE 60 MIN, À SUPERFÍCIE DA MADEIRA EM LIGAÇÕES PROTEGIDAS EXPOSTAS AO FOGO – GL20H, CAVILHA D=12 MM	130

FIGURA 10.17 – EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA AO LONGO DE 60 MIN, À SUPERFÍCIE DA MADEIRA EM LIGAÇÕES PROTEGIDAS EXPOSTAS AO FOGO – GL24H, CAVILHA D=12 MM	130
FIGURA 10.18 – EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA AO LONGO DE 60 MIN, À SUPERFÍCIE DA MADEIRA EM LIGAÇÕES PROTEGIDAS EXPOSTAS AO FOGO – GL32H, CAVILHA D=12 MM	131
FIGURA 10.19 – TEMPERATURA AO LONGO DO COMPRIMENTO DAS CAVILHAS, APÓS EXPOSIÇÃO AO FOGO – GL20H E D=6 MM	132
FIGURA 10.20 – TEMPERATURA AO LONGO DO COMPRIMENTO DAS CAVILHAS, APÓS EXPOSIÇÃO AO FOGO – GL20H E D=12 MM	132
FIGURA 10.21 – TEMPERATURA AO LONGO DO COMPRIMENTO DAS CAVILHAS, APÓS EXPOSIÇÃO AO FOGO – GL24H E D=6 MM	132
FIGURA 10.22 – TEMPERATURA AO LONGO DO COMPRIMENTO DAS CAVILHAS, APÓS EXPOSIÇÃO AO FOGO – GL24H E D=12 MM	133
FIGURA 10.23 – TEMPERATURA AO LONGO DO COMPRIMENTO DAS CAVILHAS, APÓS EXPOSIÇÃO AO FOGO – GL32H E D=6 MM	133
FIGURA 10.24 – TEMPERATURA AO LONGO DO COMPRIMENTO DAS CAVILHAS, APÓS EXPOSIÇÃO AO FOGO – GL32H E D=12 MM	133
FIGURA 10.25 – TEMPERATURA AO LONGO DO COMPRIMENTO DAS CAVILHAS, APÓS 30 MIN DE EXPOSIÇÃO AO FOGO – GL20H NÃO PROTEGIDA.....	134
FIGURA 10.26 – TEMPERATURA AO LONGO DO COMPRIMENTO DAS CAVILHAS, APÓS 30 MIN DE EXPOSIÇÃO AO FOGO – GL24H NÃO PROTEGIDA.....	134
FIGURA 10.27 – TEMPERATURA AO LONGO DO COMPRIMENTO DAS CAVILHAS, APÓS 30 MIN DE EXPOSIÇÃO AO FOGO – GL32H NÃO PROTEGIDA.....	134
FIGURA 10.28 – TEMPERATURA AO LONGO DO COMPRIMENTO DAS CAVILHAS, APÓS 60 MIN DE EXPOSIÇÃO AO FOGO – GL20H PROTEGIDA COM GESSO TIPO A.....	135
FIGURA 10.29 – TEMPERATURA AO LONGO DO COMPRIMENTO DAS CAVILHAS, APÓS 60 MIN DE EXPOSIÇÃO AO FOGO – GL24H PROTEGIDA COM GESSO TIPO A.....	135
FIGURA 10.30 – TEMPERATURA AO LONGO DO COMPRIMENTO DAS CAVILHAS, APÓS 60 MIN DE EXPOSIÇÃO AO FOGO – GL32H PROTEGIDA COM GESSO TIPO A.....	135

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 3.1 – PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS MADEIRAS LAMELADAS DO TIPO GLXXH. VALORES DE RESISTÊNCIA EM MPA E MASSA VOLÚMICA EM KG/M ³	46
TABELA 3.2 – VALORES NOMINAIS DE TENSÃO DE CEDÊNCIA E ROTURA, PARA AÇO ESTRUTURAL CONFORMADO A QUENTE [22].....	48
TABELA 6.1 – DESCRIÇÃO DAS DIFERENTES COMBINAÇÕES DE LIGAÇÕES, ESTUDADAS ATRAVÉS DO MODELO NUMÉRICO	77
TABELA 7.1 – VELOCIDADE DE CARBONIZAÇÃO NAS LIGAÇÕES COM MADEIRA NÃO PROTEGIDA, MEDIDA EM 3 PONTOS [MM/MIN].....	86
TABELA 10.1 - TABELA DE DIMENSIONAMENTO PARA LIGAÇÕES W-W-W À TEMPERATURA AMBIENTE, PARA DIFERENTES TIPOS DE MADEIRA, CARREGAMENTOS E DIÂMETROS DE CAVILHA.....	111
TABELA 10.2 - TABELA DE VERIFICAÇÃO AO FOGO PARA LIGAÇÕES W-W-W, PARA DIFERENTES TIPOS DE MADEIRA, CARREGAMENTOS E DIÂMETROS DE CAVILHA	112
TABELA 10.3 - TABELA DE DIMENSIONAMENTO PARA LIGAÇÕES W-W-W DESPROTEGIDAS E PROTEGIDAS, EXPOSTAS AO FOGO, PARA DIFERENTES TIPOS DE MADEIRA, CARREGAMENTOS E DIÂMETROS DE CAVILHA	113

1 Índice

1	INTRODUÇÃO	27
1.1	Motivação	27
1.2	Objetivos	27
1.3	Organização do relatório.....	28
2	ESTADO DA ARTE.....	33
2.1	Estruturas de madeira - revisão histórica	33
2.2	Investigação científica.....	35
3	PROPRIEDADES DOS MATERIAIS.....	43
3.1	Madeira.....	43
3.1.1	Ortotropia.....	43
3.1.2	Madeira simples	44
3.1.3	Madeira lamelada colada	44
3.1.4	Propriedades	45
3.2	Aço.....	48
3.2.1	Propriedades mecânicas	48
3.2.2	Propriedades térmicas em regime transiente	49
3.3	Gesso.....	50
3.3.1	Tipos de gesso	50
3.3.2	Propriedades térmicas em regime transiente	51
4	ANÁLISE TÉRMICA.....	55
4.1	Comportamento térmico da madeira	55
4.2	Fator de massividade do aço.....	56
4.3	Curva de incêndio ISO 834	56
4.4	Transferência de calor.....	57

4.4.1	Radiação	57
4.4.2	Condução.....	57
4.4.3	Convecção	58
5	DIMENSIONAMENTO DE UMA LIGAÇÃO W-W-W COM CAVILHAS EM DUPLO CORTE	61
5.1	Temperatura ambiente	61
5.1.1	Projeto de ligação W-W-W com cavilhas em corte duplo - método simplificado.....	61
5.1.2	Combinação de ligações	65
5.2	Altas temperaturas - fogo	67
5.2.1	Verificação da ligação exposta ao fogo	68
5.2.2	Dimensionamento para exposição ao fogo.....	69
6	ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS.....	75
6.1	Modelo numérico.....	75
7	RESULTADOS	83
7.1	Madeira não protegida	83
7.2	Comparação entre madeira não protegida e protegida	89
7.3	Madeira protegida – painéis de gesso	91
7.4	Temperatura nas cavilhas	93
8	CONCLUSÕES.....	99
8.1	CONCLUSÕES.....	99
8.2	TRABALHOS FUTUROS.....	100
9	BIBLIOGRAFIA	105
10	ANEXOS	111
10.1	Tabelas de dimensionamento da ligação W-W-W.....	111
10.2	CAMPO DE TEMPERATURAS NAS LIGAÇÕES.....	114
10.3	GRÁFICOS – TEMPERATURA NAS LIGAÇÕES W-W-W	125
10.4	GRÁFICOS – TEMPERATURA NAS CAVILHAS	132

INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

1.2 OBJECTIVOS

1.3 ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

As normas europeias existentes para auxiliar na construção de edifício em madeira, são baseados em estudos que foram elaborados ao longo dos anos. Muitas vezes, os valores usados nos cálculos para dimensionamento, descritos nessas normas, são baseados em pressupostos e em equações simplificadas. Determinados fatores como, eventuais variações nas propriedades dos materiais, a forma como são obtidos ou fabricados, poderão de alguma forma afetar o cálculo. Em alguns casos, como no exemplo da madeira, e função da sua massa volúmica, distinguem-se duas classes, a madeira dura ou macia. As propriedades térmicas são por isso afetadas, dependendo da variação da massa volúmica do material. No caso da madeira macia, por exemplo, e para uma espécie com massa volúmica superior a 290 kg/m^3 , o Eurocódigo 1995 - parte 1-2 recomenda que a velocidade de carbonização seja igual a 0.7 mm/min . No entanto, constata-se que a velocidade de carbonização é dependente da massa volúmica e do efeito combinado com outros materiais. Com o auxílio de uma ferramenta numérica de simulação, é possível por um lado, validar as propostas do Eurocódigo e por outro, perceber se as variações nas propriedades afetam de forma significativa os valores recomendados.

1.2 Objetivos

O objetivo deste trabalho é desenvolver ligações em madeira-madeira (W-W-W) em duplo corte (Figura 1.1) à temperatura ambiente e a altas temperaturas, nomeadamente sob ação do fogo, com o auxílio das normas europeias existentes para estes tipos de construções, que são os Eurocódigos 1995 parte 1-1 [1] e 1-2 [2], aplicáveis à temperatura ambiente e na situação de fogo, respetivamente.

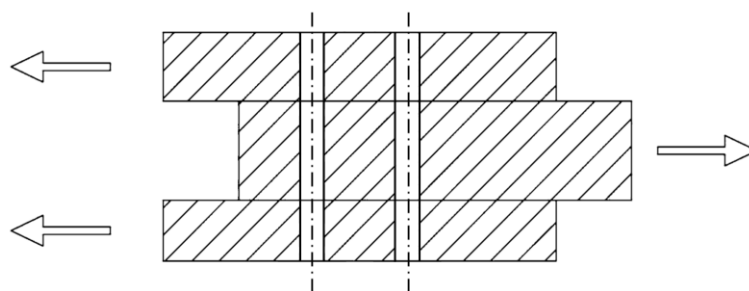


Figura 1.1 – Arranjo típico de uma ligação W-W-W com cavilhas metálicas, solicitada à tração em duplo corte (imagem adaptada de [3])

O projeto da ligação obedece aos requisitos normativos e será implementado com base numa folha de cálculo. Pretende-se criar um conjunto de tabelas de fácil consulta e utilização no projeto, em que a escolha seja em função da massa volúmica da madeira e o diâmetro das cavilhas de aço, consoante a carga axial de tração que é necessário a ligação suportar. A informação a obter para o projeto de uma determinada ligação nessas condições, refere-se à quantidade de cavilhas necessárias, ao distanciamento que as cavilhas devem ter entre si, e às distâncias das cavilhas às extremidades dos membros de madeira. O dimensionamento será elaborado para os seguintes conjuntos:

- Classes de madeira: GL20h, GL24h e GL32h;
- Diâmetros de cavilha: 6 mm, 8 mm, 10 mm e 12 mm;
- Carregamentos: 10 kN, 15 kN e 20 kN.

Com os resultados obtidos no dimensionamento e as diferentes combinações, pretende-se ainda simular numericamente, com o recurso a programas de elementos finitos, a análise térmica das ligações quando submetidas à ação do fogo. O objetivo é obter a resistência ao fogo dessas ligações com e sem proteção, avaliando em detalhe zonas críticas da ligação pela conjugação de materiais (madeira, aço e proteção).

1.3 Organização do relatório

Foram abordados os temas pela seguinte ordem: estado da arte, propriedades de materiais, análise térmica, dimensionamento de uma ligação W-W-W com cavilhas metálicas em duplo corte, análise por elementos finitos, resultados e conclusões.

No estado da arte foi feita uma breve revisão histórica acerca das primeiras utilizações de madeira no âmbito da construção, de como surgiram as ligações em madeira, a sua importância, seguindo-se uma descrição da atualidade. De seguida, foi abordada a principal investigação científica elaborada no desenvolvimento das ligações de madeira expostas a esforços, à temperatura ambiente e a temperaturas elevadas.

Nas propriedades dos materiais, foram referidas as propriedades mais importantes, quer mecânicas, quer térmicas, da madeira, do aço e do gesso, necessárias para o dimensionamento das ligações à temperatura ambiente e para o estudo numérico das ligações quando expostas ao fogo normalizado.

No capítulo da análise térmica, foi explicado o comportamento da madeira quando exposta a elevadas temperaturas. Foi apresentado o cenário de incêndio com a curva ISO834, utilizada no cálculo numérico, para estudar o efeito do fogo normalizado nas ligações projetadas. Foi elaborada uma breve revisão referente à transferência de calor.

No dimensionamento de uma ligação W-W-W com cavilhas em duplo corte, foi descrito o procedimento de cálculo à temperatura ambiente e a elevadas temperaturas, com recurso aos Eurocódigos 1995 parte 1-1 [1] e 1-2 [2].

Na análise por elementos finitos foi explicado o funcionamento desta metodologia de análise, quais os parâmetros utilizados no modelo para análise e quais as ligações estudadas.

Nos resultados, foram analisados os dados obtidos através das simulações numéricas, com a criação de gráficos para facilitar o estudo das ligações. A análise foi realizada individualmente para cada conjunto de soluções, na madeira não protegida, na madeira protegida e não protegida, na madeira protegida com painéis de gesso, e na avaliação da temperatura nas cavilhas.

Nas conclusões, depois de analisados os resultados relativos ao dimensionamento da ligação, foram expostas as principais conclusões obtidas com o trabalho desenvolvido.

Estão disponíveis nos anexos, as tabelas de dimensionamento da ligação W-W-W para temperatura ambiente e situação de fogo, os resultados do campo de temperaturas para as ligações projetadas, assim como os gráficos criados para a sua análise.

ESTADO DA ARTE

2.1 ESTRUTURAS DE MADEIRA – REVISÃO HISTÓRICA

2.2 INVESTIGAÇÃO CIENTÍFICA

2 ESTADO DA ARTE

A madeira é utilizada desde as antigas civilizações para as mais diversas finalidades. Podemos encontrar desde edifícios e pontes até máquinas, armas de guerra, construções de engenharia civil, barcos, entre outros. A madeira é obtida através do abate de árvores e pode ser encontrada em todo o mundo, contudo, ela é mais escassa em algumas áreas do globo do que noutras, devido aos diferentes climas [4].

2.1 Estruturas de madeira - revisão histórica

A madeira foi dos primeiros materiais a ser usado como base estrutural para a construção de habitações utilizadas pelos seres humanos. As primeiras casas foram edificadas pelo Homem primitivo (*Homo sapiens neanderthalensis*) por volta de 120000 – 40000 A.C. para construir abrigos, os quais eram constituídos por ramos de árvores entrelaçados e dispostos de forma circular (Figura 2.1) [4].



Figura 2.1 - Exemplo de abrigo do homem primitivo construído com ramos de árvores (120 000 - 40 000 A.C.) [4]

Entre 4 500 e 3 000 A.C., foram construídas por agricultores, as primeiras casas com estruturas em madeira, um pouco mais sólidas que os antigos abrigos (Figura 2.2) e que permitiam construir casas de maiores dimensões (5.5-7 m x 20-45 m). Devido à falta de conhecimentos técnicos, estas casas tinham alguns erros de projeto, nomeadamente, na capacidade da construção de estruturas treliçadas ou juntas entre as ripas de madeira. Por norma, o período de vida destas construções era cerca de 20 anos.

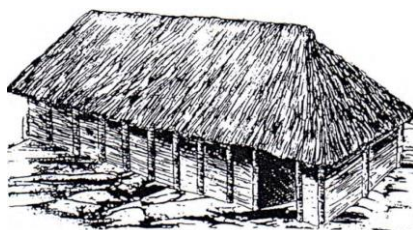


Figura 2.2 - Casa comprida construída por volta de 4 500 A.C. [4]

As primeiras pontes construídas em madeira datam de 600 A.C., mas existe pouca informação disponível à cerca das mesmas. Para se obter uma ideia da resistência das construções feitas com estruturas em madeira, há o exemplo da ponte *Pons Sublicius*, construída no período Romano na altura de Ancus Marcius (640-616 A.C.), que devido à manutenção e reparações regulares, durou cerca de 900 anos [4].

A primeira ligação/junta criada, com um sistema mais elaborado aconteceu entre 500 e 200 A.C. e foi o tipo de ligação *mortise-and-tenon* (Figura 2.3). Durante o séc. X, as estruturas para construções de madeiras eram suficientemente rígidas para suportar os esforços dos edifícios construídos e apoiados no solo, ao contrário do que era feito anteriormente, em que as construções eram suportadas por madeira diretamente inserida na terra. As juntas na madeira têm um papel fundamental na união entre duas partes e ao mesmo tempo manter a rigidez da estrutura. O seu desenvolvimento e a evolução foram fulcrais para as construções de madeira [5].

A partir do séc. XIII começaram a usar-se novas técnicas na construção de casas rurais, onde a construção das paredes era feita com novas formas de juntar as ripas de madeira nos cantos das paredes, através de entalhes simples ou entalhes tipo cauda de andorinha (Figura 2.4). Nessa altura, por toda a Europa, o tipo de construção era diversificado, sendo que nas zonas onde as árvores eram mais abundantes (Europa Central e de Leste), as casas eram construídas na totalidade em madeira, enquanto que noutras regiões encontravam-se casas construídas com combinações de madeira, pedra ou barro [4].

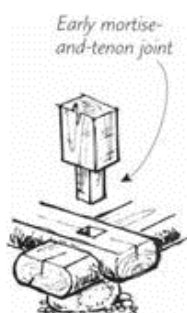


Figura 2.3 - Tipo de junta *mortise-and-tenon* [5]

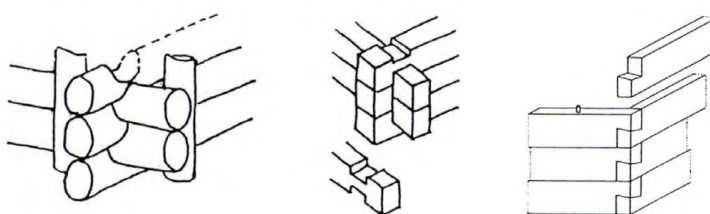


Figura 2.4 - Detalhes de entalhes. À esquerda, troncos redondos, ao centro madeira plana, e à direita, entalhes *dove tail* [4]

A partir do séc. XIV, as casas urbanas começaram a ser construídas em pedra, pelo receio de usar madeira em relação a possível ocorrência de incêndios. Contudo, continuou-se a usar madeira para construir soalhos até ao século XVI (Figura 2.5). Quanto aos tectos, embora se tenham começado a usar telhados em materiais não combustíveis desde o séc. XIV, os telhados em madeira continuam a ser usados até aos dias de hoje [4]. Na Inglaterra, depois de ter acontecido em Londres o grande fogo de 1666, foi criada uma nova regulamentação que proibia a construção de casas em madeira. O medo associado ao risco de incêndio nas casas construídas em madeira, levou a um decréscimo na construção delas [6].

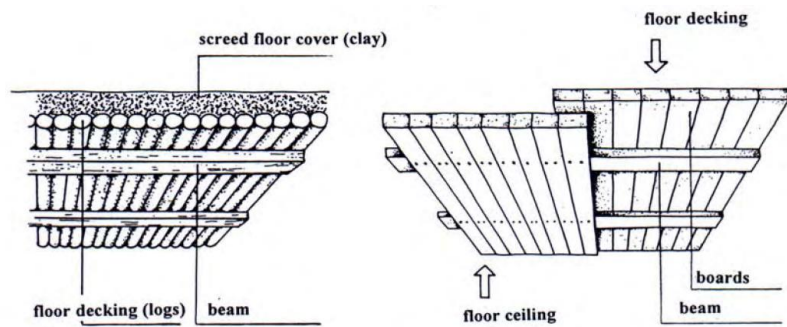


Figura 2.5 - Dois tipos de soalhos construídos em madeira. À esquerda, soalho construído com troncos e à direita, soalho construído com tábuas de madeira [4]

Nos finais do séc. XX, em 1995 foram estabelecidos na Europa os Eurocódigos (SS-EN 1995), que constituem normas europeias que visam a normalização das construções elaboradas em madeira, e correspondem a um marco importante para o projeto de construções e garantia da segurança [7].

Atualmente, as ligações mais comumente utilizadas com ligadores metálicos em duplo corte, têm como membros estruturais apenas a madeira, como membro central e dois laterais para proporcionar a ligação, ou madeira com placas de aço, que podem ser utilizadas como membros laterais ou como um único membro central, como se representa na Figura 2.6.

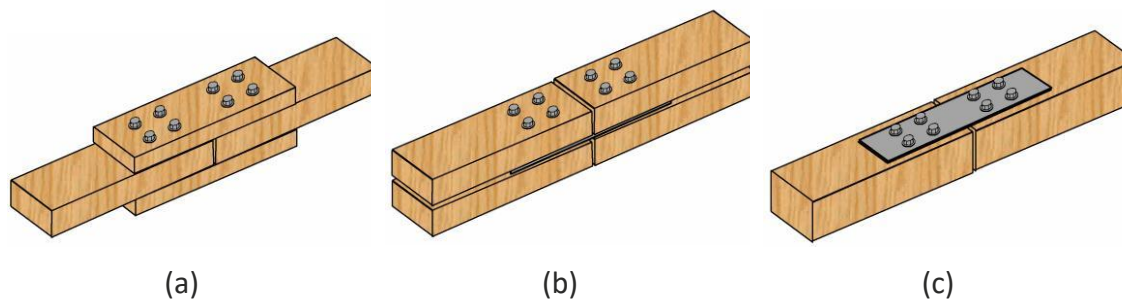


Figura 2.6 - Ligações em duplo corte: (a) ligação W-W-W; (b) ligação W-S-W; (c) ligação S-W-S [8]

2.2 Investigação científica

A necessidade de utilizar vigas com maior comprimento em estruturas de madeira, faz com que a utilização de meios de ligação entre dois membros seja algo imprescindível. Desse modo, existe a necessidade de investigar como as ligações podem ser feitas, em termos de geometria, componentes que fazem a ligação, os materiais e as condições (como o caso da temperatura) a que as ligações podem estar sujeitas. Existem três principais abordagens que normalmente são usadas para estudar este assunto, analítica, experimental e numérica com o auxílio computacional e de elementos finitos.

Em 2008, no estudo de C. L. Santos, *et al.* [9], foram realizados testes experimentais de resistência ao esmagamento da madeira de pinho português, com a finalidade de obter resultados das forças aplicadas, para serem usadas na análise das juntas/ligações (Figura 2.7). Para o seu estudo foi usado como recurso os procedimentos do Eurocódigo 1995, no qual encontraram algumas discrepâncias, no que respeita à correlação entre o módulo de escorregamento e a massa volúmica da madeira. Para prever o módulo de escorregamento da junta, foi usado um modelo analítico baseado numa análise de regressão estatística, suportada por dados obtidos em testes de esmagamento à tração, tendo-se verificado resultados bastante razoáveis. No final, foi realizada uma análise com um programa de elementos finitos (Figura 2.8), com dados de rigidez obtidos experimentalmente e os resultados foram precisos.



Figura 2.7 - Modos de falha típicos numa ligação com cavilha em madeira: a) falha frágil - duas fissuras b) falha frágil - uma fissura e c) falha dúctil [9]

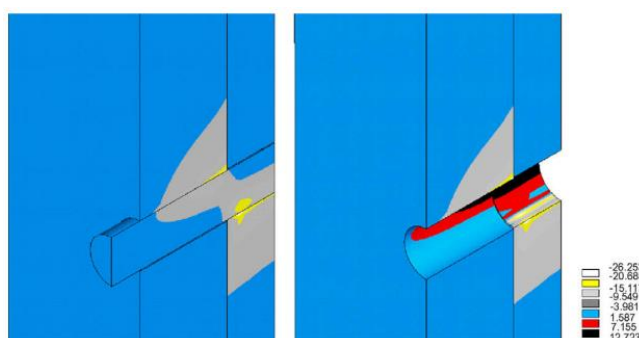


Figura 2.8 - Resultados obtidos por MEF para σ_y (MPa), em uma das configurações utilizadas [9]

Em 2009, E. Resch *et al.* [10], realizaram simulações numéricas com o método de elementos finitos (MEF) tridimensionais, com vista a identificar os múltiplos modos de falha, em ligações de cavilha em aço em madeira-madeira em duplo corte. A madeira estudada foi o abeto norueguês. Para a modelação numérica foi necessário recorrer a formulações que contemplam o comportamento do material (Figura 2.9) e a imposição das condições de fronteira. O MEF contemplou dados baseados em ensaios experimentais e simulações numéricas não-lineares, para preverem com precisão a capacidade de carga e mecanismos de falha (Figura 2.10). A capacidade de carga depende muito dos mecanismos de falha e de como eles acontecem. Por exemplo, a madeira pode falhar de forma dúctil devido a deformação plástica, por deformação plástica dos conectores de aço ou falhas frágeis da madeira, ou devido a fissuração. A carga máxima depende do modo de falha, e ocorre pela ductilidade dos materiais (plastificação da madeira ou dobradiças plásticas das cavilhas), ou por falha frágil

(fissuração devido a tensões altas à tração ou compressão). Foram estes os aspetos a ter em conta para utilizar um método constitutivo, com o objetivo de modelar o mais próximo as propriedades da madeira, com características dúcteis e frágeis. Neste estudo, concluíram que era possível usar o MEF para estudar ligações com mais que uma cavilha em linha (nunca realizado antes), contudo, o modelo usado para determinar a carga última, C1-MSP, demonstrou não ser adequado para a finalidade, requerendo melhorias.

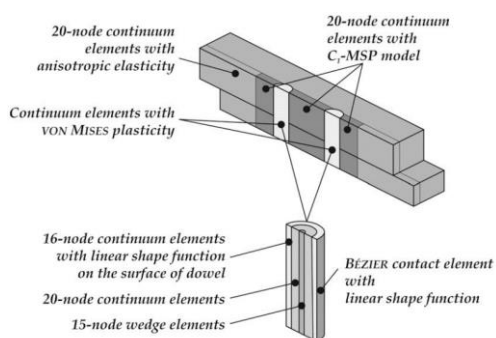


Figura 2.9 - Formulação utilizada no MEF em cada um dos componentes [10]

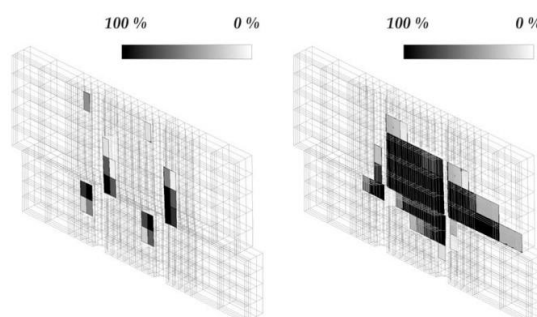


Figura 2.10 – Malha de elementos reproduzindo a falha devido a tração (esq.) e falha por corte (dir.) [10]

Em 2009, P. Cachim *et al.* [11], abordaram a relação construtiva entre cavilhas metálicas e os elementos estruturais de madeira, utilizando um modelo 3D para simular a exposição da ligação ao fogo, com base nas propriedades fornecidas pelo Eurocódigo EN1993-1-2 e EN1995-1-2. A finalidade do trabalho foi calcular as temperaturas no interior dos materiais. Com os dados de temperatura obtidos, resolveram uma análise mecânica, com as propriedades ajustadas para as temperaturas em estudo. Os resultados das simulações numéricas, mostram estar bem ajustados e terem comportamento semelhante aos experimentais, mostrando assim que independentemente da simplicidade do modelo, é possível obter resultados precisos para estudo de ligações de madeira expostas ao fogo.

Também em 2009, L. Peng *et al.* [12], estudaram ligações W-S-W com cavilhas e parafusos, para verificar a capacidade de carga a partir da resistência ao esmagamento da madeira. Para isso, resolveram um modelo numérico para estudar o campo de temperaturas na ligação (Figura 2.11), usando propriedades térmicas da literatura, numa exposição ao fogo com a curva ISO834. Com os dados obtidos, usaram o método de redução de carga para a resistência ao esmagamento e assim determinar a carga para as ligações, depois de expostas ao fogo. No final, foi proposto uma fórmula para avaliar a resistência ao fogo das ligações de madeira, comparando com os resultados dos testes experimentais. Foi possível concluir que o aumento de espessura dos membros de madeira laterais, tem uma maior influência no aumento de capacidade de carga, do que o aumento de diâmetro dos ligadores.

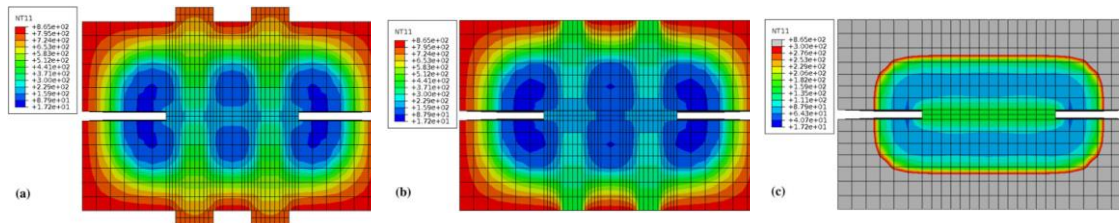


Figura 2.11 - Campo de temperaturas: (a) seção dos parafusos; (b) seção das cavilhas; (c) seção entre parafusos e cavilhas [12]

Ainda em 2009, A. Frangi *et al.* [13], conduziram testes experimentais com ligações W-S-W e S-W-S com cavilhas e pregos, em múltiplo corte, expostas ao fogo. Com os resultados obtidos, observaram que as ligações S-W-S com cavilhas metálicas, dimensionadas para a temperatura ambiente, foram capazes de suportar o fogo durante 30 min, e que com o aumento da distância dos ligadores às extremidades da madeira em 40 mm, aumentava a capacidade de resistir ao fogo até 70 min. No caso das ligações protegidas com placas à base de madeira ou placas de gesso, as ligações resistiram 60 min. Contudo, no caso das ligações que usaram os pregos como ligadores, verificou-se que as ligações de madeira não resistiram mais do que 12 min. Este facto pode ser explicado pelo aumento de temperatura, especialmente conduzido pelas laterais em aço, com conseqüente desenvolvimento de grandes deformações nos pregos.

Em 2011, L. Peng *et al.* [8], apresentaram novas correlações para o cálculo da resistência ao fogo para ligações de madeira W-W-W, W-S-W e S-W-S, com ligadores em duplo corte. Tiveram em consideração vários fatores como o caso das espessuras dos membros de madeira, diâmetro dos ligadores e o valor de carga. Verificou-se que as correlações e medições de testes experimentais de resistência ao fogo, conseguiam ser previstos com bastante eficácia. Considera-se que para uma maior resistência ao fogo, as cavilhas são melhor opção em relação aos parafusos, no que respeita a ligadores.

Em 2012, E. Resch *et al.* [14] apresentam um estudo e voltam a usar o MEF, desta vez para calcular a capacidade de carga máxima e prever as falhas em ligações madeira-madeira com cavilha individual em aço em duplo corte, para comparação com a DIN 1052 (norma alemã), com a DIN EN 1995-1-1 (Eurocódigo 1995). Como resultado, puderam verificar que as duas normas chegariam a conclusões iguais, por se basearem no modelo de *Johansen*.

Em 2013, C. Maraveas *et al.* [3], verificaram o desempenho de ligações madeira-madeira e madeira-aço com ligadores de pregos ou parafusos, expostas ao fogo, usando bibliografia sobre teste experimentais e resultados numéricos. A variação da resistência ao esmagamento da madeira com a alteração da temperatura também foi analisada. Foram estudadas as propriedades termomecânicas da madeira e a velocidade de carbonização da mesma. Investigaram ainda, os fatores determinantes no desempenho das ligações na resistência ao fogo, dos quais, o diâmetro dos ligadores, a espessura dos membros de madeira e a geometria da ligação. Os resultados do estudo mostraram que a madeira é bastante vulnerável ao fogo. Verificou-se que, tipicamente, uma ligação sujeita a um esforço de tração resiste menos que 30 min ao fogo. De salientar que a diminuição de resistência ao esmagamento da madeira, com o aumento da

temperatura, é um fator importante para o cálculo da resistência ao fogo da ligação. Com as conclusões retiradas do estudo, foram criadas regras para desenvolvimento eficiente de ligações resistentes ao fogo.

Em 2014, M. Khelifa *et al.* [15], conduziram um estudo no qual analisaram ligações de madeira com múltiplas cavilhas expostas ao fogo. O modelo usado foi baseado na mecânica do contínuo e aplicação da teoria clássica dos fluidos, para determinar a capacidade de carga das ligações sob fogo. É tido em conta o comportamento ortotrópico da madeira, relativamente às propriedades mecânicas, especialmente em relação ao enrijecimento plástico anisotrópico, deformações plásticas mais significativas e efeito do calor. Os resultados numéricos obtidos, demonstraram estar em concordância com os resultados experimentais.

Em 2018, F.M. Miranda [16] estudou as ligações aço-madeira (W-S-W) a elevadas temperaturas. O autor recorreu ao MEF para analisar diferentes combinações de carga de tração, espessuras dos membros de madeira diferentes e diâmetros de cavilha diferentes. No final, concluiu que o arranjo dos ligadores, pode influenciar significativamente a capacidade de carga das ligações, e que com a análise térmica, verificou que a velocidade de carbonização é maior que a indicada pelo Eurocódigo 1995 parte 1-2, especialmente na proximidade das cavilhas de aço.

PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

3.1 MADEIRA

3.2 AÇO

3.3 GESSO

3 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

Os materiais usados na ligação madeira-madeira, são essencialmente a madeira, cujas propriedades diferem entre os grupos e as espécies, e o aço, que é usado nas cavilhas que proporcionam as ligações entre os membros de madeira. Outro material que pode ser utilizado é o gesso, sendo este o material utilizado na proteção das ligações, contra a exposição ao fogo. Neste capítulo, são abordadas as principais características desses materiais e quais as suas propriedades mais importantes, para o estudo em questão.

No caso das propriedades térmicas dos materiais, para o estudo numérico de MEF que será feito em regime transiente, é necessário conhecer as propriedades térmicas em função da temperatura. A massa volúmica embora seja uma propriedade mecânica, ela influencia a condutividade térmica. As propriedades abordadas são as seguintes:

- Massa volúmica – massa por unidade de volume;
- Calor específico – a energia necessária para aumentar 1 grau de temperatura por unidade de massa;
- Condutividade térmica – indica o rácio de calor que é conduzido através de um determinado material [17].

3.1 Madeira

Existem dois grandes grupos principais onde se enquadram os tipos de madeira: madeiras macias e madeiras duras. Os principais tipos de madeira produzida para utilização nas construções estruturais são: madeira não processada e madeira lamelada. Outros formatos que também se podem encontrar, incluem a madeira para *decks*, painéis estruturais e varões.

3.1.1 Ortotropia

A madeira caracteriza-se por ser um material ortotrópico cujas propriedades mecânicas diferem em três eixos mutuamente perpendiculares (Figura 3. 1). A madeira tem propriedades distintas se a solicitação for no eixo longitudinal (L), que é paralelo às fibras, no eixo radial (R), que é o eixo normal ao crescimento dos anéis da madeira e perpendicular à direção das fibras, e o eixo tangencial (T), que é também perpendicular às fibras, mas tangente ao crescimento das fibras [18].

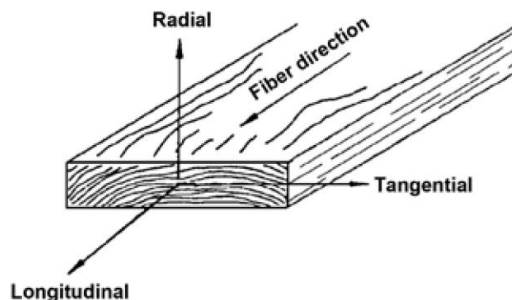


Figura 3. 1 - Três principais eixos na madeira em relação ao crescimento dos anéis [18]

3.1.2 Madeira simples

Encontra-se no estado natural, apenas serrada com a geometria apropriada para poder ser utilizada em aplicações estruturais, mas com limitações, devido à sua baixa rigidez e resistência. É com ela que a madeira lamelada é fabricada.

A madeira serrada é fornecida diretamente da serração e pode ser produzida nas mais variadas espécies de árvores disponíveis [19].

3.1.3 Madeira lamelada colada

A madeira lamelada colada é usada para criar membros estruturais. Os membros são compostos por madeira lamelada colada com resina, com a fibra essencialmente alinhada paralelamente [20]. É produzida em fábricas, pois implica um processo complexo e minucioso, em simultâneo com um controlo apertado do mesmo. Para ser produzida é necessário que a madeira seja laminada com espessuras controladas e depois seca, para mais tarde ser colada com adesivos estruturais, sendo todo o processo realizado em condições de temperatura e pressão controladas [19].



Figura 3.1 – Exemplo de madeira lamelada colada [21]

3.1.3.1 Madeira tipo GLxxx

As classes de resistência *GLxxx* referem-se à madeira lamelada colada e classificam a madeira por tipo e por resistência à tração, sendo que o terceiro e quarto dígito correspondem à resistência à flexão, enquanto que o quinto carácter, refere-se ao tipo de madeira, combinada ou homogénea. Quando esse quinto carácter é um “c”, como por exemplo a madeira GL32c, significa que é madeira combinada, ou seja, é composta

Ligações (W-W-W) madeira-madeira em corte duplo, à temperatura ambiente e a elevadas temperaturas.

por duas espécies de madeira diferentes. Nesses casos, é mais frequente a combinação de uma espécie menos resistente no centro e uma espécie de madeira mais resistente nas zonas externas. Quando o quinto caracter é “h”, como por exemplo a madeira GL32h, significa que se trata de madeira homogênea, ou seja, todas as lamelas são da mesma espécie de madeira [20].

3.1.4 Propriedades

As propriedades da madeira diferem entre as várias espécies, por esse motivo foi necessário criar um modelo de classes, para diferenciar as suas propriedades mecânicas. Para essas classificações são usados os ensaios mecânicos ou a inspeção visual, sendo a última mais usual. As madeiras com classes mais altas são normalmente utilizadas em estruturas para aguentarem esforços de flexão e torção, pois apresentam uma maior rigidez e resistência, ao contrário das madeiras com classes mais baixas, que normalmente são usadas apenas para estarem sujeitas a esforços axiais.

Características da madeira que afetam o seu desempenho estrutural:

- **Massa volúmica:** quanto maior a massa volúmica, melhores são as propriedades mecânicas. Normalmente uma grande quantidade de anéis mais antigos (mais densos que os novos), são indicativos de boas propriedades mecânicas;
- **Nós:** são imperfeições resultantes da presença local de ramos da árvore que cortam a continuidade das fibras da madeira, com isto, piorando as suas propriedades mecânicas;
- **Ângulo entre as fibras:** a madeira é um material ortotrópico, sendo preferível que as fibras sejam paralelas ao eixo longitudinal; por razões de fabrico ou má formação de crescimento da madeira podem existir ângulos entre o eixo longitudinal e a direção das fibras, o que também é prejudicial para o desempenho da madeira;
- **Módulo da Young:** na madeira foi observada uma correlação entre o aumento do peso específico, aumento da resistência e o menor desvio do alinhamento da fibra com o eixo longitudinal, levando ao aumento da rigidez;
- **Outras características:** que também afetam as propriedades mecânicas incluem as rachadelas, danos (por ex. transporte), madeira jovem, reações químicas, etc. [19]

3.1.4.1 Propriedades mecânicas da madeira GLxxh

No caso da madeira lamelada do tipo GLxxh, as suas propriedades mecânicas variam consoante a sua massa volúmica. Segundo a DIN EN 1408:2013 [22], as propriedades para as madeiras escolhidas neste trabalho são as descritas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Propriedades mecânicas das madeiras lameladas do tipo GLxxh. Valores de resistência em MPa e massa volúmica em kg/m³

Classe de resistência		GL20h	GL24h	GL32h
Resistência à flexão	$f_{m,g,k}$	20	24	32
Resistência à tração	$f_{t,0,g,k}$	16	19.2	25.6
	$f_{t,90,g,k}$		0.5	
Resistência à compressão	$f_{c,0,g,k}$	20	24	32
	$f_{c,90,g,k}$		2.5	
Resistência ao corte	$f_{v,g,k}$		3.5	
Módulo de Young	$E_{0,g,mean}$	8400	11500	14200
	$E_{0,g,05}$	7000	9600	11800
	$E_{90,g,mean}$		300	
	$E_{90,g,05}$		250	
Módulo ao corte	$G_{g,mean}$		650	
	$G_{g,05}$		540	
Massa volúmica	$\rho_{g,k}$	340	385	440
	$\rho_{g,mean}$	370	420	480

3.1.4.2 Propriedades térmicas a temperaturas elevadas

As propriedades térmicas para a condutividade térmica e o calor específico são retirados do Eurocódigo 1995 parte 1-2 [2], enquanto que a massa volúmica é calculada com base no rácio de massa perdida com o incremento de temperatura, também baseado no Eurocódigo. Na Figura 3.2, Figura 3.3 e Figura 3.4, pode-se observar as propriedades térmicas da madeira para condutividade térmica, calor específico e massa volúmica, respetivamente.

No caso da condutividade térmica, o efeito do calor não é tão relevante, pois existe um aumento que apenas acontece a partir dos 500°C, altura em que a madeira já se encontra carbonizada na totalidade.

Também devido à condensação de água, verifica-se um pico no calor específico, por volta dos 100°C, tendo depois um decréscimo aos 300°C, mais uma vez, coincidente com o início da carbonização da madeira.

É possível observar, no que diz respeito à massa volúmica, que aproximadamente a partir dos 100°C, quando o conteúdo de água presente na madeira é evaporado, cerca de 12%, a madeira começa a perder massa, sendo que é mais acentuada por volta dos

300°C, altura em que começa a carbonizar, conforme enunciado no Eurocódigo 1995 parte 1-2 [2].

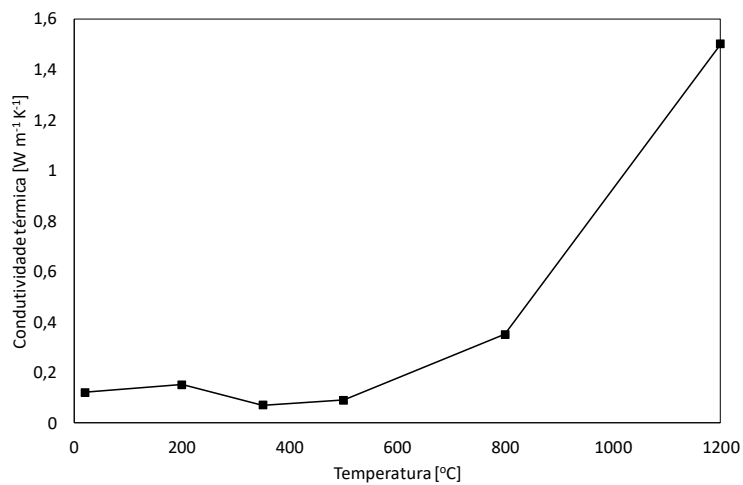


Figura 3.2 – Relação entre a temperatura e a condutividade térmica para a madeira e camada carbonizada

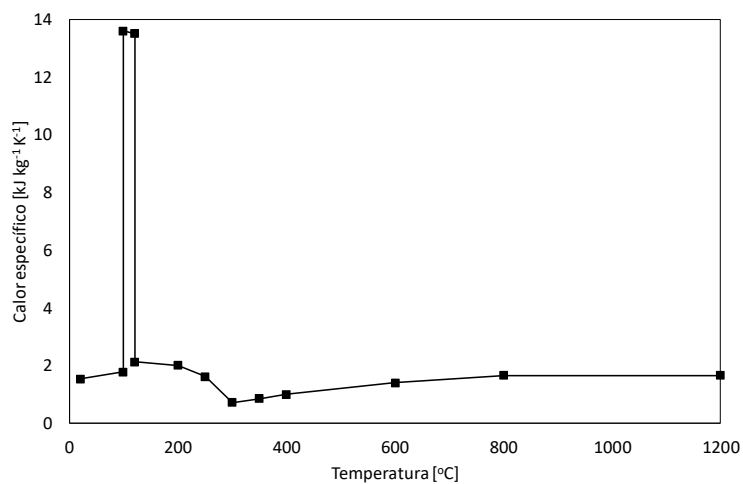


Figura 3.3 – Relação entre a temperatura e o calor específico para a madeira e a camada carbonizada

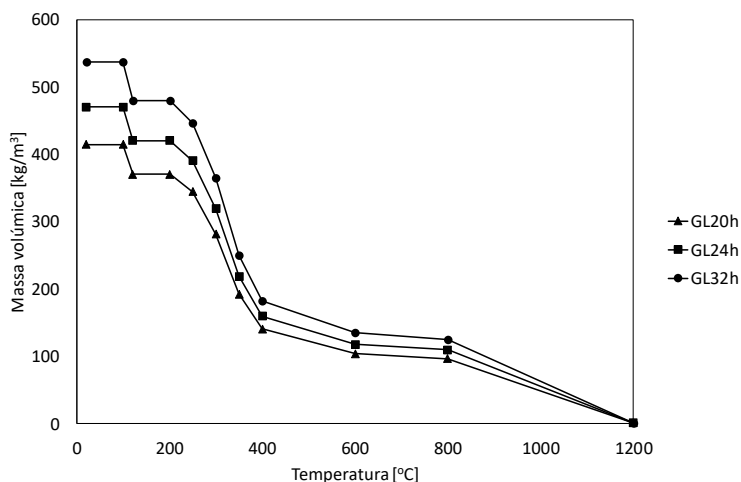


Figura 3.4 – Relação entre temperatura e massa volúmica nas classes de madeira lamelada GL20h, GL24h, GL32h

3.2 Aço

3.2.1 Propriedades mecânicas

O aço escolhido para as cavilhas utilizadas foi a classe S 275 e as suas propriedades mecânicas estão de acordo com a norma EN 10025-2, para aços estruturais obtidos através de laminação a quente. As propriedades mecânicas que se encontram na Tabela 3.2 são relativas a aços conformados com espessura inferior a 40 mm.

Tabela 3.2 – Valores nominais de tensão de cedência e rotura, para aço estrutural conformado a quente [23]

EN 10025-2	f_y [N/mm ²]	f_u [N/mm ²]
S 235	235	360
S 275	275	430
S 355	355	510
S 450	440	550

De seguida, são apresentados os coeficientes adotados nos cálculos analíticos, que segundo o Eurocódigo 1993 parte 1-1 [23] e parte 1-2 [24] são os seguintes:

- Módulo de Young $E = 210\,000\text{ N/mm}^2$
- Módulo ao corte $G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \approx 81\,000\text{ N/mm}^2$
- Coeficiente de Poisson $\nu = 0.3$
- Expansão térmica linear $\alpha = 12 \times 10^{-6}\text{ perK}$ (para $T \leq 100\text{ }^\circ\text{C}$)

- Massa volúmica

$$\rho_a = 7850 \text{ kg/m}^3$$

3.2.2 Propriedades térmicas a temperaturas elevadas

As propriedades térmicas para aço-carbono são retiradas do Eurocódigo 1993 parte 1-2 [24]. Assim como na madeira, as propriedades térmicas do aço vão sendo alteradas com o incremento de temperatura, mas neste caso, ao contrário da madeira, o aço não perde massa, porque não carboniza. Por essa razão, a massa volúmica do aço é considerada constante.

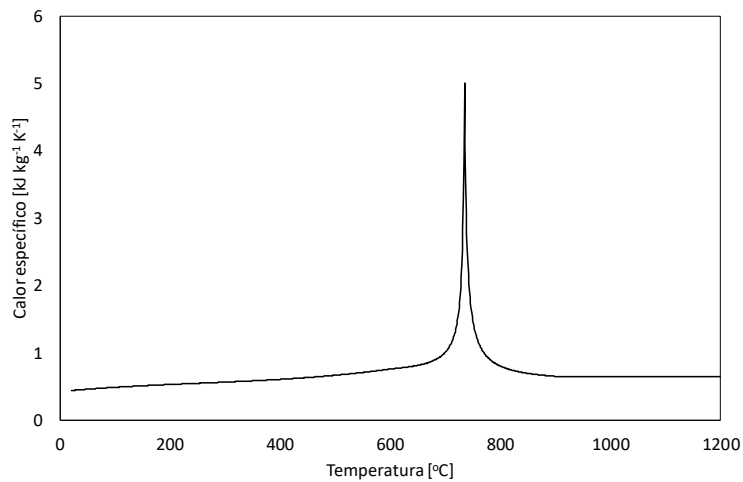


Figura 3.5 – Calor específico em função da temperatura para o aço-carbono

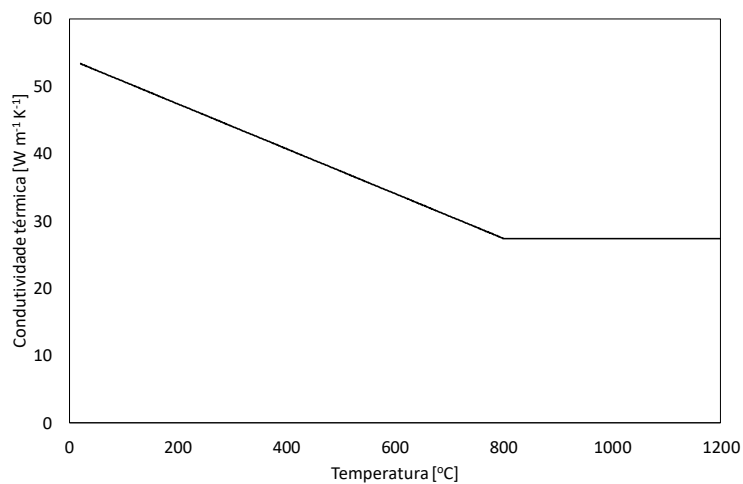


Figura 3.6 – Condutividade térmica em função da temperatura para o aço-carbono

3.3 Gesso

Os painéis de gesso são muito utilizados para servirem de proteção passiva ao fogo em construções, para usar em paredes e tetos em madeira [25]. É também um produto muito usado porque é fácil de fabricar, é amigo do ambiente, tem boa resistência ao fogo, bom aspeto estético final e baixo preço [26]. Normalmente os conjuntos são formados por vigas de madeira sólida isolados com painéis de gesso, painéis à base de derivados de madeira, ou a combinação de camadas dos dois tipos [27]. A razão do gesso ser tão utilizado deve-se à sua baixa condutibilidade térmica e à evaporação de água nele contido, que absorve uma quantidade significativa de calor, desta forma atrasando o aumento da temperatura no sistema [25].

Os painéis de gesso podem conter outros materiais na sua composição para ajudar na proteção ao fogo, contudo, o principal conteúdo é gesso, que é uma forma cristalina do sulfato de cálcio combinado com água, que resulta em sulfato de cálcio di-hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) [27].

3.3.1 Tipos de gesso

Os painéis em gesso caracterizam-se essencialmente pelo núcleo, que é firmemente ligado a uma folha em papel altamente resistente, com formato retangular e superfície plana. O tipo de folha que se encontra à superfície pode variar com o tipo de gesso, assim como o núcleo, também pode conter aditivos para modificar as propriedades do gesso. Segundo a norma BS EN 520:2004 [28], existem os seguintes tipos de gesso: tipo A, tipo H (com reduzida absorção de água), tipo E, tipo F (com adesividade do núcleo melhorada a altas temperaturas) (Figura 3.7), tipo P, tipo D (com massa volúmica controlada), tipo R (com resistência mecânica melhorada), e tipo I (com dureza superficial melhorada).

Segundo o Eurocódigo 1995 parte 1-2 [2], os tipos de painéis usados para proteção de ligações em madeira são o A ou H e o F. Para este estudo, vai ser considerado o gesso de tipo A e F.

- Gesso tipo A: painéis de gesso com a face apropriada para efeitos decorativos;
- Gesso tipo F: painéis de gesso com a face apropriada para efeitos decorativos, contém, adicionado ao núcleo em gesso, fibras minerais ou aditivos para melhorar a coesão do núcleo a altas temperaturas [28].



Figura 3.7 – Exemplo de painéis de gesso [29]

3.3.2 Propriedades térmicas a temperaturas elevadas

As propriedades térmicas do gesso são dependentes da temperatura, entre as quais, a condutividade térmica tem uma influência bastante alta. Os valores das propriedades do gesso variam muito na literatura. Uma das razões é o facto de o gesso ser um material poroso, não homogéneo e o próprio conteúdo de humidade, aumentam a dificuldade em obter dados experimentais uniformes [25].

Segundo A. Frangi *et al.*, o Instituto Geotécnico de Engenharia de ETH Zurique, conduziu um estudo experimental em que submeteu painéis de gesso tipo A, a um aumento de temperatura de 20°C/min. A variação de massa motivada pelo aumento de temperatura foi registada por Análise Termogravimétrica (TGA). Verificou-se que a primeira perda de massa foi de 17% e aconteceu entre os 100 e os 170°C, e a segunda perda de massa foi de 5% entre os 600 e os 750°C. A análise TGA de gases emitidos mostrou que na primeira perda de massa, essencialmente foi libertada água e na segunda perda de massa foi libertado dióxido de carbono [27]. Com estes dados, foi possível determinar a variação de massa para o gesso tipo A e F. A massa volúmica à temperatura ambiente, para o gesso tipo A foi considerada a partir das informações técnicas de um fabricante de gesso [30] com valor de 640 kg/m³. Quanto à massa volúmica do gesso tipo F, foi estabelecida de acordo com a bibliografia [27] com o valor de 889 kg/m³. A variação de massa volúmica pode ser observada na Figura 3.8.

O calor específico tem como base o valor de 0.950 kJ/kg°C, apresentando dois picos relacionados com os dois períodos de desidratação do gesso Figura 3.9. Os picos representam a energia consumida para dissociar e evaporar a água, assim como o movimento de água no interior do gesso, para as regiões mais frias [25].

Devido à condição porosa do gesso, a transferência de calor no gesso dá-se através da combinação de três modos: condução através do sólido e convecção e radiação através dos poros. A condutibilidade térmica efetiva é afetada por vários fatores, como a temperatura, massa volúmica, conteúdo de humidade e a porosidade do material. Os valores de condutibilidade térmica do Figura 3.10, foram retirados do estudo de I. Rahmanian *et al.* [25].

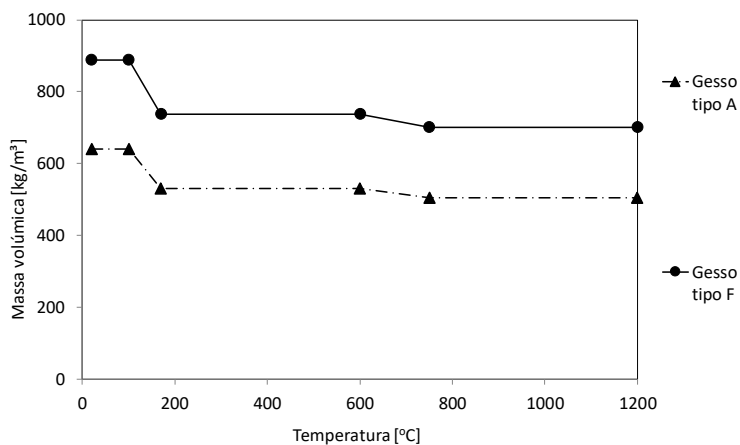


Figura 3.8 – Massa volúmica do gesso tipo A e F em função da temperatura

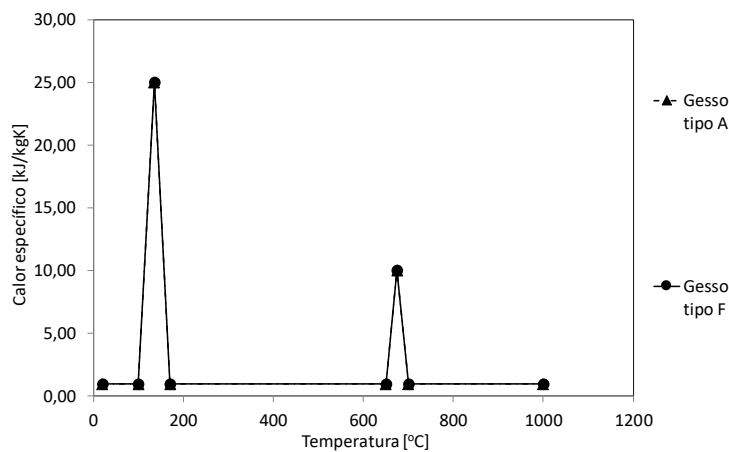


Figura 3.9 – Calor específico do gesso tipo A e F em função da temperatura

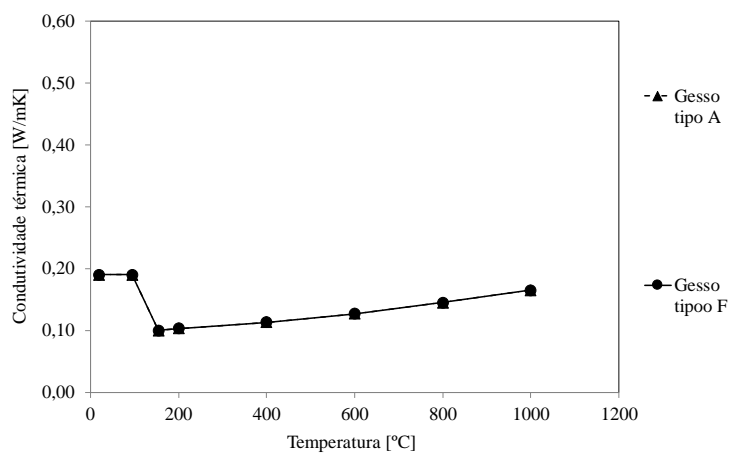


Figura 3.10 – Condutividade térmica do gesso tipo A e F em função da temperatura

ANÁLISE TÉRMICA

4.1 COMPORTAMENTO TÉRMICO DA MADEIRA

4.2 FATOR DE MASSIVIDADE DO AÇO

4.3 CURVA DE INCÊNDIO ISO 834

4.4 TRANSFERÊNCIA DE CALOR

4 ANÁLISE TÉRMICA

4.1 Comportamento térmico da madeira

A madeira entra em degradação térmica, que é denominada pirólise, quando exposta ao fogo (Figura 4.1). A pirólise na madeira converte a madeira em carvão e gás, conseqüentemente a sua massa é reduzida. O gás da pirólise é libertado sobre a forma de chamas provocadas pela combustão da madeira, deixando na sua superfície uma camada carbonizada. Eventualmente, a camada superficial carbonizada cai erodida devido à sua desintegração mecânica [31].

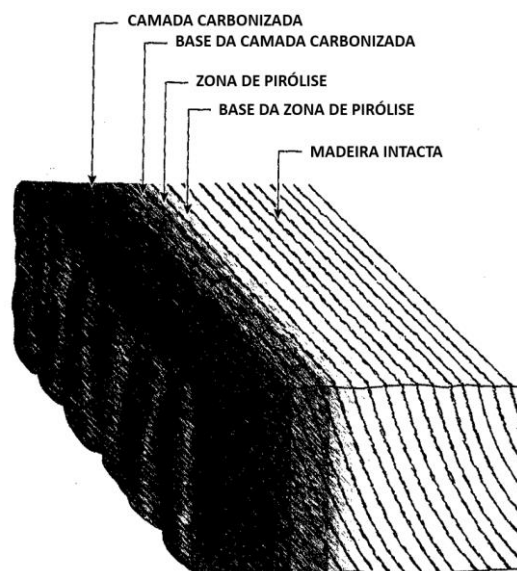


Figura 4.1 – Zonas de degradação da madeira (adaptado) [31]

A velocidade de carbonização refere-se à velocidade linear para o qual cada tipo de madeira se converte em madeira carbonizada. Inicialmente, quando a madeira começa a ser queimada sob fogo normalizado, a velocidade de carbonização é alta, mas tende a ser constante, pouco tempo depois.

A camada carbonizada não tem capacidade de carga, por essa razão, é necessário determinar a velocidade de carbonização para avaliar a resistência ao fogo. A zona de separação entre a madeira carbonizada e a não carbonizada encontra-se a uma temperatura aproximada de 300°C [31].

4.2 Fator de massividade do aço

O fator de massividade do aço contribui para a resistência ao fogo de um elemento. Este valor determina qual o tempo em que será atingida a temperatura crítica e está relacionado com os fatores geométricos dos elementos em aço. Desta forma, uma seção com maior massa terá um aquecimento mais lento do que uma seção com menor massa [32].

No caso de elementos que não tenham proteção térmica, o fator de massividade é definida pela equação 1, onde A_m representa a área da superfície exposta ao fogo por unidade de comprimento [m^2/m], e V representa o volume do elemento por unidade de comprimento [m^3/m] [24].

$$\frac{A_m}{V} [m^{-1}] \quad (1)$$

4.3 Curva de incêndio ISO 834

A norma ISO 834 [33], especifica os métodos adequados para elaborar teste experimentais de resistência ao fogo, para elementos de construção de edifícios. Nesta norma, é demonstrado qual o comportamento que a curva de fogo deve ter nos testes experimentais. Para isso deve seguir-se a equação 2, a partir da qual obtenção a curva de fogo que pode ser observada na Figura 4.2.

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

Onde, T corresponde à temperatura média gerada, em °C, e t corresponde ao tempo, em minutos.

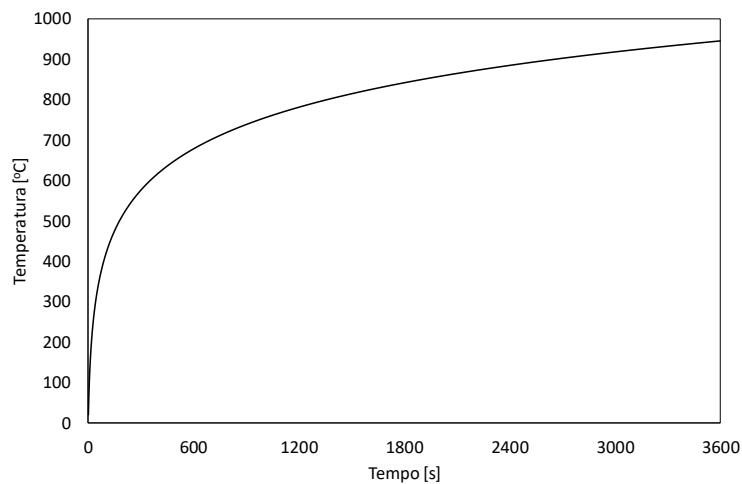


Figura 4.2 – Curva de fogo ISO 834. Temperatura em função do tempo

4.4 Transferência de calor

4.4.1 Radiação

O movimento térmico das partículas elementares faz com que elas transmitam energia na forma de radiação eletromagnética. Quanto maior for a temperatura, mais brusco é o movimento das partículas e mais intensa é a radiação. Este comportamento é semelhante a outras formas de radiação eletromagnética, como é o caso das ondas de rádio, da luz visível e os raios-X. Esses tipos de radiação diferem no intervalo do comprimento de onda. Existem substâncias que absorvem este tipo de radiação relativamente bem, outras transmitem-na quase de forma livre, enquanto o vácuo perfeito não apresenta qualquer tipo de resistência. A radiação térmica é contínua e está sempre presente.

As moléculas que se encontram à superfície de um corpo, se absorverem radiação e estiverem em contacto com um meio transparente à radiação, irradiam energia em todas as direções. Alguma dessa energia, vai viajar até encontrar outro corpo, que vai ser absorvida por este, intensificando o seu movimento térmico. Perante este processo, o corpo emissor, perde energia, baixando a sua temperatura, e o corpo receptor ganha energia, aumentando a sua temperatura. A este processo chama-se transferência de calor. É o mesmo processo que acontece quando a terra absorve a energia emitida pelo sol [34].

4.4.2 Condução

As moléculas que se encontram à superfície também irradiam calor para o interior do corpo, mas a energia é absorvida quase de imediato pelas moléculas em seu redor. As moléculas que se encontram no interior do corpo, têm a sua energia toda absorvida desta forma. Ela está continuamente a perder calor para as outras moléculas, mas também pode receber calor da mesma forma. Quando as moléculas na vizinhança atingem todas a mesma temperatura uniforme, existe um equilíbrio. Embora esse

equilíbrio possa existir, as moléculas irão sempre transferir o calor das zonas mais quentes para as zonas mais frias.

Outro mecanismo existente para a condução de calor é através das forças intermoleculares, pois as moléculas de um corpo não são isoladas e interagem umas com as outras. Como resultado, o movimento térmico de uma molécula é transmitido para a vizinhança, e quando um grupo de moléculas se encontra mais quente que o vizinho, ele vai partilhar o calor entre eles.

Na presença de um gradiente de temperaturas, o calor é transferido das zonas mais quentes para as partes mais frias, através da combinação dos efeitos referidos anteriormente. Este processo denomina-se de condução, que comparado com a radiação, apenas pode acontecer na presença de matéria, no vácuo, a condução não faz sentido.

Enquanto que para a radiação a energia pode ser transmitida através de um corpo transparente sem que haja algum efeito na sua temperatura, no caso da condução, a energia, que se traduz em alteração da temperatura, ao passar de um ponto para o outro sofre uma alteração no material onde está a intervir.

Existem materiais que são virtualmente “opacos” à radiação e a única forma deles transferirem calor, é através da condução [34].

4.4.3 Convecção

Quando o meio é um líquido ou um gás, a transferência de calor dá-se através da movimentação de porções desse meio de uma posição para outra. Num fluido, se existir diferença de temperatura entre duas regiões, o calor vai ser transferido através de condução e possivelmente radiação. Se o líquido for misturado e a zona mais quente do líquido passar para a zona mais fria, vais existir um gradiente de temperaturas muito grande, e rapidamente o calor vai ser transferido para as partículas mais frias através de condução. Misturar o líquido vai aumentar a rapidez com que o líquido transfere o calor entre si e quando mais rápido for o movimento, mais rápido atinge-se o equilíbrio de temperatura. A este processo chama-se convecção. Acontece quando alguém sopra ou abana as mãos para um objeto com o intuito de o arrefecer [34].

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

5.1 TEMPERATURA AMBIENTE

5.2 ALTAS TEMPERATURAS - FOGO

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

De forma a seleccionar facilmente o diâmetro de cavilhas em aço e a respetiva quantidade, de acordo com a carga axial de tração a que a ligação irá ser sujeita, foi elaborada uma tabela final baseada numa folha de cálculo. O projeto da ligação foi realizado com base nas equações simplificadas do Eurocódigo 5 parte 1-1 [1] e do Eurocódigo 5 parte 1.2 [2], para a temperatura ambiente e para fogo, respetivamente, bem como para o cálculo da espessura de proteção ao fogo.

5.1 Temperatura ambiente

5.1.1 Projeto de ligação W-W-W com cavilhas em corte duplo - método simplificado

Devem ser tidas em conta as seguintes considerações especiais: segundo o Eurocódigo 1995 parte 1-2 [2], a espessura dos membros laterais t_1 para ligações com cavilhas, deve ser superior ou igual 45 mm.

Segundo o Eurocódigo 1995 parte 1-1 [1], a resistência à tração ao longo da fibra para projeto $f_{t,0,d}$, deve ser igual ou maior que a tensão à tração ao longo da fibra para projeto $\sigma_{t,0,d}$ (equação 3).

$$\sigma_{t,0,d} \leq f_{t,0,d} \quad (3)$$

A resistência à tração representa um valor reduzido do característico de resistência à tração ao longo da fibra $f_{t,0,k}$, tendo em conta aplicação dos fatores de segurança: o fator de redução para a duração do carregamento e o conteúdo de humidade k_{mod} , e o fator parcial para as propriedades do material γ_M , demonstrado na seguinte equação 4.

$$f_{t,0,d} = \frac{k_{mod} \times f_{t,0,k}}{\gamma_M} \quad (4)$$

γ_M para madeira lamelada colada é 1.25, segundo a tabela 2.3 do Eurocódigo 1995 parte 1-1 [1].

Para definir k_{mod} , deve-se conhecer a duração temporal em que a carga foi usada, para determinar a sua classe de duração temporal e para classe de serviço, relacionada com a quantidade de humidade nos materiais.

Para o caso em estudo, foi considerado que a ligação terá uma classe de duração de carregamento de curto-prazo e uma classe de serviço 1, caracterizada pelo conteúdo de humidade nos materiais correspondente a uma temperatura de 20°C e uma humidade relativa do ar circundante a exceder 65%, durante apenas algumas semanas por ano.

Depois de se conhecerem as classes, é retirado o valor de 0.90 para k_{mod} para madeira lamelada colada, segundo a tabela 3.1 do Eurocódigo 1995 parte 1-1 [1].

Considerando E_d como sendo a carga aplicada e A_s a área transversal do membro, a tensão à tração de projeto $\sigma_{t,0,d}$ é calculada de acordo com a equação 5.

$$\sigma_{t,0,d} = \frac{E_d}{A_s} \quad (5)$$

De acordo com as equações simplificadas do Eurocódigo 1995 parte 1-1 [1], a capacidade de carga característica por plano de corte e por ligador $F_{v,Rk}$, para uma ligação do tipo W-W-W que utilize cavilhas, é determinada através da equação 6.

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} 1,05 \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{2 + \beta} \left[\sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \\ 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \sqrt{2M_{y,Rk} f_{h,1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \end{array} \right. \quad (6)$$

Com

$$\beta = \frac{f_{h,2,k}}{f_{h,1,k}} \quad (7)$$

Onde $f_{h,i,k}$ é a resistência ao esmagamento característica dos membros de madeira; t_1 representa a espessura dos membros laterais da ligação e t_2 a espessura do membro central; d é o diâmetro das cavilhas usadas; β é a relação entre a resistência ao esmagamento dos membros estruturais, que neste caso como se trata do mesmo material é igual a 1; $M_{y,Rk}$ é o momento de cedência característico do ligador; $F_{ax,Rk}$ é a capacidade de resistência à tração axial característica do ligador.

O valor de $M_{y,Rk}$ é calculado de acordo com o diâmetro da cavilha e a resistência do material da mesma e dado pela equação 8.

$$M_{y,Rk} = 0,3 f_{u,k} d^{2,6} \quad (8)$$

O valor de resistência característico ao esmagamento em elementos de madeira é obtido através do diâmetro das cavilhas usadas d e a massa volúmica característica da madeira ρ_k , representado na equação 9.

$$f_{h,1,k} = 0,082(1 - 0,01d)\rho_k \quad (9)$$

Depois do cálculo de $F_{v,Rk}$ pode-se obter o número de cavilhas necessários para a ligação, usando para isso a equação 10.

$$N = \frac{E_d}{F_{v,Rd}} \quad (10)$$

O número final de cavilhas é arredondado por excesso, para tornar possível uma correta distribuição das cavilhas pela ligação.

Todas as equações anteriores, são apenas válidas na madeira que faz parte da ligação, estando ausentes sinais de fissuração prematura ou qualquer tipo de corte que possa levar à rotura frágil da madeira. Para minimizar esse risco, são determinadas as distâncias mínimas que as cavilhas devem ter das extremidades da madeira e entre as próprias cavilhas, conforme o procedimento indicado no Eurocódigo 1995 parte 1-2 [2].

Segundo o Eurocódigo 1995 parte 1-1 [1], para ligações com múltiplos ligadores, deve-se ter em conta o arranjo e o tamanho dos mesmo na ligação, espaço entre ligadores, assim com a sua distância aos cantos e extremidades dos membros, de tal forma que a resistência e rigidez esperadas sejam obtidas.

Deve-se ter em conta que a capacidade de carga para uma ligação com múltiplos ligadores, poderá ser inferior ao somatório da capacidade de carga individual de cada ligador. Para determinar os espaçamentos mínimos entre ligadores e a distância às extremidades dos membros laterais mostrados na Figura 5.1, foram usadas as seguintes equações:

$$\text{Para determinar } a_1 \text{ (paralelo à fibra), com } \alpha \text{ igual } 0^\circ \quad (11)$$

$$(3 + 2 |\cos \alpha|) d$$

Para determinar a_2 (perpendicular à fibra) (12)

$$3 d$$

Para determinar $a_{3,t}$ (extremidade solicitada) (13)

$$\max (7 d; 80 \text{ mm})$$

Para determinar $a_{4,c}$ (extremidade não solicitada) (14)

$$3 d$$

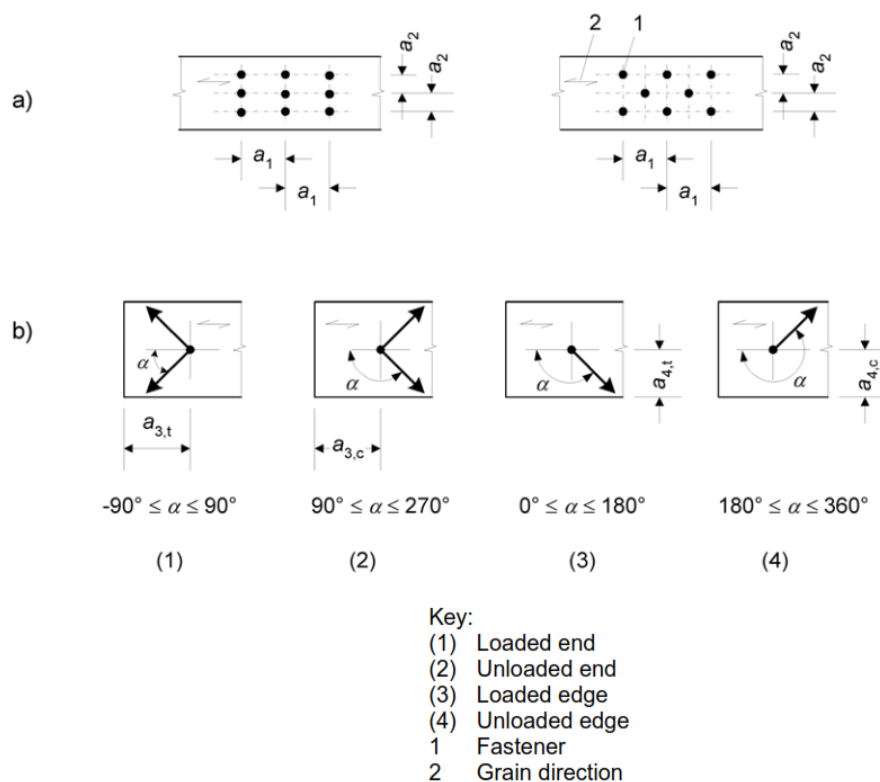


Figura 5.1 – Espaçamento e distâncias para ligadores [1]

Legenda: (a) espaçamentos entre linhas e colunas; (b) distâncias às extremidades; (1) extremidade solicitada; (2) extremidade não solicitada; (3) extremidade solicitada; (4) extremidade não solicitada; 1 ligador; 2 direção da fibra

De seguida, na Figura 5.2, encontram-se representadas as dimensões gerais das ligações W-W-W que foram alteradas segundo as tabelas criadas.

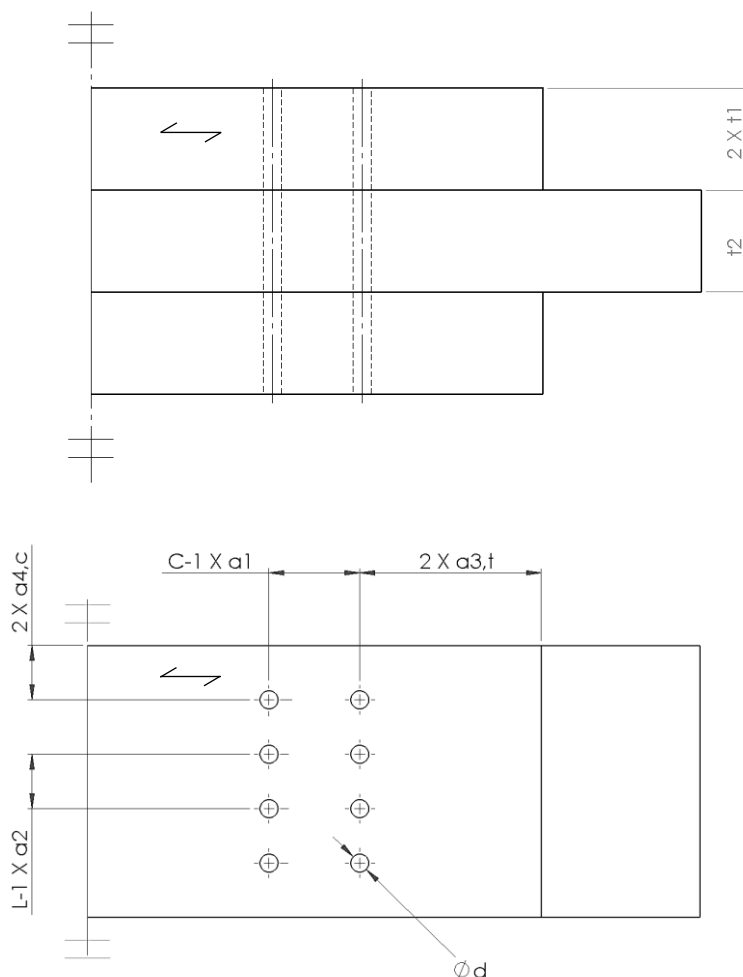


Figura 5.2 – Representação das dimensões da ligação W-W-W e distribuição dos ligadores

Segundo o Eurocódigo 1995 parte 1-2 [1], as tolerâncias para as cavilhas devem ser $-0/+0.1$ mm. Os furos nos membros de madeira devem ser feitos previamente e o seu diâmetro não deve ser maior do que o da cavilha.

5.1.2 Combinação de ligações

Inicialmente foi determinado que os cálculos iriam ser realizados para 4 diâmetros diferentes de cavilhas, 3 tipos de madeira lamelada com massas volúmicas distintas e para 3 carregamentos à tração diferentes (10, 15 e 20 kN). Um exemplo de uma ligação criada pode ser observado na Figura 5.3.

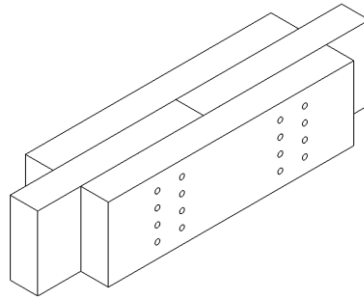


Figura 5.3 – Isométrica da ligação W-W-W para cavilhas de 8 mm com carregamento de 20 kN

Os diâmetros de cavilhas utilizados foram 6, 8, 10 e 12 mm, sendo que 6 mm é o valor mínimo possível de ser usado neste tipo de ligação e o máximo 30 mm, segundo o Eurocódigo 1995 parte 1-1 [1].

Os tipos de madeira escolhidos que serviram de base aos cálculos foram: GL20h, GL24h e GL32h.

No total foram calculadas 36 ligações diferentes, resultantes da combinação dos parâmetros referidos anteriormente.

Para criar a referida tabela, recorreu-se ao auxílio de uma folha de cálculo, onde se inseriram as equações e propriedades, de forma a obter o número de ligadores necessários para a ligação W-W-W, com o intuito de facilitar o cálculo analítico e o projeto. Os resultados obtidos na referida tabela, para os três tipos de madeira, podem ser encontrados nos anexos (Tabela 10.1).

Com os resultados obtidos foi possível criar gráficos para análise do comportamento das ligações, com a variação dos parâmetros, tal como o diâmetro de cavilhas, a massa volúmica da madeira (com a alteração do tipo de madeira “GLxxh”) e o carregamento. Foi possível verificar a existência de uma correlação entre a carga aplicada e o diâmetro de cavilha necessário a usar, sendo que a quantidade de cavilhas aumenta com a diminuição do seu diâmetro, estando essa relação ilustrada na Figura 5.4.

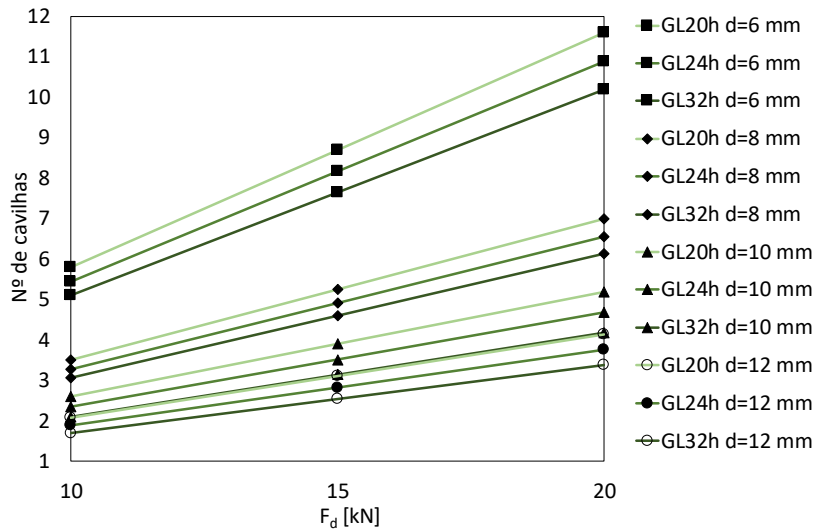


Figura 5.4 – Comparação entre o número de cavilhas e o carregamento aplicado, para os três tipos de madeira e os quatro diâmetros de cavilhas nas ligações W-W-W

É possível observar na Figura 5.5 que a quantidade necessária de cavilhas a usar, decresce muito com o aumento do diâmetro de cavilha, sendo mais pronunciado em carregamentos de maior amplitude.

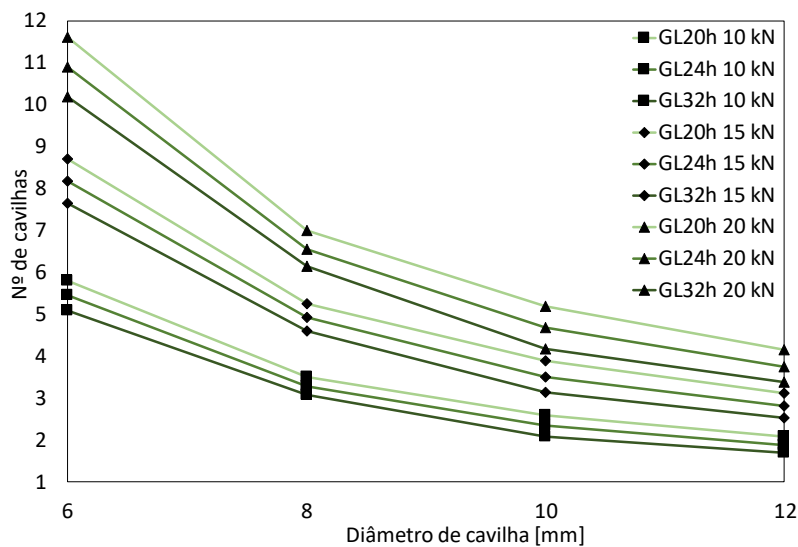


Figura 5.5 – Comparação entre o número e os diâmetros de cavilhas, para os três tipos de madeira e três carregamentos aplicados nas ligações W-W-W

5.2 Altas temperaturas - fogo

Para determinar a capacidade de resistência ao fogo da ligação projetada à temperatura ambiente, foi consultado o Eurocódigo 1995 parte 1-2 [2], em particular a tabela 6.2.1.1, onde é descrita a capacidade de resistência ao fogo para cada tipo de ligação. É possível

verificar que as ligações com cavilhas têm a capacidade de resistir ao fogo por um período mínimo de 20 min ($t_{d,fi}$), sendo assim necessário verificar se a ligação anteriormente projetada à temperatura ambiente resiste à exposição do fogo durante 30 min. Segundo o Eurocódigo 1995 parte 1-1 [1], a ligação projetada para temperatura ambiente deveria resistir à exposição ao fogo durante 30 min para a ligação não protegida, tempo mínimo admissível. Caso não resista, prevê-se o cálculo de aumento de espessura dos membros de madeira, de forma a incrementar a resistência necessária para que a ligação apresente capacidade de suportar a carga, para a qual foi projetada.

5.2.1 Verificação da ligação exposta ao fogo

Segundo o Eurocódigo 1995 parte 1-2 [2], para verificar a resistência mecânica, através dos valores das propriedades de resistência em situação de fogo, usa-se a equação 15.

$$f_{d,fi} = k_{mod,fi} \frac{f_{20}}{\gamma_{M,fi}} \quad (15)$$

Onde $f_{d,fi}$ significa a resistência calculada em situação de fogo; $k_{mod,fi}$ é o fator de modificação para o fogo com o valor de 0.8; f_{20} é o *quantil* correspondente a 20% da propriedade de resistência à temperatura ambiente e deve ser calculado segundo a equação 16; $\gamma_{M,fi}$ é o fator de segurança parcial para a madeira exposta ao fogo, recomendado pelo Eurocódigo 1995 parte 1-2 [2] igual a 1.

$$f_{20} = k_{fi} f_k \quad (16)$$

Onde k_{fi} é um coeficiente dependente do material, que para a madeira lamelada colada corresponde a 1.15 e f_k é a propriedade de resistência característica da madeira, neste caso a resistência à tração.

Como método de verificação deve ser usada a inequação 17.

$$E_{d,fi} \leq R_{d,t,fi} \quad (17)$$

Com

$$E_{d,fi} = E_d \eta_{fi} \quad (18)$$

Onde $E_{d,fi}$ é o efeito das ações de projeto em situação de fogo, incluindo efeitos de expansão térmica e deformações; $R_{d,t,fi}$ é a resistência de projeto correspondente em

situação de fogo; η_{fi} é o fator de redução de carga de projeto para situação de fogo que segundo o Eurocódigo 1995 parte 1-2 [2], como simplificação, deve-se assumir o valor de 0.6. A tabela de verificação ao fogo para ligações W-W-W, pode ser consultada nos anexos (Tabela 10.2).

5.2.2 Dimensionamento para exposição ao fogo

Como referido anteriormente, as ligações feitas com cavilhas metálicas apresentam uma duração mínima de proteção ao fogo de 20 min [2]. O prolongamento desse tempo pode ser obtido através do aumento de espessura dos membros de madeira que compõem a ligação ou através da adição de painéis de cobertura das ligações. Com o aumento de espessura de madeira dos membros da ligação, é possível aumentar a resistência ao fogo, até um máximo de 30 min. Os painéis podem ser fabricados com derivados da madeira ou em gesso. Ao utilizar painéis como proteção, a resistência ao fogo da ligação pode ser prolongada até 60 min.

5.2.2.1 Velocidade de carbonização

O Eurocódigo 1995 parte 1-2 [2] indica qual a velocidade de carbonização para os diversos tipos de madeiras, que podem ser usados em ligações. A velocidade de carbonização é possível obter-se através da medição da espessura de madeira carbonizada num determinado instante de tempo. Considera-se madeira carbonizada aquela que ultrapassou os 300°C, sendo que a diferença entre a superfície original e a camada que se encontra a 300°C é a espessura carbonizada e que será excluída da secção útil, no cálculo da resistência da ligação e esforço aplicado na mesma.

A velocidade de carbonização é definida por β_n . No presente projeto, a madeira usada na ligação é bétula, que pertence à classe das madeiras duras, que segundo o Eurocódigo 1995 parte 1-2 [2], e para massas volúmicas maiores que 290 kg/m³, têm uma velocidade de carbonização de 0.7 mm/min, que se traduz por resistência ao fogo.

5.2.2.2 Aumento de espessura da madeira

Para aumentar a resistência ao fogo da ligação até 30 min, é possível aumentar a espessura de madeira da ligação. A resistência ao fogo é definida por $t_{d,fi}$, que para o caso de ligações com cavilhas metálicas é 20 min. Para aumentar a resistência da ligação, deve-se calcular a_{fi} , que se trata do devido aumento de espessura da madeira dos membros laterais da ligação, na largura dos membros, nas distâncias entre os ligadores e as extremidades dos membros da ligação, como representado na Figura 5.6.

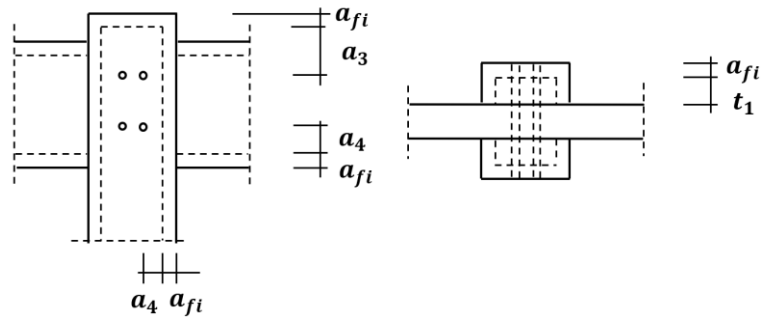


Figura 5.6 – Exemplo do local onde aplicar o aumento de espessura a_{fi} nos membros laterais [2]

Para calcular a_{fi} deve-se utilizar a seguinte expressão:

$$a_{fi} = \beta_n k_{flux} (t_{req} - t_{d,fi}) \quad (19)$$

Onde β_n é velocidade de carbonização e têm o valor de 0.7 mm/min. k_{flux} é o coeficiente que tem em conta o aumento do fluxo de calor gerado através do ligador, que segundo o Eurocódigo 1995 parte 1-2 [2] tem o valor de 1.5. O tempo t_{req} refere-se ao tempo para o qual se pretende que a ligação resista ao fogo. O tempo $t_{d,fi}$ refere-se ao tempo que a ligação resiste ao fogo, que no caso de ligações com cavilhas metálicas é de 20 min. k_{flux} ajusta a velocidade de carbonização da madeira considerando a influência da passagem de calor através do aço, para o interior da ligação. Ao retirar tempo $t_{d,fi}$ ao tempo t_{req} , fica-se com o tempo remanescente para o qual a ligação fica sem resistência ao fogo, sendo necessário aumentar a espessura de madeira da ligação para esse tempo.

5.2.2.3 Painéis de gesso

Para ligações protegidas por materiais isolantes, é proposto pelo Eurocódigo 1995 parte 1-2 [2] que sejam usados painéis em gesso, nomeadamente tipo A, tipo F ou tipo H, ou painéis fabricados à base de madeira compactada. Neste trabalho foi escolhido o uso de painéis em gesso para proteção da ligação projetada.

Para determinar a espessura necessária dos painéis de gesso na resistência ao fogo, são usadas as seguintes equações:

Para o gesso tipo A ou H:

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

$$h_p = \frac{t_{ch} + 14}{2,8} \quad (21)$$

Para o gesso tipo F:

$$t_{ch} \geq t_{req} - 1,2 t_{d,fi} \quad (22)$$

$$h_p = \frac{t_{ch} + 14}{2,8} \quad (23)$$

O valor de t_{ch} refere-se ao atraso no começo de carbonização da madeira devido à atuação da proteção de gesso. t_{req} é o tempo que se pretende que a ligação resista ao fogo, neste caso 60 min. $t_{d,fi}$ é a resistência ao fogo da ligação dependente do ligador, que como referido anteriormente, para ligações com cavilhas é 20 min. h_p é a espessura do painel de proteção ou em caso de múltiplos painéis, o somatório das suas espessuras.

Para proteger a ligação W-W-W do fogo padrão, durante o período de 60 min, foi calculado que para painéis de gesso tipo A ou H são necessários 23 mm de espessura, enquanto que para painéis de gesso tipo F são necessários 18 mm, independentemente da massa volúmica da madeira escolhida. A tabela de dimensionamento para ligações W-W-W não protegidas e protegidas, expostas ao fogo, pode ser consultada nos anexos (Tabela 10.3).

ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS

6.1 MODELO NUMÉRICO

6 ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS

Para simular a resistência ao fogo das ligações W-W-W com cavilhas de aço, foi usado o modelo numérico térmico não linear e transiente, baseado no método dos elementos finitos. Com esta metodologia, é possível obter um campo de temperaturas das ligações expostas ao fogo neste trabalho, possibilitando a comparação de desempenho entre ligações não protegidas e protegidas com diferentes tipos de placas de gesso.

O método de elementos finito é uma técnica matemática que usa sistemas de equações para resolver equações diferenciais ou integrais. Para estudar um determinado sistema complexo, ele é dividido em partes mais pequenas ou elementos, cuja solução pode ser alcançada ou aproximada [35]. O objetivo é construir um sistema complexo com blocos simples e pequenos, com geometrias simples e um número finito de elementos, possível de calcular. Quanto maior esse número de elementos, mais o resultado se aproxima de uma solução realística [36].

Os elementos são interligados no espaço por nós e cada nó, tem um determinado número de graus de liberdade, para o cálculo de tensões, temperaturas, deslocamentos, etc. O método de elementos finitos é fundamental para resolver problemas complexos, com o cálculo computacional, pois torna possível determinar problemas com maior rapidez do que se fosse usado o cálculo analítico, e redução da probabilidade de erros de cálculo durante o processo [35].

Neste trabalho, para desenvolver o cálculo numérico, recorreu-se ao programa *ANSYS® Academic Mechanical* [37], por estar indicado para o cálculo de elementos finitos, tanto na indústria, como a nível académico.

6.1 Modelo numérico

Os problemas estruturais mecânicos podem ser considerados em duas dimensões, quando é possível assumir razoavelmente o seu comportamento na terceira dimensão [38]. Como se trata de ligações com geometrias simétricas, pode concluir-se que o seu comportamento será idêntico ao longo da terceira dimensão, pelo que a análise dos modelos foi considerada bidimensional. No entanto, teve-se em consideração, o estudo de dois planos diferentes, sendo que um atravessa as cavilhas metálicas, e outro, apenas atravessa a madeira e aquando da sua existência, o gesso (Figura 6.1). No total, foram analisados 45 modelos de ligações, correspondentes à combinação das variáveis usadas para o cálculo das ligações à temperatura ambiente. O estudo das combinações foi realizado no plano a atravessar a zona das cavilhas, com o objetivo de verificar a diferença no campo de temperaturas entre os diferentes diâmetros de cavilhas. Também foi realizado o estudo que contemplou o plano que atravessa apenas a

madeira, com vista a estudar o efeito das diferentes massas volúmicas da madeira, sem a influência das cavilhas. Uma vez que esse plano é sempre igual, independentemente do diâmetro de cavilha, apenas foi realizado para o diâmetro de 6 mm.

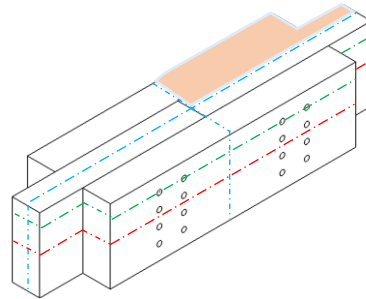


Figura 6.1 - Simetria da ligação W-W-W, usada para as simulações térmicas. A verde, o plano com cavilhas CC; a vermelho, o plano sem cavilhas SC

Foi atribuído a cada modelo/combinção um código, para facilitar a sua referência. O nome das ligações foi definido com base nas variáveis estudadas, onde o primeiro carácter corresponde ao diâmetro de cavilha, o segundo e terceiro correspondem ao plano da ligação analisado, o quarto e quinto simbolizam o tipo de madeira e o último é relativo à proteção ao fogo da ligação. As combinações podem ser consultadas na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Descrição das diferentes combinações de ligações, estudadas através do modelo numérico

Ligação	Diâmetro cavilha [mm]	Plano	Madeira (tipo)	Gesso (tipo)
6CC20D	6	Com cavilhas	GL20H	Não protegida
6CC20A				A
6CC20F				F
6CC24D			GL24H	Não protegida
6CC24A				A
6CC24F				F
6CC32D			GL32H	Não protegida
6CC32A				A
6CC32F				F
8CC20D	8	Com cavilhas	GL20H	Não protegida
8CC20A				A
8CC20F				F
8CC24D			GL24H	Não protegida
8CC24A				A
8CC24F				F
8CC32D			GL32H	Não protegida
8CC32A				A
8CC32F				F
8SC20D	8	Sem cavilhas	GL20H	Não protegida
8SC20A				A
8SC20F				F
8SC24D			GL24H	Não protegida
8SC24A				A
8SC24F				F
8SC32D			GL32H	Não protegida
8SC32A				A
8SC32F				F
10CC20D	10	Com cavilhas	GL20H	Não protegida
10CC20A				A
10CC20F				F
10CC24D			GL24H	Não protegida
10CC24A				A
10CC24F				F
10CC32D			GL32H	Não protegida
10CC32A				A
10CC32F				F
12CC20D	12	Com cavilhas	GL20H	Não protegida
12CC20A				A
12CC20F				F
12CC24D			GL24H	Não protegida
12CC24A				A
12CC24F				F
12CC32D			GL32H	Não protegida
12CC32A				A
12CC32F				F

A velocidade de carbonização pode variar entre 0.5-1.0 mm/min. Neste caso, a madeira considerada é bétula, madeira dura, em forma de madeira lamelada colada, com a classificação de GLxxh e com massa volúmica superior a 290 kg/m^3 , tendo assim uma velocidade de carbonização de 0.7 mm/min [2]. A avaliação da espessura da camada de material carbonizado, depende do tempo de exposição e determina a velocidade de carbonização em mm/min.

Devido à geometria da ligação e às condições de fronteira utilizadas, a simulação térmica das ligações foi efetuada para um plano bidimensional. O elemento finito utilizado no cálculo numérico do programa (*ANSYS® Academic Mechanical*) foi o *plane77* Figura 6.2, com 2 mm de comprimento e 8 nós com apenas um grau de liberdade por cada um, que corresponde à temperatura. Foram feitas simulações térmicas para cada uma das ligações dimensionadas previamente à temperatura ambiente, agora submetidas à exposição ao fogo normalizado em apenas uma das frentes, na direção de um dos membros laterais de madeira como demonstrado na Figura 6.3.

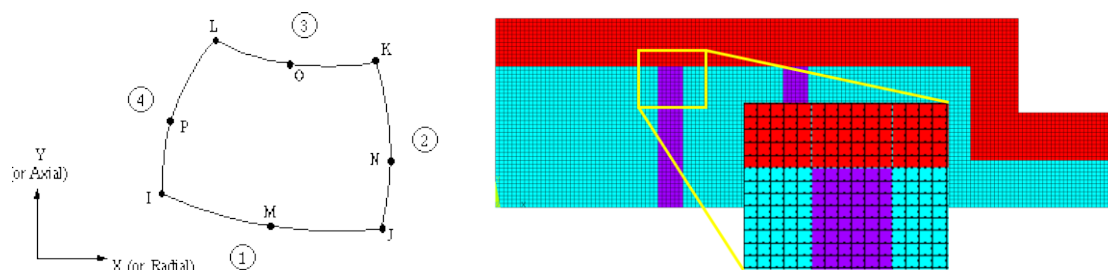


Figura 6.2 – À esquerda, elemento plane77 com 8 nós [39]; à direita, malha da ligação protegida com gesso

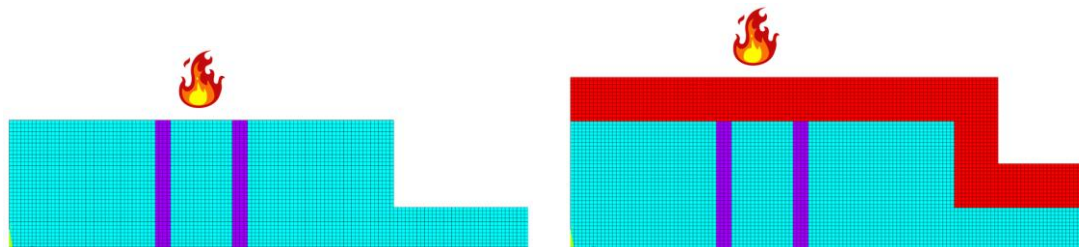


Figura 6.3 - Frente de fogo na ligação W-W-W. À esquerda, ligação não protegida e à direita, ligação protegida com placas de gesso

Assume-se para a ligação, uma temperatura inicial de 20°C . A superfície externa da ligação é exposta ao fogo normalizado, curva ISO834, durante uma hora. As condições de fronteira são de radiação e convecção. O coeficiente de convecção é igual a $25 \text{ W/m}^2\text{K}$. A emissividade da superfície exposta ao fogo tem o valor de 1 [2]. O critério de convergência usado foi 0.9%. Foi usado o contacto fechado entre os materiais, para permitir apenas condução térmica entre duas superfícies.

Todas as propriedades de materiais inseridas nas simulações, quer seja madeira, aço ou gesso, têm em conta a não-linearidade devido às propriedades térmicas dos materiais,

já referida no capítulo 3. A madeira quando é exposta ao fogo apresenta uma degradação física térmica. A interface entre a camada carbonizada e a camada não carbonizada, é a fase de transição entre o material castanho para o material preto, e caracteriza-se pela ultrapassagem do limite de 300°C, de acordo com o Eurocódigo 1995 parte 1-2 [2].

RESULTADOS

7.1 MADEIRA NÃO PROTEGIDA

7.2 COMPARAÇÃO ENTRE MADEIRA PROTEGIDA E NÃO PROTEGIDA

7.3 MADEIRA PROTEGIDA – PAINÉIS DE GESSO

7.4 TEMPERATURA NAS CAVILHAS

7 RESULTADOS

Com base apenas no Eurocódigo 1995 parte 1-2, não é possível entender a evolução da temperatura através e no interior da ligação de madeira com cavilhas metálicas. Segundo o Eurocódigo 1995 parte 1-2 [2], a velocidade de carbonização é considerada constante, contudo, as simulações numéricas demonstraram que a velocidade de carbonização varia com o diâmetro de cavilha, assim como com a massa volúmica da madeira.

Para determinar a espessura de madeira carbonizada em cada um dos modelos, foram efetuadas medições escolhendo três localizações diferentes nas ligações.

Para estudar a evolução da temperatura nas ligações, foram escolhidos oito pontos nas ligações, quatro dos quais à superfície no caso de ligações não protegidas ou zona de interface gesso-madeira, no caso das ligações protegidas, e quatro pontos de medição no interior da madeira. Mais uma vez, a comparação das ligações centrou-se, nas diferenças demonstradas entre a utilização de diferentes massas volúmicas de madeira e diferentes diâmetros de cavilhas. Foi comparada também a diferença entre ligações protegidas e não protegidas.

No final, é estudado o campo de temperaturas dentro dos ligadores, ao longo do seu comprimento, para um determinado instante de tempo.

No capítulo 10.2 dos anexos, podem ser consultadas as figuras com o campo de temperaturas, para as ligações não protegidas e protegidas. No caso das ligações não protegidas, a exposição ao fogo é de 30 min, enquanto que as protegidas é 60 min. As figuras com o campo de temperaturas estão agrupadas de acordo com o tipo de ligação, sendo que, as dispostas à esquerda evidenciam a área carbonizada, uma vez que a área cinzenta corresponde a uma temperatura superior a 300°C. Nas referidas figuras, as linhas pretas interrompidas, correspondem à cavilha, e as brancas, aos painéis de gesso.

Nos capítulos 10.3 e 10.4 dos anexos, podem ser consultados os gráficos correspondentes à temperatura nas ligações W-W-W e temperatura nas cavilhas, respetivamente.

7.1 Madeira não protegida

Na madeira não protegida, um dos resultados analisados foi a velocidade de carbonização, calculada com base na profundidade de madeira carbonizada aos 30 min. Foram escolhidos 3 pontos distintos ao longo da ligação, para verificar eventuais

diferenças de velocidade. Um dos pontos de medição (K1), foi colocado afastado das cavilhas a 68 mm, um segundo ponto de medição, foi colocado na vizinhança das cavilhas (K2) a 8 mm, e por fim, um terceiro ponto foi colocado à mesma distância da cavilha que o ponto K2, mas entre duas cavilhas (K3). O objetivo principal, foi averiguar se a velocidade de carbonização obtida através das simulações numéricas, correspondia aos valores indicativos do Eurocódigo 1995 parte 1-2. Em segundo lugar, pretendeu-se perceber qual a influência que o uso de madeiras com diferentes massas volúmicas poderá ter na velocidade de carbonização, assim como, verificar-se a influência da utilização de cavilhas com diferentes diâmetros, na condução de calor para o interior da ligação. Por fim, outro objetivo foi identificar se a cavilha tem alguma influência na velocidade de carbonização da madeira.

De forma a dar resposta à questão da influência da massa volúmica da madeira utilizada, na velocidade de carbonização, procedeu-se à análise do plano sem cavilhas (SC), de forma a excluir o possível efeito da proximidade do aço. Comparando apenas os três tipos de madeiras com diferentes massas volúmicas, verificou-se um aumento de velocidade de carbonização relacionado com a diminuição da massa volúmica, conforme observado na Figura 7.1. Por exemplo, para o ponto K3, com ligação em madeira GL20h a velocidade de carbonização foi 0.80 mm/min, enquanto que para a madeira GL32h, a velocidade foi 0.67 mm/min. A velocidade entre os três pontos de medição não sofreu variação de velocidade assinalável.

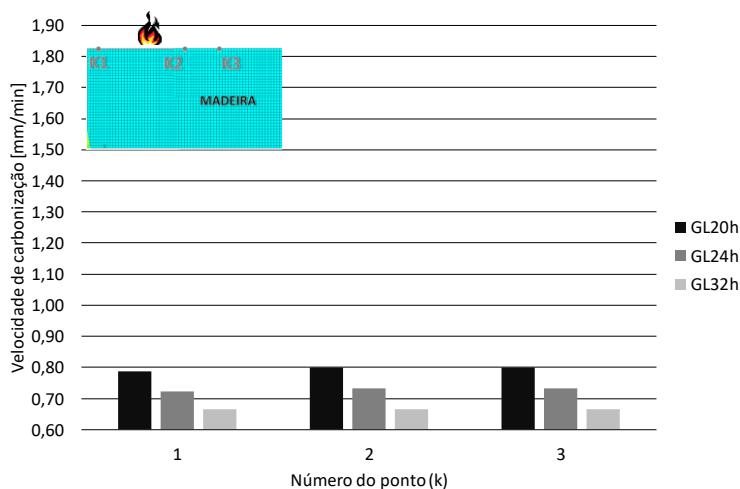


Figura 7.1 – Velocidade de carbonização em madeira não protegida – plano sem cavilhas e d=8 mm

A influência que as cavilhas de aço têm nas ligações de madeira, pode ser observada na Figura 7.2, que apresenta lado a lado, as velocidades de carbonização, referentes ao plano que passa pelas cavilhas (CC), e no plano sem cavilhas (SC). Analisando o ponto K1, afastado das cavilhas, não se verificou nenhuma alteração de velocidade relevante entre os dois planos (CC vs SC). No ponto K2, próximo das cavilhas, verificou-se uma alteração mais significativa da velocidade. Em particular, para a madeira GL20h, a velocidade aumentou de 0.80 mm/min no plano SC, para 1.00 mm/min no plano CC. A diferença é mais assinalável quando se trata do ponto K3, entre as cavilhas. Neste caso,

a velocidade de carbonização aumentou de 0.80 mm/min para 1.13 mm/min, também para a madeira GL20h.

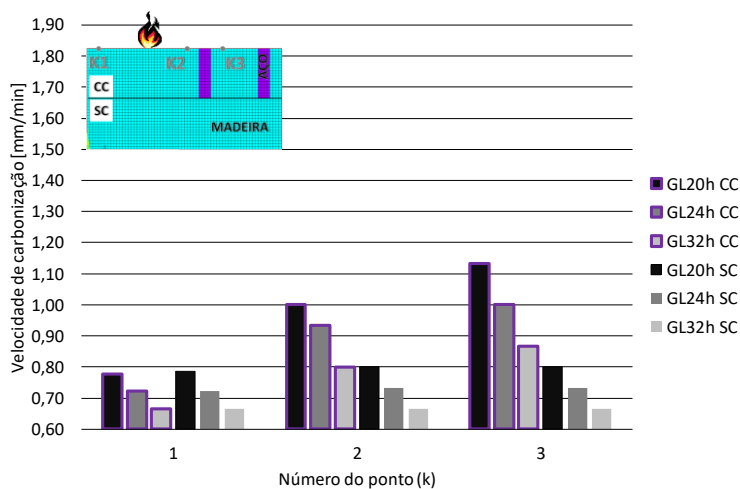


Figura 7.2 – Velocidade de carbonização em madeira não protegida – d=8 mm
Legenda: CC - plano com cavilhas; SC - plano sem cavilhas

A influência do diâmetro de cavilha, foi estudada no plano com cavilhas (CC). Verificou-se um aumento notável de velocidade de carbonização relacionado com a diminuição do seu diâmetro, podendo ser observado na Figura 7.3. Mais uma vez, no caso do ponto K1, não existiram alterações assinaláveis. No caso do ponto K2, tendo como exemplo as ligações com madeira GL24h para os diâmetros de cavilha de 6 mm e 12 mm, a velocidade de carbonização no caso da cavilha de 12mm é 0.90 mm/min, enquanto que para a cavilha de 6 mm é 1.13 mm/min. Para o ponto K3, voltou-se a usar as mesmas ligações anteriores e no caso do diâmetro 12 mm, a velocidade de carbonização foi 0.90 mm/min e no diâmetro 6 mm foi 1.33 mm/min.

É de assinalar que, para o caso das ligações com diâmetros de cavilha 10 e 12 mm, não existe um aumento de velocidade de carbonização do ponto K2 para o K3. Como exemplo, pode-se comparar a ligação com madeira GL32h e diâmetro de cavilha 10 mm, no ponto K2 a velocidade é 0.81 mm/min e em K3 é 0.81 mm/min, mostrando uma tendência diferente dos resultados das ligações com diâmetros 6 e 8 mm.

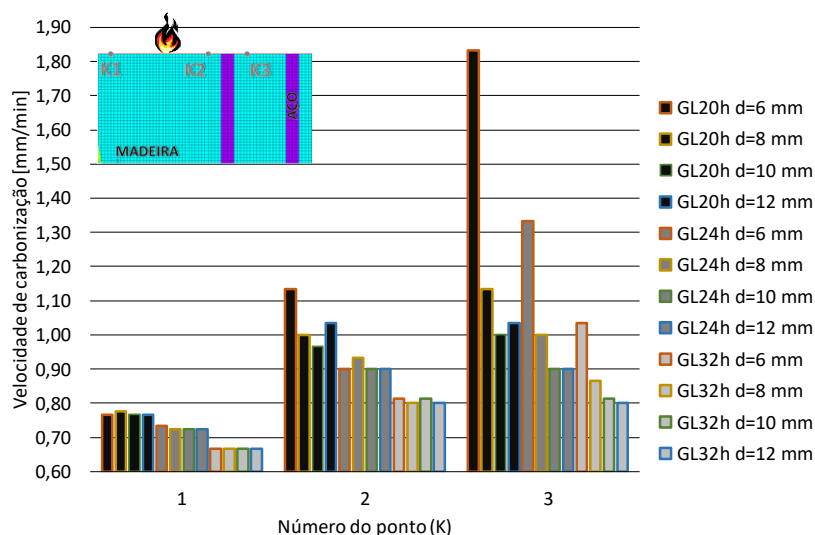


Figura 7.3 – Velocidade de carbonização em madeira não protegida – plano com cavilhas

Tabela 7.1 – Velocidade de carbonização nas ligações com madeira não protegida, medida em 3 pontos [mm/min]

Ligação	Velocidade de carbonização [mm/min]			Profundidade de carbonização [mm]		
	K1	K2	K3	K1	K2	K3
6CC20D	0,77	1,13	1,83	23	34	55
6CC24D	0,73	0,90	1,33	22	27	40
6CC32D	0,67	0,81	1,03	20	24	31
8CC20D	0,78	1,00	1,13	23	30	34
8CC24D	0,72	0,93	1,00	22	28	30
8CC32D	0,67	0,80	0,87	20	24	26
8SC20D	0,79	0,80	0,80	24	24	24
8SC24D	0,72	0,73	0,73	22	22	22
8SC32D	0,67	0,67	0,67	20	20	20
10CC20D	0,77	0,97	1,00	23	29	30
10CC24D	0,72	0,90	0,90	22	27	27
10CC32D	0,67	0,81	0,81	20	24	24
12CC20D	0,77	1,03	1,03	23	31	31
12CC24D	0,72	0,90	0,90	22	27	27
12CC32D	0,67	0,80	0,80	20	24	24

Ligações (W-W-W) madeira-madeira em corte duplo, à temperatura ambiente e a elevadas temperaturas.

Pedro Leite

Para avaliar a evolução da temperatura no interior das ligações não protegidas, foram estudados no total, oito pontos diferentes distribuídos pelas mesmas, no período estimado que devem resistir ao fogo de 30 min, para a madeira GL20h. Quatro pontos foram usados para estudar a superfície da ligação, dos quais, K1 a uma distância de 68 mm da cavilha mais próxima, K2 próximo da cavilha a 8 mm, K3 ao centro da cavilha, e K4 entre as cavilhas a 8 mm da mais próxima. Outros quatro pontos, K5 e K8, foram colocados nas mesmas posições que os anteriores, mas a uma profundidade de 20 mm.

Ao analisar a Figura 7.4, que mostra os oito pontos em simultâneo em uma das ligações, foi observado que K1, K2 e K4 apresentam uma curva muito semelhante à curva de fogo ISO834, o que se explica por estas medições serem efetuadas imediatamente à superfície da ligação. No entanto, o ponto localizado no centro da cavilha, K3, à superfície, apresentou comportamento distinto uma vez que se trata do aço e em função do seu fator de forma o valor de temperatura é inferior ao comportamento da curva ISO834. A madeira à superfície e para 30 min de exposição ao fogo apresenta 828°C e a cavilha em aço na superfície regista 513°C.

Os pontos na madeira, a 20 mm de profundidade, demonstraram temperaturas mais baixas do que os que se encontram à superfície. Por exemplo, passados 30 min, K1 apresentou 828°C, enquanto que K5, apenas 440°C.

No que diz respeito aos pontos localizados no centro da cavilha, embora não se tenha verificado uma diferença significativa, K7 apresentou valores inferiores de temperatura. Relativamente ao tempo de 30 min e uma profundidade de 20 mm na cavilha, verificou-se uma descida de 53°C, comparando os pontos K3 e K7.

No caso da madeira a uma profundidade de 20mm ao fim de 30 min, o ponto mais afastado das cavilhas (K5) revelou a temperatura mais baixa 440°C, enquanto que K6 e K8 comportaram-se de maneira muito semelhante, sendo a temperatura mais alta no K8 com 490°C.

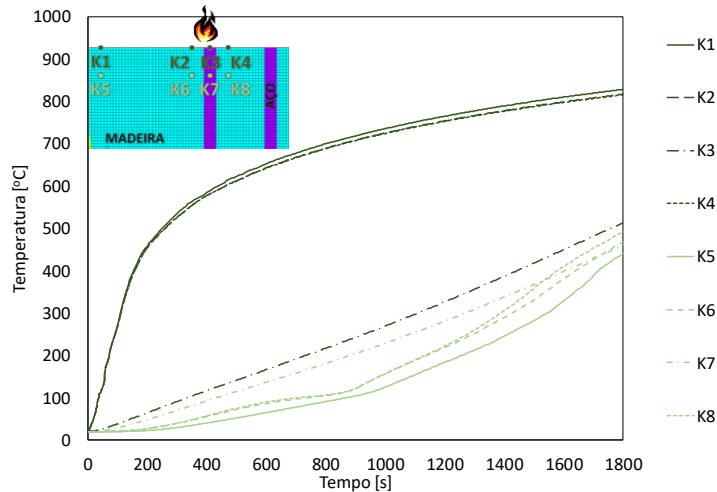


Figura 7.4 - Evolução da temperatura ao longo de 30 min, à superfície e no interior da madeira e cavilha, em ligação não protegida exposta ao fogo - GL20h, cavilha d=8 mm

Outra análise, prendeu-se com o estudo da evolução das temperaturas na comparação das diferentes massas volúmicas da madeira. Foram analisados dois pontos afastados a 68 mm das cavilhas, K1 à superfície e K5 a 20 mm de profundidade, para evitar a influência do calor conduzido pelas cavilhas (Figura 7.5).

Mais uma vez, K1 demonstrou, para as três massas volúmicas de madeira, ter uma curva semelhante à curva ISO834. No ponto K5, foi possível verificar que inicialmente, as temperaturas são muito próximas até aproximadamente os 1000 s. Nessa altura as temperaturas começaram a demonstrar uma diferença maior entre massas volúmicas. No grupo das madeiras estudadas, para o ponto K5, GL20h atingiu a temperatura mais elevada com 441°C, seguido de GL24h com 375°C, e finalmente a madeira GL32h com 300°C.

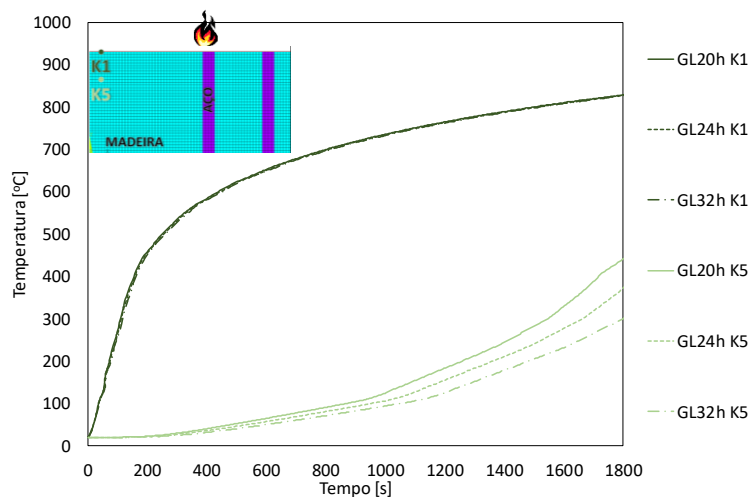


Figura 7.5 - Evolução da temperatura ao longo de 30 min afastado da cavilha, à superfície e no interior da madeira, em ligações não protegidas expostas ao fogo – d=6 mm

De forma a avaliar a influência do diâmetro das cavilhas na evolução da temperatura, estudou-se o ponto K7, localizado no centro da cavilha a 20 mm de profundidade e o ponto K8, no interior da madeira a 20 mm de profundidade, a 8 mm de distância da cavilha mais próxima, para o tipo de madeira GL20h (Figura 7.6). No caso do ponto K7, as temperaturas foram idênticas para os quatro diâmetros de cavilhas estudados. No ponto K8, embora o comportamento das temperaturas tenha sido semelhante, a diferença mais assinalável foi entre os diâmetros de 6 mm e 12 mm. Para 6 mm a temperatura foi 490°C, enquanto que para o diâmetro de 12 mm foi 461°C.

Nesta análise, verificou-se a presença de um ponto crítico para a ligação, que corresponde à condução de calor através da cavilha para o interior da ligação, independentemente do diâmetro de cavilha. Se por exemplo, se comparar as temperaturas entre a cavilha e a madeira para o diâmetro de 6 mm, para um tempo intermédio de 900 s (15 min), verifica-se que a temperatura é mais alta 82°C na cavilha do que na madeira, ao contrário do que acontece à superfície, onde a temperatura da cavilha é mais baixa do que na madeira.

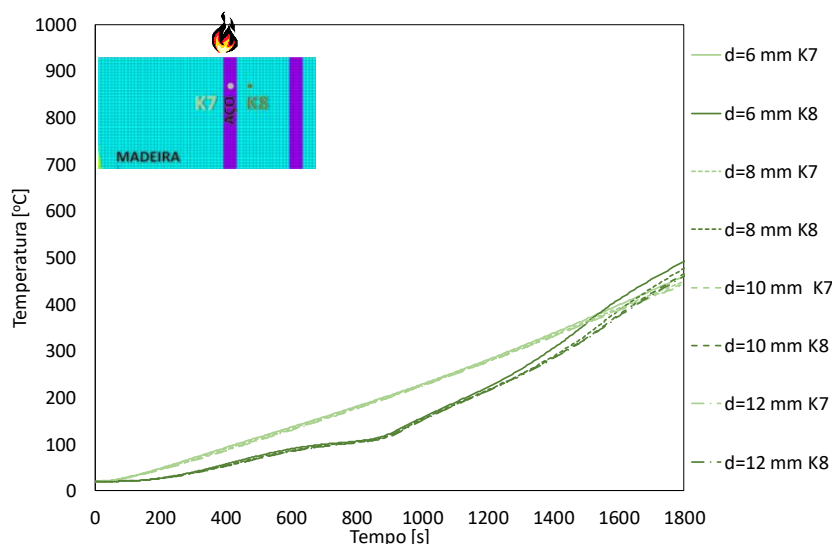


Figura 7.6 – Evolução da temperatura ao longo de 30 min, no interior da cavilha e madeira, em ligação não protegida exposta ao fogo – GL20h

7.2 Comparação entre madeira não protegida e protegida

Para realizar o estudo da comparação entre ligações protegidas e não protegidas, foi escolhida a ligação que obteve piores resultados na velocidade de carbonização, a ligação com madeira GL20h, diâmetro de cavilha 6 mm e o tipo de gesso A. Os pontos de medição de temperatura utilizados, foram os descritos, anteriormente, no capítulo da madeira não protegida, K1 a K8, com as distâncias à superfície referida. Teve-se como objetivo, verificar se a proteção de gesso trazia algum benefício para a resistência da ligação ao fogo. Embora o exigido para as ligações não protegidas seja resistir no máximo

30 min de exposição ao fogo, a simulação numérica destas ligações foi feita até aos 60 min para efeitos comparativos.

Inicialmente estudou-se o comportamento térmico da madeira à superfície, para o qual, foram escolhidos os pontos de medição K1 a K4 (Figura 7.7).

Analisando K1, ponto afastado das cavilhas, como referido anteriormente no caso da madeira não protegida, verificou-se um comportamento semelhante ao fogo ISO834, atingindo aos 60 min, 936°C, enquanto que com a proteção, a temperatura ultrapassou ligeiramente os 300°C (temperatura de carbonização da madeira), 319°C.

O ponto próximo das cavilhas K2, apresentou um comportamento semelhante a K1 na madeira não protegida, com temperatura de 929°C ao fim de 60 min, mas no caso da madeira protegida, apresentou um comportamento distinto de K1, sendo a temperatura atingida bastante inferior 220°C, para o mesmo período.

No caso de K3, localizado no centro das cavilhas, na madeira não protegida a temperatura registada ao fim de 60 min foi 830°C, enquanto que com o gesso tipo A, a temperatura desceu para 85°C. O comportamento da subida de temperatura na madeira protegida foi linear até ao final da exposição ao fogo, enquanto que na madeira não protegida houve um decréscimo a partir dos 2400 s.

No ponto entre as cavilhas, K4, a diferença de temperatura verificada pela presença da proteção de gesso tipo A, no final da exposição ao fogo, traduziu-se por uma descida na temperatura de 730°C.

Verifica-se no caso da madeira protegida que, entre os 2800 s e os 3200 s, a madeira atinge os 100°C, altura em que ocorre a evaporação da água contida na madeira. É então que a velocidade de crescimento da temperatura da madeira aumenta com a diminuição de massa volúmica da mesma.

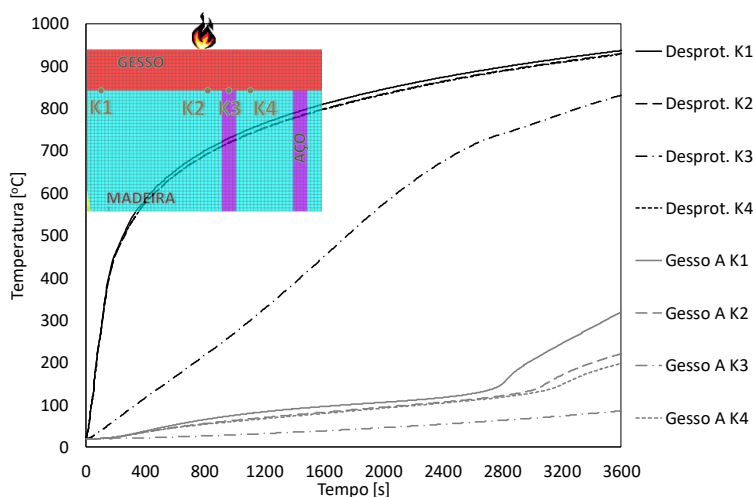


Figura 7.7 - Evolução da temperatura ao longo de 60 min, na superfície da madeira, em ligações não protegidas e protegidas com gesso tipo A, expostas ao fogo – ligação “6CC20D”

Também foi estudado o comportamento da ligação no interior, comparando madeira não protegida com protegida, avaliando os pontos K5 a K8. Verificou-se que no fim da exposição ao fogo, a temperatura dos 4 pontos, quer para madeira protegida ou não protegida é muito semelhante. A temperatura média para a ligação não protegida foi 799°C, enquanto que para a ligação protegida foi 82°C.

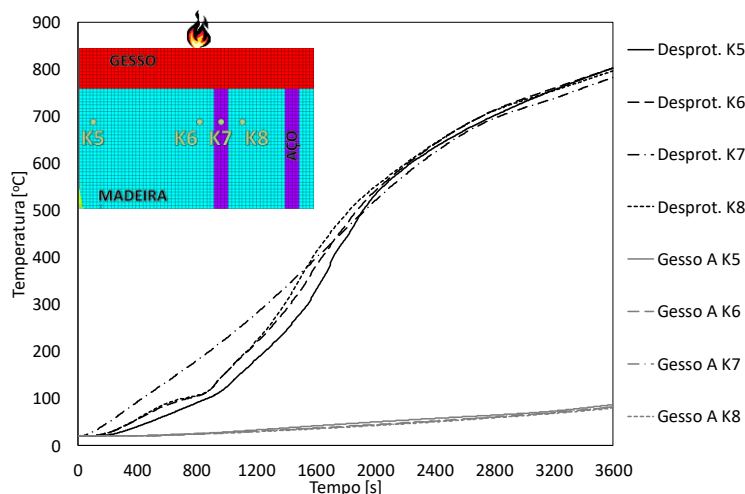


Figura 7.8 - Evolução da temperatura ao longo de 60 min, no interior da madeira em ligações não protegidas e protegidas com gesso tipo A, expostas ao fogo – ligação “6CC20D”

7.3 Madeira protegida – painéis de gesso

Com base nos mesmos pontos de medição de temperatura referidos nos capítulos anteriores (K1 a K8), foi efetuada a comparação entre os dois tipos de gesso usados para proteção das ligações de madeira, gesso tipo A e F.

Relembrando, para o gesso tipo A e F, a espessura dos painéis de proteção ao fogo é calculada com base no Eurocódigo 1995 parte 1-2 para resistir ao fogo 60 min, que não tem em consideração as propriedades dos materiais escolhidos com base na bibliografia. Por essa razão, a espessura obtida com o cálculo, não oferece a mesma resistência ao fogo entre gesso tipo A e F.

Em primeiro lugar foi estudada a zona de interface madeira-gesso. É possível observar na Figura 7.9 que o gesso tipo F permitiu conduzir mais calor do que o gesso tipo A.

Contudo, ambos os tipos de gesso foram capazes de proteger as ligações com grande eficácia, contra o fogo.

As temperaturas mais baixas no final da exposição de 60 min ao fogo, foram medidas no ponto K3, centro da cavilha com 85°C para o gesso tipo A, e 105°C para o tipo F.

As temperaturas mais altas medidas foram encontradas no ponto K1, afastado das cavilhas, onde as temperaturas máximas no final da exposição de 60 min ao fogo, foram 319°C para o gesso tipo A e 443°C para o tipo F.

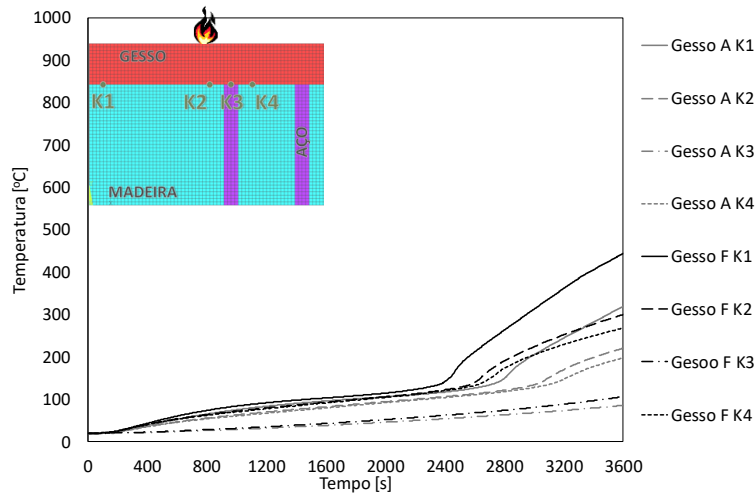


Figura 7.9 - Evolução da temperatura ao longo de 60 min, à superfície da madeira em ligações protegidas expostas ao fogo - ligação "6CC20D"

No caso dos pontos de medição da temperatura no interior da madeira, o comportamento entre os dois tipos de gesso foi muito semelhante. A temperatura mais alta foi 100°C, nos pontos K1 e K3, na proteção com gesso tipo F, após exposição ao fogo durante 60 min.

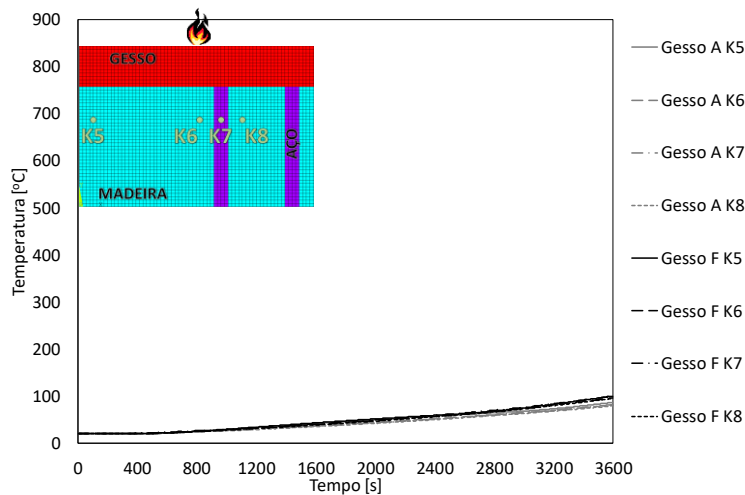


Figura 7.10 - Evolução das temperaturas ao longo de 60 min, no interior da madeira em ligações protegidas expostas ao fogo - ligação "6CC20D"

De forma geral, ambos os tipos de gesso proporcionam uma boa resistência ao fogo, sendo uma excelente opção para usar como isolamento térmico em estruturas construídas em madeira.

7.4 Temperatura nas cavilhas

A temperatura das cavilhas foi estudada nas ligações protegidas e não protegidas. Foi efetuada a leitura da temperatura ao longo do comprimento das cavilhas, desde a superfície (0 mm), até ao centro da ligação (67.5 mm), para períodos específicos, nomeadamente 30 e 60 min, após exposição ao fogo. Foi verificada a influência de cada um dos fatores existente nas ligações e a sua contribuição para uma melhor resistência ao fogo. Os fatores estudados foram: a massa volúmica da madeira, o diâmetro de cavilha e a existência ou a ausência de painéis de gesso.

Observando a Figura 7.11 que exemplifica as temperaturas nas cavilhas, verifica-se uma elevada diferença de temperaturas entre a ligação não protegida e a protegida, após uma exposição ao fogo de 30 min. No caso da ligação não protegida, a temperatura no início da cavilha é 513°C e 399°C a 67.5 mm da superfície, enquanto que para a ligação protegida com gesso tipo F, para o mesmo período de exposição ao fogo, apresentou uma temperatura no início da cavilha de 47°C e 42°C a 67.5 mm da superfície. Constatou-se que, na cavilha da ligação protegida com gesso tipo A, existiu menor transmissão de calor do que na ligação protegida com o gesso tipo F. A sua temperatura à superfície foi 42°C e 38°C no interior da ligação. A diferença de temperatura da cavilha, entre a superfície e o interior da ligação, é maior na ligação desprotegida do que na protegida com gesso tipo A, com 114°C e 4°C, respetivamente.

No caso da exposição ao fogo 60 min, para as ligações protegidas, verificou-se um aumento de temperatura das cavilhas, para ambos os tipos de gesso. No caso do gesso tipo A, a cavilha passou para 86°C à superfície e 77°C no interior da ligação. Quanto ao gesso tipo F, passou para 106°C à superfície e 94°C no interior da ligação.

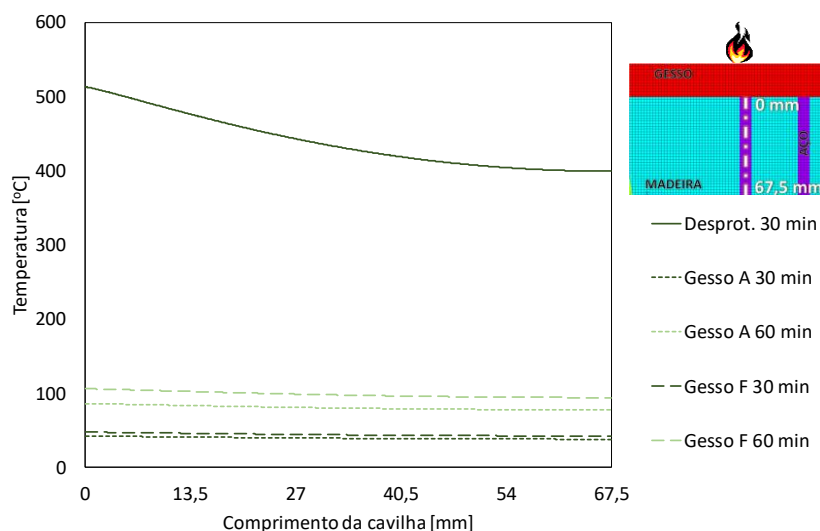


Figura 7.11 – Temperatura ao longo do comprimento das cavilhas, após exposição ao fogo – GL20h e d=6 mm

Analisando apenas as ligações não protegidas, com madeira GL20h (Figura 7.12) e GL32h (Figura 7.13), para os quatro diferentes diâmetros de cavilhas, foi possível verificar uma

alteração no comportamento da condução de calor ao longo da cavilha. No caso da ligação com madeira GL20h, o diâmetro de cavilha com 6 mm, manteve a temperatura mais alta ao longo do seu comprimento, em comparação com os outros diâmetros. O mesmo não aconteceu na ligação com madeira GL32h, onde à superfície, a temperatura máxima medida foi 484°C na cavilha com diâmetro de 6 mm, enquanto que no interior da ligação, a temperatura máxima pertenceu à cavilha com diâmetro de 12 mm, em que foram medidos 376°C.

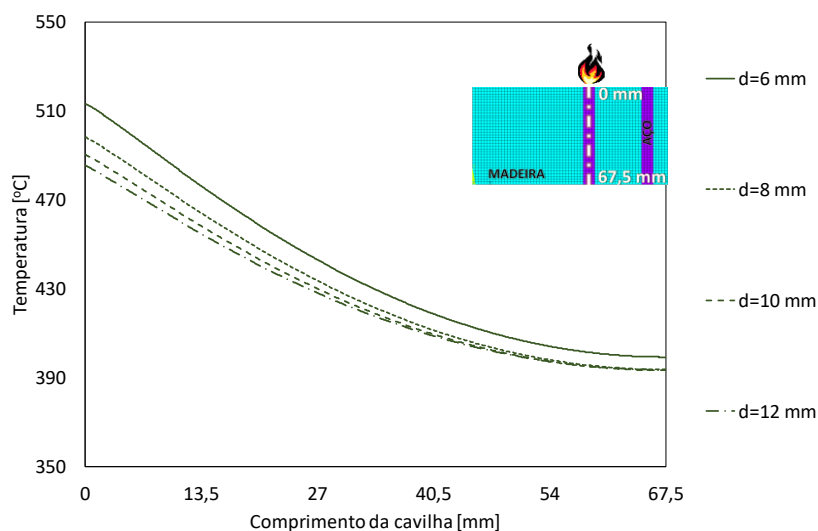


Figura 7.12 – Temperatura ao longo do comprimento das cavilhas, após 30 min de exposição ao fogo – GL20h não protegida

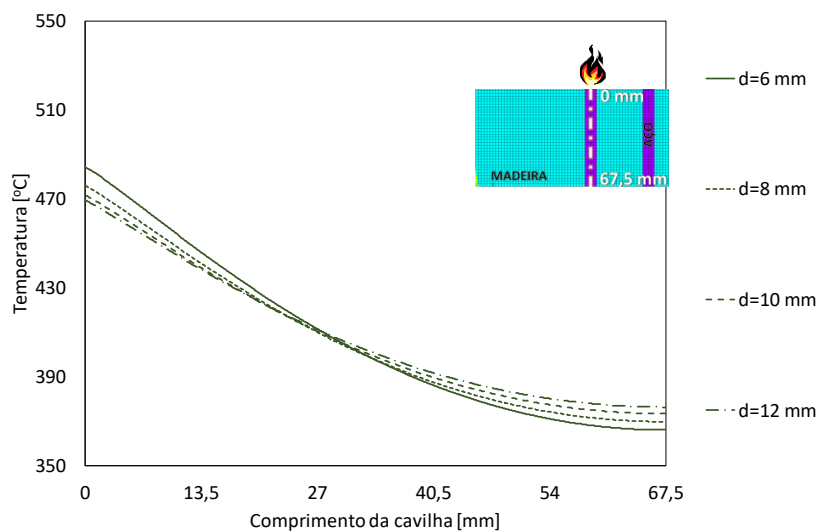


Figura 7.13 – Temperatura ao longo do comprimento das cavilhas, após 30 min de exposição ao fogo – GL32h não protegida

Ao analisar a ligação com madeira GL20h, protegida com gesso tipo A, da Figura 7.14, para uma exposição ao fogo de 60 min, foi possível verificar que o comportamento da

temperatura, com a variação do diâmetro da cavilha é semelhante entre todas as cavilhas, havendo apenas uma diferenciação relativa a uma maior dissipação do calor pelas cavilhas com maior diâmetro. Por exemplo, no caso da cavilha com diâmetro de 6 mm, à superfície mediu-se 86°C e no interior da ligação 77°C. Já no caso da cavilha com 12 mm de diâmetro, à superfície a temperatura medida foi 76°C e no interior da ligação 71°C.

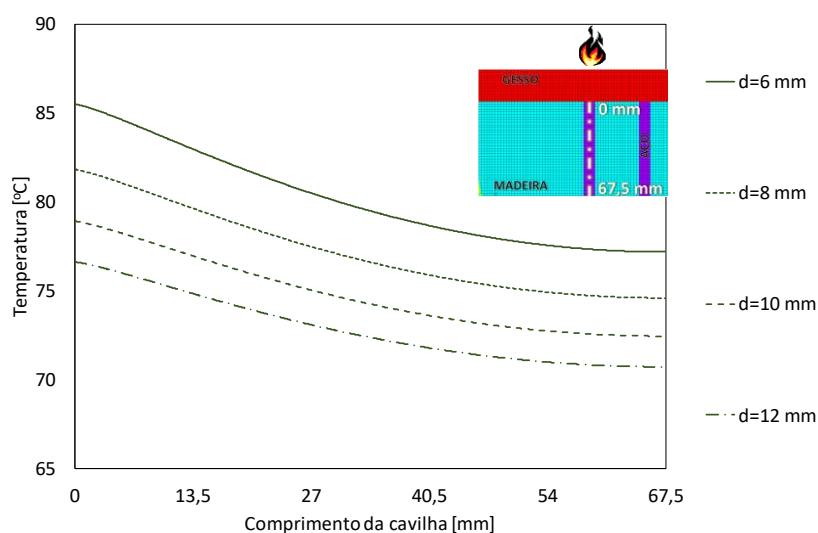


Figura 7.14 – Temperatura ao longo do comprimento das cavilhas, após 60 min de exposição ao fogo – GL20h protegida com gesso tipo A

CONCLUSÕES

8.1 CONCLUSÕES

8.2 TRABALHOS FUTUROS

8 CONCLUSÕES

8.1 CONCLUSÕES

Para o desenvolvimento do presente trabalho foram utilizadas duas metodologias. Uma metodologia foi analítica, para o qual foram usados os Eurocódigos 1995 parte 1-1 e parte 1-2, que serviram de suporte para projetar ligações de madeira com ligadores metálicos em duplo corte, assim como a resistência à exposição da ação do fogo. A outra metodologia foi a numérica, através de uma análise térmica em regime transiente, para a simulação das ligações projetadas, agora sob a ação do fogo, na determinação do campo de temperaturas e na obtenção da camada carbonizada.

Com os cálculos analíticos, foi possível verificar a existência de uma correlação entre a carga aplicada e a o diâmetro de cavilha necessário a usar, sendo que a quantidade de cavilhas a usar aumenta com a diminuição do diâmetro das cavilhas. A quantidade necessária de cavilhas a usar, decresce bastante com o aumento do diâmetro de cavilha, sendo mais pronunciado em carregamentos de maior amplitude.

A massa volúmica da madeira não altera significativamente a resistência mecânica na ligação, mas afeta muito o comportamento térmico.

Atendendo aos diferentes modelos e combinações de ligações estudadas, pode ainda concluir-se que, por exemplo, caso se pretenda diminuir os custos na construção com este tipo de ligações, é possível fazê-lo através da redução de ligadores. Para isso, em alternativa, é necessário o aumento no diâmetro dos ligadores utilizados ou escolher uma madeira com maior massa volúmica.

O efeito da combinação de dois materiais com propriedades térmicas bastante distintas, como é o caso da madeira e do aço, demonstrou ter um comportamento peculiar. Foi possível observar que a madeira levou a uma diminuição da temperatura ao longo das cavilhas de aço, fazendo com que o efeito do fogo não seja tão pronunciado, tendo desta forma um papel de isolamento sobre este material. No entanto, para a madeira, o facto das cavilhas atravessarem o interior da ligação, e sendo o aço um excelente condutor de calor, leva a que o efeito da temperatura pela ação do fogo seja conduzido para a madeira com maior intensidade. A área da madeira circundante à cavilha metálica sofre assim, um aumento de temperatura podendo até carbonizar. As ligações com cavilhas metálicas podem assim tornar-se desfavoráveis. Em alternativa, as ligações com cavilhas não metálicas (ligadores em madeira) terão no seu interior uma resistência ao fogo com melhor desempenho, uma vez que a madeira tem uma condução térmica muito baixa,

e consegue manter o seu núcleo a baixas temperaturas, próximo da temperatura ambiente (20°C).

No estudo da velocidade de carbonização, nas ligações não protegidas, verificou-se que a madeira à volta da cavilha é muito afetada pelo calor que é conduzido pela mesma. Dois fatores que podem aumentar esse efeito, é uma menor massa volúmica e um menor diâmetro de cavilha que conduz a um maior número de ligadores. Por essa razão, para combater um avanço rápido da carbonização de madeira, aconselha-se a escolha de uma maior massa volúmica da madeira, assim como um diâmetro de cavilha superior diminuindo dessa forma o número de ligadores necessários.

Com a análise dos pontos no interior das ligações, verificou-se que a temperatura na cavilha foi superior à temperatura na madeira, durante a maior parte do tempo em que a ligação esteve exposta ao fogo.

Através do estudo da temperatura nas cavilhas, conclui-se que um diâmetro menor de cavilha, aliado a uma massa volúmica de maior densidade, proporcionam menores temperaturas para o interior da ligação.

O gesso demonstrou ser um material bom isolante térmico, mantendo a madeira a uma temperatura baixa até ao final da exposição ao fogo. Se o dimensionamento da espessura de proteção de gesso, for corretamente efetuado, vai permitir que a madeira fique intacta mesmo à superfície, para o período de cálculo de resistência ao fogo. Relativamente à comparação entre os dois tipos de gesso estudados, foi visível uma maior passagem de calor no gesso tipo F. No entanto, o gesso tipo F necessitou de uma menor espessura nos painéis para oferecer a mesma proteção ao fogo, em comparação com o gesso tipo A.

8.2 TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, seria interessante explorar novas tecnologias criadas para ajudar a aumentar a resistência ao fogo das construções em madeira, e comparar com as já existentes, como o caso do gesso, que foi explorado neste trabalho.

Tendo em conta a necessidade de encontrar alternativas de construção que reúnam os requisitos de segurança, aliados à proteção ambiental, existe uma necessidade de estudar outros materiais que possam proteger as construções de madeira.

Entre os vários materiais disponíveis, destaca-se a proteção cerâmica GAINA, que consiste numa cerâmica líquida que se utiliza como um revestimento, desenvolvida pela Agência Espacial Japonesa (JAXA). Este material de proteção é constituído por microesferas cerâmicas ocas (com vazio absoluto), dióxido de titânio e silicone. A diferença entre outras cerâmicas, consiste na composição líquida de fácil aplicação, que solidifica (nano-estruturação) em 20 dias, em praticamente qualquer superfície, incluindo a madeira e o aço. A sua aplicação é semelhante a uma pintura, mas não se trata de uma tinta, mas sim de um MicroSate (sistema de isolamento térmico), sendo um produto com excelentes propriedades. Este material permite ainda reduzir as necessidades de aquecimento das habitações e as emissões de CO₂, não possui substâncias prejudiciais para o ambiente e apresenta uma durabilidade de 15 a 20 anos.

É um revestimento não inflamável, comportando-se como uma barreira térmica, criada pelos espaços de ar, existentes no interior das microesferas cerâmicas, reduzindo a condução e convecção do calor [40]. Este material, na utilização das ligações em estudo, poderia traduzir-se numa solução de projeto com vista à análise da sua resistência ao fogo.

**BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES
DE INFORMAÇÃO**

9 Bibliografia

- [1] CEN, EN1995-1-1: Eurocode 5: "Design of timber structures. Part 1-1: General Common rules and rules for buildings", Bruxelas, 2004.
- [2] CEN, EN1995-1-2: Eurocode 5: "Design of timber structures. Part 1-2: General Structural fire design", Bruxelas, 2004.
- [3] C. Maraveas, K. Miamis e C. E. Matthaïou (2015), "Performance of Timber Connections Exposed to Fire: a review," *Fire Technology*, 51 (6), pp. 1401-1432.
- [4] Leonardo da Vinci Pilot Project (2008), *Handbook 1 - Timber Structures*, CZ/06/B/FPP/168007, República Checa: TEMTIS.
- [5] T. Benson (1997), *The timber-frame home*, United States of America: The Taunton Press, Inc. ISBN: 978-1561581290.
- [6] J. Mayo (2015), *Solid Wood: Case Studies in Mass Timber Architecture, Technology and Design*, London: Routledge, ISBN: 978-0415725309.
- [7] Swedish Wood (2016), *Design of Timber Structures - Volume 1*, Suécia: Swedish Forest Industries Federation. ISBN: 978-9198030488.
- [8] L. Peng, G. Hadjisophocleous, J. Mehaffey e M. Mohammad (2011), "On the fire performance of double-shear timber connections," *Fire Safety Science*, 10, pp. 1207-1218.
- [9] C. L. Santos, A. M. P. d. Jesus, J. J. L. Morais e J. L. P. C. Lousada (2009), "Quasi-static mechanical behaviour of a double-shear single dowel wood connection," *Construction and building materials*, 23 (1), pp. 171-182.
- [10] E. Resch e M. Kaliske (2010), "Three-dimensional numerical analyses of load-bearing behavior and failure," *Computers & Structures*, 88 (3-4), pp. 165-177.
- [11] P. B. Cachim e J.-M. Franssen (2009), "Numerical modelling of timber connections under fire loading using a component model," *Fire safety Journal*, 44 (6), pp. 840-853.
- [12] L. Peng, G. Hadjisophocleous, J. Mehaffey e M. Mohammad (2009), "Predicting the Fire Resistance of Wood-Steel-Wood Timber connections," *Fire Technology*, 47 (4), pp. 1101-1119.

- [13] A. Frangi, C. Erchinger e M. Fontana (2010), "Experimental fire analysis of steel-to-timber connections using dowels and nails," *Fire and Materials*, 34 (1), pp. 1-19.
- [14] E. Resch e M. Kaliske (2012), "Numerical analysis and design of double-shear dowel-type connections of wood," *Engineering Structures*, 41, pp. 234-241.
- [15] M. Khelifa, A. Khennane, M. El Ganaoui e Y. Rogaume (2014), "Analysis of the behavior of multiple dowel timber connections in fire," *Fire Safety Journal*, 68, pp. 119-128.
- [16] F. d. M. Miranda (2018), *Análise a elevadas temperaturas da ligação (W-S-W) aço-madeira com chapa metálica central*, Dissertação de Mestrado: Instituto Politécnico de Bragança, Bragança.
- [17] S. Kalpakjian e S. R. Schmid (2009), *Manufacturing Engineering and Technology (sixth edition)*, Canada: Pearson.
- [18] R. J. Ross e U. S. Department of Agriculture Forest Service (2010), *Wood handbook: wood as an engineering material*, Madison, WI: CreateSpace Independent Publishing Platform; ISBN: 978-1484859704.
- [19] American Institute of Timber Construction (2012), *Timber Construction Manual 6th Ed.*, Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. ISBN: 978-0470545096.
- [20] British standard, "BS EN 1194-1999," *Timber structures - Glued laminated timber - Strength classes and determination of characteristic values*, 15 09 1999.
- [21] HASSLACHER NORICA TIMBER, *Glue Laminated Timber (catalogue)*, Austria, 2018.
- [22] German Institute for Standardisation, "DIN EN 14080:2013," *Timber Structures - Glued Laminated Timber and Glued Solid Timber - Requirements*, 01 01 2013.
- [23] CEN, EN1993-1-1: "Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings", Bruxelas, 2005.
- [24] CEN, EN1993-1-2: "Eurocode 3: Design of steel structures - part 1-2: General rules - Structural fire design", Bruxelas, 2010.
- [25] I. Rahmanian e Y. Wang (2009), "Thermal conductivity of gypsum at high temperatures - A combined experimental and numerical approach," *Acta polytechnica*, 49 (1), pp. 16-20.
- [26] Q. L. Yu e H. J. H. Brouwers (2011), "Thermal properties and microstructure of gypsum board and its dehydration products: a theoretical and experimental investigation," *Fire and materials*, 36 (7), pp. 1-15.
- [27] A. Frangi, V. Schleifer, M. Fontana e E. Hugi (2009), "Experimental and numerical analysis of gypsum plasterboards in fire," *Fire technology*, 46 (1), pp. 149-167.

- [28] British Standard, BS EN 520:2004+A1:2009 "Gypsum plasterboards - Definitions, requirements and test methods", Inglaterra: British standards, 2010.
- [29] "British Gypsum," 2019. [Online]. Available: <https://www.british-gypsum.com/products/gyproc-fireline?tab0=1>. [Acedido em 02 06 2019].
- [30] British Gypsum, *Gyproc WallBoard - product data sheet*, Inglaterra, 2015.
- [31] R. H. White (2002), *SFPE Handbook of fire protection engineering (capítulo 11)*, Massachusetts: National Fire Protection Association, Inc. ISBN: 978-1493925650.
- [32] R. L. S. Ervedal (2011), *Resistência ao fogo de elementos estruturais metálicos de classe 4*, Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro, Aveiro.
- [33] *ISO 834-1:1999 "Fire-resistance tests - elements of building construction - Part 1: requirements"*, Génova, 1999.
- [34] A. J. Ede (1967), *An introduction to heat transfer - principles and calculations*, Birmingham: Pergamon Press Ltd. ISBN: 978-0080135175.
- [35] M. K. Thompson e J. M. Thompson (2017), *ANSYS Mechanical APDL for Finite Elements Analysis*, San Diego: Elsevier Science, ISBN: 978-0128129814.
- [36] X. Chen e Y. Liu (2015), *Finite element modeling and simulation with ANSYS workbench*, Boca Raton, Florida: CRC Press, ISBN: 978-1138486294.
- [37] *ANSYS Mechanical APDL, Release 2019 R1, Build 19.3*.
- [38] P. Seshu (2012), *Textbook of finite element analysis*, Nova Déli: PHI Learning, ISBN: 978-8120323155.
- [39] Kolektiv, "Katedra mechaniky," Faculty of Mechanical Engineering of the Czech Technical University, 23 09 2011. [Online]. Available: http://mechanika2.fs.cvut.cz/old/pme/examples/ansys55/html/element_55/chapter4/ES4-77.htm. [Acedido em 25 05 2019].
- [40] "GAINA," [Online]. Available: <https://gaina.es/aislamiento-termico/>. [Acedido em 28 05 2019].

ANEXOS

10.1 TABELAS DE DIMENSIONAMENTO DA LIGAÇÃO W-W-W

10.2 CAMPO DE TEMPERATURAS NAS LIGAÇÕES

10.3 GRÁFICOS – TEMPERATURA NAS LIGAÇÕES W-W-W

10.4 GRÁFICOS – TEMPERATURA NAS CAVILHAS

10 ANEXOS

10.1 Tabelas de dimensionamento da ligação W-W-W

Tabela 10.1 - Tabela de dimensionamento para ligações W-W-W à temperatura ambiente, para diferentes tipos de madeira, carregamentos e diâmetros de cavilha

Madeira	Carregamento	Dimensões da madeira				Cavilha		Tensão admissível na madeira	Capacidade de carga por ligador e por plano de corte	Quantidade de cavilhas			Espaçamento entre furos [mm]			
		F _d (KN)	t ₁ e t ₂ (mm)	Comp. (mm)	Altura (mm)	Diã. (mm)	Comp. (mm)			f _{t,0,d} (N/mm ²)	F _{v,Rd} (N)	Nº total	Linhas	Colunas	a ₁	a ₂
GL20h	10	45	380	120	6	135	11,5	1723,4	6	3	2	30	42	80	18	
	10	45	320	120	8	135	11,5	2861,5	4	2	2	40	72	80	24	
	10	45	320	120	10	135	11,5	3852,9	4	2	2	50	60	80	30	
	10	45	456	120	12	135	11,5	4824,8	4	2	2	60	48	84	36	
	15	45	380	120	6	135	11,5	1723,4	10	5	2	30	21	80	18	
	15	45	400	120	8	135	11,5	2861,5	6	3	2	40	36	80	24	
	15	45	420	120	10	135	11,5	3852,9	4	2	2	50	60	80	30	
	15	45	456	120	12	135	11,5	4824,8	4	2	2	60	48	84	36	
	20	45	440	120	6	135	11,5	1723,4	12	6	2	30	17	80	18	
	20	45	400	120	8	135	11,5	2861,5	8	4	2	40	24	80	24	
GL24h	10	45	380	120	6	135	13,8	1836,1	6	3	2	30	42	80	18	
	10	45	320	120	8	135	13,8	3048,8	4	2	2	40	72	80	24	
	10	45	320	120	10	135	13,8	4276,3	4	2	2	50	60	80	30	
	10	45	336	120	12	135	13,8	5326,0	2	1	2	60	0	84	60	
	15	45	380	120	6	135	13,8	1836,1	10	5	2	30	21	80	18	
	15	45	400	120	8	135	13,8	3048,8	6	3	2	40	36	80	24	
	15	45	420	120	10	135	13,8	4276,3	4	2	2	50	60	80	30	
	15	45	456	120	12	135	13,8	5326,0	4	2	2	60	48	84	36	
	20	45	440	120	6	135	13,8	1836,1	12	6	2	30	17	80	18	
	20	45	400	120	8	135	13,8	3048,8	8	4	2	40	24	80	24	
GL32h	10	45	380	120	6	135	18,4	1962,9	6	3	2	30	42	80	18	
	10	45	320	120	8	135	18,4	3259,3	4	2	2	40	24	80	24	
	10	45	320	120	10	135	18,4	4783,1	2	1	2	50	30	80	60	
	10	45	336	120	12	135	18,4	5924,9	2	1	2	60	48	84	60	
	15	45	380	120	6	135	18,4	1962,9	10	5	2	30	21	80	18	
	15	45	400	120	8	135	18,4	3259,3	6	3	2	40	36	80	24	
	15	45	420	120	10	135	18,4	4783,1	4	2	2	50	60	80	30	
	15	45	456	120	12	135	18,4	5924,9	4	2	2	60	48	84	36	
	20	45	440	120	6	135	18,4	1962,9	12	6	2	30	28	80	18	
	20	45	400	120	8	135	18,4	3259,3	8	4	2	40	24	80	24	
	20	45	420	120	10	135	18,4	4783,1	6	3	2	50	30	80	30	
	20	45	456	120	12	135	18,4	5924,9	4	2	2	60	48	84	36	

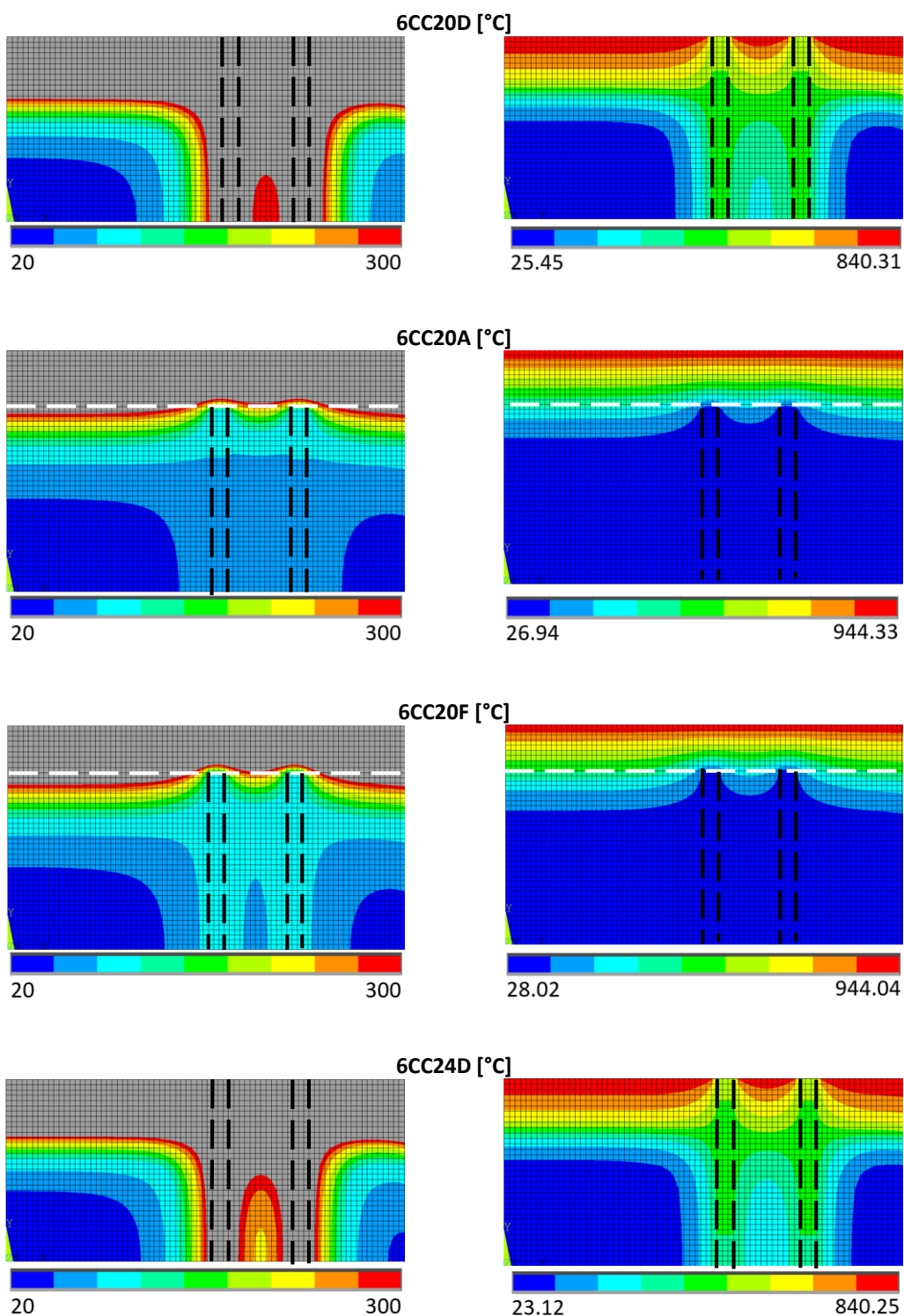
Tabela 10.2 - Tabela de verificação ao fogo para ligações W-W-W, para diferentes tipos de madeira, carregamentos e diâmetros de cavilha

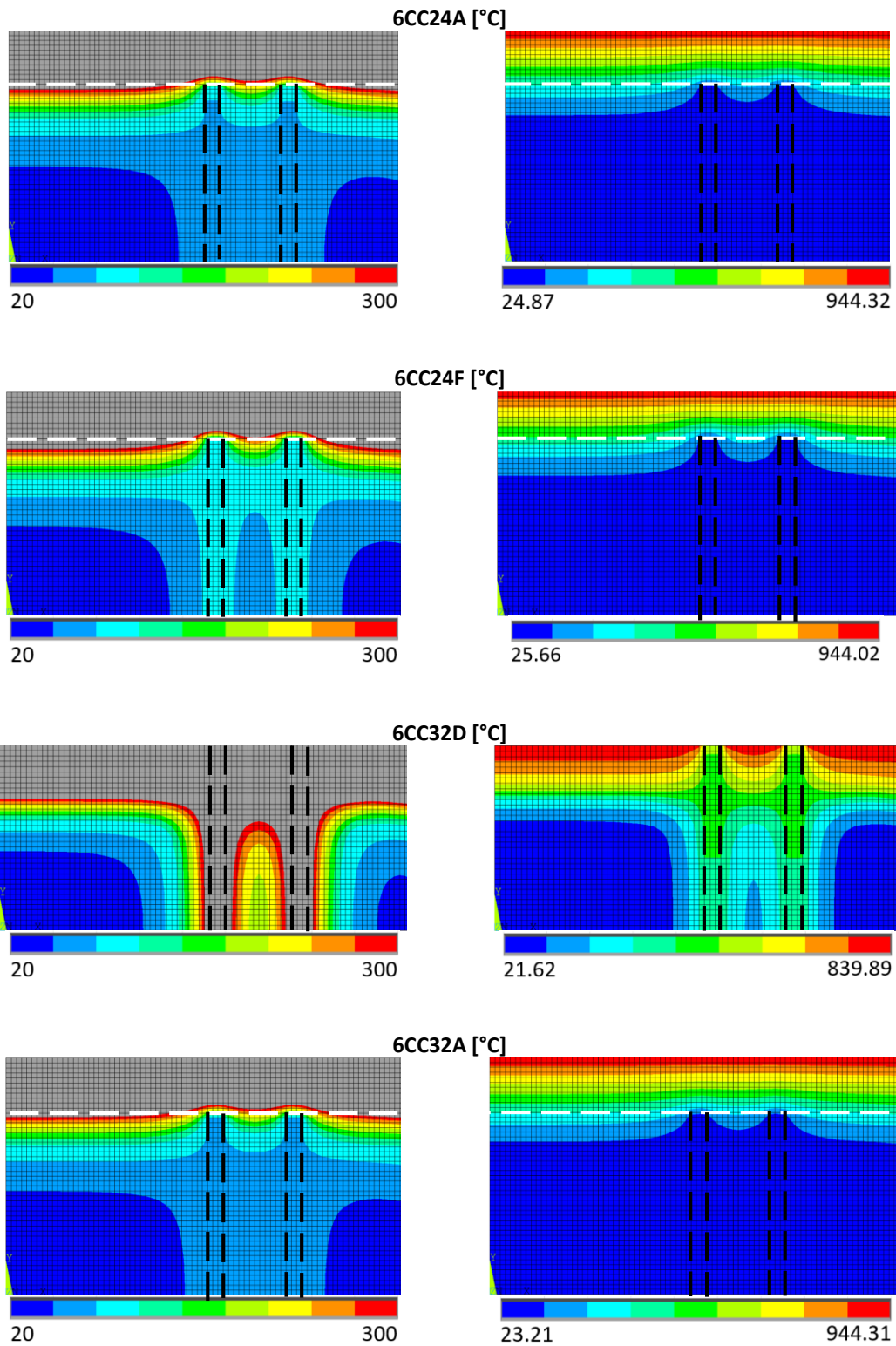
Madeira	Carregamento	Dimensões da madeira				Cavilha		Carregamento em situação de fogo	Verificação ao fogo $E_{d,fi} / A_s < f_{d,fi}$	
		E_d (kN)	t_1 e t_2 (mm)	Comp. (mm)	Altura (mm)	Diâ. (mm)	Comp. (mm)		$E_{d,fi}$ (kN)	$E_{d,fi} / A_s$ (MPa)
GL20h	10	45	380	120	6	135	6,0	0,37	14,72	
	10	45	320	120	8	135	6,0	0,37	14,72	
	10	45	320	120	10	135	6,0	0,37	14,72	
	10	45	456	120	12	135	6,0	0,37	14,72	
	15	45	380	120	6	135	9,0	0,56	14,72	
	15	45	400	120	8	135	9,0	0,56	14,72	
	15	45	420	120	10	135	9,0	0,56	14,72	
	15	45	456	120	12	135	9,0	0,56	14,72	
	20	45	440	120	6	135	12,0	0,74	14,72	
	20	45	400	120	8	135	12,0	0,74	14,72	
	20	45	420	120	10	135	12,0	0,74	14,72	
	20	45	576	120	12	135	12,0	0,74	14,72	
GL24h	10	45	380	120	6	135	6,0	0,37	17,66	
	10	45	320	120	8	135	6,0	0,37	17,66	
	10	45	320	120	10	135	6,0	0,37	17,66	
	10	45	336	120	12	135	6,0	0,37	17,66	
	15	45	380	120	6	135	9,0	0,56	17,66	
	15	45	400	120	8	135	9,0	0,56	17,66	
	15	45	420	120	10	135	9,0	0,56	17,66	
	15	45	456	120	12	135	9,0	0,56	17,66	
	20	45	440	120	6	135	12,0	0,74	17,66	
	20	45	400	120	8	135	12,0	0,74	17,66	
	20	45	420	120	10	135	12,0	0,74	17,66	
	20	45	456	120	12	135	12,0	0,74	17,66	
GL32h	10	45	380	120	6	135	6,0	0,37	23,55	
	10	45	320	120	8	135	6,0	0,37	23,55	
	10	45	320	120	10	135	6,0	0,37	23,55	
	10	45	336	120	12	135	6,0	0,37	23,55	
	15	45	380	120	6	135	9,0	0,56	23,55	
	15	45	400	120	8	135	9,0	0,56	23,55	
	15	45	420	120	10	135	9,0	0,56	23,55	
	15	45	456	120	12	135	9,0	0,56	23,55	
	20	45	440	120	6	135	12,0	0,74	23,55	
	20	45	400	120	8	135	12,0	0,74	23,55	
	20	45	420	120	10	135	12,0	0,74	23,55	
	20	45	456	120	12	135	12,0	0,74	23,55	

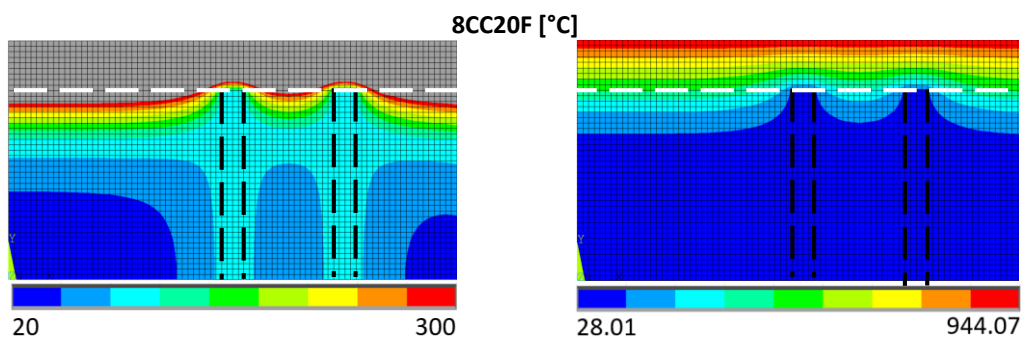
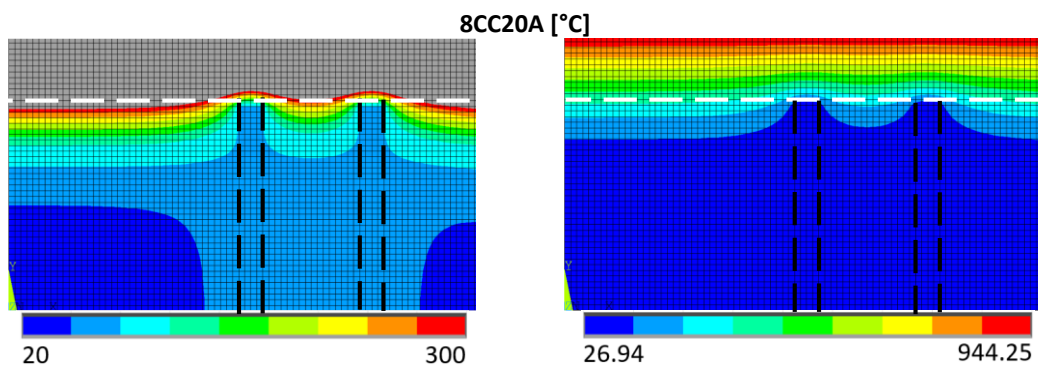
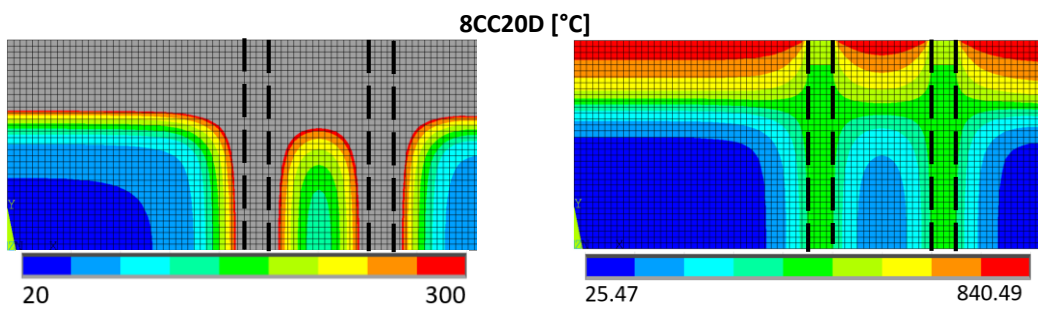
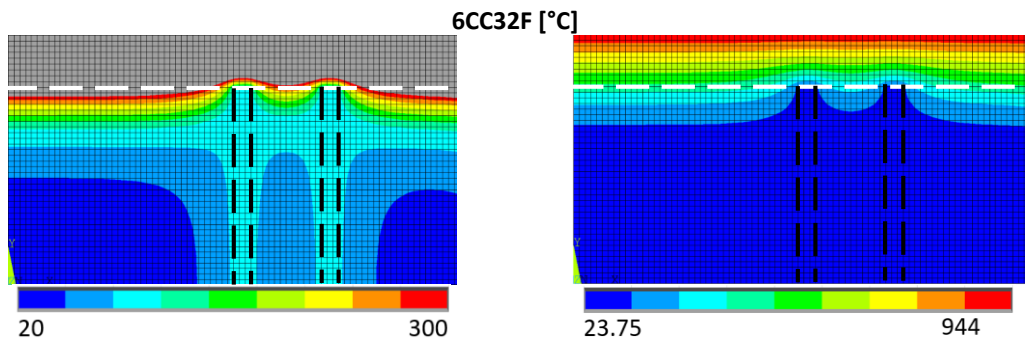
Tabela 10.3 - Tabela de dimensionamento para ligações W-W-W desprotegidas e protegidas, expostas ao fogo, para diferentes tipos de madeira, carregamentos e diâmetros de cavilha

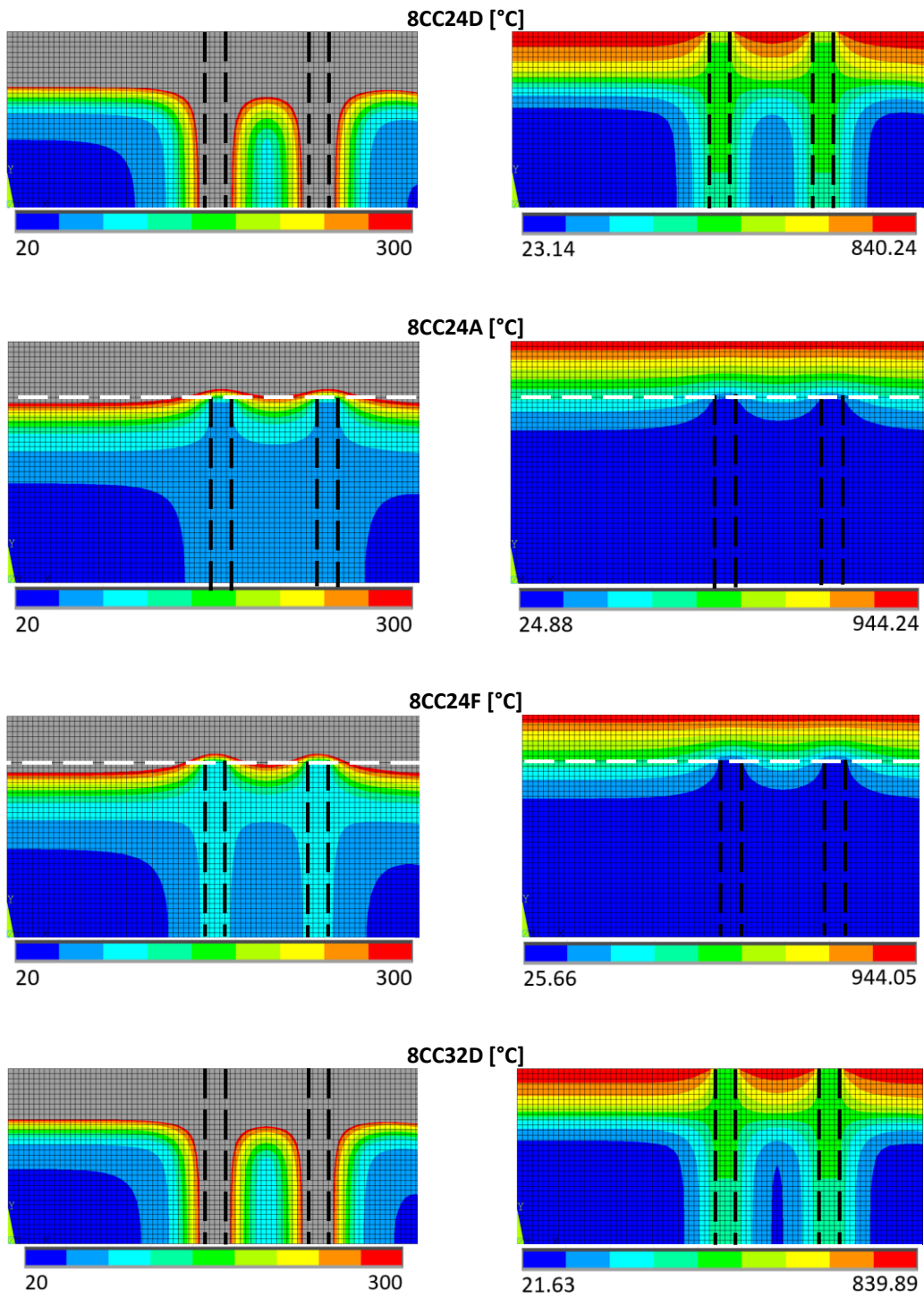
Madeira	Carregamento	Dimensões da madeira			Cavilha		Aumento espessura de madeira	Espessura gesso tipo A ou H	Espessura gesso tipo F
		E_d (KN)	t_1 e t_2 (mm)	Comp. (mm)	Altura (mm)	Diâ. (mm)			
GL20h	10	45	380	120	6	135	10,5	23	18
	10	45	320	120	8	135	10,5	23	18
	10	45	320	120	10	135	10,5	23	18
	10	45	456	120	12	135	10,5	23	18
	15	45	380	120	6	135	10,5	23	18
	15	45	400	120	8	135	10,5	23	18
	15	45	420	120	10	135	10,5	23	18
	15	45	456	120	12	135	10,5	23	18
	20	45	440	120	6	135	10,5	23	18
	20	45	400	120	8	135	10,5	23	18
	20	45	420	120	10	135	10,5	23	18
	20	45	576	120	12	135	10,5	23	18
GL24h	10	45	380	120	6	135	10,5	23	18
	10	45	320	120	8	135	10,5	23	18
	10	45	320	120	10	135	10,5	23	18
	10	45	336	120	12	135	10,5	23	18
	15	45	380	120	6	135	10,5	23	18
	15	45	400	120	8	135	10,5	23	18
	15	45	420	120	10	135	10,5	23	18
	15	45	456	120	12	135	10,5	23	18
	20	45	440	120	6	135	10,5	23	18
	20	45	400	120	8	135	10,5	23	18
	20	45	420	120	10	135	10,5	23	18
	20	45	456	120	12	135	10,5	23	18
GL32h	10	45	380	120	6	135	10,5	23	18
	10	45	320	120	8	135	10,5	23	18
	10	45	320	120	10	135	10,5	23	18
	10	45	336	120	12	135	10,5	23	18
	15	45	380	120	6	135	10,5	23	18
	15	45	400	120	8	135	10,5	23	18
	15	45	420	120	10	135	10,5	23	18
	15	45	456	120	12	135	10,5	23	18
	20	45	440	120	6	135	10,5	23	18
	20	45	400	120	8	135	10,5	23	18
	20	45	420	120	10	135	10,5	23	18
	20	45	456	120	12	135	10,5	23	18

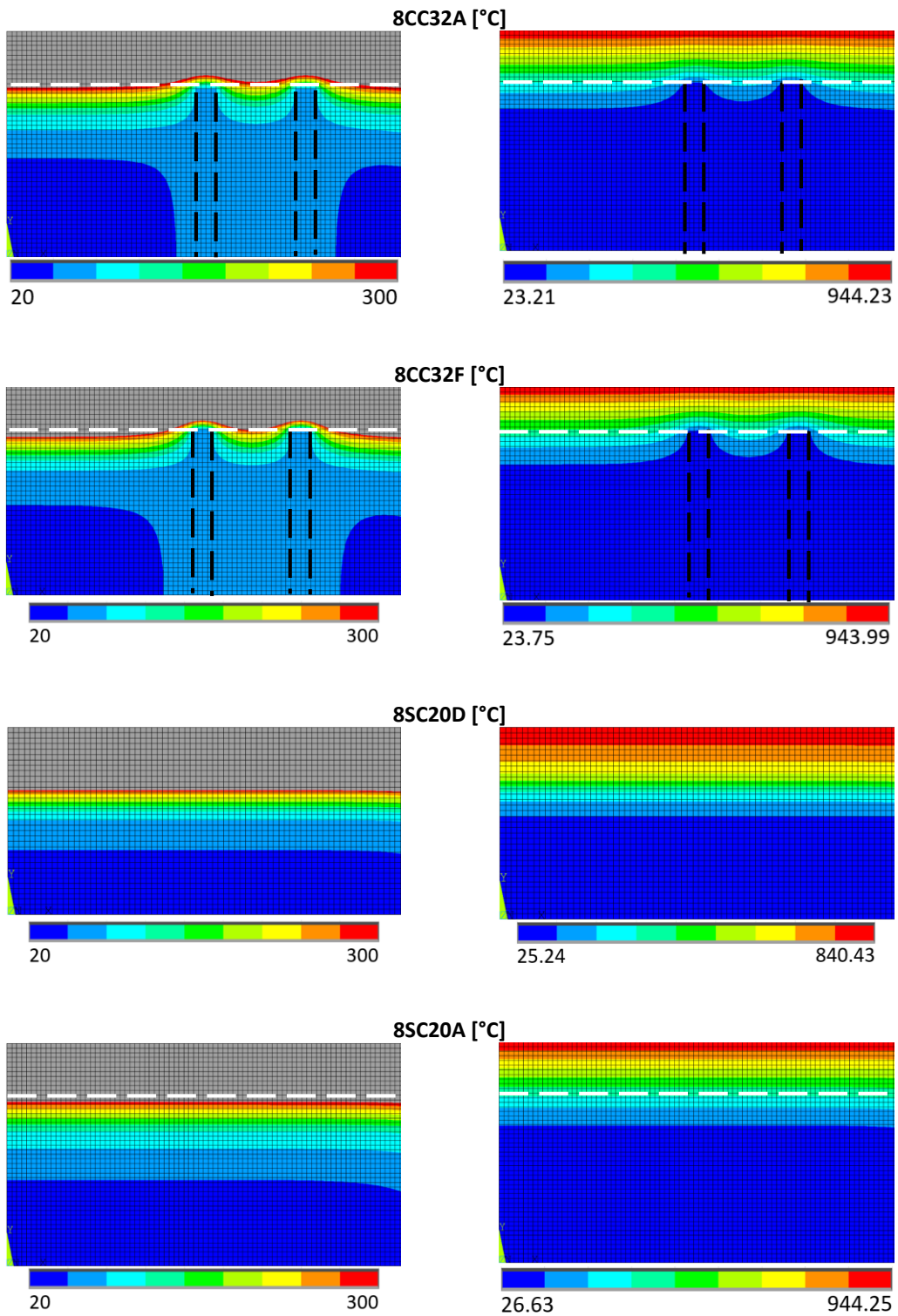
10.2 CAMPO DE TEMPERATURAS NAS LIGAÇÕES

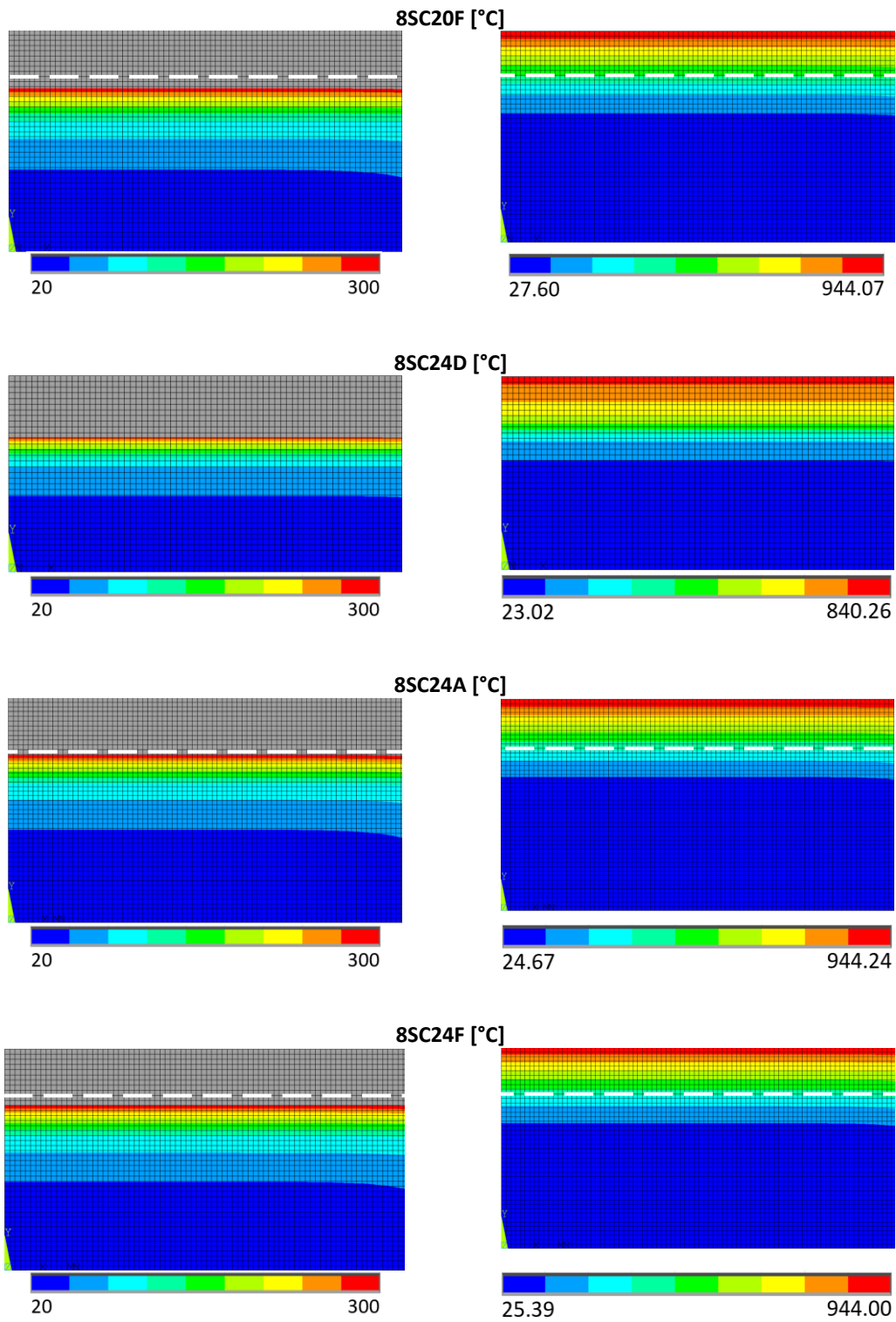


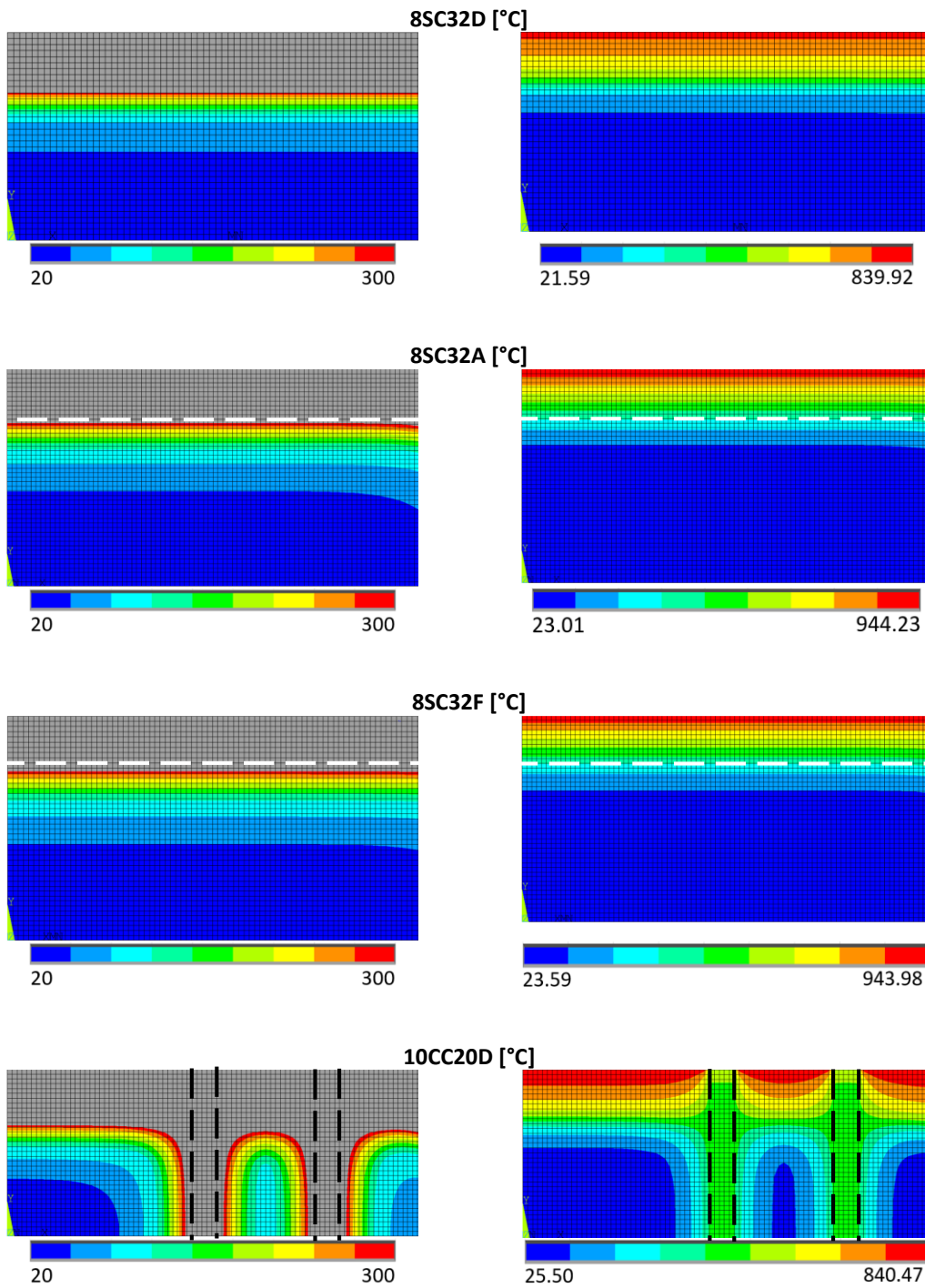


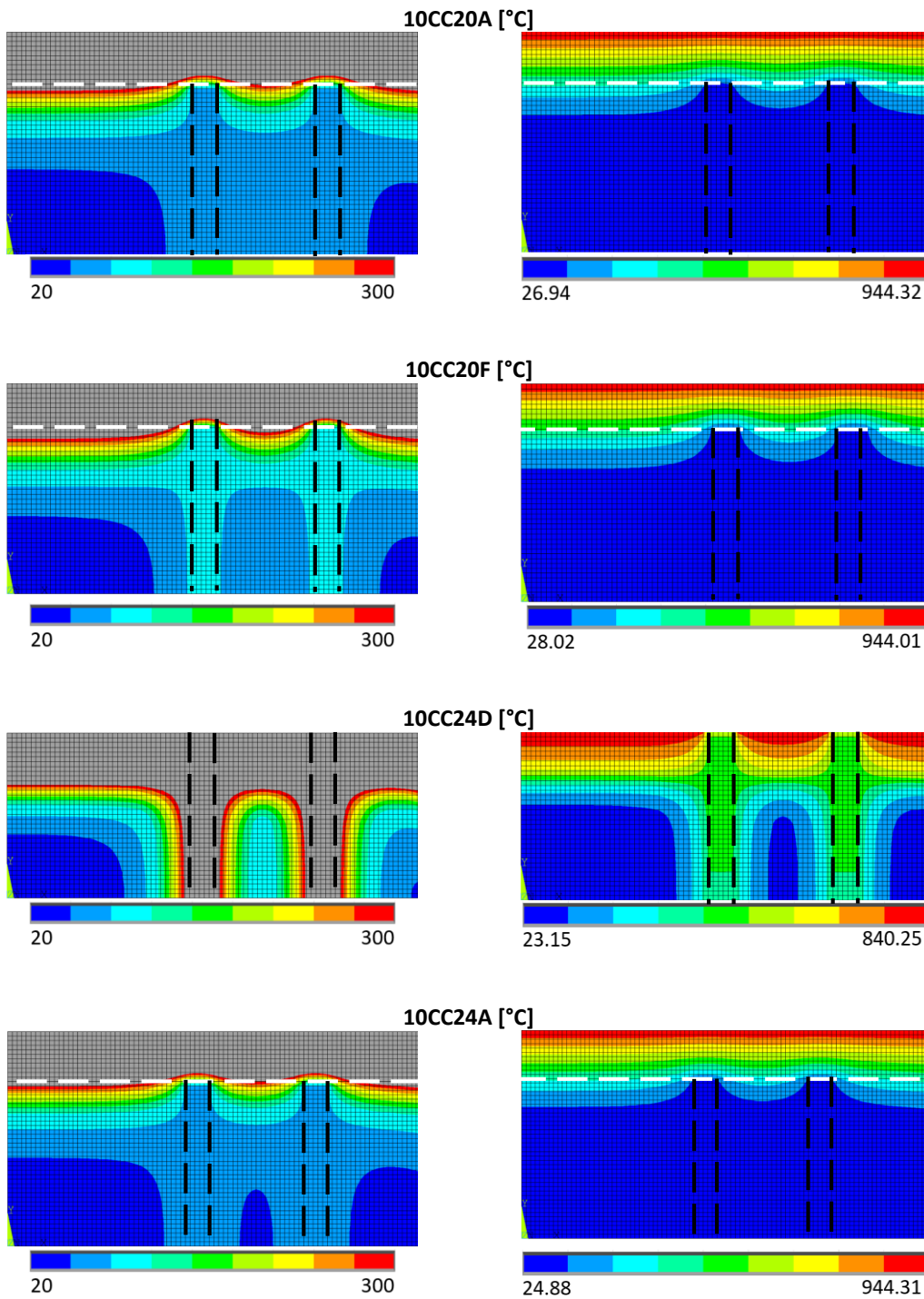


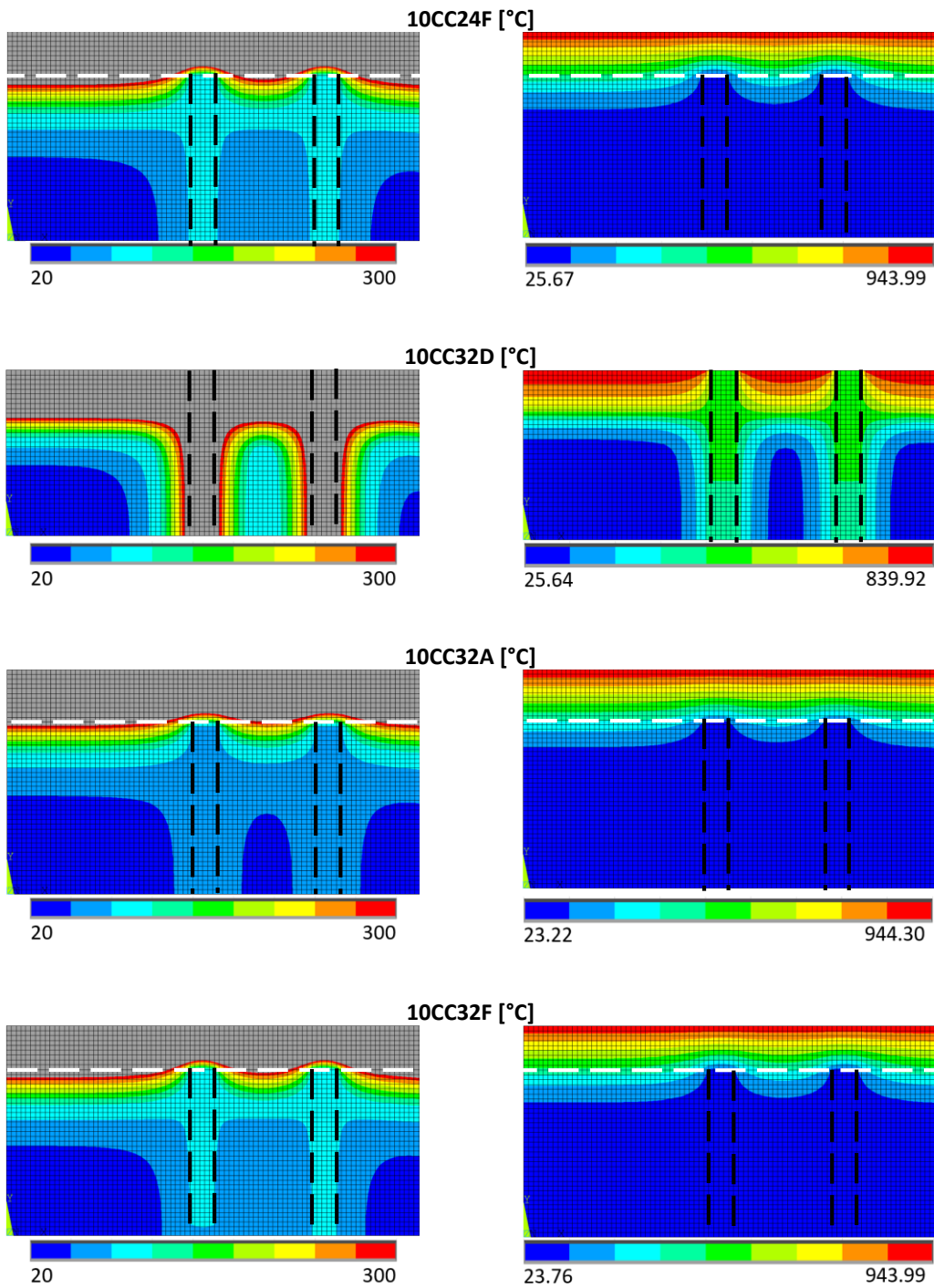


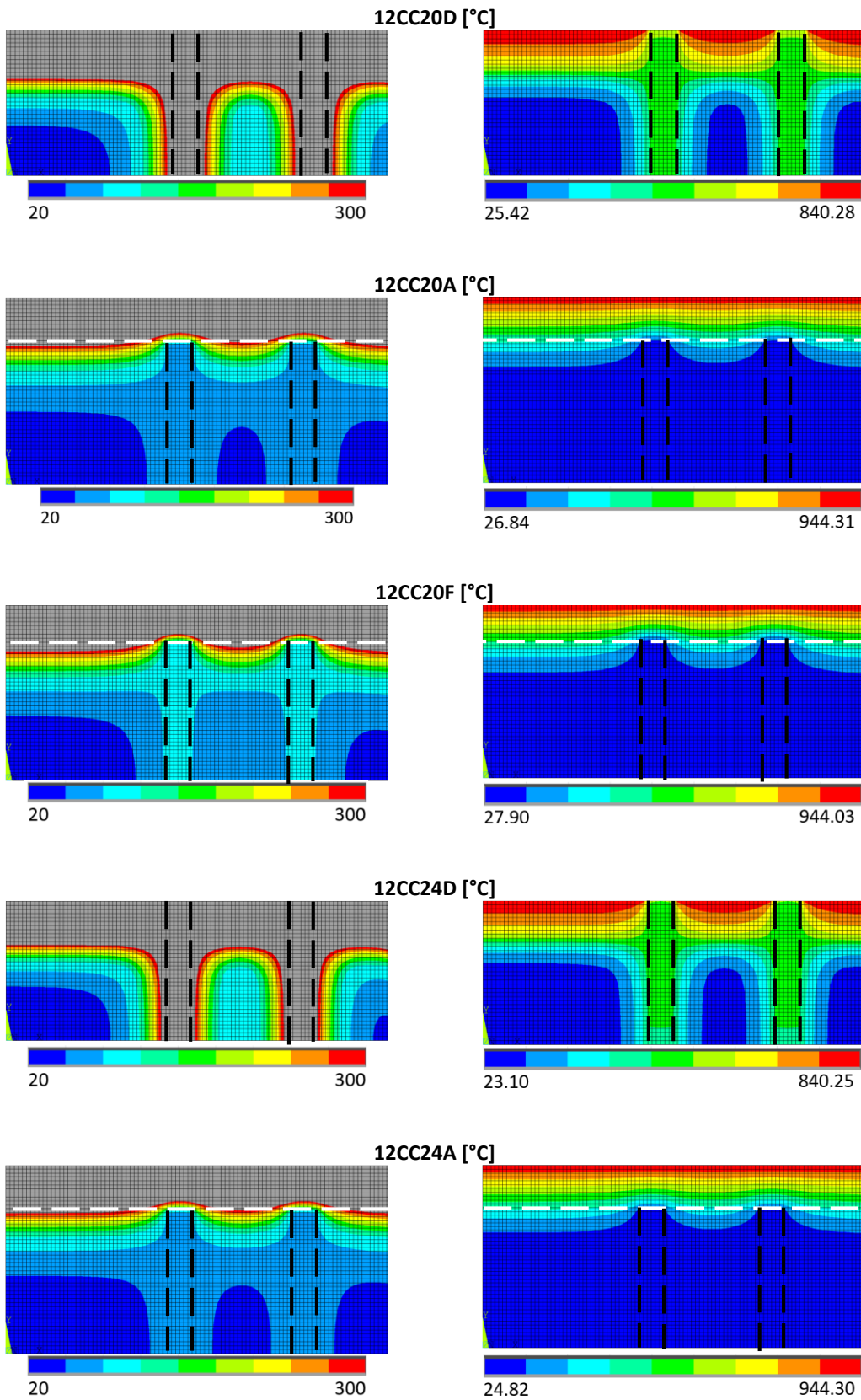


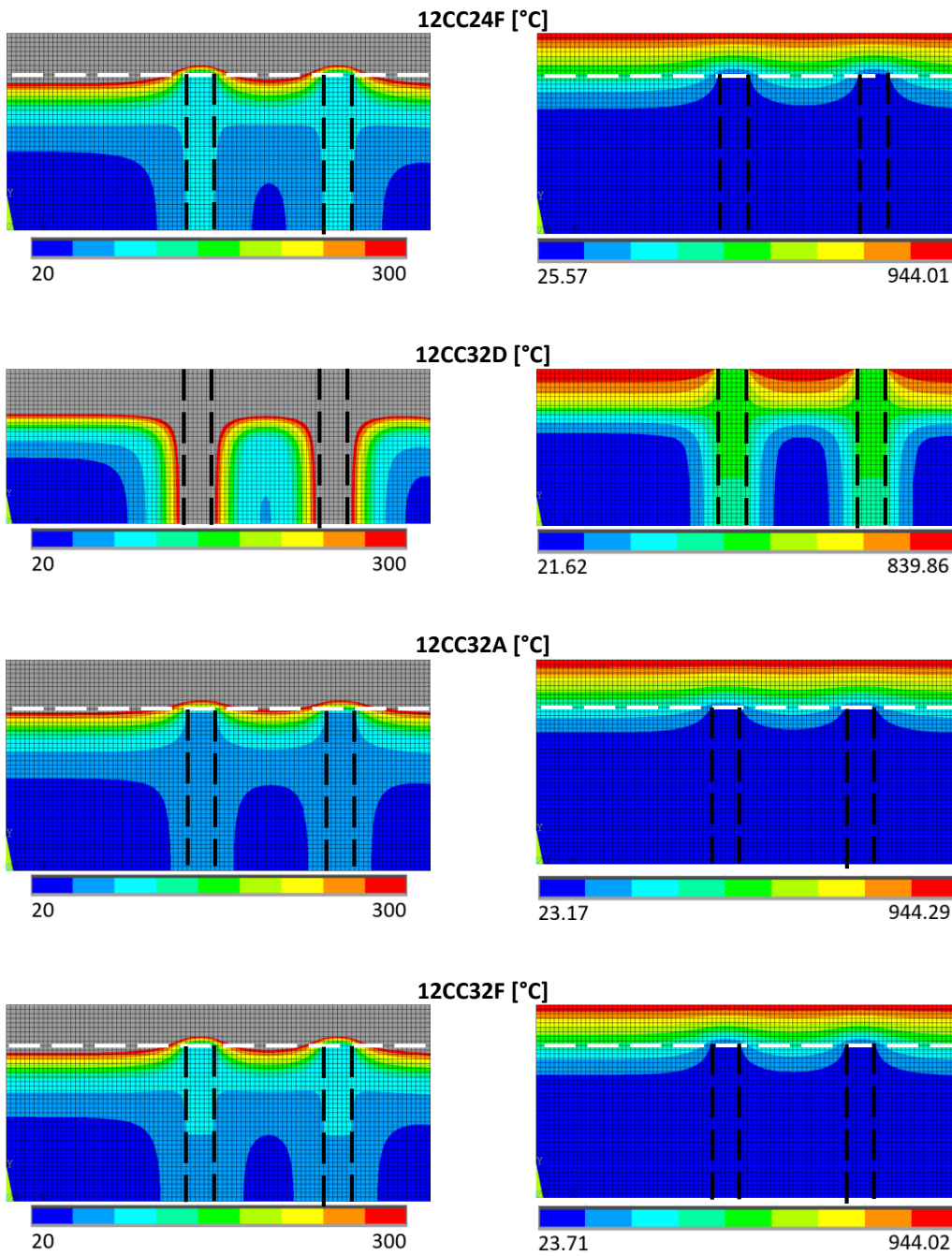












10.3 GRÁFICOS – TEMPERATURA NAS LIGAÇÕES W-W-W

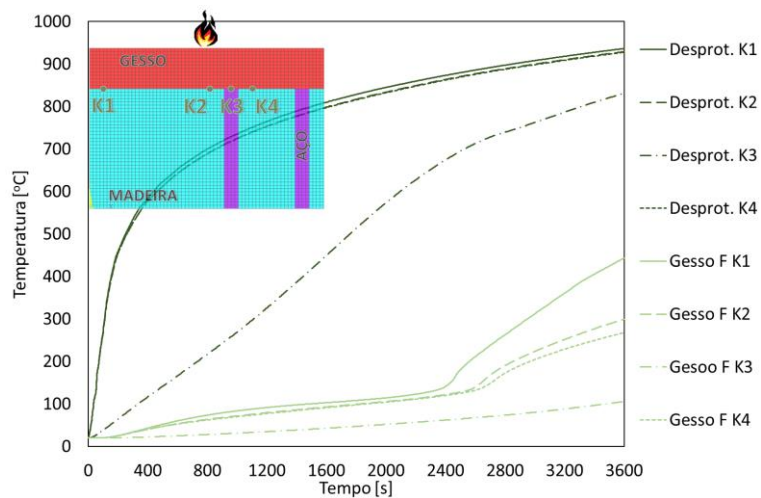


Figura 10.1 – Evolução da temperatura ao longo de 60 min, na superfície da madeira, em ligações não protegidas e protegidas com gesso tipo A, expostas ao fogo - GL20h, cavilha d=6 mm

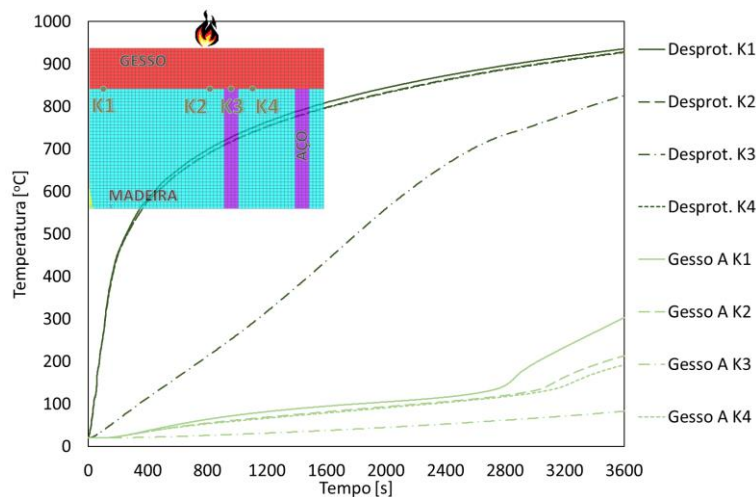


Figura 10.2 – Evolução da temperatura ao longo de 60 min, na superfície da madeira, em ligações não protegidas e protegidas com gesso tipo A, expostas ao fogo - GL24h, cavilha d=6 mm

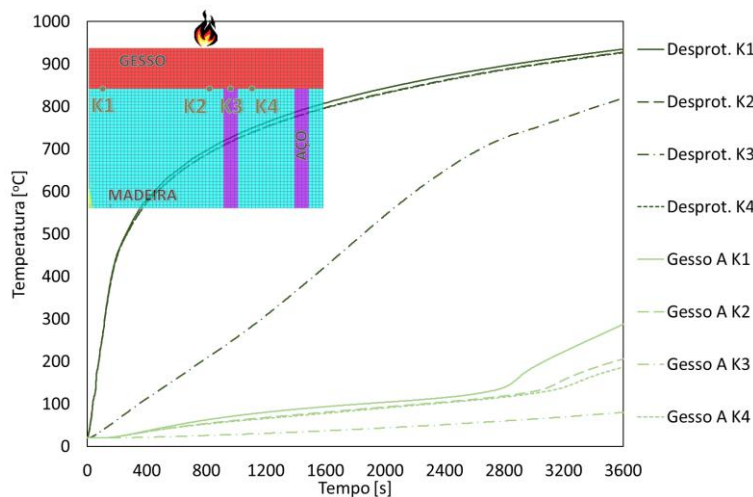


Figura 10.3 – Evolução da temperatura ao longo de 60 min, na superfície da madeira, em ligações não protegidas e protegidas com gesso tipo A, expostas ao fogo – GL32h, cavilha d=6 mm

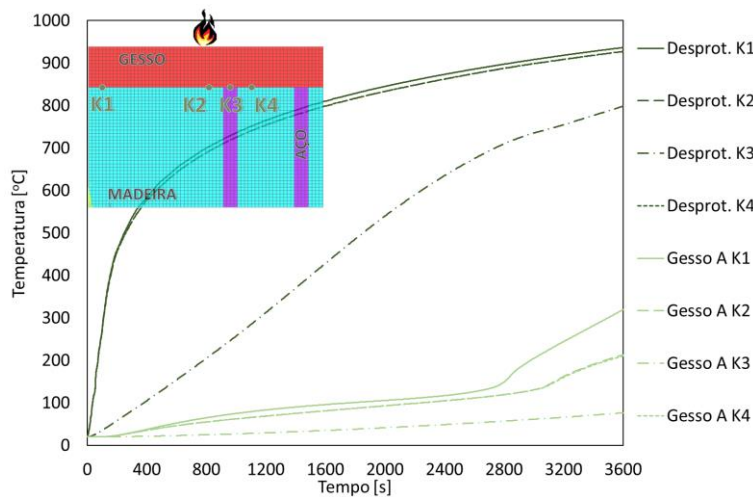


Figura 10.4 – Evolução da temperatura ao longo de 60 min, na superfície da madeira, em ligações não protegidas e protegidas com gesso tipo A, expostas ao fogo - GL20h, cavilha d=12 mm

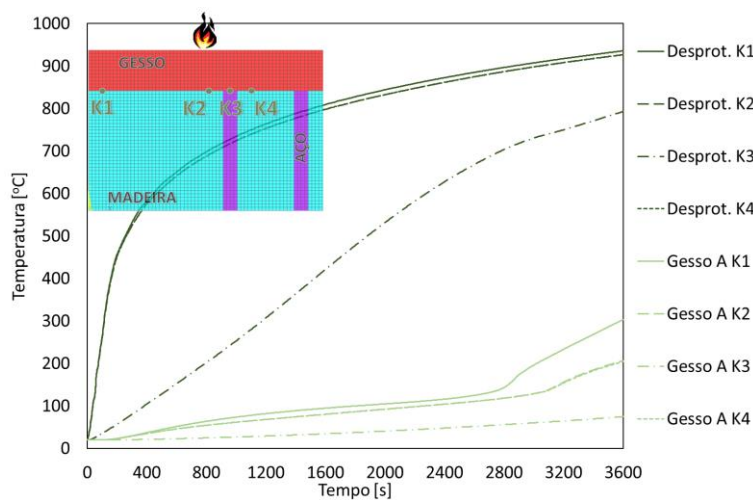


Figura 10.5 – Evolução da temperatura ao longo de 60 min, na superfície da madeira, em ligações não protegidas e protegidas com gesso tipo A, expostas ao fogo - GL24h, cavilha d=12 mm

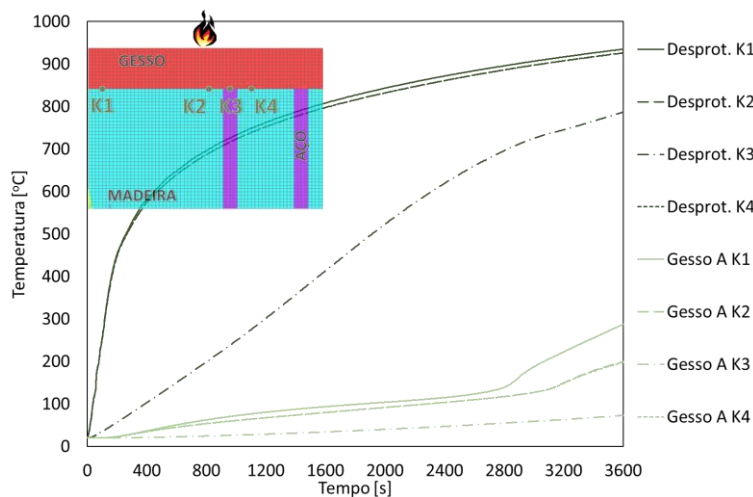


Figura 10.6 – Evolução da temperatura ao longo de 60 min, na superfície da madeira, em ligações não protegidas e protegidas com gesso tipo A, expostas ao fogo – GL32h, cavilha d=12 mm

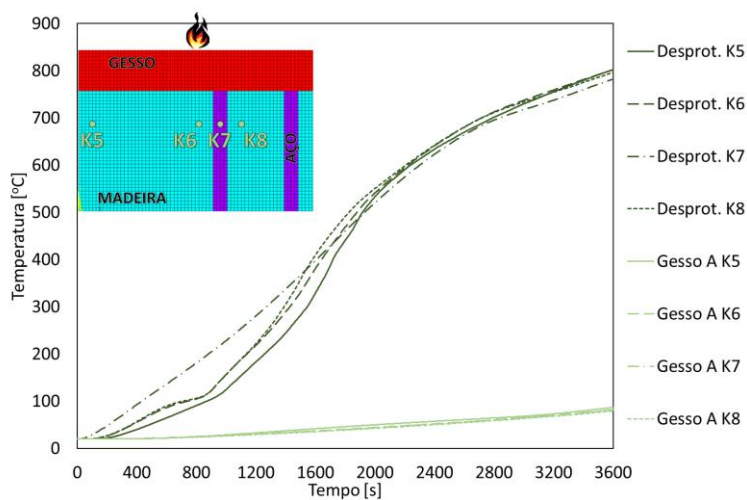


Figura 10.7 – Evolução da temperatura ao longo de 60 min, no interior da madeira em ligações não protegidas e protegidas com gesso tipo A, expostas ao fogo – GL20h, cavilha d=6 mm

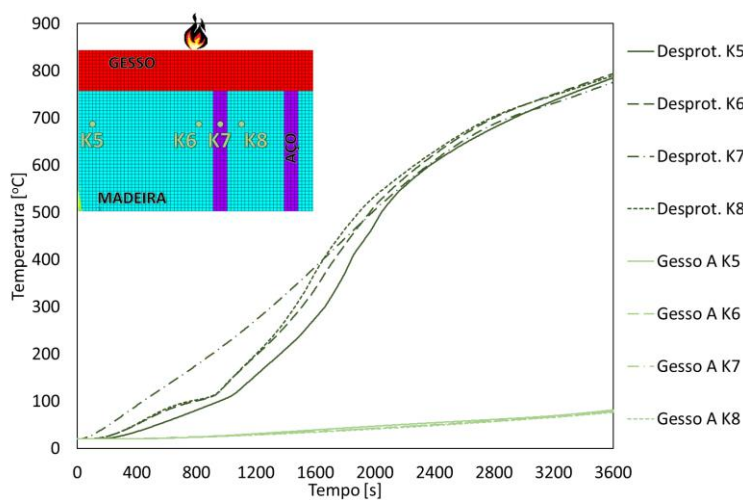


Figura 10.8 – Evolução da temperatura ao longo de 60 min, no interior da madeira em ligações não protegidas e protegidas com gesso tipo A, expostas ao fogo – GL24h, cavilha d=6 mm

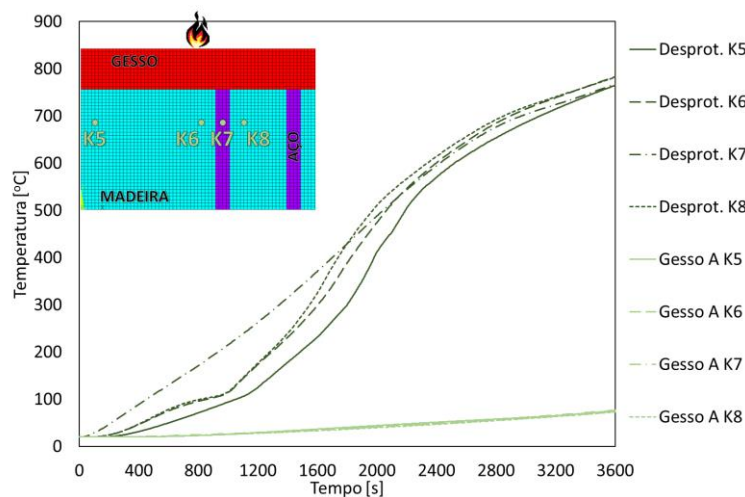


Figura 10.9 – Evolução da temperatura ao longo de 60 min, no interior da madeira em ligações não protegidas e protegidas com gesso tipo A, expostas ao fogo – GL32h, cavilha d=6 mm

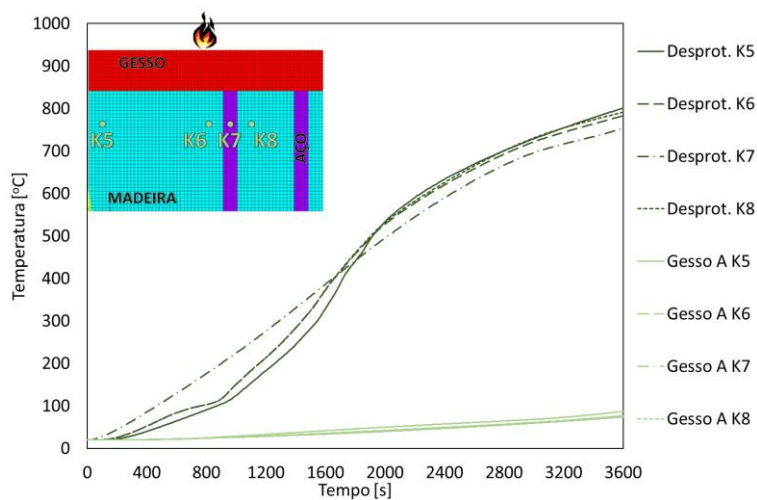


Figura 10.10 – Evolução da temperatura ao longo de 60 min, no interior da madeira em ligações não protegidas e protegidas com gesso tipo A, expostas ao fogo – GL20h, cavilha d=12 mm

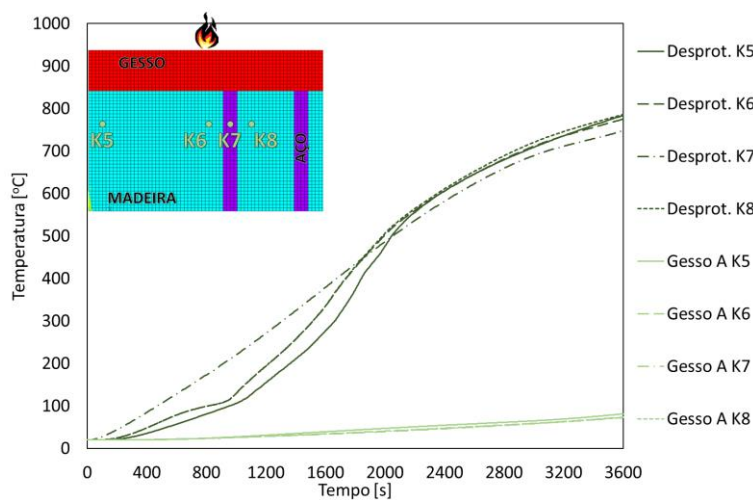


Figura 10.11 – Evolução da temperatura ao longo de 60 min, no interior da madeira em ligações não protegidas e protegidas com gesso tipo A, expostas ao fogo – GL24h, cavilha d=12 mm

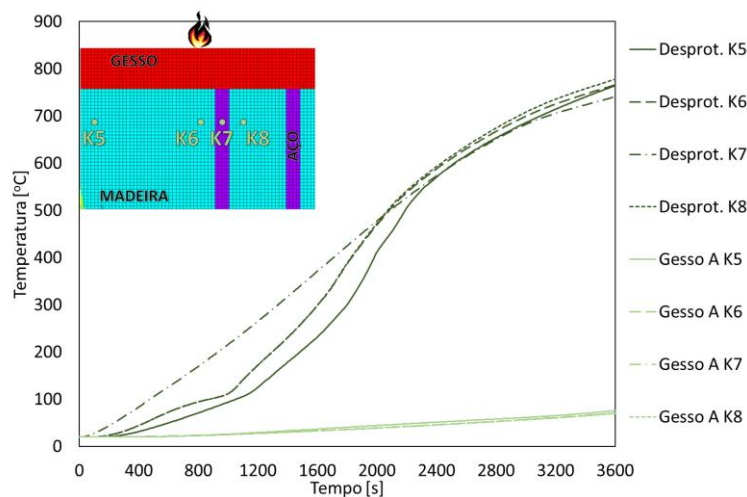


Figura 10.12 – Evolução da temperatura ao longo de 60 min, no interior da madeira em ligações não protegidas e protegidas com gesso tipo A, expostas ao fogo – GL32h, cavilha d=12 mm

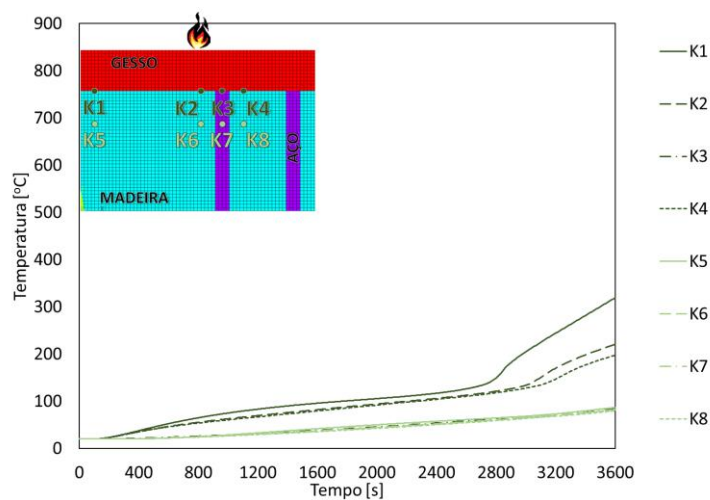


Figura 10.13 – Evolução da temperatura ao longo de 60 min, à superfície da madeira em ligações protegidas expostas ao fogo – GL20h, cavilha d=6 mm

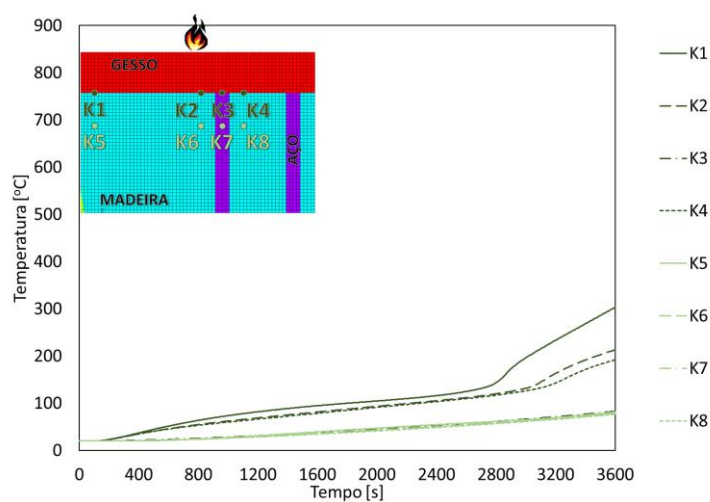


Figura 10.14 – Evolução da temperatura ao longo de 60 min, à superfície da madeira em ligações protegidas expostas ao fogo – GL24h, cavilha d=6 mm

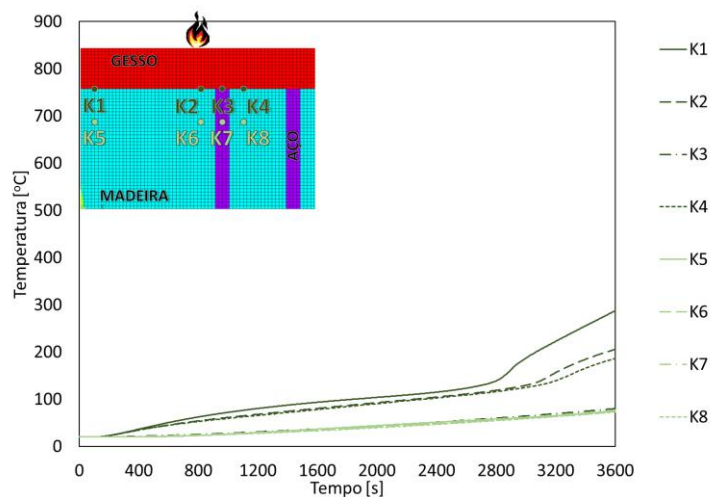


Figura 10.15 – Evolução da temperatura ao longo de 60 min, à superfície da madeira em ligações protegidas expostas ao fogo – GL32h, cavilha d=6 mm

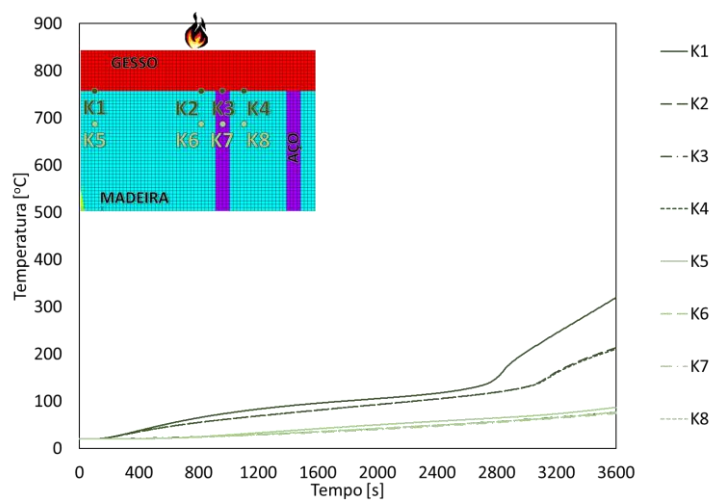


Figura 10.16 – Evolução da temperatura ao longo de 60 min, à superfície da madeira em ligações protegidas expostas ao fogo – GL20h, cavilha d=12 mm

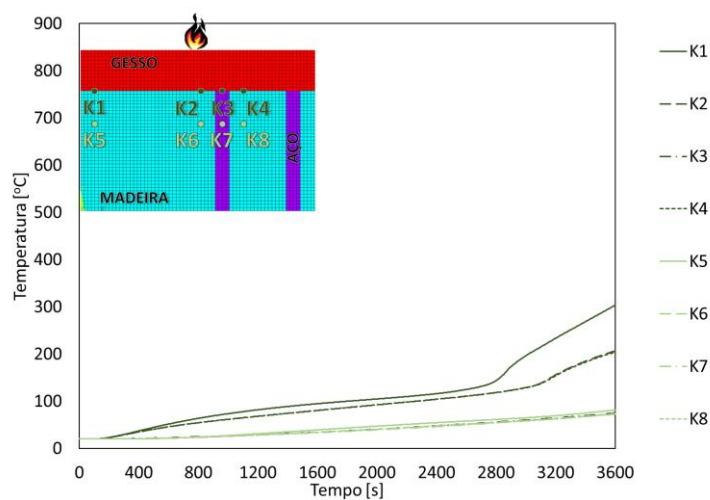


Figura 10.17 – Evolução da temperatura ao longo de 60 min, à superfície da madeira em ligações protegidas expostas ao fogo – GL24h, cavilha d=12 mm

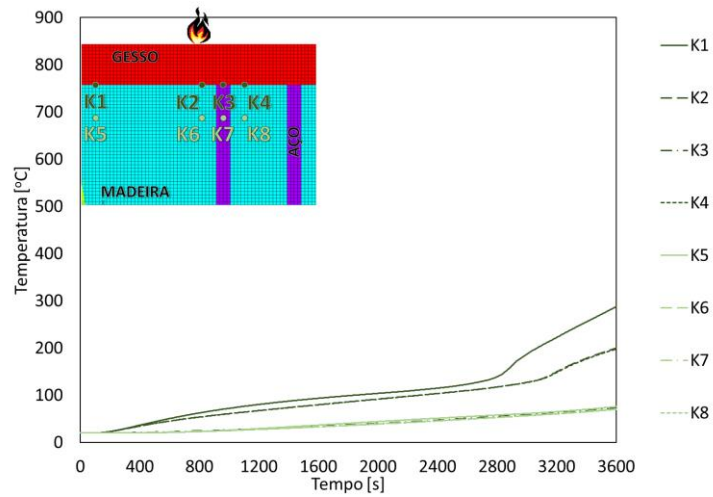


Figura 10.18 – Evolução da temperatura ao longo de 60 min, à superfície da madeira em ligações protegidas expostas ao fogo – GL32h, cavilha d=12 mm

10.4 GRÁFICOS – TEMPERATURA NAS CAVILHAS

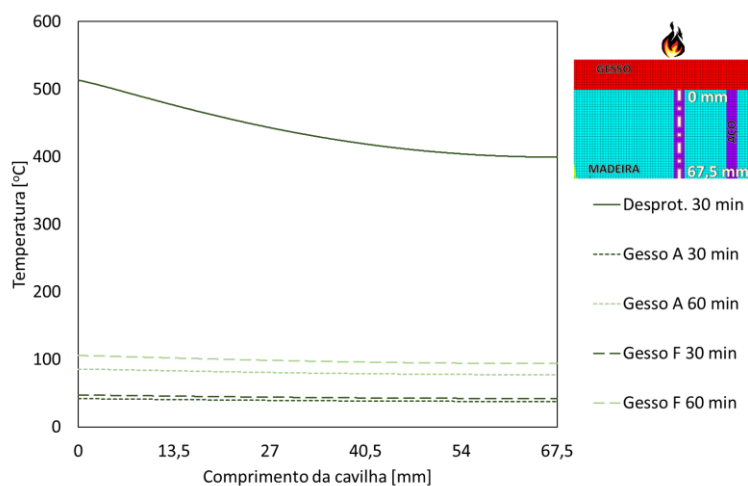


Figura 10.19 – Temperatura ao longo do comprimento das cavilhas, após exposição ao fogo – GL20h e d=6 mm

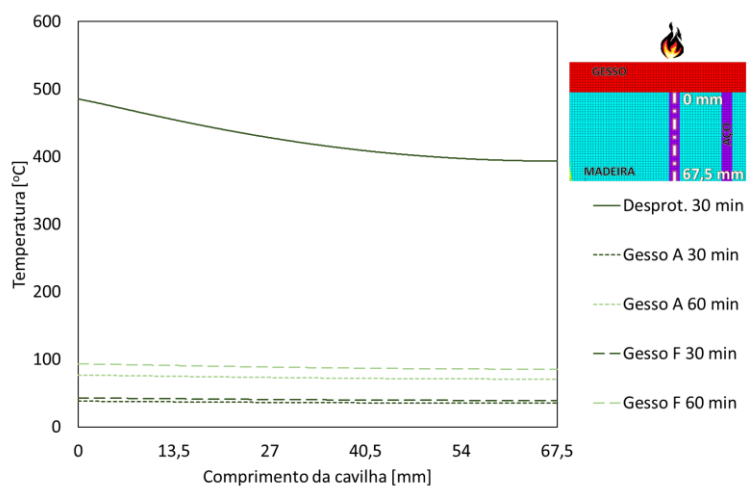


Figura 10.20 – Temperatura ao longo do comprimento das cavilhas, após exposição ao fogo – GL20h e d=12 mm

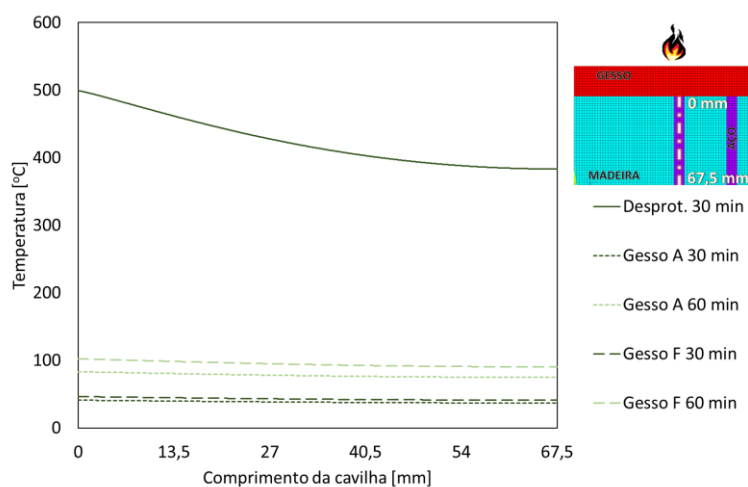


Figura 10.21 – Temperatura ao longo do comprimento das cavilhas, após exposição ao fogo – GL24h e d=6 mm

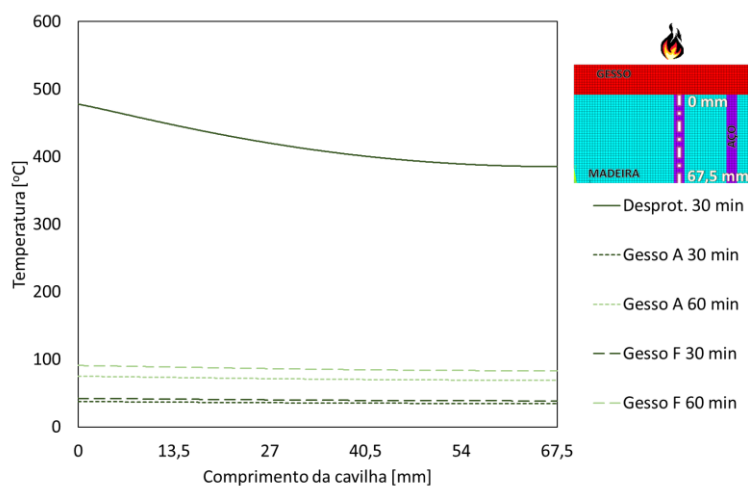


Figura 10.22 – Temperatura ao longo do comprimento das cavilhas, após exposição ao fogo – GL24h e d=12 mm

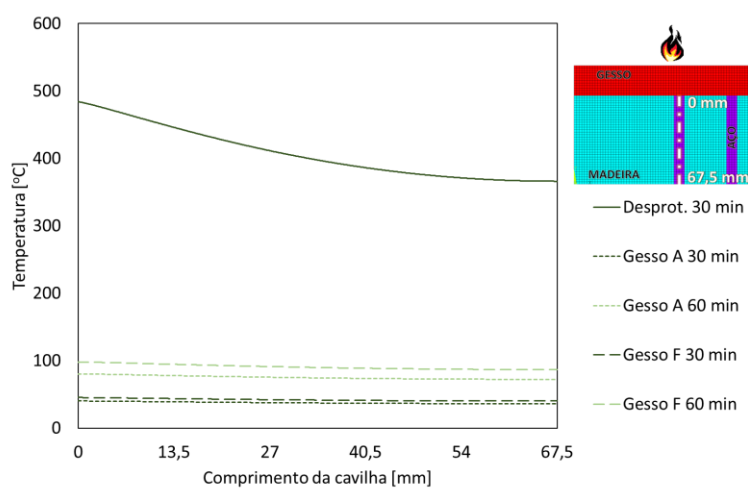


Figura 10.23 – Temperatura ao longo do comprimento das cavilhas, após exposição ao fogo – GL32h e d=6 mm

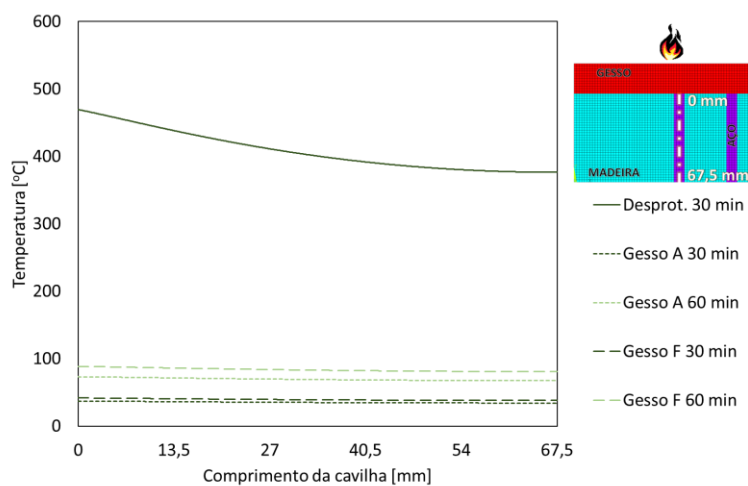


Figura 10.24 – Temperatura ao longo do comprimento das cavilhas, após exposição ao fogo – GL32h e d=12 mm

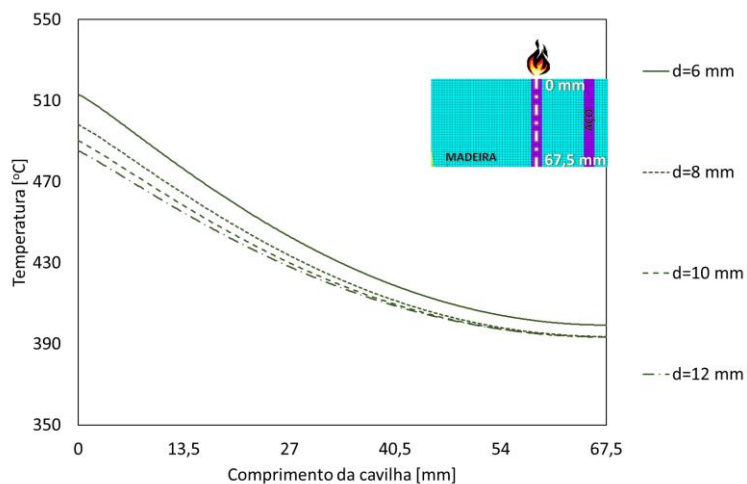


Figura 10.25 – Temperatura ao longo do comprimento das cavilhas, após 30 min de exposição ao fogo – GL20h não protegida

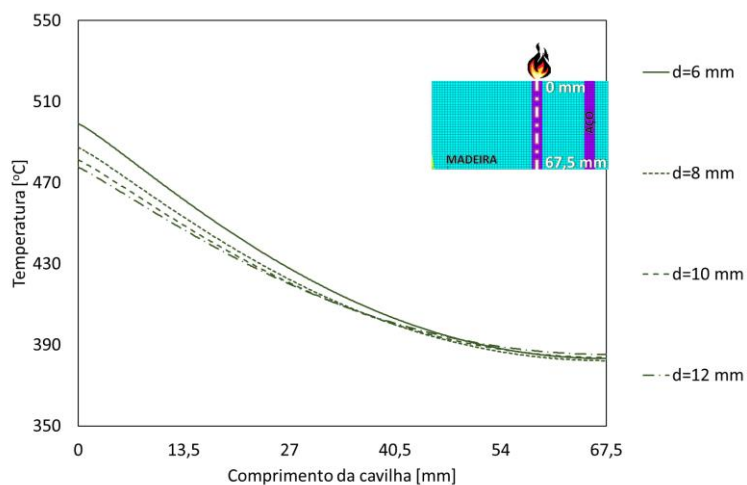


Figura 10.26 – Temperatura ao longo do comprimento das cavilhas, após 30 min de exposição ao fogo – GL24h não protegida

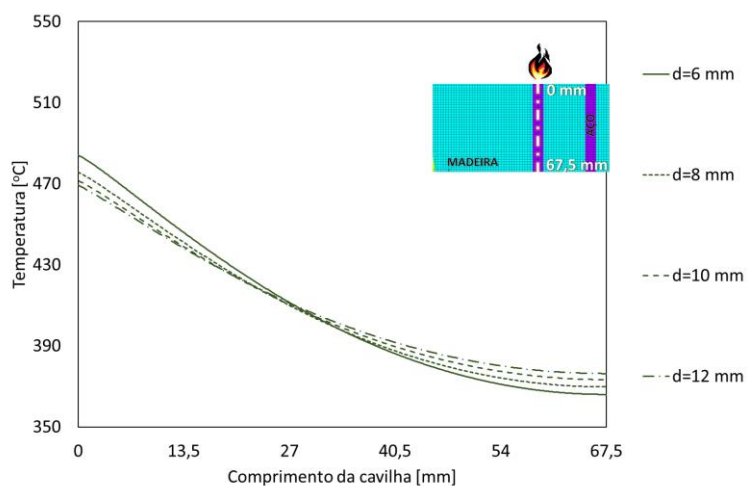


Figura 10.27 – Temperatura ao longo do comprimento das cavilhas, após 30 min de exposição ao fogo – GL32h não protegida

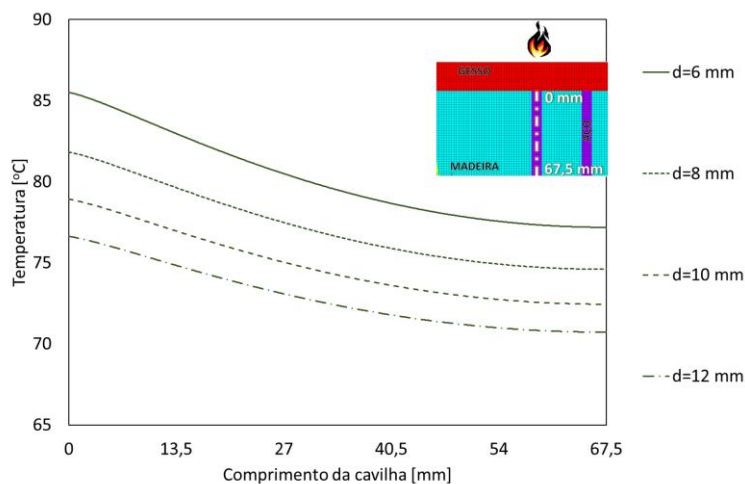


Figura 10.28 – Temperatura ao longo do comprimento das cavilhas, após 60 min de exposição ao fogo – GL20h protegida com gesso tipo A

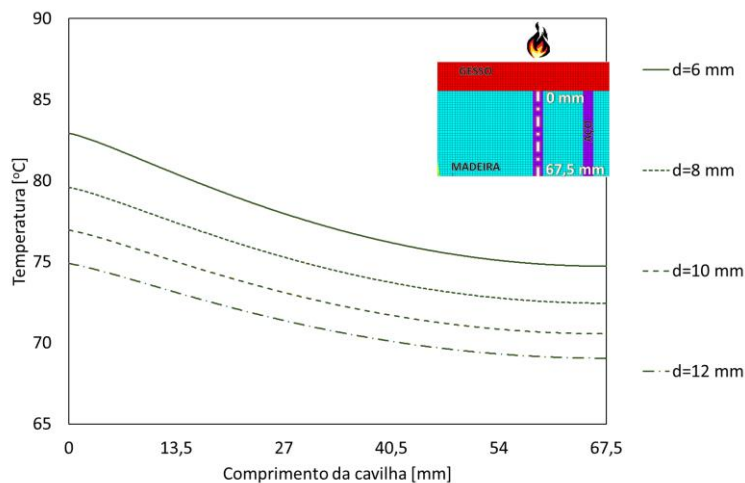


Figura 10.29 – Temperatura ao longo do comprimento das cavilhas, após 60 min de exposição ao fogo – GL24h protegida com gesso tipo A

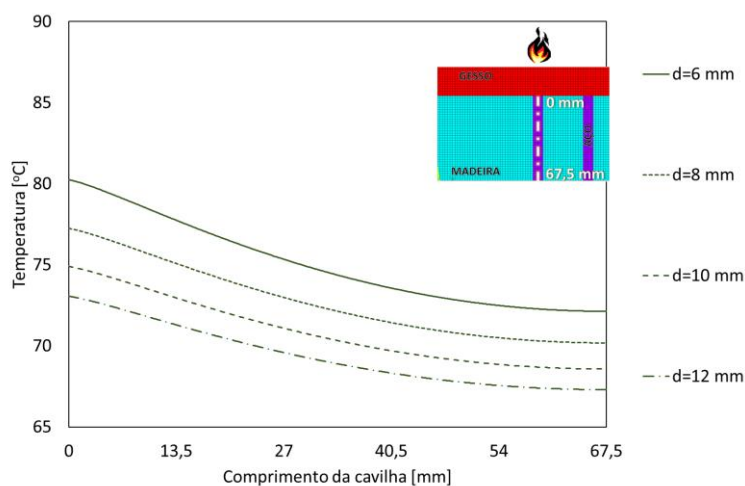


Figura 10.30 – Temperatura ao longo do comprimento das cavilhas, após 60 min de exposição ao fogo – GL32h protegida com gesso tipo A