

Ligações Aço-Madeira com chapa metálica central e cavilhas, com ou sem proteção, à temperatura ambiente e sob ação do fogo

Rúben David Almeida Rodrigues Martins

Dissertação apresentada à

Escola Superior de Tecnologia e Gestão

Instituto Politécnico de Bragança

para obtenção do grau de Mestre em

Engenharia Industrial

Ramo de Engenharia Mecânica

Este trabalho foi efetuado sob orientação de:

Professora Doutora Elza Maria Morais Fonseca

junho 2018



Agradecimentos

Agradeço em primeiro lugar a todos os docentes do Instituto Politécnico de Bragança pela formação e ajuda, e em especial à orientadora desta tese, Professora Elza Maria Morais Fonseca pelo apoio, disponibilidade, ideias e compreensão das dificuldades durante a elaboração desta tese.

Um enorme agradecimento a todos os amigos por todas as ajudas, ideias e atenção ao longo de toda a vida universitária, em especial ao Miguel, Sérgio, Pedro, Vítor e Cláudia.

Por último, e não menos importante, à minha irmã, mãe e pai por toda a motivação e apoio, e por terem tornado possível eu chegar a este ponto da minha vida.

Resumo

O principal objetivo deste trabalho é estudar o comportamento de ligações (protegidas e não protegidas) do tipo madeira-aço-madeira (M-A-M) sujeitas a corte duplo, com cavilhas como ligadores e uma placa de aço como membro central. As ligações com cavilhas são utilizadas essencialmente para transmitir cargas elevadas. Para cada ligação em estudo foram utilizados diferentes diâmetros de ligadores e diferentes forças aplicadas à temperatura ambiente ou em situação de exposição ao fogo. Foram admitidas cargas de 25, 50, 75 e 100 kN, com diâmetros de cavilhas de 10, 12, 14 e 16 mm. A espessura dos elementos de madeira variou entre 45, 50, 55 e 60 mm, assim como a placa central de aço com espessuras de 5, 6, 8 e 10 mm. O número de ligadores varia de ligação para ligação, bem como a sua disposição, sendo que no presente estudo considerou-se a disposição dos ligadores em uma e duas filas. A ação do fogo na ligação foi imposta pela curva normalizada ISO834. Os elementos de madeira são constituídos por madeira do tipo laminada colada de bétula amarela com características equivalentes ao tipo GL28H. Nas ligações com proteção foram considerados três tipos de gesso de forma a obter um melhor isolamento da ligação em situação de exposição a um incêndio. Foram utilizadas as equações simplificadas presentes no Eurocódigo 5, parte 1-1 e parte 1-2, para obtenção dos resultados analíticos tanto para a resistência mecânica da ligação como para a resistência térmica em situação de fogo. Foram desenvolvidos modelos numéricos para análise mecânica e análise térmica, e assim permitirem verificar o efeito dos elementos ligadores, da placa de aço e das placas de gesso no efeito do avanço da camada carbonizada.

Palavras-chave: Ligação M-A-M, madeira, aço, gesso, cavilha, camada carbonizada, fogo, corte duplo.

Abstract

The main objective of this work is to present wood-steel-wood (W-S-W) connections (with or without insulation) in double-shear, joined by steel dowel fasteners and a steel plate as the central member. Joints with dowels are used in timber construction to transmit high loads. For each studied connection, different dowel diameters and external applied tensile loads at ambient temperature and in fire situation shall be taken in account. Were analysed tensile loads of 25, 50, 75 and 100 kN, dowels diameters of 10, 12, 14 and 16 mm. The wooden board thickness was equal to 45, 50, 55 and 60 mm and steel plate thickness of 5, 6, 8 and 10 mm. The number of dowels will vary from connection to connection and vary in their disposition. The studied dowels were rearranged in two rows or in only one. The connection behaviour was studied when exposed to the standard fire curve ISO834. In the wood plates will be used a glue laminated wood, as yellow birch, with characteristics equals to GL28H. In W-S-W protected connections three types of gypsum will be used in order to obtain a better insulation. Using the proposed simplified equations from Eurocode 5, part 1-1 and part1-2, all analytical results were obtained at ambient and high temperature. A numerical structural and thermal analysis was used to verify the effect of the steel dowels, steel plate and gypsum in the wood charring rate evolution.

Keywords: W-S-W connection, wood, steel, gypsum, dowel, char layer, fire, double shear.

Conteúdo

| | |
|---|----|
| 1. Introdução..... | 2 |
| 1.1. Objetivos..... | 8 |
| 1.2. Apresentação sumária dos capítulos | 9 |
| 2. Propriedades dos materiais..... | 12 |
| 2.1. Madeira | 12 |
| 2.1.1. Propriedades mecânicas..... | 13 |
| 2.1.1.1. Madeira do tipo GL28H | 14 |
| 2.1.2. Propriedades térmicas..... | 16 |
| 2.1.2.1. Condutividade térmica | 16 |
| 2.1.2.2. Calor específico..... | 17 |
| 2.1.2.3. Massa volúmica..... | 18 |
| 2.2. Aço..... | 18 |
| 2.2.1. Propriedades mecânicas..... | 19 |
| 2.2.2. Propriedades térmicas..... | 19 |
| 2.2.2.1. Calor específico..... | 20 |
| 2.2.2.2. Condutividade térmica | 20 |
| 3. Dimensionamento da ligação à temperatura ambiente..... | 22 |
| 3.1. Método de cálculo..... | 22 |
| 3.2. Resultados obtidos | 26 |
| 4. Dimensionamento da ligação para altas temperaturas | 30 |
| 4.1. Materiais isolantes | 31 |
| 4.1.1. Gesso | 32 |
| 4.2. Método de cálculo..... | 32 |

| | | |
|--------|---|----|
| 4.2.1. | Ligações não protegidas | 33 |
| 4.2.2. | Ligações protegidas | 34 |
| 4.2.3. | Regras adicionais de cálculo | 35 |
| 5. | Análise de elementos finitos para ligações M-A-M à temperatura ambiente | 38 |
| 6. | Análise de elementos finitos para ligações M-A-M a altas temperaturas | 48 |
| 6.1. | Ligações não protegidas..... | 49 |
| 6.2. | Ligações protegidas | 54 |
| 7. | Análise de resultados e conclusões | 65 |

Lista de símbolos

Letras latinas maiúsculas

| | |
|----------------|---|
| A_s | Secção transversal da ligação (mm^2) |
| $E_{d,fi}$ | Tensão axial de projeto para situação de incêndio (N/mm^2) |
| E_L | Módulo de elasticidade na direção longitudinal, madeira (N/mm^2) |
| E_R | Módulo de elasticidade na direção radial, madeira (N/mm^2) |
| E_T | Módulo de elasticidade na direção tangencial, madeira (N/mm^2) |
| $E_{0,medio}$ | Módulo de elasticidade médio paralelo à fibra, madeira (N/mm^2) |
| $E_{0,0.05}$ | Módulo de elasticidade paralelo à fibra, madeira (N/mm^2) |
| $E_{90,medio}$ | Módulo de elasticidade médio perpendicular à fibra, madeira (N/mm^2) |
| F_d | Carga axial aplicada ao elemento de madeira (N) |
| $F_{v,Rd}$ | Valor de projeto da resistência por plano de corte e por ligador (N) |
| $F_{v,Rk}$ | Capacidade de carga por plano de corte e por ligador (N) |
| $F_{ax,Rk}$ | Resistência ao arranque característica do ligador (N) |
| G_{medio} | Módulo de corte médio, madeira (N/mm^2) |
| G_{LR} | Módulo de corte no plano Longitudinal-Radial (N/mm^2) |
| G_{LT} | Módulo de corte no plano Longitudinal-Transversal (N/mm^2) |
| G_{RT} | Módulo de corte no plano Radial-Transversal (N/mm^2) |
| $M_{y,Rk}$ | Momento plástico do ligador (Nm) |
| N | Número de ligadores (-) |

Letras minúsculas latinas

| | |
|--------------|---|
| a_{fi} | Espessura extra do elemento de madeira para aumentar a resistência mecânica da ligação em situação de incêndio (mm) |
| a_1 | Espaçamento entre ligadores paralelamente ao grão (mm) |
| a_2 | Espaçamento entre ligadores perpendicularmente ao grão (mm) |
| $a_{3,t}$ | Distância entre o ligador e a extremidade solicitada (mm) |
| $a_{4,c}$ | Distância entre o ligador e a extremidade não solicitada (mm) |
| b_{st} | Largura da placa de aço (mm) |
| c_a | Calor específico do aço (J/kg.K) |
| d | Diâmetro do ligador (mm) |
| d_g | Profundidade de abertura (mm) |
| $f_{c,0,k}$ | Resistência à compressão paralela à fibra (N/mm ²) |
| $f_{c,90,k}$ | Resistência à compressão perpendicular à fibra (N/mm ²) |
| $f_{d,fi}$ | Resistência ao fogo, valor de projeto (N/mm ²) |
| $f_{h,1,k}$ | Resistência ao esmagamento característica do ligador (N/mm ²) |
| $f_{m,k}$ | Resistência à flexão da madeira (N/mm ²) |
| $f_{t,0,k}$ | Resistência à tração paralela à fibra (N/mm ²) |
| $f_{t,0,d}$ | Tensão resistente paralela às fibras (N/mm ²) |
| $f_{t,90,k}$ | Resistência à tração perpendicular à fibra (N/mm ²) |
| $f_{u,k}$ | Tensão de cedência característica, aço (N/mm ²) |
| $f_{v,g,k}$ | Resistência ao corte (N/mm ²) |
| f_{20} | 20% da tensão frátil de resistência da madeira à temperatura ambiente (N/mm ²) |
| h_p | Espessura dos painéis de proteção (mm) |
| k_{fi} | Coeficiente (-) |

| | |
|--------------|--|
| k_{flux} | Coeficiente de fluxo de calor pelo ligador (-) |
| k_{mod} | Coeficiente de modificação (-) |
| $k_{mod,fi}$ | Coeficiente de modificação para situação de incêndio (-) |
| l | Comprimento inicial a 20°C, aço (mm) |
| l_c | Comprimento da cavilha (mm) |
| t_s | Espessura da placa central de aço (mm) |
| t_{ch} | Tempo de carbonização dos painéis de proteção (s) |
| $t_{d,fi}$ | Tempo de resistência da estrutura ao fogo (s) |
| t_{req} | Tempo requerido para a resistência ao fogo (s) |
| t_l | Espessura dos elementos laterais de madeira (mm) |

Símbolos gregos

| | |
|-----------------|--|
| α | Coeficiente linear de expansão térmica (K ⁻¹) |
| β_n | Taxa de carbonização de projeto (-) |
| β_0 | Taxa de carbonização unidimensional de projeto (-) |
| γ_M | Fator de segurança parcial (-) |
| $\gamma_{M,fi}$ | Fator de segurança parcial em caso de incêndio (-) |
| Δl | Alongamento térmico, aço (mm) |
| η_{fi} | Fator de redução de carga (-) |
| θ_a | Temperatura do aço (°C) |
| λ_a | Condutividade térmica do aço (W/mK) |
| μ_{LR} | Coeficiente de <i>Poisson</i> no plano Longitudinal-Radial (-) |
| μ_{LT} | Coeficiente de <i>Poisson</i> no plano Longitudinal-Tangencial (-) |
| μ_{RL} | Coeficiente de <i>Poisson</i> no plano Radial-Longitudinal (-) |

| | |
|-----------------------|---|
| μ_{RT} | Coeficiente de <i>Poisson</i> no plano Radial-Tangencial (-) |
| μ_{TL} | Coeficiente de <i>Poisson</i> no plano Tangencial-Longitudinal (-) |
| μ_{TR} | Coeficiente de <i>Poisson</i> no plano Tangencial-Radial (-) |
| ν | Coeficiente de <i>Poisson</i> (-) |
| ρ_k | Massa volúmica (kg/m ³) |
| $\sigma_{t,\theta,d}$ | Tensão de projeto segundo a orientação do grão (N/mm ²) |

Lista de tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 1 –Valores característicos da resistência e rigidez (em N/mm^2) da massa volúmica (em kg/m^3) de GL28H, adaptado de (Toscca, n.d.) | 14 |
| Tabela 2 - Rácio da elasticidade com o teor de humidade aproximadamente de 12%, (Green, Winandy, & Kretschmann, 1999)..... | 15 |
| Tabela 3 - Coeficiente de Poisson com o teor de humidade aproximadamente de 12%, (Green et al., 1999)..... | 15 |
| Tabela 4 - Condutividade térmica da madeira em função da temperatura, (CEN, 2003)16 | |
| Tabela 5 - Calor específico da madeira em função da temperatura, (CEN, 2003)..... | 17 |
| Tabela 6 - Massa volúmica da madeira em função da temperatura, (CEN, 2003)..... | 18 |
| Tabela 7 - Mínimo espaçamento e distância entre extremidades para cavilhas, (CEN, 2004)..... | 25 |
| Tabela 8 - Largura das placas de aço..... | 35 |
| Tabela 9 - Parâmetros das ligações estudadas no programa ANSYS | 40 |
| Tabela 10 - Casos estudados nas simulações mecânicas..... | 43 |
| Tabela 11 - Resultados obtidos e respetivos erros relativos para o caso 2..... | 44 |
| Tabela 12 - Resultados numéricos para a velocidade de carbonização..... | 50 |

Lista de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Diferentes construções em madeira, (Stamato, 2002) | 2 |
| Figura 2 - À esquerda, viga híbrida de madeira e aço. À direita, ligação madeira-aço-madeira. (Ohene, 2014) | 3 |
| Figura 3 - Espécime utilizado nos ensaios experimentais, (Stapf et al., 2012) | 5 |
| Figura 4 - À esquerda, amostra num forno num ensaio experimental. À direita, modelo numérico. (Akotuah et al., 2015)..... | 6 |
| Figura 5 - Resultado de ensaios experimental no final de 50 minutos de exposição ao fogo, (Brandon et al., 2015)..... | 7 |
| Figura 6 - À esquerda, presença de poros em madeira do tipo hardwood (carvalho), à direita, ausência dos mesmos em madeiras do género softwood (pinheiro) (Jasuja, Gauri, Pooja, Rupal, & Kate, n.d.)..... | 12 |
| Figura 7 - Direções ou eixos principais, (Coutinho, 1999) | 13 |
| Figura 8 - Exemplo de ligação a dimensionar | 22 |
| Figura 9 - Modos de falha previstos pelo Eurocódigo..... | 24 |
| Figura 10 - Distância entre ligadores e as extremidades, adaptado de (CEN, 2004) | 25 |
| Figura 11 - Ligação M-A-M..... | 26 |
| Figura 12 - Zonas de degradação numa secção de madeira, (Barreira, 2008)..... | 30 |
| Figura 13 - Tipos de proteção dos lados da placa de aço em ligações M-A-M, ligadores não exibidos. Adaptado de (CEN, 2003)..... | 36 |
| Figura 14 - Elemento SOLID185 com 8 nós | 39 |
| Figura 15 - Representação das quatro ligações utilizadas | 41 |
| Figura 16 - Ligação C, elemento de madeira, placa de aço e cavilhas com respetiva malha utilizada | 42 |
| Figura 17 - Localização de quatro nós a fim de retirar os valores das tensões equivalentes. À esquerda para as ligações A e B, e à direita, para as ligações C e D..... | 44 |

| | |
|---|----|
| Figura 18 - Tensões equivalentes de von Mises na ligação C, caso 2, em quatro nós distintos..... | 45 |
| Figura 19 - Tensões equivalentes, ligação C, caso 2..... | 46 |
| Figura 20 – Elemento SOLID278 com oito nós..... | 48 |
| Figura 21 - Representação das faces expostas..... | 50 |
| Figura 22 - Localização de três nós a fim de retirar os valores da temperatura. À esquerda para as ligações A e B, e à direita, para as ligações C e D..... | 51 |
| Figura 23 - Temperatura em três nós a 0, 5 e 10 mm de profundidade em ligação não protegida..... | 52 |
| Figura 24 - Madeira carbonizada ao fim de 15 minutos (à esquerda) e ao fim de 30 minutos (à direita) de simulação em ligação não protegida..... | 53 |
| Figura 25 - Madeira carbonizada ao fim de 15 minutos (à esquerda) e ao fim de 30 minutos (à direita) de simulação, pormenor, em ligação não protegida..... | 53 |
| Figura 26 - Condutividade térmica do gesso segundo vários autores..... | 55 |
| Figura 27 - Calor específico do gesso segundo vários autores..... | 55 |
| Figura 28 - Densidade do gesso segundo vários autores..... | 56 |
| Figura 29 – Representação das quatro ligações utilizadas com as respetivas faces expostas protegidas por gesso..... | 57 |
| Figura 30- Localização de três nós a fim de retirar os valores da temperatura. À esquerda para as ligações A e B, e à direita, para as ligações C e D..... | 58 |
| Figura 31 - Temperatura de quatro nós a 0, 12,1, 17,1 e 22,1 mm de profundidade em ligação protegida, gesso de (Alves & Batista, 2007)..... | 58 |
| Figura 32 - Temperatura de quatro nós a 0, 12,1, 17,1 e 22,1 mm de profundidade em ligação protegida, gesso de (Sultan, 1996)..... | 59 |
| Figura 33 - Temperatura de quatro nós a 0, 12,1, 17,1 e 22,1 mm de profundidade em ligação protegida, gesso de (Aissa, 2017)..... | 59 |
| Figura 34 - Madeira carbonizada ao fim de 15 minutos (à esquerda) e ao fim de 30 minutos (à direita) de simulação em ligação protegida por gesso tipo (Alves & Batista, 2007) . | 61 |
| Figura 35 - Madeira carbonizada ao fim de 15 minutos (à esquerda) e ao fim de 30 minutos (à direita) de simulação em ligação protegida por gesso tipo (Sultan, 1996)..... | 61 |
| Figura 36 - Madeira carbonizada ao fim de 15 minutos (à esquerda) e ao fim de 30 minutos (à direita) de simulação em ligação protegida por gesso tipo (Aissa, 2017)..... | 61 |

Figura 37 - Temperatura (°C) dos elementos de madeira em ligação M-A-M protegidas por diferentes tipos de gesso, da esquerda para a direita (Alves & Batista, 2007; Sultan, 1996; Aissa, 2017)..... 62

Capítulo 1

1. Introdução

A madeira, devido à sua disponibilidade na natureza, à relativa facilidade de obtenção e tratamento, é provavelmente, o material de construção mais antigo, tal como a pedra. Trata-se de um material complexo por possuir uma estrutura fibrosa heterogénea e anisotrópica, (Barreira, 2008). É de salientar a existência de diferentes tipos de madeira, o que torna o seu estudo mais complexo, pois as suas características e propriedades mecânicas variam de espécie para espécie.

A madeira, como elemento de construção, é conhecida, não só devido a fatores ecológicos e estruturais, mas também ao seu elevado desempenho mecânico quando relacionado com a sua massa volúmica, (Blesák, Caldová, & Wald, 2015).

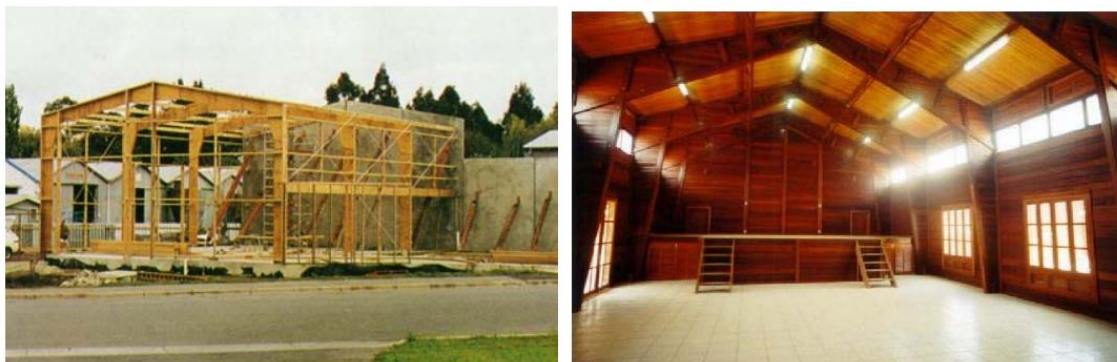


Figura 1 - Diferentes construções em madeira, (Stamato, 2002)

Em construções de madeira, as ligações são consideradas os pontos críticos devido à sua resistência e durabilidade estarem diretamente dependentes do tipo de ligação e dos diferentes elementos ligadores nelas utilizadas. Estas zonas, encontram-se ainda sujeitas a tensões e deformações localizadas, que podem comprometer a estabilidade geral da estrutura, (Aissa, 2017).

Com o propósito de criar construções cada vez mais altas e robustas, tornou-se necessário combinar a madeira com outros materiais de construção tais com o aço e o betão, denominando-se sistemas de construção híbridos (do inglês, *hybrid building sys-*

de madeira e ângulo da carga em relação à orientação do grão de madeira. Foi possível constatar que aumentando a espessura do elemento de madeira, aumenta-se a resistência da ligação. Em relação ao ângulo entre a carga e o grão, foi verificada uma forte influência entre ambas as variáveis.

Em situação de incêndio e sob a ação do fogo, os elementos constituintes de uma ligação têm as suas propriedades físicas e mecânicas alteradas, o que pode provocar a instabilidade da ligação e, por conseguinte, de toda a estrutura envolvida.

Aquando do início da combustão da madeira, começa-se a formar uma camada de carvão na superfície do material. Essa camada permite o isolamento do interior da madeira, protegendo-a assim da ação externa do fogo. Desta forma, as construções de madeira mantêm uma parte substancial da sua capacidade resistente quando expostas ao fogo, (Tavakkol-Khah & Klingsch, 1997). Contudo, o metal utilizado na ligação possui um efeito negativo neste cenário, devido ao facto de o calor ser transmitido para camadas interiores da madeira através dos elementos ligadores de aço, (Peng, Hadjisophocleus, Mehaffey, & Mohammad, 2011). Isto leva a um aumento da camada de carvão e a uma redução da capacidade resistente da ligação.

A análise do desempenho de ligações quando sujeitas a condições de fogo torna-se bastante trabalhoso, visto que existem diferentes tipos de ligações, diversos elementos de ligação e diferentes espécies de madeira, (Peng et al., 2011) .

Recorrendo a análises numéricas 3D usando o programa ABAQUS e a dados experimentais, (Fragiacomo, Menis, Moss, Buchanan, & Clemente, 2010) obtiveram resultados aceitáveis quanto à temperatura, deslocamento e tempo de falha, recorrendo às propriedades térmicas e à degradação das propriedades mecânicas com a temperatura sugeridas pelo Eurocódigo 5. As análises numéricas foram efetuadas recorrendo a dois processos, uma análise térmica do membro exposto ao fogo seguida de uma análise estrutural sobre uma carga constante ao longo do tempo.

Com o propósito de simplificar os métodos de cálculos já existentes, (Hadjisophocleus, Mohammad, Peng, & Mehaffey, 2011), criaram um método empírico que envolvesse diferentes tipos de ligações (MAM, MMM, AMA) diferentes rácios de carregamento e dimensões dos ligadores (cavilhas ou parafusos) a fim de avaliar a resistência ao fogo de ligações de madeira. Conseguiram obter valores do tempo de resistência

ao fogo da ligação com um erro relativo de $\pm 15\%$ em ligações do tipo MAM e MMM e de $\pm 10\%$ em ligações do tipo AMA comparando com resultados experimentais. Para ligações revestidas com 15,9 mm de gesso do tipo X e uma dupla camada de contraplacado a resistência ao fogo é de 30 minutos e 15 minutos, respectivamente. Para ligações não protegidas, aumentar a espessura dos elementos de madeira prova-se igualmente eficaz, contudo o diâmetro e o número de ligadores não possuem qualquer impacto direto na resistência ao fogo da ligação para a mesma carga.



Figura 3 - Espécime utilizado nos ensaios experimentais, (Stapf et al., 2012)

(Schmid, Klippel, Just, & Frangi, 2014) efetuaram uma análise a 153 testes de resistência ao fogo de elementos de madeira (117 membros sob efeito de flexão, 6 à compressão e 30 em tração) de forma a tentarem validar o método de redução de secção transversal presente no Eurocódigo. A maioria da bibliografia analisada possuía uma qualidade de nível baixo ou incompleta, impossibilitando a validação do modelo de projeto ou encontrando grandes desvios nos resultados. Nos casos dos membros sujeitos tração os resultados preencheram os requisitos, enquanto que os membros sujeitos à compressão obtiveram resultados muitos diferentes dos obtidos pelo método de redução. Contudo, membros sujeitos a flexão apresentam um desvio ainda maior.

Em 2015, foi realizado um estudo sobre resistência ao fogo abordando diferentes parâmetros em estruturas de tipo híbrido (madeira e aço). Foram utilizadas duas colunas

de aço e uma viga de madeira laminada para os ensaios experimentais. As colunas de aço encontravam-se completamente protegidas enquanto que a viga de madeira apenas possuía a parte superior protegida, tentando representar a presença do teto. Foram consideradas o tipo de ligações, a carga aplicada e o diâmetro do parafuso. Para a imposição da curva de fogo foi utilizada a norma CAN/ULC-S101. Na análise de elementos finitos foi utilizado o programa ABAQUS, sendo que foram realizadas análises do tipo transiente seguida de uma análise estrutural a cada intervalo de tempo para determinar a resposta mecânica da estrutura. Esta investigação mostrou que a resistência ao fogo depende da carga mecânica aplicada sob a condição de fogo, sendo que quanto maior a carga aplicada, menor será a sua resistência. Foi ainda observado um erro de $\pm 8,32\%$ na estimativa da tempo de falha entre o modelo numérico e os testes experimentais, (Akotuah, Ali, Erochko, Zhang, & Hadjisophocleous, 2015).

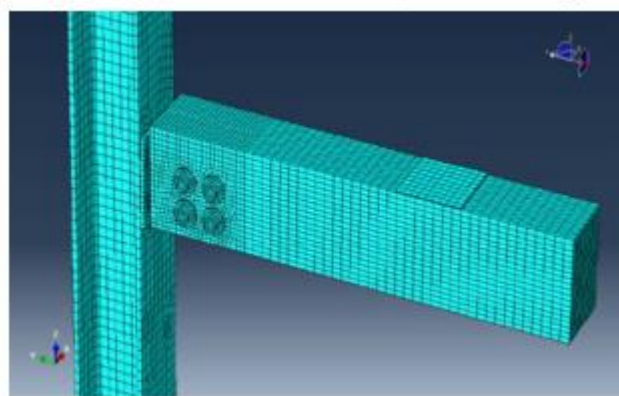


Figura 4 - À esquerda, amostra num forno num ensaio experimental. À direita, modelo numérico. (Akotuah et al., 2015)

No mesmo ano, com o objetivo de eliminar o efeito do aço como condutor de calor, (Brandon et al., 2015) realizaram ensaios experimentais em que substituíram os ligadores de aço por ligadores não metálicos com baixa condutividade térmica, analisando a resistência térmica e mecânica da ligação. Utilizaram ligadores poliméricos de fibra de vidro reforçada, obtendo ligações em que o fluxo de calor é regulado pelas propriedades do elemento de madeira.

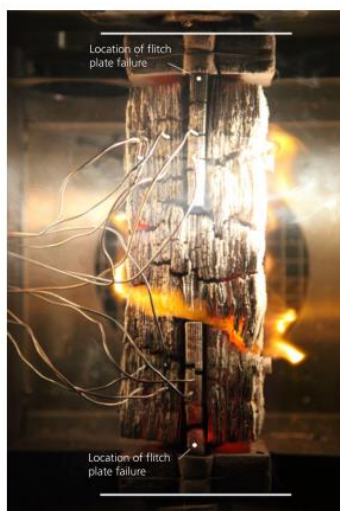


Figura 5 - Resultado de ensaios experimental no final de 50 minutos de exposição ao fogo, (Brandon et al., 2015)

O principal objetivo da proteção contra o fogo é limitar o risco relativamente ao próprio indivíduo, sociedade, propriedade vizinha, ambiente ou propriedade diretamente exposta, em caso de incêndio, (CEN, 2002). Assim, as construções devem ser projetadas de modo a que em caso de incêndio:

- A resistência à carga imposta pode ser mantida por um período específico de tempo;
- A geração e a propagação do fogo e do fumo devem ser limitadas;
- A propagação do fogo para construções adjacentes deve ser limitada;
- Os ocupantes possam deixar o local ou resgatados por outros meios;
- A segurança das equipas de resgate deve ser levada em consideração.

Desta forma, uma análise estrutural relativamente à ação do fogo deve ter em conta:

- Os cenários de fogo;
- As curvas de incêndio;
- A evolução da temperatura no interior dos elementos estruturais;
- O comportamento mecânico da estrutura exposta ao fogo.

Com o propósito de retardar o avanço da camada carbonizada na madeira, são utilizados materiais isolantes, como o caso do gesso. Contudo, na literatura os estudos sobre a utilização de materiais isolantes em ligações são pouco frequentes.

Relativamente à capacidade do gesso como material de proteção, em estruturas expostas ao fogo, é frequentemente utilizado em paredes internas. Em 2007, utilizando simulações numéricas recorrendo aos programas ABAQUS e SAFIR foram desenvolvidos modelos computacionais capazes de fornecer o valor da temperatura em qualquer ponto do sistema estudado, podendo assim traçar distribuições de temperatura na estrutura de paredes do tipo *dry wall*. Quando comparados com resultados experimentais, os modelos propostos apresentaram alguns desvios nas previsões da temperatura, apresentando valores de temperatura inferior aos obtidos experimentalmente. Supõe-se que estes desvios são devidos ao confinamento do material isolante no interior da cavidade da parede, (Alves & Batista, 2007).

Em 2009 foi realizada uma comparação de quatro tipos diferentes de placas de gesso disponíveis no mercado Europeu, em relação às suas propriedades térmicas quando sujeitos a condições de fogo impostas pela curva ISO834. Esta comparação foi realizada tanto experimentalmente como utilizando uma simulação numérica 2D, recorrendo ao programa VOLTRA. Os resultados experimentais demonstraram a importância da percentagem de sulfato de cálcio, carbonato de cálcio e carbonato de magnésio presentes na constituição das placas de gesso. Quanto aos resultados provenientes da simulação numérica, a percentagem de sulfato de cálcio provou-se essencial na resposta do gesso ao fogo durante os primeiros 30 minutos, (Wakili & Hugi, 2009).

1.1. Objetivos

Este trabalho tem como objetivo o estudo e dimensionamento de ligações madeira-aço-madeira em corte duplo à temperatura ambiente e sob ação do fogo. Nas ligações serão utilizados elementos ligadores do tipo cavilha em aço. Serão consideradas diferentes variáveis de projeto no estudo de ligações com ou sem proteção em gesso, como material de isolamento. O projeto inicial das ligações é efetuado de acordo com as equações de cálculo analíticas propostas nos Eurocódigo 1, 3 e 5.

Serão desenvolvidos modelos numéricos para análise estrutural e térmica utilizando o programa de elementos finitos ANSYS. Os modelos numéricos permitem a comparação dos resultados obtidos para a resistência da capacidade de carga da ligação com o dimensionamento da mesma efetuado previamente. Nas ligações expostas ao fogo será utilizada a curva de fogo normalizada ISO 834, para a evolução da temperatura ambiente, de modo a verificar-se a resistência térmica da ligação com e sem material de proteção.

Como objetivo final pretende-se criar diferentes tabelas de consulta fácil, úteis no projeto de engenharia, para que possibilitem o rápido dimensionamento de 256 ligações madeira-aço-madeira estudadas. Pretende-se ainda analisar e entender o comportamento das ligações em situação de incêndio, bem como o papel na utilização de diferentes propriedades de gessos no cálculo da velocidade de carbonização da madeira, conclusões estas importantes em adição ao projeto, e não conseguidas pela utilização do Eurocódigo 5.

1.2. Apresentação sumária dos capítulos

No **capítulo 2** deste trabalho serão apresentadas as características físicas e mecânicas da madeira e do aço. Serão apresentadas, também, as suas propriedades térmicas, nomeadamente, a condutividade térmica, calor específico e massa volúmica.

No **capítulo 3** é apresentado o método de cálculo para dimensionamento proposto pelo Eurocódigo, utilizando como base, um modelo genérico de uma ligação madeira-aço-madeira. Será ainda apresentada uma tabela final com as diferentes ligações calculadas e obtidas por este método, utilizando quatro cargas limites, quatro espessuras de placa de aço, quatro espessuras de elementos de madeira e quatro diferentes diâmetros de cavilhas, para um total de 256 ligações.

O **capítulo 4** contém o processo de cálculo relativo a ligações expostas ao fogo, sendo que se divide na verificação e posterior dimensionamento, caso a respetiva ligação não verifique os requisitos para situação de incêndio. O estudo é efetuado para todas as ligações previamente dimensionadas no capítulo anterior.

No **capítulo 5** apresenta os modelos desenvolvidos para análise mecânica 3D realizadas a quatro das ligações projetadas. Este capítulo, apresenta ainda o método de elementos finitos utilizado de forma a solucionar o problema mecânico bem como a apresentação e discussão dos resultados obtidos.

O **capítulo 6** engloba as análises térmicas 3D realizadas em ligações protegidas e não protegidas. É descrito o método de elementos finitos utilizado para as mesmas quatro ligações. São ainda apresentados os diferentes tipos de isolamentos e as suas propriedades térmicas, utilizados para proteger a ligação, bem como a respetiva discussão de resultados.

O último capítulo apresenta as conclusões finais bem como ideias para trabalhos futuros.

Capítulo 2

2. Propriedades dos materiais

Nos subcapítulos seguintes serão apresentadas algumas propriedades mecânicas e térmicas dos materiais utilizados (madeira e aço).

2.1. Madeira

Tratando-se de um material biológico, a madeira apresenta características que diferem de outros materiais estruturais que têm a sua origem não biológica. Possui uma enorme variedade devido às diferentes espécies existentes. Para além disso, a sua heterogeneidade e anisotropia são acentuadas, (Xavier, 2003).

Em relação à utilização como um material de construção, a madeira pode ser caracterizada em hardwood ou softwood. A madeira pertencente à primeira categoria provém de árvores com ramagem espessa e com um crescimento lento. Por outro lado, árvores coníferas e sem flor fornecem a madeira do tipo softwood, (Barreira, 2008), (Aissa, 2017). Estas categorias distinguem-se principalmente devido à constituição celular do tronco. É de salientar, contudo, que softwoods são relativamente mais fáceis de trabalhar e apresentam uma menor resistência sob condições de fogo. Na Figura 6 são apresentadas as diferenças aparentes entre softwood e hardwood.

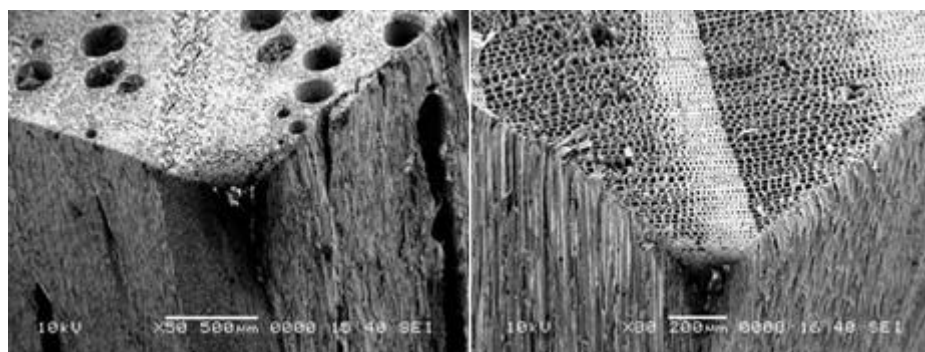


Figura 6 - À esquerda, presença de poros em madeira do tipo hardwood (carvalho), à direita, ausência dos mesmos em madeiras do género softwood (pinheiro) (Jasuja, Gauri, Pooja, Rupal, & Kate, n.d.)

2.1.1. Propriedades mecânicas

Como referido anteriormente, a madeira é um material heterogéneo, ortotrópico e com uma enorme variabilidade. É possível definir em cada ponto, três direções de simetria material: Longitudinal, ao longo da direção das fibras; Radial (R), paralela aos anéis e perpendicular às fibras; Tangencial (T), aos raios e perpendicular tanto à direção R como L, (Xavier, 2003).

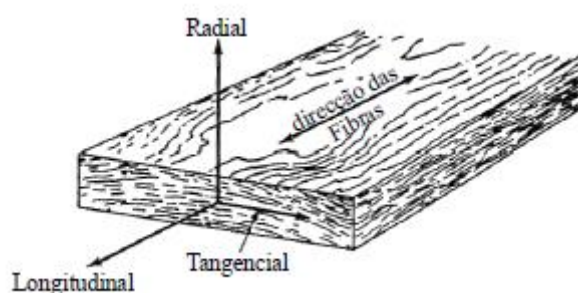


Figura 7 - Direções ou eixos principais, (Coutinho, 1999)

Devido a tratar-se de um material biológico, a madeira pode apresentar alguns fatores naturais que podem influenciar as suas propriedades, (Coutinho, 1999):

- A estrutura anatómica e a organização celular, responsáveis pelo comportamento físico-mecânico, variam de espécie para espécie.
- A massa volúmica é um índice da distribuição ou concentração de material existente e resistente.
- Ao longo de toda a estrutura da árvore, as propriedades do material variam, tanto na sua direção longitudinal (mais perto da raiz ou da copa) como radial (mais interior ou localizada perto da casca).
- A presença de defeitos, como nós, fendas, entre outros.
- A presença de humidade também faz variar as propriedades do material, apresentando uma maior resistência mecânica quando completamente isenta de humidade.

2.1.1.1. Madeira do tipo GL28H

No presente trabalho, será utilizada um tipo de madeira característico. Trata-se da GL28H, um tipo de madeira lamelada colada comumente utilizada na engenharia da construção.

Apesar da ideia na reconstrução de secções de madeira a partir de colagens sucessivas de elementos menores ser originalmente egípcia, só no início do século XX é que a utilização de madeira lamelada para uso na construção se tornou efetiva devido ao surgimento das colas orgânicas. A madeira lamelada colada permite obter grandes vãos, uma escolha criteriosa das peças de madeira e a eliminação de deficiências maiores antes das colagens, (Imowood, 2017).

A designação GL refere-se ao facto de ser uma madeira colada lamelada; o número seguinte (neste caso 28), define a sua resistência à flexão, e por fim, a última letra, H ou C, distingue a tipologia da viga, homogénea ou combinada, respetivamente, (Banema, 2017). As propriedades mecânicas para este tipo de madeira podem ser consultadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores característicos da resistência e rigidez (em N/mm^2) da massa volúmica (em kg/m^3) de GL28H, adaptado de (Toscca, n.d.)

| Designação | Simbologia | GL28H |
|--|----------------|-------|
| Resistência à flexão | $f_{m,k}$ | 28 |
| Resistência à tração paralela à fibra | $f_{t,0,k}$ | 19,5 |
| Resistência à tração perpendicular à fibra | $f_{t,90,k}$ | 0,45 |
| Resistência à compressão paralela à fibra | $f_{c,0,k}$ | 26,5 |
| Resistência à compressão perpendicular à fibra | $f_{c,90,k}$ | 3 |
| Resistência ao corte | $f_{v,k}$ | 3,2 |
| Módulo de elasticidade paralelo à fibra | $E_{0,medio}$ | 12600 |
| | $E_{0,0,05}$ | 10200 |
| Módulo de elasticidade perpendicular à fibra | $E_{90,medio}$ | 420 |
| Módulo de corte | G_{medio} | 780 |

| | | |
|----------------|----------|-----|
| Massa volúmica | ρ_k | 410 |
|----------------|----------|-----|

Devido às suas propriedades, a GL28H pode ser comparada à madeira proveniente de uma bétula amarela. As Tabelas 1 e 2 apresentam as propriedades elásticas deste tipo de madeira. É de relembrar que a madeira é um material ortotrópico e por isso as suas propriedades variam consoante os eixos anteriormente referidos. A resistência na direção longitudinal é usualmente a direção com maior resistência (cerca de 10 vezes superior relativamente às outras direções), (Aissa, 2017).

Tabela 2 - Rácio da elasticidade com o teor de humidade aproximadamente de 12%, (Green, Winandy, & Kretschmann, 1999).

| Espécie | E_T/E_L | E_R/E_L | G_{LR}/E_L | G_{LT}/E_L | G_{RT}/E_L |
|----------------|-----------|-----------|--------------|--------------|--------------|
| Bétula Amarela | 0,050 | 0,078 | 0,074 | 0,068 | 0,017 |

Tabela 3 - Coeficiente de Poisson com o teor de humidade aproximadamente de 12%, (Green et al., 1999)

| Espécie | μ_{LR} | μ_{LT} | μ_{RT} | μ_{TR} | μ_{RL} | μ_{TL} |
|----------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Bétula Amarela | 0,426 | 0,451 | 0,697 | 0,426 | 0,043 | 0,024 |

2.1.2. Propriedades térmicas

As propriedades térmicas da madeira (calor específico, massa específica e condutividade térmica) estão apresentadas no anexo B do Eurocódigo 5 Parte 1-2, (CEN, 2003).

2.1.2.1. Condutividade térmica

A condutividade térmica trata-se da medida da taxa de transferência de calor através de materiais submetidos a um gradiente de temperatura. Em elementos de madeira, a condutividade térmica é substancialmente menor comparada com os elementos de aço. Na Tabela 4 são apresentados os valores para a condutividade térmica a diferentes temperaturas.

Tabela 4 - Condutividade térmica da madeira em função da temperatura, (CEN, 2003)

| Temperatura, °C | Condutividade térmica, W/m °C |
|-----------------|-------------------------------|
| 20 | 0,12 |
| 200 | 0,15 |
| 350 | 0,07 |
| 500 | 0,09 |
| 800 | 0,35 |
| 1200 | 1,50 |

Como se pode verificar, os valores da condutividade térmica mostram uma ligeira diminuição entre os 200 °C e os 350 °C. A partir desse valor, a condutividade tende a aumentar.

2.1.2.2. Calor específico

O calor específico tem como base uma relação direta entre a capacidade de aquecimento de um determinado material e a capacidade de aquecimento da água.

Os valores tabelados no Eurocódigo 5, parte 1-2, (CEN, 2003) estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Calor específico da madeira em função da temperatura, (CEN, 2003)

| Temperatura, °C | Calor específico, kJ/kg °C |
|-----------------|----------------------------|
| 20 | 1,53 |
| 99 | 1,77 |
| 99 | 13,60 |
| 120 | 13,50 |
| 120 | 2,12 |
| 200 | 2,00 |
| 250 | 1,62 |
| 300 | 0,71 |
| 350 | 0,85 |
| 400 | 1,00 |
| 600 | 1,40 |
| 800 | 1,65 |
| 1200 | 1,65 |

É possível observar-se um pico de valores do calor específico entre os 99 °C e os 120 °C. Este aumento no calor específico é devido ao aquecimento necessário para a evaporação da água presente na madeira.

2.1.2.3. Massa volúmica

A massa volúmica depende diretamente da massa e do volume do material. No caso da madeira, a existência de água no seu interior, proporciona uma massa volúmica maior, sendo que este valor decai à medida que a humidade começa a diminuir. Na Tabela 6 são apresentados os valores para a massa volúmica da madeira, de acordo com o Euro-código 5, parte 1-2 (CEN, 2003).

Tabela 6 - Massa volúmica da madeira em função da temperatura, (CEN, 2003)

| Temperatura, °C | Massa específica |
|-----------------|------------------|
| 20 | 1 + w |
| 99 | 1 + w |
| 99 | 1 + w |
| 120 | 1,00 |
| 120 | 1,00 |
| 200 | 1,00 |
| 250 | 0,93 |
| 300 | 0,76 |
| 350 | 0,52 |
| 400 | 0,38 |
| 600 | 0,28 |
| 800 | 0,26 |
| 1200 | 0 |

2.2. Aço

Ao contrário da madeira, o aço não pode ser encontrado na natureza. Para obter este material é necessário recorrer a um conjunto de técnicas, descritas seguidamente. Primeiramente, o minério de ferro (FeO) é aquecido em altos fornos, utilizando coque (carvão vegetal) para fornecer carbono ao minério e de fundentes (utilizados para auxiliar

a produção de escória, que é formada por materiais indesejáveis ao processo). Este processo tem como objetivo eliminar ao máximo a quantidade de oxigênio. Após este processo obtém-se o denominado ferro-gusa, constituído por 3,5% a 4,0% de carbono. No final de uma segunda fusão, tem-se o ferro fundido, em que os teores de carbono variam entre 2 a 6,7%. Finalmente, o aço é obtido através da descarbonatação do ferro-gusa. O aço, em si, é uma liga de ferro-carbono, possuindo um teor de, no mínimo, 0,008% e, no máximo, 2,11% de carbono, entre outros elementos residuais, (Ferraz, 2003).

2.2.1. Propriedades mecânicas

No Eurocódigo 3, parte 1-1, podem ser consultadas as propriedades deste material, (CEN, 2005b). Nas tabelas 3.1 deste Eurocódigo, é possível consultar a tensão de cedência e a tensão última de diferentes classes de aço em relação à espessura do material. As características mecânicas gerais do aço, também expostas no Eurocódigo, são apresentadas a seguir:

- Módulo de elasticidade: $E = 210\text{GPa}$;
- Módulo de corte: $G = 81\text{GPa}$;
- Coeficiente de *Poisson*: $\nu = 0,3$;
- Coeficiente linear de expansão térmica: $\alpha = 12 \times 10^{-6} \text{K}^{-1} (T \leq 100)$

2.2.2. Propriedades térmicas

As propriedades térmicas do aço, podem ser calculadas através de várias expressões disponíveis no Eurocódigo 3, parte 1-2 (CEN, 2005a). Segundo este mesmo Eurocódigo, a massa volúmica deste material é independente da sua temperatura, tomando o valor de 7850kg/m^3 .

2.2.2.1. Calor específico

O calor específico do aço, c_a em [J/kg.K] é dado pelas seguintes equações, (CEN, 2005a):

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

$$c_a = 425 + 7,73 \times 10^{-1} \theta_a - 1,69 \times 10^{-3} \theta_a^2 + 2,22 \times 10^{-6} \theta_a^3 \quad (4)$$

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

$$c_a = 666 + \frac{13002}{738 - \theta_a} \quad (5)$$

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

$$c_a = 545 + \frac{17820}{\theta_a - 731} \quad (6)$$

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

$$c_a = 650 \quad (7)$$

2.2.2.2. Condutividade térmica

Através das seguintes equações é possível determinar a condutividade térmica, λ_a , em [W/mK], (CEN, 2005a):

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

$$\lambda_a = 54 - 3,33 \times 10^{-2} \theta_a \quad (8)$$

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

$$\lambda_a = 27,3 \quad (9)$$

Capítulo 3

3. Dimensionamento da ligação à temperatura ambiente

Na seguinte secção é apresentado o método de cálculo utilizado no dimensionamento de ligações em duplo corte à temperatura ambiente, bem como os respetivos resultados analíticos obtidos.

3.1. Método de cálculo

A fim de determinar a configuração da ligação em estudo, M-A-M à temperatura ambiente, irão ser respeitados os Eurocódigos em vigor, sendo que para o dimensionamento da ligação, serão tidos em conta as etapas apresentadas a seguir.

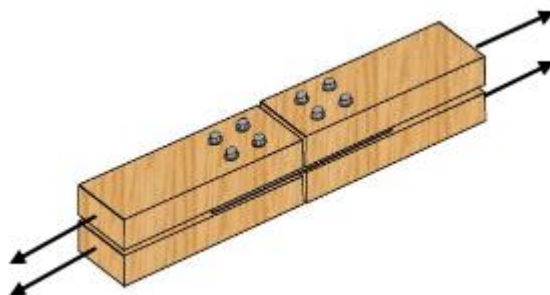


Figura 8 - Exemplo de ligação a dimensionar

O estado limite último tem de ser garantido. Para elementos em que a força aplicada é paralela à orientação do grão, deve ser considerada a seguinte expressão apresentada no Eurocódigo5, parte 1-1, (CEN, 2004).

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

Em que, $\sigma_{t,0,d}$ representa a tensão de projeto segundo a orientação do grão, e $f_{t,0,d}$, refere-se à resistência ao longo do grão. A tensão de projeto segundo a orientação do grão pode ser obtida através da Equação 11

$$\sigma_{t,0,d} = \frac{F_d}{A_s} \quad (11)$$

Onde, F_d é a força aplicada e A_s designa a área da secção transversal da ligação.

Por sua vez, $f_{t,0,d}$ deve ser calculada com a expressão seguinte, (CEN, 2004):

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

Em que: k_{mod} representa o fator de modificação que leva em conta o efeito de duração da força aplicada e o tipo de madeira utilizada, de acordo com a tabela 3.1 do EC5-1-1, (CEN, 2004); $f_{t,0,k}$ é a tensão paralela às fibras; γ_M representa o fator de segurança parcial em que os valores podem ser consultados na tabela 2.3 do EC5-1-1, (CEN, 2004).

Tratando-se de uma ligação com placa de aço (qualquer que seja a sua espessura) como elemento central de uma ligação sujeita a corte duplo, a capacidade de carga por plano de corte e por cada ligador, deve ser calculada recorrendo à equação 13, (CEN, 2004). Este valor corresponde à carga máxima que determinada ligação aguenta dividida por cada plano de corte e por cada ligador existente na ligação.

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{h,1,k} t_1 d \left[\sqrt{2 + \frac{4M_{y,Rk}}{f_{h,Rk} d t_1^2}} - 1 \right] + \frac{F_{\alpha x,Rk}}{4} \\ 2,3 \sqrt{M_{y,Rk} f_{h,1,k} d} + \frac{F_{\alpha x,Rk}}{4} \end{array} \right. \quad (13)$$

Na qual:

$F_{v,Rk}$: é a capacidade de carga por plano de corte e ligador;

t_1 : é a menor espessura dos elementos laterais da madeira;

$f_{h,1,k}$: é a resistência ao esmagamento característica;

d : diâmetro do ligador;

$M_{y,Rk}$: é o momento de cedência plástica do ligador;

$F_{ax,Rk}$: é a resistência ao arranque característica do ligador.

Para calcular o valor de $M_{y,Rk}$, valor limite de plástica do ligador quando sujeito à flexão, deve-se recorrer à seguinte expressão, para a qual é necessária o valor da tensão de cedência característica do aço, $f_{u,k}$, e o diâmetro do ligador, d :

$$M_{y,Rk} = 0,3 f_{u,k} d^{2,6} \quad (14)$$

Por sua vez, para calcular a resistência ao esmagamento, paralelo às fibras da madeira, é necessário utilizar os valores da massa volúmica da madeira utilizada, ρ_k , e o diâmetro do ligador, d , para obter o seu resultado segundo a equação:

$$f_{h,1,k} = 0,082(1 - 0,01d)\rho_k \quad (15)$$

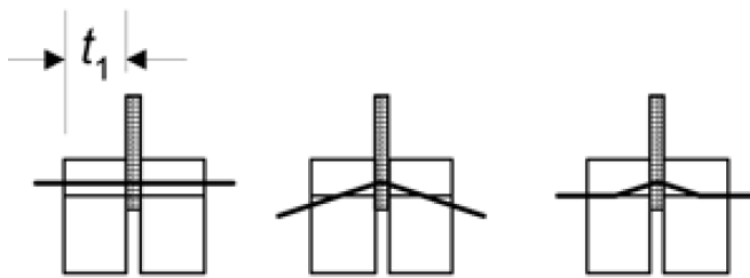


Figura 9 - Modos de falha previstos pelo Eurocódigo

Após a obtenção do valor de $F_{v,Rk}$, é necessário calcular o valor de projeto da resistência por plano de corte por ligador, $F_{v,Rd}$.

$$F_{v,Rd} = \frac{F_{v,Rk} k_{mod}}{\gamma_M} \quad (16)$$

Com o valor $F_{v,Rd}$, torna-se possível calcular o número mínimo de ligadores, N .

$$N = \frac{F_d}{F_{v,Rd}} \quad (17)$$

Segundo o Eurocódigo 5 parte 1-1, a_1 representa o espaçamento entre os ligadores paralelamente ao grão, a_2 é o espaçamento entre os ligadores perpendicularmente ao

grão, $a_{3,t}$ é a distância entre o ligador e a extremidade solicitada e $a_{4,c}$ corresponde à distância entre o ligador e a extremidade não solicitada, (CEN, 2004). Este mesmo Eurocódigo, contudo, não coloca restrições quanto à disposição das cavilhas ao longo da ligação desde que o procedimento acima referido seja verificado.

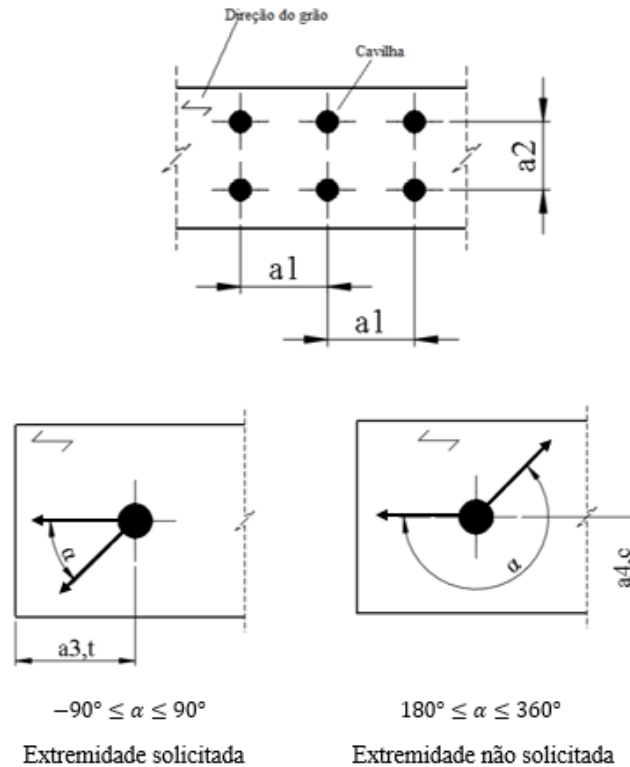


Figura 10 - Distância entre ligadores e as extremidades, adaptado de (CEN, 2004)

Na tabela seguinte são apresentadas as formas de cálculo de cada um dos espaçamentos segundo o mesmo Eurocódigo.

Tabela 7 - Mínimo espaçamento e distância entre extremidades para cavilhas, (CEN, 2004)

| Espaçamento e distância a extremidades | Ângulo | Espaçamento ou distância a extremidades mínimo |
|--|---------------------------------------|--|
| a_1 (paralelo ao grão) | $0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$ | $(3 + 2 \cos \alpha) d$ |
| a_2 (perpendicular ao grão) | $0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$ | $3d$ |
| $a_{3,t}$ | $-90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ | $\max(7 d; 80\text{mm})$ |
| $a_{3,c}$ | $90^\circ \leq \alpha < 150^\circ$ | $\max((a_{3,t} \sin \alpha) d; 3d)$ |

| | | |
|-----------|---|---|
| | $150^\circ \leq \alpha < 210^\circ$ $210^\circ \leq \alpha \leq 270^\circ$ | $3d$ $\max((a_{3,t} \sin \alpha) d; 3d)$ |
| $a_{4,t}$ | $0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$ | $\max([2 + 2 \sin \alpha]d; 3d)$ |
| $a_{4,c}$ | $180^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$ | $3d$ |

Por fim, é possível obter um modelo da ligação que se apresenta na Figura 9.

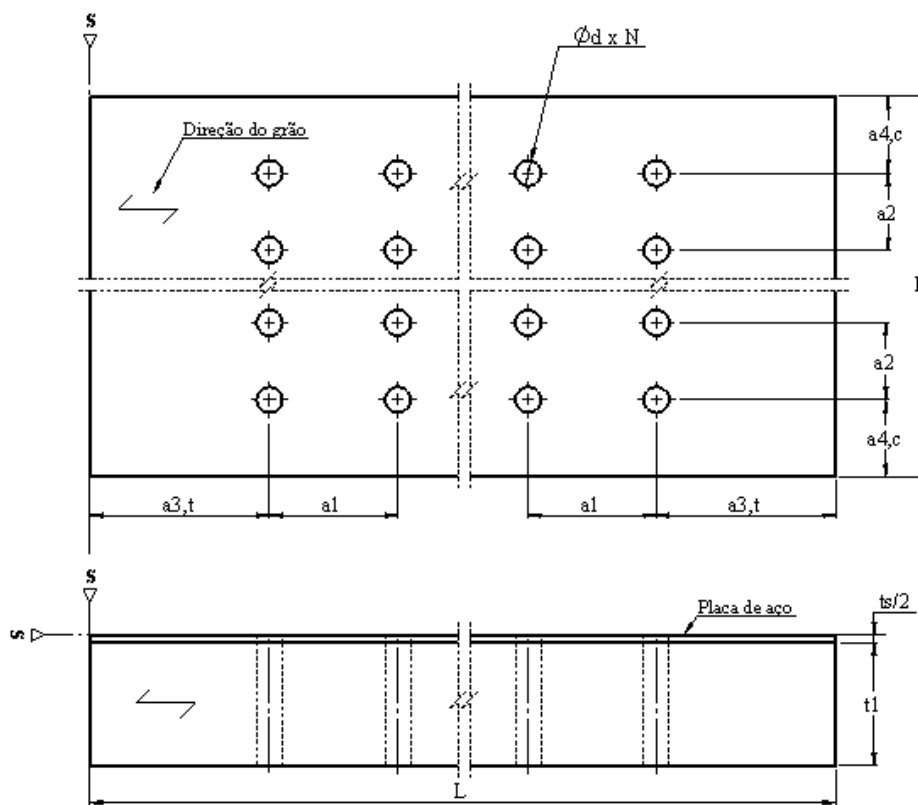


Figura 11 - Ligação M-A-M

3.2. Resultados obtidos

De maneira a obter um número significativo de ligações, foram tidas em contas quatro variáveis distintas.

A primeira variável a considerar é a força aplicada nas extremidades da ligação. Foram utilizadas cargas de 25, 50, 75 e 100 kN. Convertendo para quilograma-força, 100kN corresponde a aproximadamente 10 toneladas.

A espessura da placa de aço e a espessura das placas de madeira foram outras duas variáveis analisadas. O tamanho da espessura da placa de aço, t_s , varia entre 5, 6, 8 e 10 mm. Por sua vez, para as placas de madeira foi considerada uma espessura, t_1 , de 45, 50, 55 e 60 milímetros.

Por fim, a última variável considerada foi o diâmetro das cavilhas. Variando entre 10, 12, 14 e 16 mm, as cavilhas tinham um comprimento, lc , também variável para corresponder ao tamanho da ligação. Para este tipo de ligadores, foi tido em conta a norma DIN 6325. Alguns dos comprimentos, porém, não correspondiam aos comprimentos fornecidos por esta norma. Assim, considera-se que todas as cavilhas em que o comprimento ultrapassa o comprimento indicado na norma referida, são torneadas a partir de varões do mesmo aço.

A disposição dos elementos ligadores na ligação foi obtida fazendo variar o número de linhas e colunas em função do número de mínimo de ligadores necessários. Em todas situações foi escolhido o caso em que a área da secção transversal do elemento de madeira fosse a menor, mas garantindo sempre que seja superior a A_s .

As ligações obtidas pelo método de cálculo descrito podem ser consultadas em tabelas no Anexo 1. Nas tabelas mencionadas, é possível consultar as dimensões gerais das ligações de acordo com as diferentes variáveis introduzidas.

Com as tabelas desenvolvidas pretende-se facilitar a consulta e diminuir o tempo necessário para o dimensionamento deste tipo de ligações no projeto estrutural de engenharia. Através da análise dos dados das tabelas é possível constatar que:

- Quanto maior a força aplicada na ligação, maior ou igual será a área da secção transversal.
- O número mínimo de cavilhas diminui ou mantém-se constante consoante se aumenta a espessura dos elementos de madeira. O mesmo se verifica quando se aumenta o diâmetro dos respetivos ligadores.

- A espessura da placa de aço não influencia nenhum aspecto de cálculo, apenas o comprimento do ligador.
- A carga imposta na ligação é uma variável necessária ao dimensionamento para o cálculo da capacidade resistente.

Capítulo 4

4. Dimensionamento da ligação para altas temperaturas

A madeira é um material sólido combustível que, quando aquecida, produz gases de queima e chama. Os gases quentes e as chamas aquecem a porção da madeira ainda não atingida, libertando mais gases inflamáveis, gerando um processo em cadeia que alimenta a combustão, (Moraes & Figueroa, 2009).

Tanto a madeira como o carvão proveniente da combustão, são ambos isolantes térmicos, retardando o fluxo de calor para o interior da secção, abrandando, assim, o avanço da frente de carbonização. Desta forma, os elementos de madeira possuem uma camada aquecida, cujas propriedades mecânicas foram afetadas pelo calor, e um núcleo inalterado, (Moraes & Figueroa, 2009).

Entre a camada carbonizada, em que ocorreu perda de massa e alteração das propriedades mecânicas, e a madeira intacta do núcleo, existe uma outra camada de menor espessura, na qual as propriedades da madeira encontram-se alteradas, mas não totalmente decompostas, dando-se o nome de zona de pirólise, (Barreira, 2008).

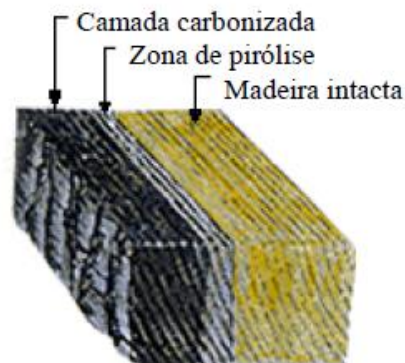


Figura 12 - Zonas de degradação numa secção de madeira, (Barreira, 2008)

Quando a madeira é aquecida em ambiente controlado até aos 100 °C, ocorrem poucas reações químicas, contudo quando esta temperatura é atingida, ocorre a evaporação de grande parte da humidade existente na madeira. À medida que a temperatura au-

menta até aos 200°C, ocorre uma pequena degradação devido às fronteiras químicas começarem a falhar por desidratação. Entre os 200°C e os 280°C, a degradação da camada superficial desloca-se para o interior da madeira. Essa região é sucedida por uma camada na qual a pirólise se processa lentamente. Entre os 240 °C e os 350 °C, ocorre uma formação lenta de carvão. Por sua vez, entre 280 °C e 500 °C ocorrem reações exotérmicas com a libertação de gases combustíveis e alcatrão sob a forma de fumo, originando o carvão. Ultrapassado os 500 °C, completa-se a carbonização, (Barreira, 2008).

Ao contrário do aço, em que o colapso, por ação do fogo, resulta na diminuição das propriedades mecânicas do material com o aumento da temperatura, a falha da resistência mecânica na madeira, só acontece pela perda, por carbonização da secção resistente, (Ferreira, 2005).

De maneira a evitar o colapso da ligação das estruturas, é necessário dimensioná-la de modo a que resista a 30 minutos de incêndio, conforme estipulado nos Eurocódigos. Para isso, é utilizado um dos seguintes métodos, o aumento da área resistente da ligação ou a proteção da ligação com material isolante.

Neste capítulo é apresentado o método de cálculo para ligações do tipo Madeira-Aço-Madeira, protegidas ou não, para situações de alta temperatura conforme o Eurocódigo 5, parte 1-2. Neste Eurocódigo são apresentadas duas formas de cálculo, o método simplificado e o método de redução de carga. No presente estudo será apenas analisado o primeiro método mencionado.

4.1. Materiais isolantes

Os materiais isolantes têm como propósito reduzir a transferência de calor para outros elementos. Podem ser agrupados pela sua composição (natural ou sintética), forma (espuma, painéis, etc.), efeito estrutural, modo de funcionamento, resistência à transferência de calor, impacto ambiental, entre outros. Devido a estes fatores, a escolha do material isolante para uma determinada estrutura é influenciada por diversos fatores.

De forma a prever o comportamento da estrutura é necessário determinar o que acontece no seu interior. Para tais cálculos é essencial ter o conhecimento das propriedades térmicas do material, nomeadamente, o calor específico, massa volúmica e condutividade térmica, de forma a fazer uma escolha eficaz do isolamento, (Haddad, 2016).

4.1.1. Gesso

O gesso é comumente utilizado como material isolante, consistindo num núcleo não combustível feito essencialmente de sulfato de cálcio desidratado com ou sem aditivos. Estes aditivos podem ajudar no aumento da resistência ao fogo e na diminuição de absorção de água. As placas de gesso são resistentes, isolantes acústico, resistentes ao fogo e fáceis de instalar, (Just, Schmid, & König, 2010). Devido à desidratação, este material torna-se quebradiço perdendo a sua resistência mecânica e estrutural, condicionando, assim, a sua capacidade protetora.

4.2. Método de cálculo

Os cálculos apresentados serão efetuados para um tempo de exposição ao fogo de 30 minutos que corresponde ao tempo mínimo de exposição segundo o Eurocódigo 5 parte 1-2, para uma ligação sem proteção, (CEN, 2003), porém, para diferentes tipos de edifícios este valor poderá variar. Os elementos de madeira anteriormente dimensionados à temperatura ambiente, serão novamente analisados para confirmar se resistem aos 30 minutos de exposição ao fogo. Caso não se verifique será necessário proceder ao aumento da seção resistente, ou introduzir material isolante.

A fim de garantir esta verificação é necessário calcular, em primeiro lugar, a tensão axial de projeto para a situação de exposição de fogo, $E_{d,fi}$.

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

Em que F_d corresponde à carga atuante na ligação, e η_{fi} refere-se ao fator de redução de carga.

De seguida é necessário obter o valor de projeto do esforço resistente ao fogo, $f_{d,fi}$ através da seguinte equação:

$$f_{d,fi} = k_{mod,fi} \frac{f_{20}}{\gamma_{M,fi}} \quad (19)$$

Nesta equação, $k_{mod,fi}$ representa o fator de modificação para o fogo, $\gamma_{M,fi}$ é o fator parcial de segurança para a madeira em situação de fogo e, por fim, f_{20} corresponde a 20% fráctil da força resistente à temperatura ambiente e pode ser calculado com base na equação 20, utilizando os valor do coeficiente k_{fi} , tomando, segundo Eurocódigo o valor de 1,15, e da resistência à tração paralela à fibra da madeira, f_k .

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

Por fim, é possível obter a seguinte inequação. Caso se prove verdadeira, a ligação preenche os requisitos para resistir a 30min de fogo.

$$\frac{E_{d,fi}}{A_s} < f_{d,fi} \quad (21)$$

Se a ligação não verificar a inequação apresentada, é escolhida uma das duas soluções apresentadas nos próximos dois subcapítulos.

No Anexo 1 é possível consultar a verificação ao fogo de todas as ligações já calculadas no capítulo anterior. Não se encontra nenhum cálculo relacionado com o redimensionamento da ligação, uma vez que todas as ligações aguentam no mínimo 30 minutos de resistência ao fogo, tal como proposta do Eurocódigo 5 parte 1-2, (CEN, 2003).

4.2.1. Ligações não protegidas

O método simplificado para ligações não protegidas, segundo o Eurocódigo 5 parte 1-2 (CEN, 2003), garante a resistência ao fogo por um período de tempo, $t_{d,fi}$, em

função do ligador. Para o caso de cavilhas, este período de tempo corresponde a 20 minutos, contudo requer que a espessura lateral do elemento, t_1 , mínima seja 45 mm.

A fim de ser possível atingir os 30 minutos de tempo requerido pelo Eurocódigo, torna-se necessário aumentar a espessura e a largura dos elementos laterais de madeira.

A espessura extra do elemento para aumentar a resistência mecânica da ligação ao fogo, a_{fi} , é dada por

$$a_{fi} = \beta_n k_{flux} (t_{req} - t_{d,fi}) \quad (22)$$

Em que β_n é a velocidade para a carbonização, em que os valores de projeto podem ser consultados na tabela 3.1 do Eurocódigo 5 parte 1-2, (CEN, 2003); k_{flux} , representa o coeficiente do fluxo de calor pelo ligador; t_{req} , corresponde a 30 minutos para a resistência ao fogo.

Calculando novamente a Equação 13, com o valor de t_1 atualizado obtém-se um novo valor de $F_{v,Rk}$. Dividindo este novo valor pelo anteriormente calculado no dimensionamento à temperatura ambiente, é possível obter um valor que corresponde ao grau de sobredimensionamento que se impõe à ligação de maneira a esta resistir ao fogo por 30 minutos sem comprometer a estabilidade da estrutura.

4.2.2. Ligações protegidas

De acordo com o método para ligações protegidas segundo o Eurocódigo 5 parte 1-2 (CEN, 2003), para atingir uma resistência ao fogo de 30 minutos, torna-se necessário proteger a ligação com outros materiais. Este mesmo Eurocódigo apresenta 2 hipóteses de proteção, usando placas ou derivados de madeira, e placas de gesso, (CEN, 2003).

Para calcular a espessura necessária, h_p , das placas de proteção, é necessário calcular o tempo de carbonização, t_{ch} . Para isso é preciso ter em conta os valores do tempo requerido para a resistência ao fogo, t_{req} , e a resistência ao fogo por um período de tempo,

$t_{d,fi}$, em função do ligador. Por fim, β_0 , representa a velocidade de carbonização unidimensional de projeto em circunstâncias de incêndio padrão, com os valores a serem consultados na tabela 3.1 do Eurocódigo 5 parte 1-2, (CEN, 2003). Desta forma:

- Para painéis derivados de madeira:

$$t_{ch} \geq t_{req} - 0,5 t_{d,fi} \quad (23)$$

$$h_p = t_{ch} \beta_0 \quad (24)$$

- Para gesso do tipo A ou H

$$t_{ch} \geq t_{req} - 0,5 t_{d,fi} \quad (25)$$

$$h_p = \frac{t_{ch} + 14}{2,8} \quad (26)$$

- Para gesso do tipo F

$$t_{ch} \geq t_{req} - 1,2 t_{d,fi} \quad (27)$$

$$h_p = \frac{t_{ch} + 14}{2,8} \quad (28)$$

4.2.3. Regras adicionais de cálculo

Para ligações com placas de aço internas, o Eurocódigo 5, parte 1-2 (CEN, 2003) adiciona algumas regras para além das mencionadas nos subcapítulos anteriores. Assim, se a espessura da placa central de aço, t_s , for igual ou superior a 2 mm, a largura da placa de aço, b_{st} , deve seguir as dimensões apresentadas na tabela 8, em função do tempo mínimo requerido, t_{req} .

Tabela 8 - Largura das placas de aço

| Tipo de proteção | t_{req} | b_{st} |
|-------------------------------|------------|-----------------------|
| Lados não protegidos em geral | 30 minutos | $\geq 200 \text{ mm}$ |
| | 60 minutos | $\geq 280 \text{ mm}$ |

| | | |
|-------------------------|------------|-----------------------|
| Lados não protegidos em | 30 minutos | $\geq 120 \text{ mm}$ |
| 1 ou 2 lados | 60 minutos | $\geq 280 \text{ mm}$ |

Para placas de aço mais estreitas que os elementos de madeira podem ser consideradas como protegidas nos seguintes casos:

- Para placas com a espessura inferior a 3 mm, a profundidade de abertura, d_g , tem de ser superior a 20 mm para uma resistência ao fogo de trinta minutos e superior a 60 mm para uma resistência ao fogo de sessenta minutos.
- Para juntas com tiras coladas ou placas de proteção à base de madeira, onde a profundidade da tira colada, d_g , ou a espessura do painel, h_p , é maior que 10 mm para a resistência ao fogo de trinta minutos e maior que 30 mm para resistência ao fogo de sessenta minutos.

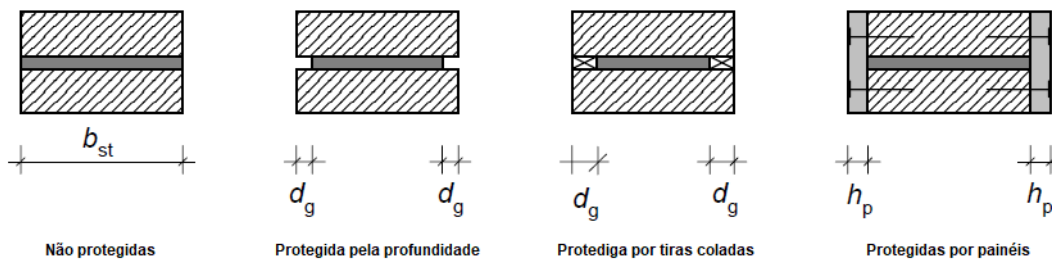


Figura 13 - Tipos de proteção dos lados da placa de aço em ligações M-A-M, ligadores não exibidos. Adaptado de (CEN, 2003)

Capítulo 5

5. Análise de elementos finitos para ligações M-A-M à temperatura ambiente

Devido à necessidade na análise de elementos estruturais e carregamentos complexos, torna-se necessário utilizar métodos aproximados de engenharia que permitam aplicar os princípios da teoria da mecânica dos meios contínuos, na resolução de problemas de cálculo sem uma solução fácil de cálculo. De entre esses métodos destacam-se aqueles baseados na divisão do modelo contínuo numa discretização em diferentes elementos finitos, para a obtenção de soluções aproximadas para o interior do modelo, sendo o processo mais utilizado o Método dos Elementos Finitos (MEF), (Westin & Ribeiro, 2009).

A larga utilização do MEF deve-se ao facto de ser aplicado em diversas áreas de engenharia para a análise de problemas clássicos elasto-lineares da mecânica estrutural, em problemas não lineares, na mecânica de fluidos, no eletromagnetismo, na transmissão de calor, acústica, fratura, fadiga, entre outros tipos de análise, (Westin & Ribeiro, 2009).

Neste trabalho vai ser utilizado o programa de elementos finitos *ANSYS*, utilizado em diferentes áreas da engenharia. As análises estruturais terão como objetivo identificar os deslocamentos, deformações, tensões e forças existentes na ligação. O modelo de solução é baseado num sistema de equações de equilíbrio de resolução algébrica, para os diferentes elementos finitos constituintes do modelo. Por assemblagem, a solução é obtida para o modelo global, função das condições de fronteira e de carregamento inicial, de forma a obter a resposta global do problema.

O Método de Elementos Finitos recorre a modelos contínuos que são aproximados a um número finito de elementos discretos, e ligados entre si por pontos nodais ou nós. Cada nó de um elemento finito possui um determinado número de graus de liberdade associado a translações e/ou rotações necessárias ao tipo de análise. A interpolação dentro dos elementos finitos é conseguida através de funções de forma utilizadas na resolução das equações de equilíbrio. Estas funções de forma são tipicamente equações polinomiais (lineares, quadráticas, ...) que interpolam a solução entre os valores discretos obtidos nos pontos nodais, para os diferentes graus de liberdade associados. Particularmente, e para

análises tridimensionais são escolhidas funções de forma com polinómios de baixa ordem, de forma a não introduzir um dispêndio computacional pelo aumento significativo de graus de liberdade, (Aissa, 2017).

Em todas as simulações apresentadas foi utilizado o elemento SOLID185 como apresentado na Figura 12, com base em funções de forma lineares. O elemento é então definido por oito nós e três graus de liberdade por cada nó, correspondentes às translações nas direções x , y e z .

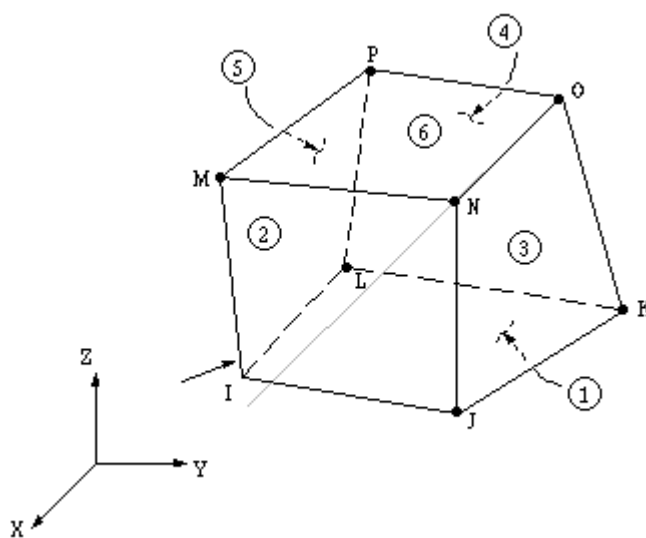


Figura 14 - Elemento SOLID185 com 8 nós

O principal objetivo da simulação numérica por Elementos Finitos é obter a carga máxima que a ligação suporta a fim de validar os cálculos simplificados obtidos pelo Eurocódigo. Com a utilização do MEF é possível verificar a ligação no seu conjunto, e analisar-se para qualquer parte do modelo a distribuição de tensões, deformações e deslocamentos, identificando as zonas mais críticas.

Neste trabalho serão utilizadas ligações similares às apresentadas no desenho técnico do capítulo 3, Figura 9. São, portanto, constituídas por quatro placas de madeira, uma de aço e um número variável de ligadores (cavilhas) dispostas segundo as regras do Eurocódigo. Vão ser analisadas quatro ligações distintas, que se encontram apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 - Parâmetros das ligações estudadas no programa ANSYS

| Ligação | d(mm) | t1(mm) | Cn | Ln | h(mm) | L(mm) | ts (mm) |
|---------|-------|--------|----|----|-------|-------|---------|
| A | 10 | 45 | 6 | 1 | 60 | 390 | 5 |
| B | 10 | 45 | 12 | 1 | 60 | 690 | 5 |
| C | 10 | 45 | 9 | 2 | 90 | 540 | 5 |
| D | 10 | 45 | 12 | 2 | 90 | 690 | 5 |

Como se pode verificar, o diâmetro d das cavilhas mantém-se constante bem como a espessura das placas de madeira, t_1 , e a espessura da placa de aço, t_s . Faz-se variar o número de colunas, C_n , e de linhas, L_n , de ligadores. Consequentemente, varia a altura, h , e o comprimento, L , da ligação total. Foram escolhidas estas ligações pois são as que, *a priori*, apresentam uma menor resistência mecânica. Devido a tratar-se de estruturas com dupla simetria, só será analisado um quarto de cada ligação, como se pode observar na Figura 13, reduzindo assim o tempo de processamento computacional bem como a memória RAM necessária da resolução da simulação.

A modelação das geometrias nas diferentes ligações foi facilitada pela utilização de variáveis paramétricas através da linguagem APDL (Ansys Parametric Design Language), assim como criando as rotinas necessárias para a definição dos materiais, do contato entre os elementos, condições de fronteira e do método de solução. Um exemplo de um dos códigos utilizados pode ser consultado no anexo 30.

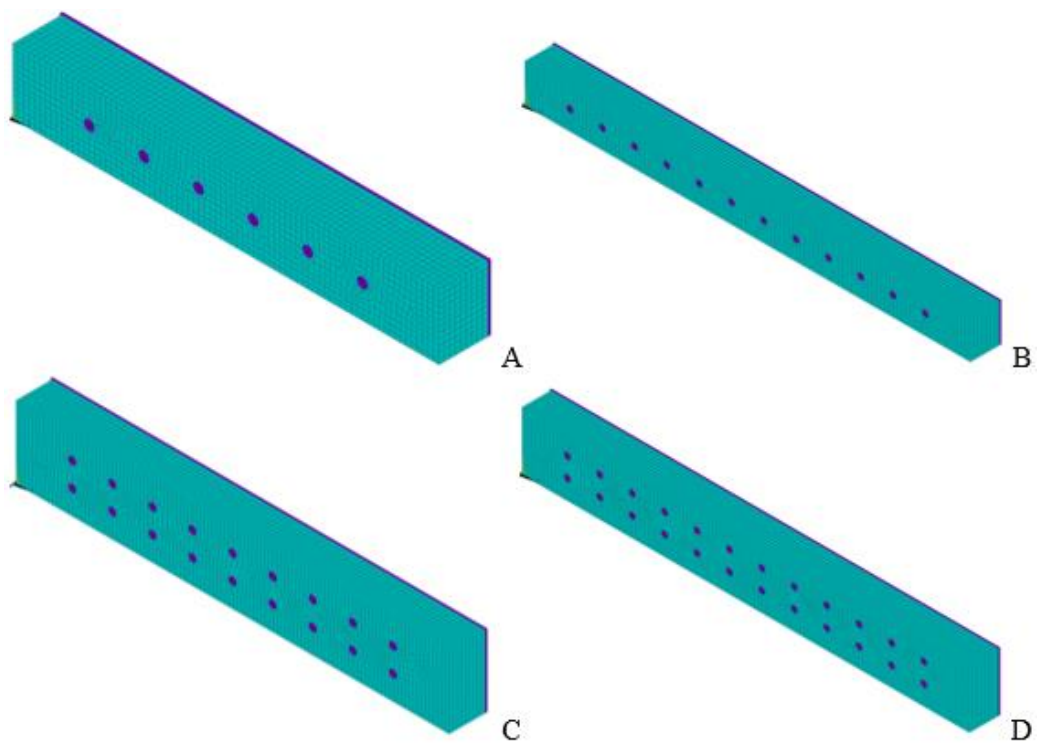
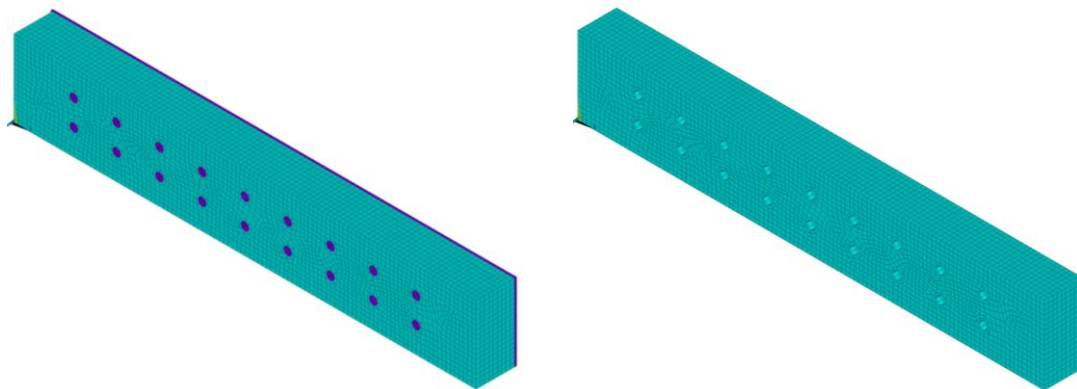


Figura 15 - Representação das quatro ligações utilizadas

Tanto o aço como a madeira foram considerados materiais com comportamento não linear. Foram utilizados dois tipos de materiais distintos (isotrópico para o aço e ortotrópico para a madeira), com características elástico-plástico, de modo a obter resultados mais próximos do real com a simulação numérica.

As cargas utilizadas e as condições fronteira respeitam, portanto, as simetrias impostas. Para a elaboração da malha de elementos finitos foi utilizada uma dimensão para a aresta do elemento igual a 5mm, sendo a mesma gerada de forma automática.



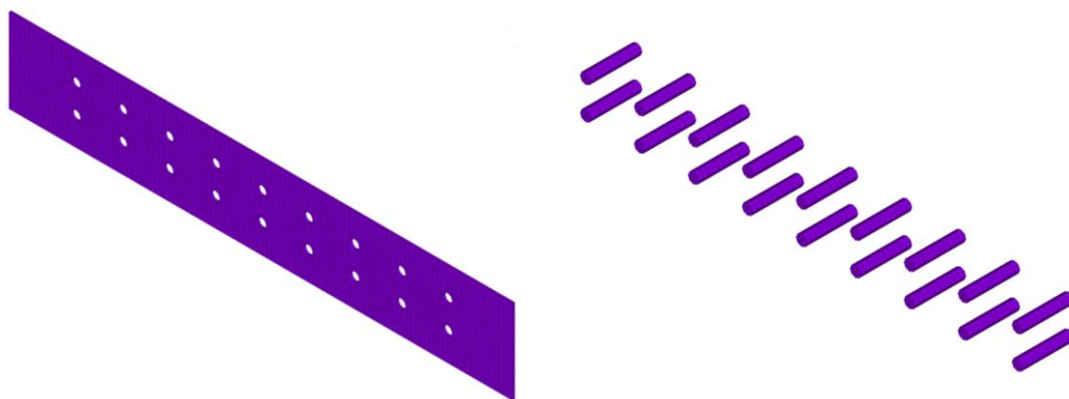


Figura 16 - Ligação C, elemento de madeira, placa de aço e cavilhas com respectiva malha utilizada

No conjunto global das peças da ligação, os elementos encontram-se em contacto uns em relação aos outros, nomeadamente as cavilhas em relação à placa de aço e aos elementos de madeira, e ainda a placa de aço em relação aos elementos de madeira. Torna-se, por isso, necessário introduzir o contacto entre as diferentes superfícies dos elementos, através da utilização de um algoritmo que automaticamente gera os pares de contacto, denominados por TARGE170 e CONTA174. O coeficiente de fricção estático considerado entre as superfícies é de 0,3 para um comportamento tangencial baseado na lei da fricção de Coulomb.

Na análise estática de elementos finitos será utilizada uma carga de tração incremental linear que varia até 200 kN, aplicada numa das extremidades do elemento de madeira. O programa irá realizar a análise através de incrementos (*steps*), parando assim que alcançar a carga máxima de resistência da ligação. Em cada *step* o programa resolve numericamente o problema dentro de um determinado intervalo de tempo (*time step*) escolhido, neste caso entre o máximo 10 s e o mínimo 1 s, até obter a convergência da solução, com base num número máximo de iterações imposto e uma tolerância admitida, neste caso sempre igual a 0,001.

Para cada ligação foram executadas seis diferentes simulações fazendo variar diferentes parâmetros. Os casos estudados podem ser consultados na Tabela 10.

Tabela 10 - Casos estudados nas simulações mecânicas

| Caso | Critério de convergência | t_{pk} (mm) | Número de iterações |
|------|--------------------------|---------------|---------------------------|
| 1 | L2 | 2 | 6 |
| 2 | L1 | 2 | 6 |
| 3 | <i>Infinite</i> | 2 | 6 |
| 4 | L2 | 2 | Selecionado pelo programa |
| 5 | L1 | 2 | Selecionado pelo programa |
| 6 | <i>Infinite</i> | 2 | Selecionado pelo programa |

Para a verificação da convergência de um problema, o programa apresenta três normas vetoriais: L1 (compara o critério de convergência com a soma dos valores absolutos do desequilíbrio de força para todos os graus de liberdade), L2 (executa a verificação da convergência utilizando a soma da raiz quadrada dos quadrados do desequilíbrio de força para todos os graus de liberdade) e a norma infinita (repete a verificação do grau de liberdade em cada nó grau de liberdade do modelo). Estes critérios foram escolhidos de acordo com a melhor solução a obter para cada caso em estudo.

As simulações numéricas têm como objetivo final determinar a carga máxima que a ligação suporta. Estes valores serão posteriormente comparados com os valores obtidos analiticamente. Os resultados analíticos têm o seu valor diminuído devido aos coeficientes de segurança aplicados segundo o Eurocódigo 5, parte 1-1 (CEN, 2004), nomeadamente γ_M e k_{mod} . Assim, a comparação entre os resultados é efetuada com os valores analíticos sem a incorporação dos coeficientes de segurança. Na seguinte tabela são apresentados os resultados comparativos entre os valores numéricos e os obtidos analiticamente para uma ligação. A ligação apresentada refere-se ao caso 2 em estudo, tendo sido o modelo que comparativamente obteve os menores erros relativos. Os resultados obtidos para as restantes ligações podem ser consultados nos Anexos 2 e 3 com os respetivos erros relativos obtidos.

Tabela 11 - Resultados obtidos e respetivos erros relativos para o caso 2

| Ligação | Analítico (N) | Analítico sem coeficiente de segurança (N) | Numérico (N) | Erro relativo |
|---------|---------------|--|--------------|---------------|
| A | 71136 | 111150 | 107010 | 3,72% |
| B | 71136 | 111150 | 116063 | 4,42% |
| C | 106704 | 166725 | 174840 | 4,87% |
| D | 106704 | 166725 | 172060 | 3,20% |

Em relação às tensões de corte, os valores máximos e mínimos, tanto nos elementos de madeira como nos elementos de aço, verificam-se nas zonas dos furos das cavilhas. Nos elementos de madeira, encontram-se zonas de compressão e tração à volta dos furos, por um lado devido ao esmagamento da madeira contra o ligador e por outro lado no alongamento dos furos nas zonas perpendiculares à direção da carga.

Na Figura 16 é possível visualizar um gráfico da comparação das tensões equivalentes de von Mises em quatro nós diferentes. Estes nós, localizam-se nas zonas onde se verificam as maiores tensões equivalentes e podem ser verificadas a sua localização na Figura 15.

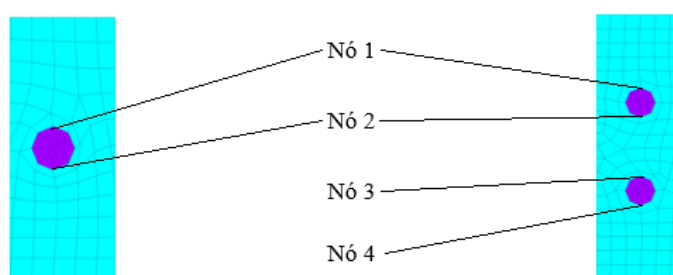


Figura 17 - Localização de quatro nós a fim de retirar os valores das tensões equivalentes. À esquerda para as ligações A e B, e à direita, para as ligações C e D

O gráfico representa a evolução das referidas tensões ao longo do tempo de simulação com a carga incremental. Os gráficos de todas as simulações para o caso 2 podem ser consultados no Anexo 4, sendo que o da Figura 16 representa apenas a ligação C.

Pela observação do gráfico é possível verificar que os nós em estudo alcançam a tensão de cedência da madeira, através dos valores obtidos nas tensões equivalentes próximo de 19,5 MPa. Estes valores máximos de tensão correspondem à carga imposta de 130 kN na ligação, pelo que a partir desse valor a solução numérica estabiliza e deixará de convergir.

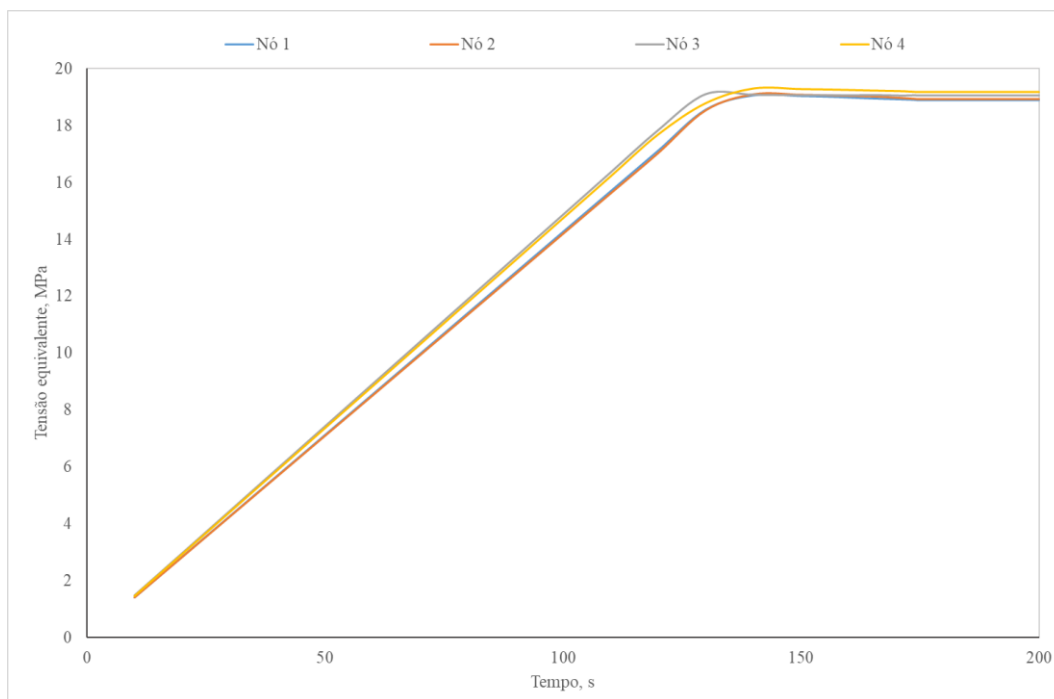


Figura 18 - Tensões equivalentes de von Mises na ligação C, caso 2, em quatro nós distintos

Os resultados obtidos são limitados pelas características ortotrópicas da madeira em todas as três principais direções. A Figura 17 representa a tensão equivalente verificada ao longo da ligação. É possível observar que as tensões equivalentes aumentam com a sua proximidade à zona de aplicação da carga. As tensões na componente longitudinal, na zona das cavilhas possui um valor reduzido (cor azul claro) comparado com a restante ligação possivelmente devido à presença dos ligadores, tornando a ligação mais estável. Novamente, na figura apenas se encontra representada a ligação C para o caso 2, contudo as imagens para todas as ligações do referido caso podem ser consultadas nos Anexos 5 a 8.

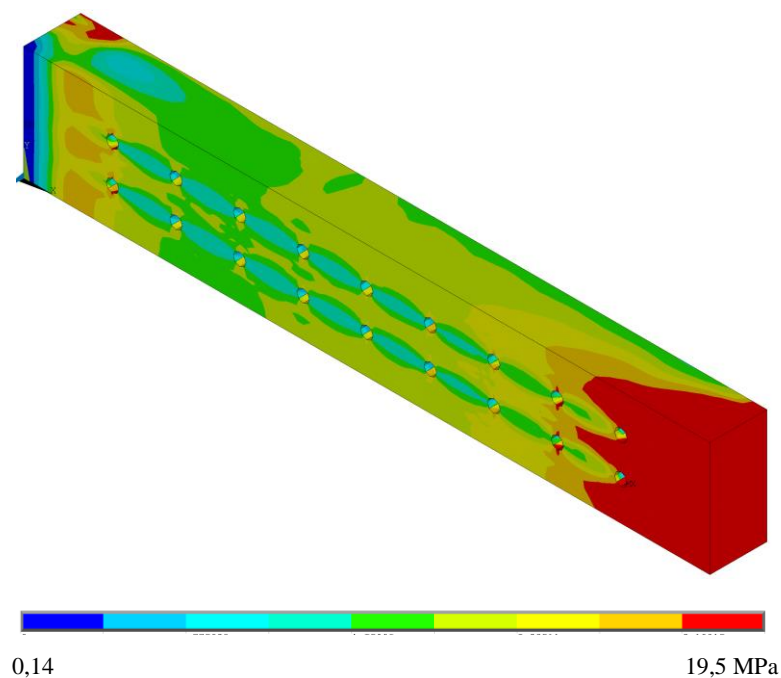


Figura 19 - Tensões equivalentes, ligação C, caso 2

Devido ao esforço computacional, como referido, foram utilizados *time steps* de 10 segundos e uma tolerância de 0,001. Apesar de estes dois valores proporcionarem resultados satisfatórios relativamente à avaliação mecânica da ligação bem como a verificação da segurança da mesma, diminuindo estes dois parâmetros é possível refinar os valores, obtendo uma solução que se encontra mais próxima da realidade com erros relativos inferiores. A diminuição do tamanho da malha ou o refinamento em zonas mais próximas dos furos é outra variável importante para a melhoria da solução.

Capítulo 6

6. Análise de elementos finitos para ligações M-A-M a altas temperaturas

Neste capítulo, serão utilizados os mesmos modelos numéricos submetidos a uma análise térmica não-linear em regime transiente. Através dos cálculos analíticos foi possível verificar que cada ligação consegue preencher os requisitos mínimos para resistir a uma situação de um fogo durante trinta minutos sem comprometer a estabilidade da estrutura. Por esse motivo, os modelos numéricos não sofrerão qualquer alteração geométrica.

Tal como no capítulo 5, será apenas analisado um quarto da ligação devido à existência de dupla simetria, reduzindo, portanto, o esforço computacional. O tipo de elemento utilizado corresponde ao SOLID278, representado na Figura 18. Trata-se de um elemento específico para análises térmica, possuindo oito nós com apenas um grau de liberdade em cada um nó, a temperatura.

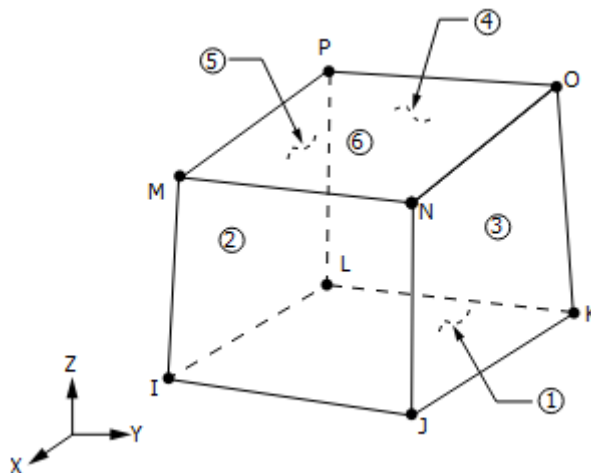


Figura 20 – Elemento SOLID278 com oito nós

Para o tempo total da análise de 1800 segundos, e tal como no modelo mecânico, também na análise térmica foi escolhido um incremento de tempo (*time step*) máximo de 10 segundos e um mínimo de 0,5 segundos. Foi utilizado um critério de convergência com base no fluxo de calor menor que 0,9%, e um valor de referência mínimo de 1×10^{-6} .

6.1. Ligações não protegidas

No presente subcapítulo são apresentadas as simulações relativas a ligações em que a face exposta não se encontra protegida por nenhum tipo de isolamento.

Para este tipo de análise também foram desenvolvidos códigos em linguagem APDL, para de alguma forma facilitar a modelação e a introdução da informação necessária em pré-processamento. A utilização desta linguagem facilita a construção de um modelo de análise complexo. Um exemplo de um dos códigos utilizado pode ser consultado no anexo 31.

Na análise térmica, as condições de fronteira utilizadas relacionam-se com a convecção e a radiação devido à exposição do fogo. A temperatura inicial do modelo corresponde à temperatura ambiente de 20 °C. A emissividade considerada para ambos os materiais corresponde a 1. Apenas uma das superfícies da ligação estará exposta à curva de fogo ISO834 durante 1800 segundos. A convecção da face exposta, corresponde a 25 W/m²K. A constante de Stephan-Boltzmann é de $5,67 \times 10^{-14}$ Wmm⁻² K⁻⁴ (CEN, 2003).

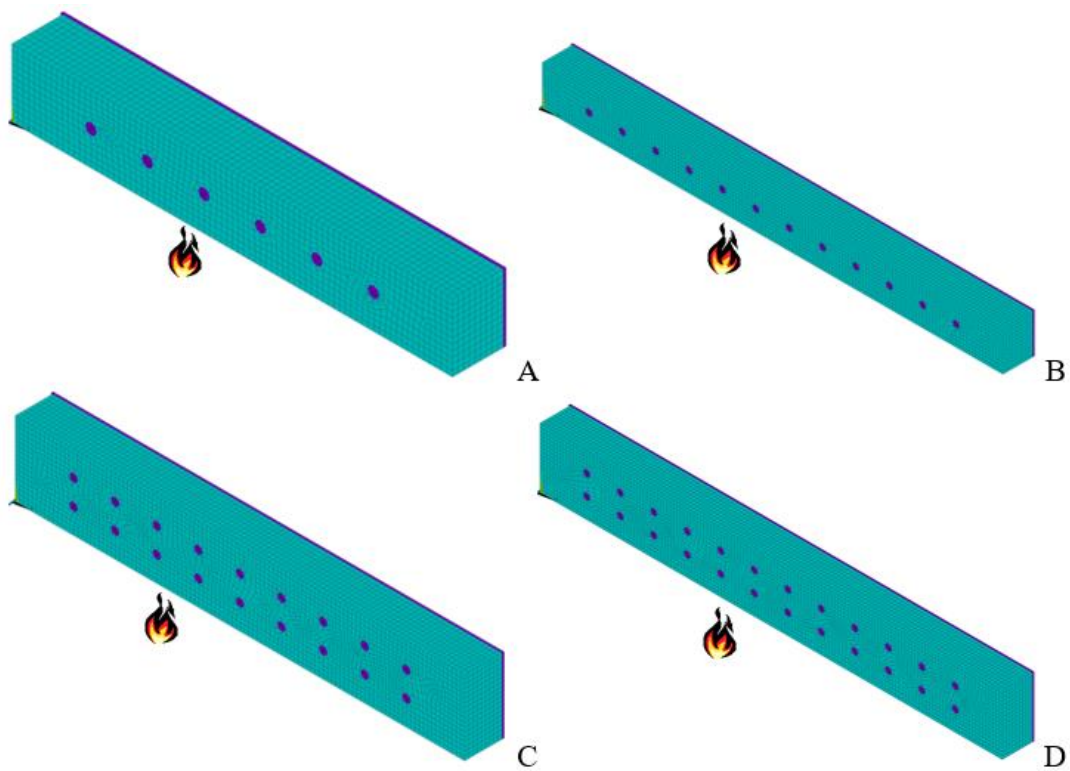


Figura 21 - Representação das faces expostas

O principal objetivo da análise térmica consiste na obtenção de valores de temperatura e obtenção da velocidade de carbonização da madeira quando sujeita ao fogo, comparando-a com o seu valor teórica. Para um tempo de exposição ao fogo de trinta minutos, os valores da velocidade de carbonização calculados nas ligações em estudo são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Resultados numéricos para a velocidade de carbonização

| Ligação | Eurocódigo 5, parte 1-2, velocidade de carbonização, mm/min | Valor numérico da velocidade de carbonização, mm/min |
|---------|---|--|
| A | 0,7 | 0,6833 |
| B | 0,7 | 0,6917 |
| C | 0,7 | 0,6917 |
| D | 0,7 | 0,7000 |

Como mencionado anteriormente em outros capítulos, são considerados dois tipos de materiais, madeira e aço. As propriedades térmicas, contudo, aparecem como os fatores determinantes para obter resultados satisfatórios.

Nas próximas imagens são exibidos os resultados obtidos em uma das ligações. Assim como no capítulo anterior será apresentada apenas a ligação C, sendo que os restantes podem ser consultados nos Anexos 9 a 13, bem como a temperatura obtida nos outros elementos da estrutura para um tempo de 30 minutos.

A Figura 21, representa a evolução da temperatura ao longo dos 1800 segundos simulados. São considerados três nós diferentes, com a sua localização representada esquematicamente na Figura 20, sendo que todos se localizam a aproximadamente 5mm da superfície de uma cavilha, um encontra-se na superfície da face exposta e os outros nós a 5 e 10 mm de profundidade.



Figura 22 - Localização de três nós a fim de retirar os valores da temperatura. À esquerda para as ligações A e B, e à direita, para as ligações C e D

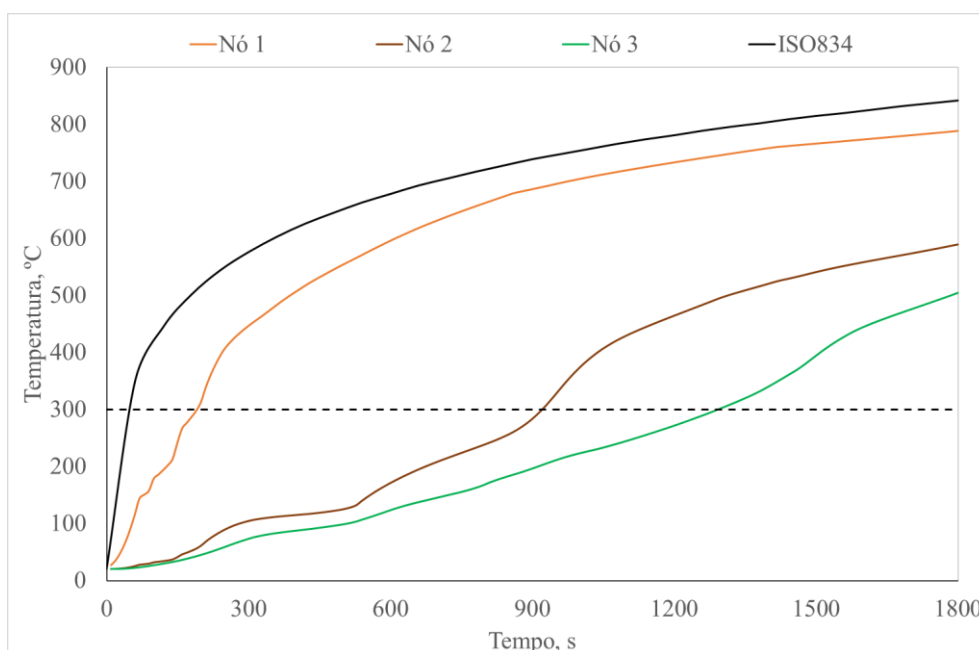


Figura 23 - Temperatura em três nós a 0, 5 e 10 mm de profundidade em ligação não protegida

Através da análise do gráfico é fácil concluir que quanto maior a profundidade a que se encontra o nó, menor a temperatura que este atinge, isto devido ao efeito isolante da madeira e do carvão. Numa fase inicial, verifica-se alguma irregularidade nos valores obtidos (entre 20 e 200°C) devido à malha e ao *time step* utilizados na análise.

Em todas as ligações, a temperatura de carbonização da madeira (300°C) foi atingida aproximadamente a 155 segundos após o início da simulação.

Nas Figura 22 a 23 encontra-se representada a comparação entre a madeira carbonizada aos 15 minutos de simulação e no fim de 30 minutos. Na Figura 23 é apresentada uma vista do interior do elemento de madeira.

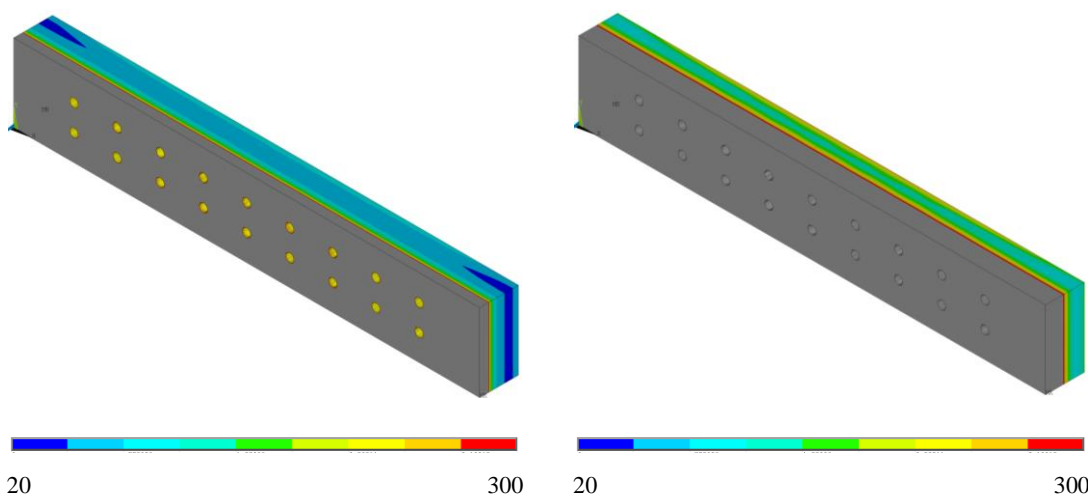


Figura 24 - Madeira carbonizada ao fim de 15 minutos (à esquerda) e ao fim de 30 minutos (à direita) de simulação em ligação não protegida

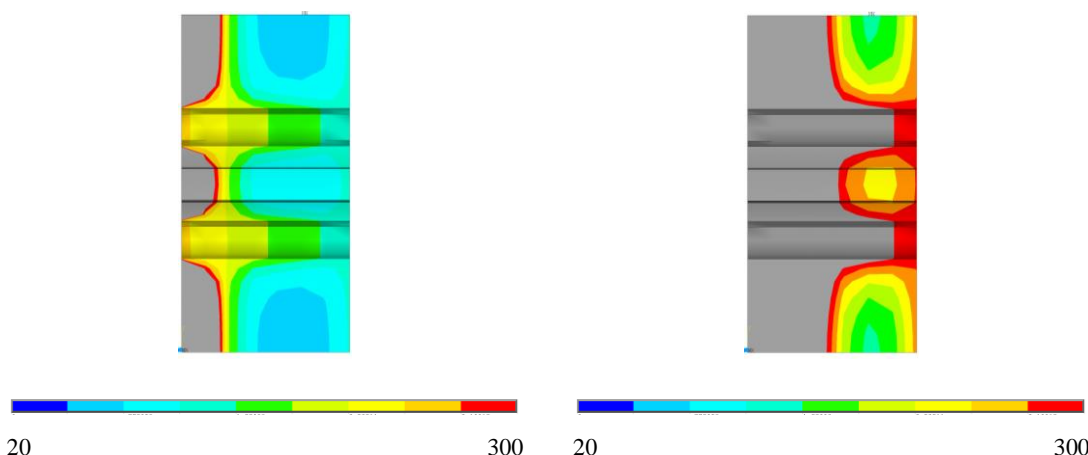


Figura 25 - Madeira carbonizada ao fim de 15 minutos (à esquerda) e ao fim de 30 minutos (à direita) de simulação, pormenor, em ligação não protegida.

Ao fim de 15 minutos, a temperatura da superfície de ligação encontra-se perto dos 650 °C que ultrapassa a temperatura de carbonização da madeira, portanto parte da madeira já se encontra carbonizada. Ao fim de 30 minutos a profundidade de carbonização duplicou.

De acordo com os dados obtidos nas quatro simulações térmicas transientes realizadas para as ligações M-A-M não protegidas é possível concluir que os modelos numéricos encontram-se de acordo com os dados do Eurocódigo 5, parte 1-2, (CEN, 2003).

6.2. Ligações protegidas

Neste subcapítulo, todas as variáveis e modelos numéricos correspondem aos apresentados no subcapítulo anterior, com a adição do gesso como material isolante. Um exemplo do código desenvolvido na linguagem APDL pode ser consultado no anexo 31.

Às quatro ligações estudadas foi adicionada uma camada de gesso com 12,1 mm, correspondente ao valor mínimo de hp para o gesso do tipo A, com o objetivo de retardar a velocidade de carbonização por trinta minutos de exposição a condições de fogo de acordo com o Eurocódigo 5, parte 1-2 (CEN, 2003).

As propriedades térmicas do gesso não se encontram especificadas no Eurocódigo, por isso foi necessário recorrer à literatura. Atendendo à diversificação das propriedades deste material, foram escolhidos três tipos de gesso de três autores diferentes, (Aissa, 2017; Alves & Batista, 2007; Sultan, 1996). Nas figuras seguintes estão representadas a condutividade térmica, o calor específico e a massa volúmica do gesso, com base na literatura.

No Anexo 14 podem ser consultadas as formas de cálculo de cada um dos gessos utilizados neste estudo.

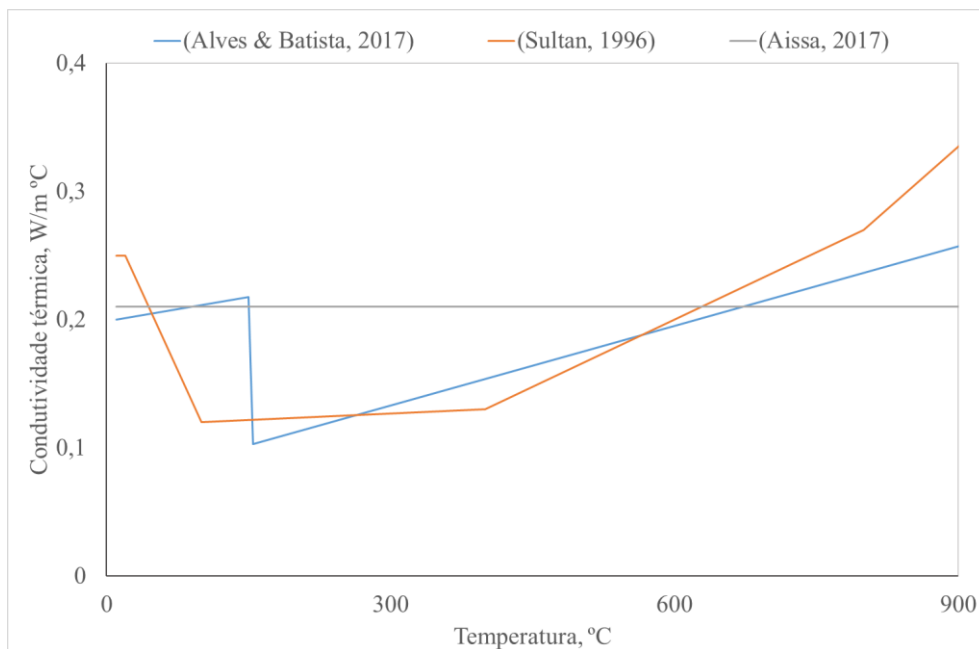


Figura 26 - Condutividade térmica do gesso segundo vários autores

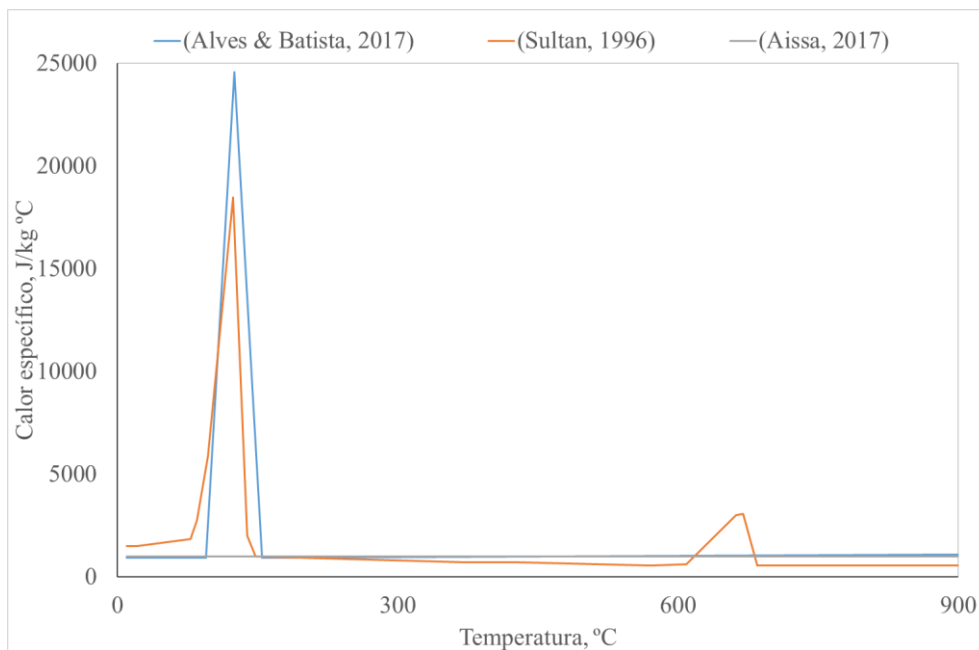


Figura 27 - Calor específico do gesso segundo vários autores

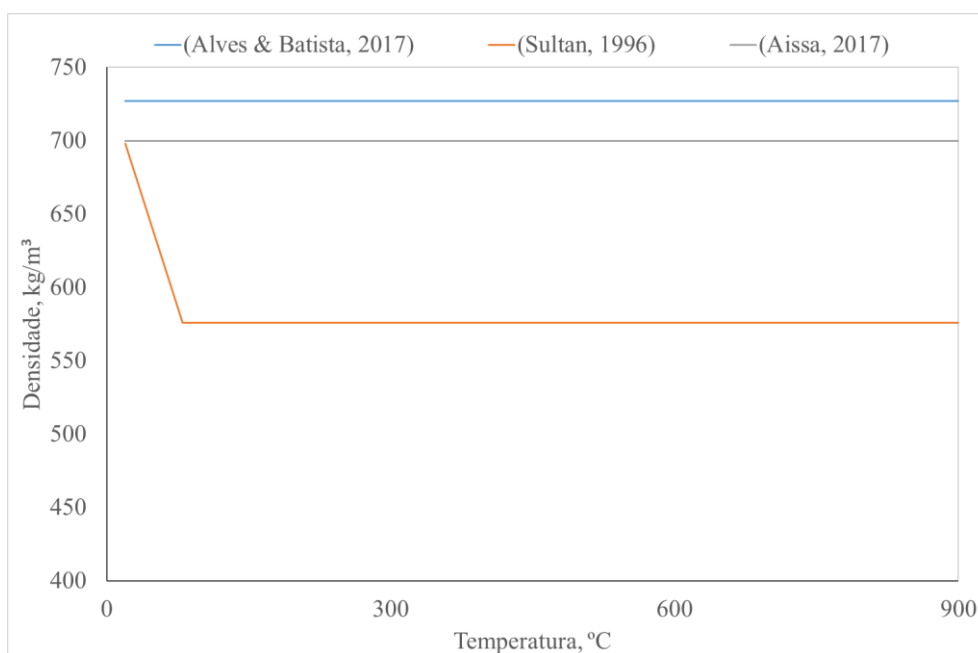


Figura 28 - Densidade do gesso segundo vários autores

Na figura seguinte encontram-se representadas as quatro ligações com a respetiva camada de isolante. A espessura desta camada, h_p , é considerada 12,1mm. Este valor é obtido pela Equação (26), que representa a espessura obtida pelo Eurocódigo para o gesso do tipo A num tempo de exposição ao fogo de trinta minutos, em ligações com cavilhas. Apesar de nenhum dos gessos corresponder exatamente ao tipo A, a espessura será mantida constante para qualquer um dos materiais de gesso para obtenção de um termo de comparação.

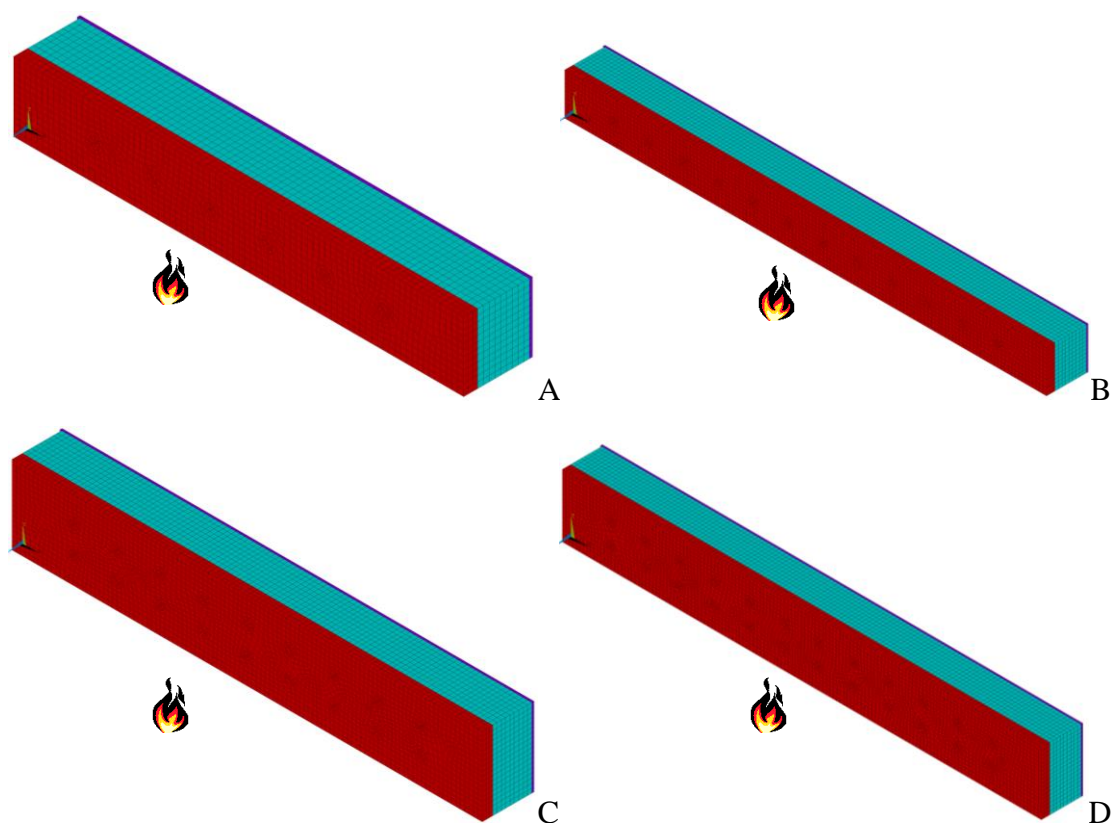


Figura 29 – Representação das quatro ligações utilizadas com as respectivas faces expostas protegidas por gesso

Como referido anteriormente, a face exposta destas ligações estará sujeita a uma análise térmica do tipo transiente e não linear, sob condições de fogo durante trinta minutos de acordo com a curva ISO834. A temperatura inicial encontra-se a 20 °C. Será ainda realizada uma análise para cada tipo do gesso.

Com as simulações pretende-se verificar se a espessura de gesso é suficiente para proteger a ligação durante os trinta minutos de incêndio. Será ainda realizada a comparação entre os diferentes tipos de gesso.

Novamente, irá apenas ser apresentada a ligação C para todos os tipos de gesso, contudo os resultados de todas as simulações podem ser consultados em anexo para os trinta minutos de simulação.

As Figuras 29 a 31 apresentam a evolução de 4 pontos nodais distintos da ligação ao longo do tempo para cada um dos tipos de gesso estudados. Os primeiros três nós encontram-se na superfície da madeira, 5mm e 10mm de profundidade, respetivamente,

o quarto nó encontra-se na superfície do gesso. A localização dos pontos está representada esquematicamente na Figura 28. A curva ISO834 representa a evolução da temperatura do fogo ao longo do tempo.



Figura 30- Localização de três nós a fim de retirar os valores da temperatura. À esquerda para as ligações A e B, e à direita, para as ligações C e D

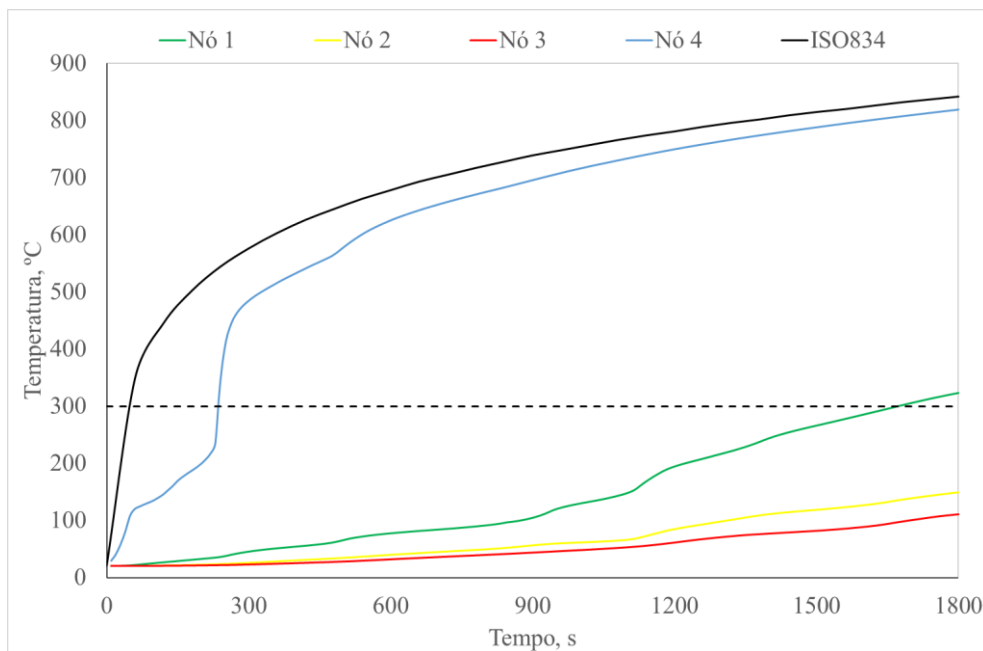


Figura 31 - Temperatura de quatro nós a 0, 12,1, 17,1 e 22,1 mm de profundidade em ligação protegida, gesso de (Alves & Batista, 2007)

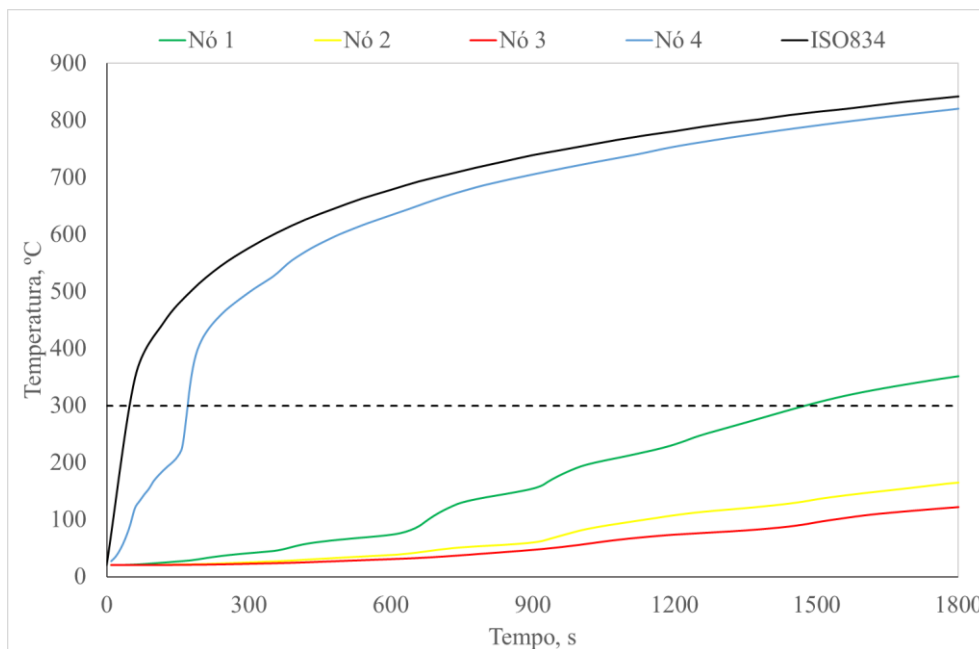


Figura 32 - Temperatura de quatro nós a 0, 12,1, 17,1 e 22,1 mm de profundidade em ligação protegida, gesso de (Sultan, 1996)

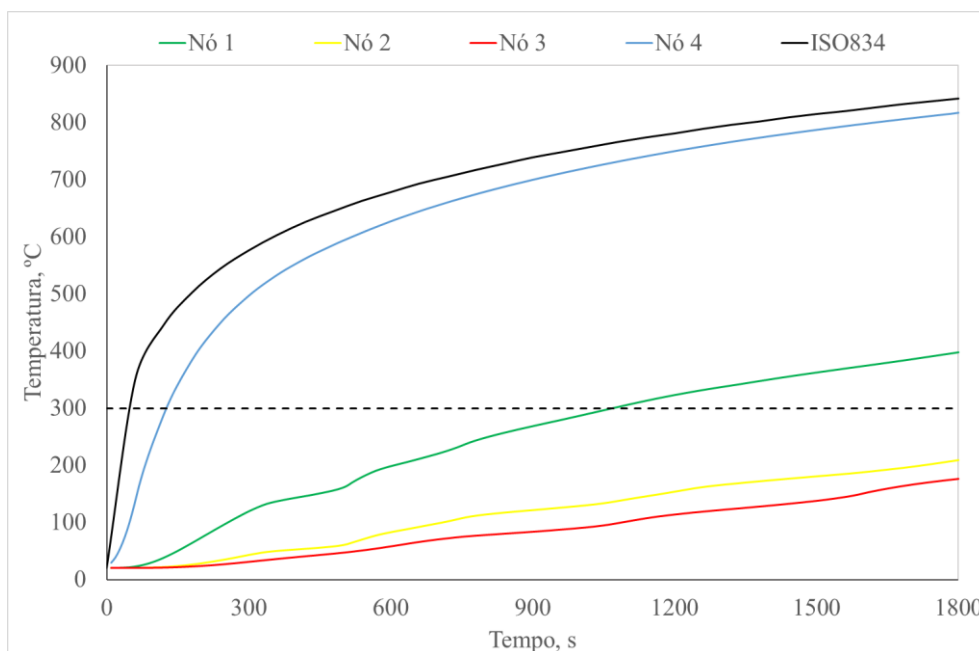


Figura 33 - Temperatura de quatro nós a 0, 12,1, 17,1 e 22,1 mm de profundidade em ligação protegida, gesso de (Aissa, 2017)

A partir da análise dos gráficos é possível observar que em todos se verifica a carbonização da madeira, sendo que, no terceiro gesso (Aissa, 2017) os nós analisados alcançam uma maior temperatura, relativamente aos outros tipos de gesso

Nas simulações realizadas, o tempo que decorreu até se começar a verificar a carbonização da madeira é de, aproximadamente, 1195 segundos para o gesso do autor (Alves & Batista, 2007), 1012 segundo para o gesso de (Sultan, 1996) e 608 segundos para o gesso do autor (Aissa, 2017).

No gesso (Alves & Batista, 2007), a temperatura máxima atingida no primeiro nó é a inferior de todos os casos, sendo, por isso, o gesso que melhor isola a ligação. É de salientar, contudo, que utilizando os 12,1 mm de espessura para o gesso, não se torna suficiente para proteger a ligação. Porém, confirmando a verificação imposta pelo Euro-código, a espessura da camada carbonizada não é suficiente para comprometer a segurança da ligação ao fim dos 30 minutos de incêndio.

Nas figuras seguintes é apresentada a evolução da camada de madeira carbonizada ao fim de 15 minutos e de 30 minutos para cada um dos tipos de gesso utilizados.

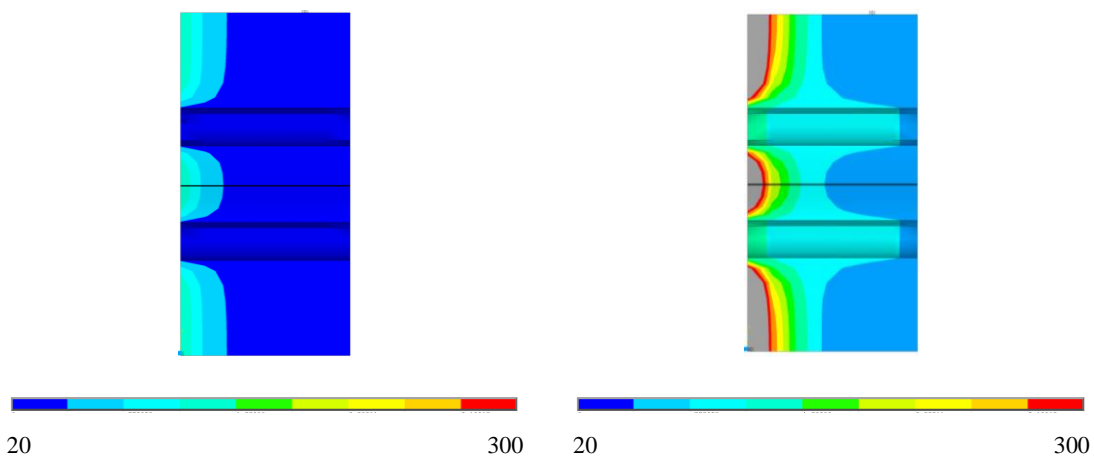


Figura 34 - Madeira carbonizada ao fim de 15 minutos (à esquerda) e ao fim de 30 minutos (à direita) de simulação em ligação protegida por gesso tipo (Alves & Batista, 2007)

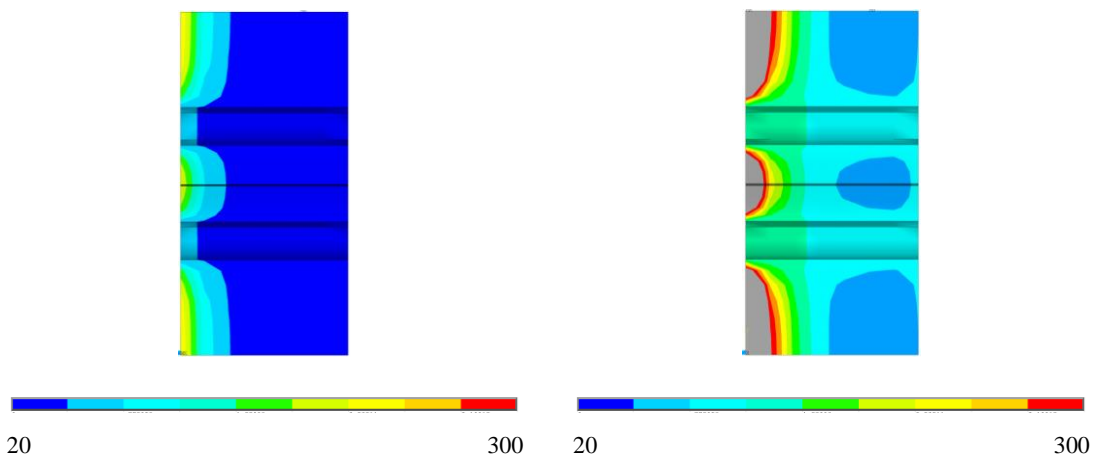


Figura 35 - Madeira carbonizada ao fim de 15 minutos (à esquerda) e ao fim de 30 minutos (à direita) de simulação em ligação protegida por gesso tipo (Sultan, 1996)

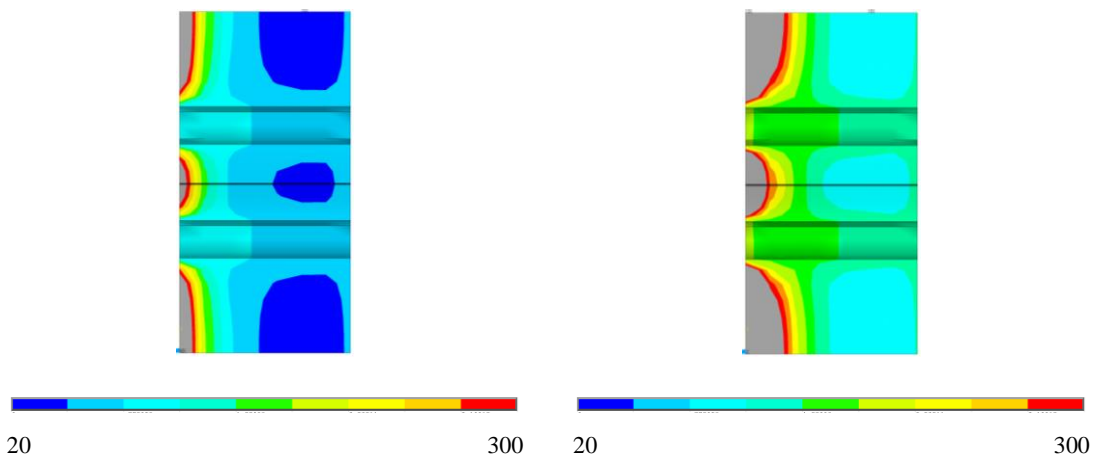


Figura 36 - Madeira carbonizada ao fim de 15 minutos (à esquerda) e ao fim de 30 minutos (à direita) de simulação em ligação protegida por gesso tipo (Aissa, 2017)

Na Figura 36 encontra-se apresentada a temperatura de todos os elementos de madeira de todas as ligações ao fim dos 30 minutos de simulação.

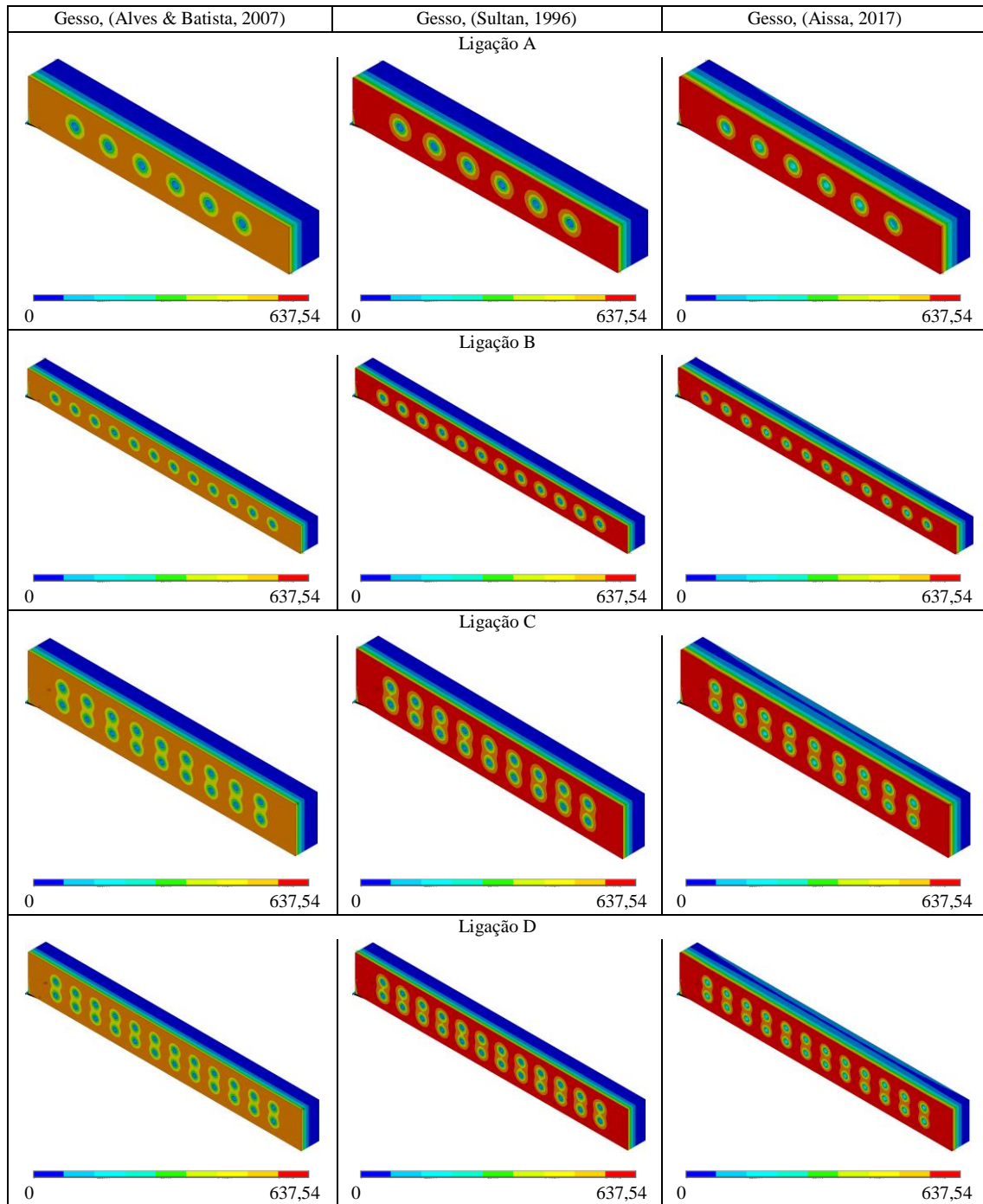


Figura 37 - Temperatura (°C) dos elementos de madeira em ligação M-A-M protegidas por diferentes tipos de gesso, da esquerda para a direita (Alves & Batista, 2007; Sultan, 1996; Aissa, 2017)

Através da análise das imagens apresentadas, é possível constatar os valores dos gráficos para as temperaturas, sendo que o gesso proposto por (Alves & Batista, 2007) é o que mantém o elemento de madeira a uma temperatura inferior, levando a uma menor camada de madeira carbonizada. Por outro lado, o gesso do autor (Aissa, 2017) é o que verifica uma maior temperatura ao longo de todo o elemento de madeira.

De acordo com os resultados obtidos para as doze simulações térmicas transientes realizadas às ligações M-A-M protegidas é possível concluir que os modelos numéricos se encontram de acordo com os dados do Eurocódigo 5, parte 1-2, (CEN, 2003).

Capítulo 7

7. Análise de resultados e conclusões

O dimensionamento analítico imposto pelo Eurocódigo tanto para a análise mecânica como para a verificação ao fogo, trata-se de um trabalho moroso. As tabelas desenvolvidas e apresentadas no final desta tese, têm como objetivo facilitar o projeto de 256 ligações M-A-M em estudo. Através da sua consulta, e para a rápida utilização, é possível obter as variáveis envolvidas no dimensionamento em segurança. Recorrendo a dimensões dos elementos constituintes mais comuns (espessuras de placas e diâmetros de cavilhas), bem como ao tipo de ligações mais frequentes (cavilhas), este tipo de tabelas torna-se uma mais valia no projeto estrutural.

As simulações numéricas para a análise estrutural provaram ser um método eficiente na verificação do comportamento da ligação e todos os seus constituintes em duplo corte, até ao limite máximo da sua resistência. Foram desenvolvidos vários modelos de teste em linguagem APDL e após uma análise de convergência de soluções, foram apresentadas neste trabalho as 24 simulações obtidas com o menor erro relativo quando comparadas com o cálculo analítico. As tensões verificadas na ligação para a carga máxima instalada obedeceram aos limites impostos pelas propriedades mecânicas dos materiais.

Ao nível da verificação e dimensionamento de ligações expostas ao fogo, o Eurocódigo é pouco específico em relação ao que acontece na ligação durante esse tempo de exposição. As simulações numéricas provam assim que é possível prever e conhecer em pormenor as diferentes zonas e constituintes da ligação, funcionando como um complemento à informação disponível nos códigos.

Em relação aos modelos numéricos desenvolvidos para a análise ao fogo das ligações verificou-se que os ligadores em aço funcionam tanto como dissipadores de calor como agente condutores. Também foram desenvolvidos códigos em linguagem APDL para as diferentes simulações efetuadas, sendo as apresentadas neste trabalho num total de 4. As simulações foram realizadas para ligações protegidas e não protegidas. Em relação ao material de madeira funciona como isolante em relação ao aço, conseguindo permanecer a temperaturas baixas no interior do elemento estrutural.

Apesar de, analiticamente, todas as ligações verificarem a resistência ao fogo durante trinta minutos, foi efetuada a adição de material isolante nas mesmas, verificando que este não é capaz de proteger totalmente a madeira durante o tempo de exposição. Em relação aos tipos de gesso utilizados, foram efetuadas 12 simulações numéricas (4 para cada tipo de gesso) sendo que o material apresentado pelo autor AISSA, é o que apresenta uma menor capacidade de proteção. As propriedades térmicas deste gesso foram consideradas constantes e os resultados obtidos apresentam relativas semelhanças aos outros tipos de gesso.

Por fim, os resultados obtidos ao longo deste trabalho são uma mais valia devido a facilitarem os cálculos dos Eurocódigos apresentando um guião de dimensionamento bem como tabelas de fácil consulta que apresentam as características fundamentais de algumas ligações M-A-M para a engenharia. Este estudo pode ser utilizado na construção de edifícios, diminuindo o tempo gasto no dimensionamento e mantendo a segurança exigida.

Futuramente, utilizando este trabalho como base, seria interessante analisar outras variáveis, aumentando, assim, o número de entradas nas tabelas, tanto para este tipo de ligação como de outro tipo. Também a realização de ensaios experimentais e simulações numéricas utilizando gessos ou outros materiais de isolamento disponíveis no mercado, seriam complementares ao estudo já realizado. Por outro lado, em relação à situação de incêndio, seria interessante estudar o comportamento das ligações em análises térmico-mecânicas, bem como estudar os efeitos na ligação aquando do arrefecimento da estrutura.

Bibliografia

- Aissa, A. (2017). *Computational Model for Timber Connections Exposed to High Temperatures*. Instituto Politécnico de Bragança.
- Akotuah, A. O., Ali, S. G., Erochko, J., Zhang, X., & Hadjisophocleous, G. V. (2015). Study of the Fire Performance of Hybrid Steel-Timber Connections With Full-Scale Tests and Finite Element Modelling. In *Proceedings of the International Conference in Dubrovnik* (pp. 251–256).
- Alves, M. C., & Batista, E. D. M. (2007). Computacional analysis of the heat transfer through cold-formed steel frame panel under fire condition. *Engenharia Civil: Estrutura Em Aço*, 60(2), 303–313.
- Banema. (2017). Vigas Lameladas da Hüttemann Holz. Retrieved from www.banema.pt
- Barreira, L. (2008). *Estudo Numérico do Comportamento Térmico e Mecânico de Estruturas em Madeira*. Instituto Politécnico de Bragança.
- Blesák, L., Caldová, E., & Wald, F. (2015). Unprotected Timber- Fibre Reinforced Concrete Slab in Fire. In *Wood Research* (Vol. 60, pp. 605–616).
- Brandon, D., Maluk, C., Ansell, M. P., Harris, R., Walker, P., Bisby, L., & Bregulla, J. (2015). *Fire performance of metal-free timber connections*. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials* (Vol. 168). Institution of Civil Engineers.
- CEN. (2002). EN1991-1-2, Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire. Bruxelas.
- CEN. (2003). EN1995-1-2, Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-2 - General rules – Structural fire design. Bruxelas.
- CEN. (2004). EN1995-1-1, Eurocode 5 : Design of timber structures - Part 1-1 : General - Common rules and rules for buildings, 1–123.
- CEN. (2005a). EN 1993-1-2: Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design
- CEN. (2005b). EN1993-1-1, Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings. Bruxelas.

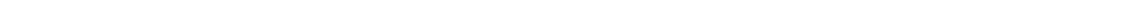
- Coutinho, J. (1999). MADEIRAS. In *Materiais de Construção 1* (pp. 1–36).
- Ferraz, H. (2003). O Aço na Construção Civil. *Revista Eletrônica de Ciências*, 22.
- Ferreira, A. L. (2005). Proteção da madeira contra o fogo. In *Encontro sobre a madeira e suas aplicações nobres - Bem utilizar a Madeira*. Coimbra: Consulfogo - Consultoria e Formação em Protecção Incêndio.
- Fragiacomo, M., Menis, A., Moss, P. J., Buchanan, A. H., & Clemente, I. (2010). Numerical and experimental evaluation of the temperature distribution within laminated veneer lumber (LVL) exposed to fire. *World Conference on Timber Engineering*, 1(3), 145–159.
- Green, D., Winandy, J., & Kretschmann, D. (1999). Mechanical properties of wood. In *Wood Handbook - Wood as an Engineering Material* (pp. 1–45). Forest Products Laboratory, USDA Fores.
- Haddad, D. (2016). *Numerical Analysis of Wooden Slabs with Perforations Under Fire Conditions*. Instituto Politécnico de Bragança.
- Hadjisophocleus, G., Mohammad, M., Peng, L., & Mehaffey, J. (2011). On the Fire Performance of Double-shear Timber Connections. *Fire Safety Science*, 10(3), 1207–1218.
- Imowood. (2017). Características Lamelados Colados. Retrieved from <http://www.imowood.pt/madeira-lamelada/caracteristicas/>
- Jasuja, N., Gauri, S., Pooja, S., Rupal, B., & Kate, T. (n.d.). Harwood vs Softwood. In *Diffen.com*. Diffen LLC. Web. Retrieved from http://www.diffen.com/difference%0A/Hardwood_vs_Softwood'.
- Jorissen, A. (1999). Double shear timber connections with dowel type fasteners. *Heron*, 44(3), 163–186.
- Just, A., Schmid, J., & König, J. (2010). Gypsum plasterboards used as fire protection - Analysis of a database. SP Technical Research Institute of Sweden.
- Moraes, P. D. De, & Figueroa, M. J. M. (2009). Comportamento da madeira a temperaturas elevadas. *Ambiente Construído*. Porto Alegre: Associação Nacional da Tecnologia do Ambiente Construído.

- Ohene, A. A. (2014). *Modelling the Fire Performance of Hybrid Steel-Timber Connections*. Department of Civil and Environmental Engineering, Carleton University, Ottawa, Ontario.
- Peng, L., Hadjisophocleus, G., Mehaffey, J., & Mohammad, M. (2011). Predicting the Fire Resistance of Wood-Steel-Wood Timber Connections. In *Fire Technology* (Vol. 47, pp. 1101–1119).
- Schmid, J., Klippel, M., Just, A., & Frangi, A. (2014). Review and analysis of fire resistance tests of timber members in bending, tension and compression with respect to the Reduced Cross-Section Method. *Fire Safety Journal*, 68, 81–99.
- Schweigler, M., Bader, T. K., & Hochreiner, G. (2016). An Engineering Modeling Approach for the Nonlinear Load-Displacement Behavior of Single Dowel Connections – Parameter Study. *Proceedings of the WCTE 2016 World Conference on Timber Engineering, Vienna / Austria, August 22-25, 2016*.
- Stamato, G. C. (2002). *Ligações em estruturas de madeira compostas por chapas de madeira compensada*. Universidade de São Paulo.
- Stapf, G., Aicher, S., & Zisi, N. (2012). Block shear failure of wooden dowel connections. *CIB-W18 Timber Structures*, 1–11.
- Sultan, M. A. (1996). A model for predicting heat transfer through noninsulated unloaded steel-stud gypsum board wall assemblies exposed to fire. *Fire Technology*, 32(3), 239–259.
- Tavakkol-Khah, M., & Klingsch, W. (1997). Calculation Model for Predicting Fire Resistance Time of Timber Members. In *Fire Safety Science - Proceedings of the Fifth International Symposium* (pp. 1201–1211). International Association for Fire Safety Science.
- Toscca. (n.d.). Valores característicos da resistência e rigidez da massa volúmica da Madeira Lamelada Colada. Retrieved from www.toscca.com
- Wakili, K. G., & Hugi, E. (2009). Four types of gypsum plaster boards and their thermophysical properties under fire condition. *Journal of Fire Sciences*. Los Angeles, London, New Delhi and Singapore: SAGE Publications 2009.

Westin, M. F., & Ribeiro, R. T. da S. (2009). Método Dos Elementos Finitos Na Simulação De Tensão E Elasticidade Em Placas. Retrieved from http://www.mat.ufmg.br/gaal/aplicacoes/elementos_finitos.pdf

Xavier, J. (2003). *Caracterização do comportamento ao corte da madeira usando o ensaio de Iosipescu*. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real.

Anexos



Anexo 1 – Dimensionamento de ligações Madeira-Aço-Madeira

| Carga (kN) | Cavilha (mm) | | Disposição das cavilhas | | Espaçamento e distâncias (mm) | | | | Placas de madeira (mm) | | Placa de aço (mm) | | | Carga em situação de fogo, (kN) | Carga por área em situação de fogo | Tensão resistente ao fogo | Verificação |
|------------|--------------|-------------|-------------------------|---------|-------------------------------|----|------|------|------------------------|---------|-------------------|-------------|-------------|---------------------------------|------------------------------------|---------------------------|-------------|
| | Diâmetro, d | Comprimento | Linhas | Colunas | a1 | a2 | a3,t | a4,c | Espessura, t1 | Largura | Espessura, ts | Largura, bs | Comprimento | | | | |
| 25 | 10 | 95 | 1 | 6 | 50 | 30 | 70 | 30 | 45 | 60 | 5 | 60 | 780 | 15 | 2,78 | 17,94 | Verifica |
| 25 | 10 | 105 | 1 | 6 | 50 | 30 | 70 | 30 | 50 | 60 | 5 | 60 | 780 | 15 | 2,50 | 17,94 | Verifica |
| 25 | 10 | 115 | 1 | 5 | 50 | 30 | 70 | 30 | 55 | 60 | 5 | 60 | 680 | 15 | 2,27 | 17,94 | Verifica |
| 25 | 10 | 125 | 1 | 5 | 50 | 30 | 70 | 30 | 60 | 60 | 5 | 60 | 680 | 15 | 2,08 | 17,94 | Verifica |
| 25 | 10 | 96 | 1 | 6 | 50 | 30 | 70 | 30 | 45 | 60 | 6 | 60 | 780 | 15 | 2,78 | 17,94 | Verifica |
| 25 | 10 | 106 | 1 | 6 | 50 | 30 | 70 | 30 | 50 | 60 | 6 | 60 | 780 | 15 | 2,50 | 17,94 | Verifica |
| 25 | 10 | 116 | 1 | 5 | 50 | 30 | 70 | 30 | 55 | 60 | 6 | 60 | 680 | 15 | 2,27 | 17,94 | Verifica |
| 25 | 10 | 126 | 1 | 5 | 50 | 30 | 70 | 30 | 60 | 60 | 6 | 60 | 680 | 15 | 2,08 | 17,94 | Verifica |
| 25 | 10 | 98 | 1 | 6 | 50 | 30 | 70 | 30 | 45 | 60 | 8 | 60 | 780 | 15 | 2,78 | 17,94 | Verifica |
| 25 | 10 | 108 | 1 | 6 | 50 | 30 | 70 | 30 | 50 | 60 | 8 | 60 | 780 | 15 | 2,50 | 17,94 | Verifica |
| 25 | 10 | 118 | 1 | 5 | 50 | 30 | 70 | 30 | 55 | 60 | 8 | 60 | 680 | 15 | 2,27 | 17,94 | Verifica |
| 25 | 10 | 128 | 1 | 5 | 50 | 30 | 70 | 30 | 60 | 60 | 8 | 60 | 680 | 15 | 2,08 | 17,94 | Verifica |
| 25 | 10 | 100 | 1 | 6 | 50 | 30 | 70 | 30 | 45 | 60 | 10 | 60 | 780 | 15 | 2,78 | 17,94 | Verifica |
| 25 | 10 | 110 | 1 | 6 | 50 | 30 | 70 | 30 | 50 | 60 | 10 | 60 | 780 | 15 | 2,50 | 17,94 | Verifica |
| 25 | 10 | 120 | 1 | 5 | 50 | 30 | 70 | 30 | 55 | 60 | 10 | 60 | 680 | 15 | 2,27 | 17,94 | Verifica |
| 25 | 10 | 130 | 1 | 5 | 50 | 30 | 70 | 30 | 60 | 60 | 10 | 60 | 680 | 15 | 2,08 | 17,94 | Verifica |
| 25 | 12 | 95 | 1 | 5 | 60 | 36 | 84 | 36 | 45 | 72 | 5 | 72 | 816 | 15 | 2,31 | 17,94 | Verifica |
| 25 | 12 | 105 | 1 | 5 | 60 | 36 | 84 | 36 | 50 | 72 | 5 | 72 | 816 | 15 | 2,08 | 17,94 | Verifica |
| 25 | 12 | 115 | 1 | 4 | 60 | 36 | 84 | 36 | 55 | 72 | 5 | 72 | 696 | 15 | 1,89 | 17,94 | Verifica |
| 25 | 12 | 125 | 1 | 4 | 60 | 36 | 84 | 36 | 60 | 72 | 5 | 72 | 696 | 15 | 1,74 | 17,94 | Verifica |
| 25 | 12 | 96 | 1 | 5 | 60 | 36 | 84 | 36 | 45 | 72 | 6 | 72 | 816 | 15 | 2,31 | 17,94 | Verifica |
| 25 | 12 | 106 | 1 | 5 | 60 | 36 | 84 | 36 | 50 | 72 | 6 | 72 | 816 | 15 | 2,08 | 17,94 | Verifica |
| 25 | 12 | 116 | 1 | 4 | 60 | 36 | 84 | 36 | 55 | 72 | 6 | 72 | 696 | 15 | 1,89 | 17,94 | Verifica |
| 25 | 12 | 126 | 1 | 4 | 60 | 36 | 84 | 36 | 60 | 72 | 6 | 72 | 696 | 15 | 1,74 | 17,94 | Verifica |
| 25 | 12 | 98 | 1 | 5 | 60 | 36 | 84 | 36 | 45 | 72 | 8 | 72 | 816 | 15 | 2,31 | 17,94 | Verifica |
| 25 | 12 | 108 | 1 | 5 | 60 | 36 | 84 | 36 | 50 | 72 | 8 | 72 | 816 | 15 | 2,08 | 17,94 | Verifica |
| 25 | 12 | 118 | 1 | 4 | 60 | 36 | 84 | 36 | 55 | 72 | 8 | 72 | 696 | 15 | 1,89 | 17,94 | Verifica |
| 25 | 12 | 128 | 1 | 4 | 60 | 36 | 84 | 36 | 60 | 72 | 8 | 72 | 696 | 15 | 1,74 | 17,94 | Verifica |
| 25 | 12 | 100 | 1 | 5 | 60 | 36 | 84 | 36 | 45 | 72 | 10 | 72 | 816 | 15 | 2,31 | 17,94 | Verifica |
| 25 | 12 | 110 | 1 | 5 | 60 | 36 | 84 | 36 | 50 | 72 | 10 | 72 | 816 | 15 | 2,08 | 17,94 | Verifica |
| 25 | 12 | 120 | 1 | 4 | 60 | 36 | 84 | 36 | 55 | 72 | 10 | 72 | 696 | 15 | 1,89 | 17,94 | Verifica |
| 25 | 12 | 130 | 1 | 4 | 60 | 36 | 84 | 36 | 60 | 72 | 10 | 72 | 696 | 15 | 1,74 | 17,94 | Verifica |
| 25 | 14 | 95 | 1 | 4 | 70 | 42 | 98 | 42 | 45 | 84 | 5 | 84 | 812 | 15 | 1,98 | 17,94 | Verifica |
| 25 | 14 | 105 | 1 | 4 | 70 | 42 | 98 | 42 | 50 | 84 | 5 | 84 | 812 | 15 | 1,79 | 17,94 | Verifica |
| 25 | 14 | 115 | 1 | 4 | 70 | 42 | 98 | 42 | 55 | 84 | 5 | 84 | 812 | 15 | 1,62 | 17,94 | Verifica |
| 25 | 14 | 125 | 1 | 4 | 70 | 42 | 98 | 42 | 60 | 84 | 5 | 84 | 812 | 15 | 1,49 | 17,94 | Verifica |
| 25 | 14 | 96 | 1 | 4 | 70 | 42 | 98 | 42 | 45 | 84 | 6 | 84 | 812 | 15 | 1,98 | 17,94 | Verifica |
| 25 | 14 | 106 | 1 | 4 | 70 | 42 | 98 | 42 | 50 | 84 | 6 | 84 | 812 | 15 | 1,79 | 17,94 | Verifica |
| 25 | 14 | 116 | 1 | 4 | 70 | 42 | 98 | 42 | 55 | 84 | 6 | 84 | 812 | 15 | 1,62 | 17,94 | Verifica |
| 25 | 14 | 126 | 1 | 4 | 70 | 42 | 98 | 42 | 60 | 84 | 6 | 84 | 812 | 15 | 1,49 | 17,94 | Verifica |
| 25 | 14 | 98 | 1 | 4 | 70 | 42 | 98 | 42 | 45 | 84 | 8 | 84 | 812 | 15 | 1,98 | 17,94 | Verifica |
| 25 | 14 | 108 | 1 | 4 | 70 | 42 | 98 | 42 | 50 | 84 | 8 | 84 | 812 | 15 | 1,79 | 17,94 | Verifica |
| 25 | 14 | 118 | 1 | 4 | 70 | 42 | 98 | 42 | 55 | 84 | 8 | 84 | 812 | 15 | 1,62 | 17,94 | Verifica |
| 25 | 14 | 128 | 1 | 4 | 70 | 42 | 98 | 42 | 60 | 84 | 8 | 84 | 812 | 15 | 1,49 | 17,94 | Verifica |
| 25 | 14 | 100 | 1 | 4 | 70 | 42 | 98 | 42 | 45 | 84 | 10 | 84 | 812 | 15 | 1,98 | 17,94 | Verifica |
| 25 | 14 | 110 | 1 | 4 | 70 | 42 | 98 | 42 | 50 | 84 | 10 | 84 | 812 | 15 | 1,79 | 17,94 | Verifica |
| 25 | 14 | 120 | 1 | 4 | 70 | 42 | 98 | 42 | 55 | 84 | 10 | 84 | 812 | 15 | 1,62 | 17,94 | Verifica |
| 25 | 14 | 130 | 1 | 4 | 70 | 42 | 98 | 42 | 60 | 84 | 10 | 84 | 812 | 15 | 1,49 | 17,94 | Verifica |
| 25 | 16 | 95 | 1 | 3 | 80 | 48 | 112 | 48 | 45 | 96 | 5 | 96 | 768 | 15 | 1,74 | 17,94 | Verifica |
| 25 | 16 | 105 | 1 | 3 | 80 | 48 | 112 | 48 | 50 | 96 | 5 | 96 | 768 | 15 | 1,56 | 17,94 | Verifica |
| 25 | 16 | 115 | 1 | 3 | 80 | 48 | 112 | 48 | 55 | 96 | 5 | 96 | 768 | 15 | 1,42 | 17,94 | Verifica |
| 25 | 16 | 125 | 1 | 3 | 80 | 48 | 112 | 48 | 60 | 96 | 5 | 96 | 768 | 15 | 1,30 | 17,94 | Verifica |
| 25 | 16 | 96 | 1 | 3 | 80 | 48 | 112 | 48 | 45 | 96 | 6 | 96 | 768 | 15 | 1,74 | 17,94 | Verifica |
| 25 | 16 | 106 | 1 | 3 | 80 | 48 | 112 | 48 | 50 | 96 | 6 | 96 | 768 | 15 | 1,56 | 17,94 | Verifica |
| 25 | 16 | 116 | 1 | 3 | 80 | 48 | 112 | 48 | 55 | 96 | 6 | 96 | 768 | 15 | 1,42 | 17,94 | Verifica |
| 25 | 16 | 126 | 1 | 3 | 80 | 48 | 112 | 48 | 60 | 96 | 6 | 96 | 768 | 15 | 1,30 | 17,94 | Verifica |
| 25 | 16 | 98 | 1 | 3 | 80 | 48 | 112 | 48 | 45 | 96 | 8 | 96 | 768 | 15 | 1,74 | 17,94 | Verifica |
| 25 | 16 | 108 | 1 | 3 | 80 | 48 | 112 | 48 | 50 | 96 | 8 | 96 | 768 | 15 | 1,56 | 17,94 | Verifica |
| 25 | 16 | 118 | 1 | 3 | 80 | 48 | 112 | 48 | 55 | 96 | 8 | 96 | 768 | 15 | 1,42 | 17,94 | Verifica |
| 25 | 16 | 128 | 1 | 3 | 80 | 48 | 112 | 48 | 60 | 96 | 8 | 96 | 768 | 15 | 1,30 | 17,94 | Verifica |
| 25 | 16 | 100 | 1 | 3 | 80 | 48 | 112 | 48 | 45 | 96 | 10 | 96 | 768 | 15 | 1,74 | 17,94 | Verifica |
| 25 | 16 | 110 | 1 | 3 | 80 | 48 | 112 | 48 | 50 | 96 | 10 | 96 | 768 | 15 | 1,56 | 17,94 | Verifica |
| 25 | 16 | 120 | 1 | 3 | 80 | 48 | 112 | 48 | 55 | 96 | 10 | 96 | 768 | 15 | 1,42 | 17,94 | Verifica |
| 25 | 16 | 130 | 1 | 3 | 80 | 48 | 112 | 48 | 60 | 96 | 10 | 96 | 768 | 15 | 1,30 | 17,94 | Verifica |

| Carga (kN) | Cavilha (mm) | | Disposição das cavilhas | | Espaçamento e distâncias (mm) | | | | Placas de madeira (mm) | | Placa de aço (mm) | | | Carga em situação de fogo, (kN) | Carga por área em situação de fogo | Tensão resistente ao fogo | Verificação |
|------------|--------------|-------------|-------------------------|---------|-------------------------------|----|------|------|------------------------|---------|-------------------|--------------|-------------|---------------------------------|------------------------------------|---------------------------|-------------|
| | Diâmetro, d | Comprimento | Linhas | Colunas | a1 | a2 | a3,t | a4,c | Espessura, t1 | Largura | Espessura, ts | Largura, bst | Comprimento | | | | |
| 50 | 10 | 95 | 1 | 12 | 50 | 30 | 70 | 30 | 45 | 60 | 5 | 60 | 1380 | 30 | 5,56 | 17,94 | Verifica |
| 50 | 10 | 105 | 1 | 11 | 50 | 30 | 70 | 30 | 50 | 60 | 5 | 60 | 1280 | 30 | 5,00 | 17,94 | Verifica |
| 50 | 10 | 115 | 1 | 10 | 50 | 30 | 70 | 30 | 55 | 60 | 5 | 60 | 1180 | 30 | 4,55 | 17,94 | Verifica |
| 50 | 10 | 125 | 1 | 10 | 50 | 30 | 70 | 30 | 60 | 60 | 5 | 60 | 1180 | 30 | 4,17 | 17,94 | Verifica |
| 50 | 10 | 96 | 1 | 12 | 50 | 30 | 70 | 30 | 45 | 60 | 6 | 60 | 1380 | 30 | 5,56 | 17,94 | Verifica |
| 50 | 10 | 106 | 1 | 11 | 50 | 30 | 70 | 30 | 50 | 60 | 6 | 60 | 1280 | 30 | 5,00 | 17,94 | Verifica |
| 50 | 10 | 116 | 1 | 10 | 50 | 30 | 70 | 30 | 55 | 60 | 6 | 60 | 1180 | 30 | 4,55 | 17,94 | Verifica |
| 50 | 10 | 126 | 1 | 10 | 50 | 30 | 70 | 30 | 60 | 60 | 6 | 60 | 1180 | 30 | 4,17 | 17,94 | Verifica |
| 50 | 10 | 98 | 1 | 12 | 50 | 30 | 70 | 30 | 45 | 60 | 8 | 60 | 1380 | 30 | 5,56 | 17,94 | Verifica |
| 50 | 10 | 108 | 1 | 11 | 50 | 30 | 70 | 30 | 50 | 60 | 8 | 60 | 1280 | 30 | 5,00 | 17,94 | Verifica |
| 50 | 10 | 118 | 1 | 10 | 50 | 30 | 70 | 30 | 55 | 60 | 8 | 60 | 1180 | 30 | 4,55 | 17,94 | Verifica |
| 50 | 10 | 128 | 1 | 10 | 50 | 30 | 70 | 30 | 60 | 60 | 8 | 60 | 1180 | 30 | 4,17 | 17,94 | Verifica |
| 50 | 10 | 100 | 1 | 12 | 50 | 30 | 70 | 30 | 45 | 60 | 10 | 60 | 1380 | 30 | 5,56 | 17,94 | Verifica |
| 50 | 10 | 110 | 1 | 11 | 50 | 30 | 70 | 30 | 50 | 60 | 10 | 60 | 1280 | 30 | 5,00 | 17,94 | Verifica |
| 50 | 10 | 120 | 1 | 10 | 50 | 30 | 70 | 30 | 55 | 60 | 10 | 60 | 1180 | 30 | 4,55 | 17,94 | Verifica |
| 50 | 10 | 130 | 1 | 10 | 50 | 30 | 70 | 30 | 60 | 60 | 10 | 60 | 1180 | 30 | 4,17 | 17,94 | Verifica |
| 50 | 12 | 95 | 1 | 9 | 60 | 36 | 84 | 36 | 45 | 72 | 5 | 72 | 1296 | 30 | 4,63 | 17,94 | Verifica |
| 50 | 12 | 105 | 1 | 9 | 60 | 36 | 84 | 36 | 50 | 72 | 5 | 72 | 1296 | 30 | 4,17 | 17,94 | Verifica |
| 50 | 12 | 115 | 1 | 8 | 60 | 36 | 84 | 36 | 55 | 72 | 5 | 72 | 1176 | 30 | 3,79 | 17,94 | Verifica |
| 50 | 12 | 125 | 1 | 8 | 60 | 36 | 84 | 36 | 60 | 72 | 5 | 72 | 1176 | 30 | 3,47 | 17,94 | Verifica |
| 50 | 12 | 96 | 1 | 9 | 60 | 36 | 84 | 36 | 45 | 72 | 6 | 72 | 1296 | 30 | 4,63 | 17,94 | Verifica |
| 50 | 12 | 106 | 1 | 9 | 60 | 36 | 84 | 36 | 50 | 72 | 6 | 72 | 1296 | 30 | 4,17 | 17,94 | Verifica |
| 50 | 12 | 116 | 1 | 8 | 60 | 36 | 84 | 36 | 55 | 72 | 6 | 72 | 1176 | 30 | 3,79 | 17,94 | Verifica |
| 50 | 12 | 126 | 1 | 8 | 60 | 36 | 84 | 36 | 60 | 72 | 6 | 72 | 1176 | 30 | 3,47 | 17,94 | Verifica |
| 50 | 12 | 98 | 1 | 9 | 60 | 36 | 84 | 36 | 45 | 72 | 8 | 72 | 1296 | 30 | 4,63 | 17,94 | Verifica |
| 50 | 12 | 108 | 1 | 9 | 60 | 36 | 84 | 36 | 50 | 72 | 8 | 72 | 1296 | 30 | 4,17 | 17,94 | Verifica |
| 50 | 12 | 118 | 1 | 8 | 60 | 36 | 84 | 36 | 55 | 72 | 8 | 72 | 1176 | 30 | 3,79 | 17,94 | Verifica |
| 50 | 12 | 128 | 1 | 8 | 60 | 36 | 84 | 36 | 60 | 72 | 8 | 72 | 1176 | 30 | 3,47 | 17,94 | Verifica |
| 50 | 12 | 100 | 1 | 9 | 60 | 36 | 84 | 36 | 45 | 72 | 10 | 72 | 1296 | 30 | 4,63 | 17,94 | Verifica |
| 50 | 12 | 110 | 1 | 9 | 60 | 36 | 84 | 36 | 50 | 72 | 10 | 72 | 1296 | 30 | 4,17 | 17,94 | Verifica |
| 50 | 12 | 120 | 1 | 8 | 60 | 36 | 84 | 36 | 55 | 72 | 10 | 72 | 1176 | 30 | 3,79 | 17,94 | Verifica |
| 50 | 12 | 130 | 1 | 8 | 60 | 36 | 84 | 36 | 60 | 72 | 10 | 72 | 1176 | 30 | 3,47 | 17,94 | Verifica |
| 50 | 14 | 95 | 1 | 8 | 70 | 42 | 98 | 42 | 45 | 84 | 5 | 84 | 1372 | 30 | 3,97 | 17,94 | Verifica |
| 50 | 14 | 105 | 1 | 7 | 70 | 42 | 98 | 42 | 50 | 84 | 5 | 84 | 1232 | 30 | 3,57 | 17,94 | Verifica |
| 50 | 14 | 115 | 1 | 7 | 70 | 42 | 98 | 42 | 55 | 84 | 5 | 84 | 1232 | 30 | 3,25 | 17,94 | Verifica |
| 50 | 14 | 125 | 1 | 7 | 70 | 42 | 98 | 42 | 60 | 84 | 5 | 84 | 1232 | 30 | 2,98 | 17,94 | Verifica |
| 50 | 14 | 96 | 1 | 8 | 70 | 42 | 98 | 42 | 45 | 84 | 6 | 84 | 1372 | 30 | 3,97 | 17,94 | Verifica |
| 50 | 14 | 106 | 1 | 7 | 70 | 42 | 98 | 42 | 50 | 84 | 6 | 84 | 1232 | 30 | 3,57 | 17,94 | Verifica |
| 50 | 14 | 116 | 1 | 7 | 70 | 42 | 98 | 42 | 55 | 84 | 6 | 84 | 1232 | 30 | 3,25 | 17,94 | Verifica |
| 50 | 14 | 126 | 1 | 7 | 70 | 42 | 98 | 42 | 60 | 84 | 6 | 84 | 1232 | 30 | 2,98 | 17,94 | Verifica |
| 50 | 14 | 98 | 1 | 8 | 70 | 42 | 98 | 42 | 45 | 84 | 8 | 84 | 1372 | 30 | 3,97 | 17,94 | Verifica |
| 50 | 14 | 108 | 1 | 7 | 70 | 42 | 98 | 42 | 50 | 84 | 8 | 84 | 1232 | 30 | 3,57 | 17,94 | Verifica |
| 50 | 14 | 118 | 1 | 7 | 70 | 42 | 98 | 42 | 55 | 84 | 8 | 84 | 1232 | 30 | 3,25 | 17,94 | Verifica |
| 50 | 14 | 128 | 1 | 7 | 70 | 42 | 98 | 42 | 60 | 84 | 8 | 84 | 1232 | 30 | 2,98 | 17,94 | Verifica |
| 50 | 14 | 100 | 1 | 8 | 70 | 42 | 98 | 42 | 45 | 84 | 10 | 84 | 1372 | 30 | 3,97 | 17,94 | Verifica |
| 50 | 14 | 110 | 1 | 7 | 70 | 42 | 98 | 42 | 50 | 84 | 10 | 84 | 1232 | 30 | 3,57 | 17,94 | Verifica |
| 50 | 14 | 120 | 1 | 7 | 70 | 42 | 98 | 42 | 55 | 84 | 10 | 84 | 1232 | 30 | 3,25 | 17,94 | Verifica |
| 50 | 14 | 130 | 1 | 7 | 70 | 42 | 98 | 42 | 60 | 84 | 10 | 84 | 1232 | 30 | 2,98 | 17,94 | Verifica |
| 50 | 16 | 95 | 1 | 6 | 80 | 48 | 112 | 48 | 45 | 96 | 5 | 96 | 1248 | 30 | 3,47 | 17,94 | Verifica |
| 50 | 16 | 105 | 1 | 6 | 80 | 48 | 112 | 48 | 50 | 96 | 5 | 96 | 1248 | 30 | 3,13 | 17,94 | Verifica |
| 50 | 16 | 115 | 1 | 6 | 80 | 48 | 112 | 48 | 55 | 96 | 5 | 96 | 1248 | 30 | 2,84 | 17,94 | Verifica |
| 50 | 16 | 125 | 1 | 6 | 80 | 48 | 112 | 48 | 60 | 96 | 5 | 96 | 1248 | 30 | 2,60 | 17,94 | Verifica |
| 50 | 16 | 96 | 1 | 6 | 80 | 48 | 112 | 48 | 45 | 96 | 6 | 96 | 1248 | 30 | 3,47 | 17,94 | Verifica |
| 50 | 16 | 106 | 1 | 6 | 80 | 48 | 112 | 48 | 50 | 96 | 6 | 96 | 1248 | 30 | 3,13 | 17,94 | Verifica |
| 50 | 16 | 116 | 1 | 6 | 80 | 48 | 112 | 48 | 55 | 96 | 6 | 96 | 1248 | 30 | 2,84 | 17,94 | Verifica |
| 50 | 16 | 126 | 1 | 6 | 80 | 48 | 112 | 48 | 60 | 96 | 6 | 96 | 1248 | 30 | 2,60 | 17,94 | Verifica |
| 50 | 16 | 98 | 1 | 6 | 80 | 48 | 112 | 48 | 45 | 96 | 8 | 96 | 1248 | 30 | 3,47 | 17,94 | Verifica |
| 50 | 16 | 108 | 1 | 6 | 80 | 48 | 112 | 48 | 50 | 96 | 8 | 96 | 1248 | 30 | 3,13 | 17,94 | Verifica |
| 50 | 16 | 118 | 1 | 6 | 80 | 48 | 112 | 48 | 55 | 96 | 8 | 96 | 1248 | 30 | 2,84 | 17,94 | Verifica |
| 50 | 16 | 128 | 1 | 6 | 80 | 48 | 112 | 48 | 60 | 96 | 8 | 96 | 1248 | 30 | 2,60 | 17,94 | Verifica |
| 50 | 16 | 100 | 1 | 6 | 80 | 48 | 112 | 48 | 45 | 96 | 10 | 96 | 1248 | 30 | 3,47 | 17,94 | Verifica |
| 50 | 16 | 110 | 1 | 6 | 80 | 48 | 112 | 48 | 50 | 96 | 10 | 96 | 1248 | 30 | 3,13 | 17,94 | Verifica |
| 50 | 16 | 120 | 1 | 6 | 80 | 48 | 112 | 48 | 55 | 96 | 10 | 96 | 1248 | 30 | 2,84 | 17,94 | Verifica |
| 50 | 16 | 130 | 1 | 6 | 80 | 48 | 112 | 48 | 60 | 96 | 10 | 96 | 1248 | 30 | 2,60 | 17,94 | Verifica |

| Carga (kN) | Cavilha (mm) | | Disposição das cavilhas | | Espaçamento e distâncias (mm) | | | | Placas de madeira (mm) | | Placa de aço (mm) | | | Carga em situação de fogo, (kN) | Carga por área em situação de fogo | Tensão resistente ao fogo | Verificação |
|------------|--------------|-------------|-------------------------|---------|-------------------------------|----|------|------|------------------------|---------|-------------------|--------------|-------------|---------------------------------|------------------------------------|---------------------------|-------------|
| | Diâmetro, d | Comprimento | Linhas | Colunas | a1 | a2 | a3,t | a4,c | Espessura, t1 | Largura | Espessura, ts | Largura, bst | Comprimento | | | | |
| 75 | 10 | 95 | 2 | 9 | 50 | 30 | 70 | 30 | 45 | 90 | 5 | 90 | 1080 | 45 | 5,56 | 17,94 | Verifica |
| 75 | 10 | 105 | 2 | 8 | 50 | 30 | 70 | 30 | 50 | 90 | 5 | 90 | 980 | 45 | 5,00 | 17,94 | Verifica |
| 75 | 10 | 115 | 1 | 15 | 50 | 30 | 70 | 30 | 55 | 60 | 5 | 60 | 1680 | 45 | 6,82 | 17,94 | Verifica |
| 75 | 10 | 125 | 1 | 14 | 50 | 30 | 70 | 30 | 60 | 60 | 5 | 60 | 1580 | 45 | 6,25 | 17,94 | Verifica |
| 75 | 10 | 96 | 2 | 9 | 50 | 30 | 70 | 30 | 45 | 90 | 6 | 90 | 1080 | 45 | 5,56 | 17,94 | Verifica |
| 75 | 10 | 106 | 2 | 8 | 50 | 30 | 70 | 30 | 50 | 90 | 6 | 90 | 980 | 45 | 5,00 | 17,94 | Verifica |
| 75 | 10 | 116 | 1 | 15 | 50 | 30 | 70 | 30 | 55 | 60 | 6 | 60 | 1680 | 45 | 6,82 | 17,94 | Verifica |
| 75 | 10 | 126 | 1 | 14 | 50 | 30 | 70 | 30 | 60 | 60 | 6 | 60 | 1580 | 45 | 6,25 | 17,94 | Verifica |
| 75 | 10 | 98 | 2 | 9 | 50 | 30 | 70 | 30 | 45 | 90 | 8 | 90 | 1080 | 45 | 5,56 | 17,94 | Verifica |
| 75 | 10 | 108 | 2 | 8 | 50 | 30 | 70 | 30 | 50 | 90 | 8 | 90 | 980 | 45 | 5,00 | 17,94 | Verifica |
| 75 | 10 | 118 | 1 | 15 | 50 | 30 | 70 | 30 | 55 | 60 | 8 | 60 | 1680 | 45 | 6,82 | 17,94 | Verifica |
| 75 | 10 | 128 | 1 | 14 | 50 | 30 | 70 | 30 | 60 | 60 | 8 | 60 | 1580 | 45 | 6,25 | 17,94 | Verifica |
| 75 | 10 | 100 | 2 | 9 | 50 | 30 | 70 | 30 | 45 | 90 | 10 | 90 | 1080 | 45 | 5,56 | 17,94 | Verifica |
| 75 | 10 | 110 | 2 | 8 | 50 | 30 | 70 | 30 | 50 | 90 | 10 | 90 | 980 | 45 | 5,00 | 17,94 | Verifica |
| 75 | 10 | 120 | 1 | 15 | 50 | 30 | 70 | 30 | 55 | 60 | 10 | 60 | 1680 | 45 | 6,82 | 17,94 | Verifica |
| 75 | 10 | 130 | 1 | 14 | 50 | 30 | 70 | 30 | 60 | 60 | 10 | 60 | 1580 | 45 | 6,25 | 17,94 | Verifica |
| 75 | 12 | 95 | 1 | 14 | 60 | 36 | 84 | 36 | 45 | 72 | 5 | 72 | 1896 | 45 | 6,94 | 17,94 | Verifica |
| 75 | 12 | 105 | 1 | 13 | 60 | 36 | 84 | 36 | 50 | 72 | 5 | 72 | 1776 | 45 | 6,25 | 17,94 | Verifica |
| 75 | 12 | 115 | 1 | 12 | 60 | 36 | 84 | 36 | 55 | 72 | 5 | 72 | 1656 | 45 | 5,68 | 17,94 | Verifica |
| 75 | 12 | 125 | 1 | 12 | 60 | 36 | 84 | 36 | 60 | 72 | 5 | 72 | 1656 | 45 | 5,21 | 17,94 | Verifica |
| 75 | 12 | 96 | 1 | 14 | 60 | 36 | 84 | 36 | 45 | 72 | 6 | 72 | 1896 | 45 | 6,94 | 17,94 | Verifica |
| 75 | 12 | 106 | 1 | 13 | 60 | 36 | 84 | 36 | 50 | 72 | 6 | 72 | 1776 | 45 | 6,25 | 17,94 | Verifica |
| 75 | 12 | 116 | 1 | 12 | 60 | 36 | 84 | 36 | 55 | 72 | 6 | 72 | 1656 | 45 | 5,68 | 17,94 | Verifica |
| 75 | 12 | 126 | 1 | 12 | 60 | 36 | 84 | 36 | 60 | 72 | 6 | 72 | 1656 | 45 | 5,21 | 17,94 | Verifica |
| 75 | 12 | 98 | 1 | 14 | 60 | 36 | 84 | 36 | 45 | 72 | 8 | 72 | 1896 | 45 | 6,94 | 17,94 | Verifica |
| 75 | 12 | 108 | 1 | 13 | 60 | 36 | 84 | 36 | 50 | 72 | 8 | 72 | 1776 | 45 | 6,25 | 17,94 | Verifica |
| 75 | 12 | 118 | 1 | 12 | 60 | 36 | 84 | 36 | 55 | 72 | 8 | 72 | 1656 | 45 | 5,68 | 17,94 | Verifica |
| 75 | 12 | 128 | 1 | 12 | 60 | 36 | 84 | 36 | 60 | 72 | 8 | 72 | 1656 | 45 | 5,21 | 17,94 | Verifica |
| 75 | 12 | 100 | 1 | 14 | 60 | 36 | 84 | 36 | 45 | 72 | 10 | 72 | 1896 | 45 | 6,94 | 17,94 | Verifica |
| 75 | 12 | 110 | 1 | 13 | 60 | 36 | 84 | 36 | 50 | 72 | 10 | 72 | 1776 | 45 | 6,25 | 17,94 | Verifica |
| 75 | 12 | 120 | 1 | 12 | 60 | 36 | 84 | 36 | 55 | 72 | 10 | 72 | 1656 | 45 | 5,68 | 17,94 | Verifica |
| 75 | 12 | 130 | 1 | 12 | 60 | 36 | 84 | 36 | 60 | 72 | 10 | 72 | 1656 | 45 | 5,21 | 17,94 | Verifica |
| 75 | 14 | 95 | 1 | 11 | 70 | 42 | 98 | 42 | 45 | 84 | 5 | 84 | 1792 | 45 | 5,95 | 17,94 | Verifica |
| 75 | 14 | 105 | 1 | 11 | 70 | 42 | 98 | 42 | 50 | 84 | 5 | 84 | 1792 | 45 | 5,36 | 17,94 | Verifica |
| 75 | 14 | 115 | 1 | 10 | 70 | 42 | 98 | 42 | 55 | 84 | 5 | 84 | 1652 | 45 | 4,87 | 17,94 | Verifica |
| 75 | 14 | 125 | 1 | 10 | 70 | 42 | 98 | 42 | 60 | 84 | 5 | 84 | 1652 | 45 | 4,46 | 17,94 | Verifica |
| 75 | 14 | 96 | 1 | 11 | 70 | 42 | 98 | 42 | 45 | 84 | 6 | 84 | 1792 | 45 | 5,95 | 17,94 | Verifica |
| 75 | 14 | 106 | 1 | 11 | 70 | 42 | 98 | 42 | 50 | 84 | 6 | 84 | 1792 | 45 | 5,36 | 17,94 | Verifica |
| 75 | 14 | 116 | 1 | 10 | 70 | 42 | 98 | 42 | 55 | 84 | 6 | 84 | 1652 | 45 | 4,87 | 17,94 | Verifica |
| 75 | 14 | 126 | 1 | 10 | 70 | 42 | 98 | 42 | 60 | 84 | 6 | 84 | 1652 | 45 | 4,46 | 17,94 | Verifica |
| 75 | 14 | 98 | 1 | 11 | 70 | 42 | 98 | 42 | 45 | 84 | 8 | 84 | 1792 | 45 | 5,95 | 17,94 | Verifica |
| 75 | 14 | 108 | 1 | 11 | 70 | 42 | 98 | 42 | 50 | 84 | 8 | 84 | 1792 | 45 | 5,36 | 17,94 | Verifica |
| 75 | 14 | 118 | 1 | 10 | 70 | 42 | 98 | 42 | 55 | 84 | 8 | 84 | 1652 | 45 | 4,87 | 17,94 | Verifica |
| 75 | 14 | 128 | 1 | 10 | 70 | 42 | 98 | 42 | 60 | 84 | 8 | 84 | 1652 | 45 | 4,46 | 17,94 | Verifica |
| 75 | 14 | 100 | 1 | 11 | 70 | 42 | 98 | 42 | 45 | 84 | 10 | 84 | 1792 | 45 | 5,95 | 17,94 | Verifica |
| 75 | 14 | 110 | 1 | 11 | 70 | 42 | 98 | 42 | 50 | 84 | 10 | 84 | 1792 | 45 | 5,36 | 17,94 | Verifica |
| 75 | 14 | 120 | 1 | 10 | 70 | 42 | 98 | 42 | 55 | 84 | 10 | 84 | 1652 | 45 | 4,87 | 17,94 | Verifica |
| 75 | 14 | 130 | 1 | 10 | 70 | 42 | 98 | 42 | 60 | 84 | 10 | 84 | 1652 | 45 | 4,46 | 17,94 | Verifica |
| 75 | 16 | 95 | 1 | 9 | 80 | 48 | 112 | 48 | 45 | 96 | 5 | 96 | 1728 | 45 | 5,21 | 17,94 | Verifica |
| 75 | 16 | 105 | 1 | 9 | 80 | 48 | 112 | 48 | 50 | 96 | 5 | 96 | 1728 | 45 | 4,69 | 17,94 | Verifica |
| 75 | 16 | 115 | 1 | 9 | 80 | 48 | 112 | 48 | 55 | 96 | 5 | 96 | 1728 | 45 | 4,26 | 17,94 | Verifica |
| 75 | 16 | 125 | 1 | 8 | 80 | 48 | 112 | 48 | 60 | 96 | 5 | 96 | 1568 | 45 | 3,91 | 17,94 | Verifica |
| 75 | 16 | 96 | 1 | 9 | 80 | 48 | 112 | 48 | 45 | 96 | 6 | 96 | 1728 | 45 | 5,21 | 17,94 | Verifica |
| 75 | 16 | 106 | 1 | 9 | 80 | 48 | 112 | 48 | 50 | 96 | 6 | 96 | 1728 | 45 | 4,69 | 17,94 | Verifica |
| 75 | 16 | 116 | 1 | 9 | 80 | 48 | 112 | 48 | 55 | 96 | 6 | 96 | 1728 | 45 | 4,26 | 17,94 | Verifica |
| 75 | 16 | 126 | 1 | 8 | 80 | 48 | 112 | 48 | 60 | 96 | 6 | 96 | 1568 | 45 | 3,91 | 17,94 | Verifica |
| 75 | 16 | 98 | 1 | 9 | 80 | 48 | 112 | 48 | 45 | 96 | 8 | 96 | 1728 | 45 | 5,21 | 17,94 | Verifica |
| 75 | 16 | 108 | 1 | 9 | 80 | 48 | 112 | 48 | 50 | 96 | 8 | 96 | 1728 | 45 | 4,69 | 17,94 | Verifica |
| 75 | 16 | 118 | 1 | 9 | 80 | 48 | 112 | 48 | 55 | 96 | 8 | 96 | 1728 | 45 | 4,26 | 17,94 | Verifica |
| 75 | 16 | 128 | 1 | 8 | 80 | 48 | 112 | 48 | 60 | 96 | 8 | 96 | 1568 | 45 | 3,91 | 17,94 | Verifica |
| 75 | 16 | 100 | 1 | 9 | 80 | 48 | 112 | 48 | 45 | 96 | 10 | 96 | 1728 | 45 | 5,21 | 17,94 | Verifica |
| 75 | 16 | 110 | 1 | 9 | 80 | 48 | 112 | 48 | 50 | 96 | 10 | 96 | 1728 | 45 | 4,69 | 17,94 | Verifica |
| 75 | 16 | 120 | 1 | 9 | 80 | 48 | 112 | 48 | 55 | 96 | 10 | 96 | 1728 | 45 | 4,26 | 17,94 | Verifica |
| 75 | 16 | 130 | 1 | 8 | 80 | 48 | 112 | 48 | 60 | 96 | 10 | 96 | 1568 | 45 | 3,91 | 17,94 | Verifica |

| Carga (kN) | Cavilha (mm) | | Disposição das cavilhas | | Espaçamento e distâncias (mm) | | | Placas de madeira (mm) | | Placa de aço (mm) | | | Carga em situação de fogo, (kN) | Carga por área em situação de fogo | Tensão resistente ao fogo | Verificação | |
|------------|--------------|-------------|-------------------------|---------|-------------------------------|----|------|------------------------|---------------|-------------------|---------------|--------------|---------------------------------|------------------------------------|---------------------------|-------------|-------------|
| | Diâmetro, d | Comprimento | Linhas | Colunas | a1 | a2 | a3,1 | a4,c | Espessura, t1 | Largura | Espessura, ts | Largura, bst | | | | | Comprimento |
| 100 | 10 | 95 | 2 | 12 | 50 | 30 | 70 | 30 | 45 | 90 | 5 | 90 | 1380 | 60 | 7,41 | 17,94 | Verifica |
| 100 | 10 | 105 | 2 | 11 | 50 | 30 | 70 | 30 | 50 | 90 | 5 | 90 | 1280 | 60 | 6,67 | 17,94 | Verifica |
| 100 | 10 | 115 | 2 | 10 | 50 | 30 | 70 | 30 | 55 | 90 | 5 | 90 | 1180 | 60 | 6,06 | 17,94 | Verifica |
| 100 | 10 | 125 | 2 | 10 | 50 | 30 | 70 | 30 | 60 | 90 | 5 | 90 | 1180 | 60 | 5,56 | 17,94 | Verifica |
| 100 | 10 | 96 | 2 | 12 | 50 | 30 | 70 | 30 | 45 | 90 | 6 | 90 | 1380 | 60 | 7,41 | 17,94 | Verifica |
| 100 | 10 | 106 | 2 | 11 | 50 | 30 | 70 | 30 | 50 | 90 | 6 | 90 | 1280 | 60 | 6,67 | 17,94 | Verifica |
| 100 | 10 | 116 | 2 | 10 | 50 | 30 | 70 | 30 | 55 | 90 | 6 | 90 | 1180 | 60 | 6,06 | 17,94 | Verifica |
| 100 | 10 | 126 | 2 | 10 | 50 | 30 | 70 | 30 | 60 | 90 | 6 | 90 | 1180 | 60 | 5,56 | 17,94 | Verifica |
| 100 | 10 | 98 | 2 | 12 | 50 | 30 | 70 | 30 | 45 | 90 | 8 | 90 | 1380 | 60 | 7,41 | 17,94 | Verifica |
| 100 | 10 | 108 | 2 | 11 | 50 | 30 | 70 | 30 | 50 | 90 | 8 | 90 | 1280 | 60 | 6,67 | 17,94 | Verifica |
| 100 | 10 | 118 | 2 | 10 | 50 | 30 | 70 | 30 | 55 | 90 | 8 | 90 | 1180 | 60 | 6,06 | 17,94 | Verifica |
| 100 | 10 | 128 | 2 | 10 | 50 | 30 | 70 | 30 | 60 | 90 | 8 | 90 | 1180 | 60 | 5,56 | 17,94 | Verifica |
| 100 | 10 | 100 | 2 | 12 | 50 | 30 | 70 | 30 | 45 | 90 | 10 | 90 | 1380 | 60 | 7,41 | 17,94 | Verifica |
| 100 | 10 | 110 | 2 | 11 | 50 | 30 | 70 | 30 | 50 | 90 | 10 | 90 | 1280 | 60 | 6,67 | 17,94 | Verifica |
| 100 | 10 | 120 | 2 | 10 | 50 | 30 | 70 | 30 | 55 | 90 | 10 | 90 | 1180 | 60 | 6,06 | 17,94 | Verifica |
| 100 | 10 | 130 | 2 | 10 | 50 | 30 | 70 | 30 | 60 | 90 | 10 | 90 | 1180 | 60 | 5,56 | 17,94 | Verifica |
| 100 | 12 | 95 | 2 | 9 | 60 | 36 | 84 | 36 | 45 | 108 | 5 | 108 | 1296 | 60 | 6,17 | 17,94 | Verifica |
| 100 | 12 | 105 | 2 | 9 | 60 | 36 | 84 | 36 | 50 | 108 | 5 | 108 | 1296 | 60 | 5,56 | 17,94 | Verifica |
| 100 | 12 | 115 | 2 | 8 | 60 | 36 | 84 | 36 | 55 | 108 | 5 | 108 | 1176 | 60 | 5,05 | 17,94 | Verifica |
| 100 | 12 | 125 | 1 | 15 | 60 | 36 | 84 | 36 | 60 | 72 | 5 | 72 | 2016 | 60 | 6,94 | 17,94 | Verifica |
| 100 | 12 | 96 | 2 | 9 | 60 | 36 | 84 | 36 | 45 | 108 | 6 | 108 | 1296 | 60 | 6,17 | 17,94 | Verifica |
| 100 | 12 | 106 | 2 | 9 | 60 | 36 | 84 | 36 | 50 | 108 | 6 | 108 | 1296 | 60 | 5,56 | 17,94 | Verifica |
| 100 | 12 | 116 | 2 | 8 | 60 | 36 | 84 | 36 | 55 | 108 | 6 | 108 | 1176 | 60 | 5,05 | 17,94 | Verifica |
| 100 | 12 | 126 | 1 | 15 | 60 | 36 | 84 | 36 | 60 | 72 | 6 | 72 | 2016 | 60 | 6,94 | 17,94 | Verifica |
| 100 | 12 | 98 | 2 | 9 | 60 | 36 | 84 | 36 | 45 | 108 | 8 | 108 | 1296 | 60 | 6,17 | 17,94 | Verifica |
| 100 | 12 | 108 | 2 | 9 | 60 | 36 | 84 | 36 | 50 | 108 | 8 | 108 | 1296 | 60 | 5,56 | 17,94 | Verifica |
| 100 | 12 | 118 | 2 | 8 | 60 | 36 | 84 | 36 | 55 | 108 | 8 | 108 | 1176 | 60 | 5,05 | 17,94 | Verifica |
| 100 | 12 | 128 | 1 | 15 | 60 | 36 | 84 | 36 | 60 | 72 | 8 | 72 | 2016 | 60 | 6,94 | 17,94 | Verifica |
| 100 | 12 | 100 | 2 | 9 | 60 | 36 | 84 | 36 | 45 | 108 | 10 | 108 | 1296 | 60 | 6,17 | 17,94 | Verifica |
| 100 | 12 | 110 | 2 | 9 | 60 | 36 | 84 | 36 | 50 | 108 | 10 | 108 | 1296 | 60 | 5,56 | 17,94 | Verifica |
| 100 | 12 | 120 | 2 | 8 | 60 | 36 | 84 | 36 | 55 | 108 | 10 | 108 | 1176 | 60 | 5,05 | 17,94 | Verifica |
| 100 | 12 | 130 | 1 | 15 | 60 | 36 | 84 | 36 | 60 | 72 | 10 | 72 | 2016 | 60 | 6,94 | 17,94 | Verifica |
| 100 | 14 | 95 | 2 | 8 | 70 | 42 | 98 | 42 | 45 | 126 | 5 | 126 | 1372 | 60 | 5,29 | 17,94 | Verifica |
| 100 | 14 | 105 | 1 | 14 | 70 | 42 | 98 | 42 | 50 | 84 | 5 | 84 | 2212 | 60 | 7,14 | 17,94 | Verifica |
| 100 | 14 | 115 | 1 | 13 | 70 | 42 | 98 | 42 | 55 | 84 | 5 | 84 | 2072 | 60 | 6,49 | 17,94 | Verifica |
| 100 | 14 | 125 | 1 | 13 | 70 | 42 | 98 | 42 | 60 | 84 | 5 | 84 | 2072 | 60 | 5,95 | 17,94 | Verifica |
| 100 | 14 | 96 | 2 | 8 | 70 | 42 | 98 | 42 | 45 | 126 | 6 | 126 | 1372 | 60 | 5,29 | 17,94 | Verifica |
| 100 | 14 | 106 | 1 | 14 | 70 | 42 | 98 | 42 | 50 | 84 | 6 | 84 | 2212 | 60 | 7,14 | 17,94 | Verifica |
| 100 | 14 | 116 | 1 | 13 | 70 | 42 | 98 | 42 | 55 | 84 | 6 | 84 | 2072 | 60 | 6,49 | 17,94 | Verifica |
| 100 | 14 | 126 | 1 | 13 | 70 | 42 | 98 | 42 | 60 | 84 | 6 | 84 | 2072 | 60 | 5,95 | 17,94 | Verifica |
| 100 | 14 | 98 | 2 | 8 | 70 | 42 | 98 | 42 | 45 | 126 | 8 | 126 | 1372 | 60 | 5,29 | 17,94 | Verifica |
| 100 | 14 | 108 | 1 | 14 | 70 | 42 | 98 | 42 | 50 | 84 | 8 | 84 | 2212 | 60 | 7,14 | 17,94 | Verifica |
| 100 | 14 | 118 | 1 | 13 | 70 | 42 | 98 | 42 | 55 | 84 | 8 | 84 | 2072 | 60 | 6,49 | 17,94 | Verifica |
| 100 | 14 | 128 | 1 | 13 | 70 | 42 | 98 | 42 | 60 | 84 | 8 | 84 | 2072 | 60 | 5,95 | 17,94 | Verifica |
| 100 | 14 | 100 | 2 | 8 | 70 | 42 | 98 | 42 | 45 | 126 | 10 | 126 | 1372 | 60 | 5,29 | 17,94 | Verifica |
| 100 | 14 | 110 | 1 | 14 | 70 | 42 | 98 | 42 | 50 | 84 | 10 | 84 | 2212 | 60 | 7,14 | 17,94 | Verifica |
| 100 | 14 | 120 | 1 | 13 | 70 | 42 | 98 | 42 | 55 | 84 | 10 | 84 | 2072 | 60 | 6,49 | 17,94 | Verifica |
| 100 | 14 | 130 | 1 | 13 | 70 | 42 | 98 | 42 | 60 | 84 | 10 | 84 | 2072 | 60 | 5,95 | 17,94 | Verifica |
| 100 | 16 | 95 | 1 | 12 | 80 | 48 | 112 | 48 | 45 | 96 | 5 | 96 | 2208 | 60 | 6,94 | 17,94 | Verifica |
| 100 | 16 | 105 | 1 | 12 | 80 | 48 | 112 | 48 | 50 | 96 | 5 | 96 | 2208 | 60 | 6,25 | 17,94 | Verifica |
| 100 | 16 | 115 | 1 | 11 | 80 | 48 | 112 | 48 | 55 | 96 | 5 | 96 | 2048 | 60 | 5,68 | 17,94 | Verifica |
| 100 | 16 | 125 | 1 | 11 | 80 | 48 | 112 | 48 | 60 | 96 | 5 | 96 | 2048 | 60 | 5,21 | 17,94 | Verifica |
| 100 | 16 | 96 | 1 | 12 | 80 | 48 | 112 | 48 | 45 | 96 | 6 | 96 | 2208 | 60 | 6,94 | 17,94 | Verifica |
| 100 | 16 | 106 | 1 | 12 | 80 | 48 | 112 | 48 | 50 | 96 | 6 | 96 | 2208 | 60 | 6,25 | 17,94 | Verifica |
| 100 | 16 | 116 | 1 | 11 | 80 | 48 | 112 | 48 | 55 | 96 | 6 | 96 | 2048 | 60 | 5,68 | 17,94 | Verifica |
| 100 | 16 | 126 | 1 | 11 | 80 | 48 | 112 | 48 | 60 | 96 | 6 | 96 | 2048 | 60 | 5,21 | 17,94 | Verifica |
| 100 | 16 | 98 | 1 | 12 | 80 | 48 | 112 | 48 | 45 | 96 | 8 | 96 | 2208 | 60 | 6,94 | 17,94 | Verifica |
| 100 | 16 | 108 | 1 | 12 | 80 | 48 | 112 | 48 | 50 | 96 | 8 | 96 | 2208 | 60 | 6,25 | 17,94 | Verifica |
| 100 | 16 | 118 | 1 | 11 | 80 | 48 | 112 | 48 | 55 | 96 | 8 | 96 | 2048 | 60 | 5,68 | 17,94 | Verifica |
| 100 | 16 | 128 | 1 | 11 | 80 | 48 | 112 | 48 | 60 | 96 | 8 | 96 | 2048 | 60 | 5,21 | 17,94 | Verifica |
| 100 | 16 | 100 | 1 | 12 | 80 | 48 | 112 | 48 | 45 | 96 | 10 | 96 | 2208 | 60 | 6,94 | 17,94 | Verifica |
| 100 | 16 | 110 | 1 | 12 | 80 | 48 | 112 | 48 | 50 | 96 | 10 | 96 | 2208 | 60 | 6,25 | 17,94 | Verifica |
| 100 | 16 | 120 | 1 | 11 | 80 | 48 | 112 | 48 | 55 | 96 | 10 | 96 | 2048 | 60 | 5,68 | 17,94 | Verifica |
| 100 | 16 | 130 | 1 | 11 | 80 | 48 | 112 | 48 | 60 | 96 | 10 | 96 | 2048 | 60 | 5,21 | 17,94 | Verifica |

Anexo 2 – Resultados numéricos da carga última (N) obtidos nas simulações numéricas para cada um dos casos estudados

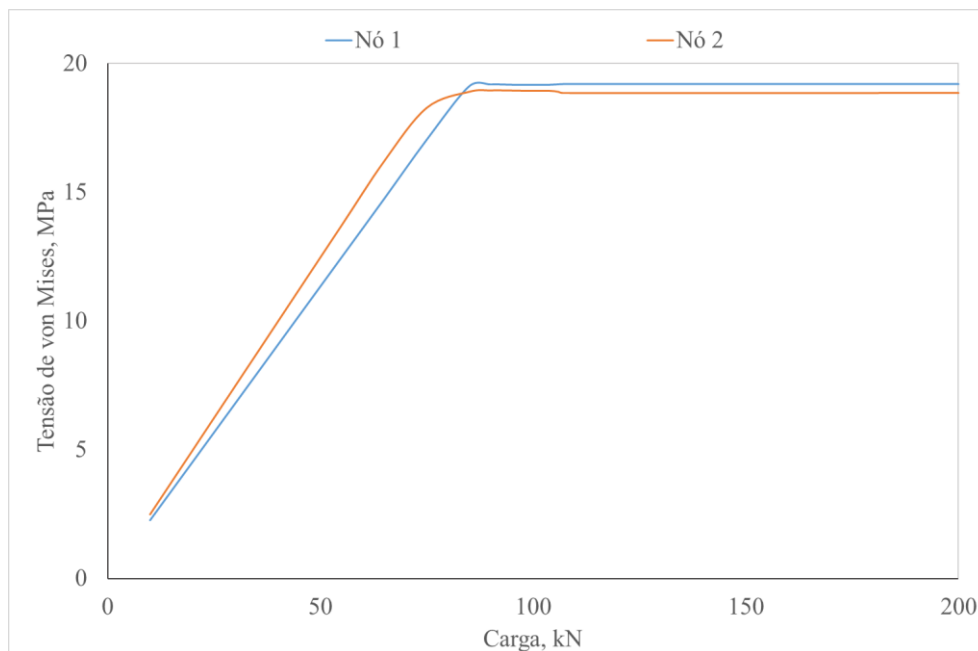
| Ligação | Valor analítico | Caso | | | | | |
|---------|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| A | 111150 | 107210 | 107010 | 101010 | 109060 | 109060 | 109060 |
| B | 111150 | 119060 | 116063 | 116060 | 122190 | 122190 | 1122190 |
| C | 166725 | 174840 | 174840 | 178320 | 196530 | 192530 | 183530 |
| D | 166725 | 171700 | 172060 | 171550 | 182140 | 182140 | 182150 |

Anexo 3 – Erros relativos obtidos nas simulações numéricas para cada um dos casos estudados

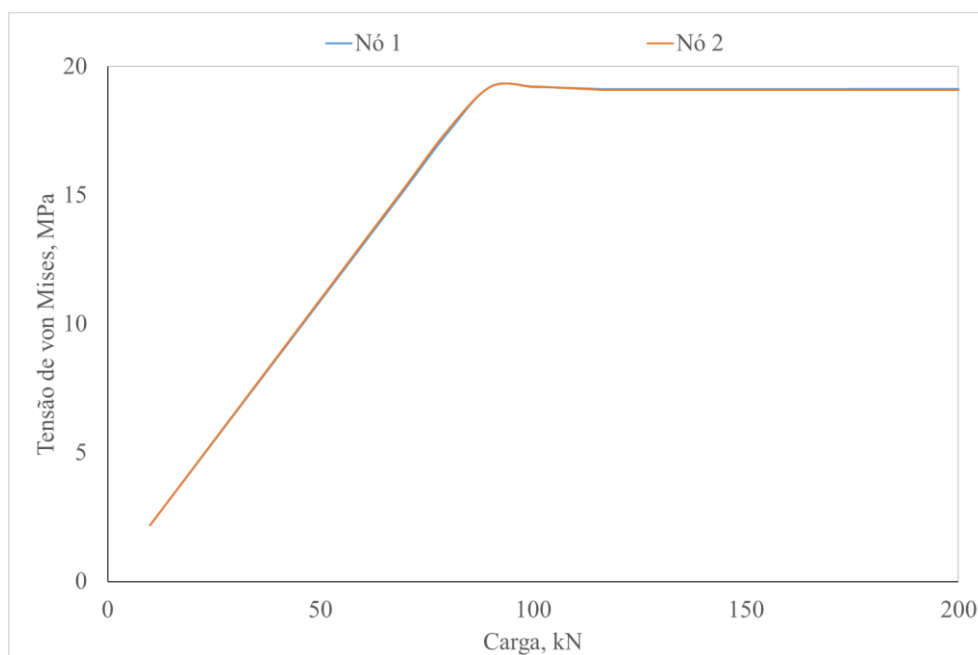
| Ligação | Caso | | | | | |
|---------|------|------|------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| A | 3,5% | 3,7% | 9,1% | 1,9% | 1,9% | 1,9% |
| B | 7,1% | 4,4% | 4,4% | 9,9% | 9,9% | 9,9% |
| C | 4,9% | 4,9% | 7,0% | 17,9% | 15,5% | 10,1% |
| D | 3,0% | 3,2% | 2,9% | 9,2% | 9,2% | 9,3% |

Anexo 4 – Tensões equivalentes de von Mises em diferentes pontos em função da carga, caso 2.

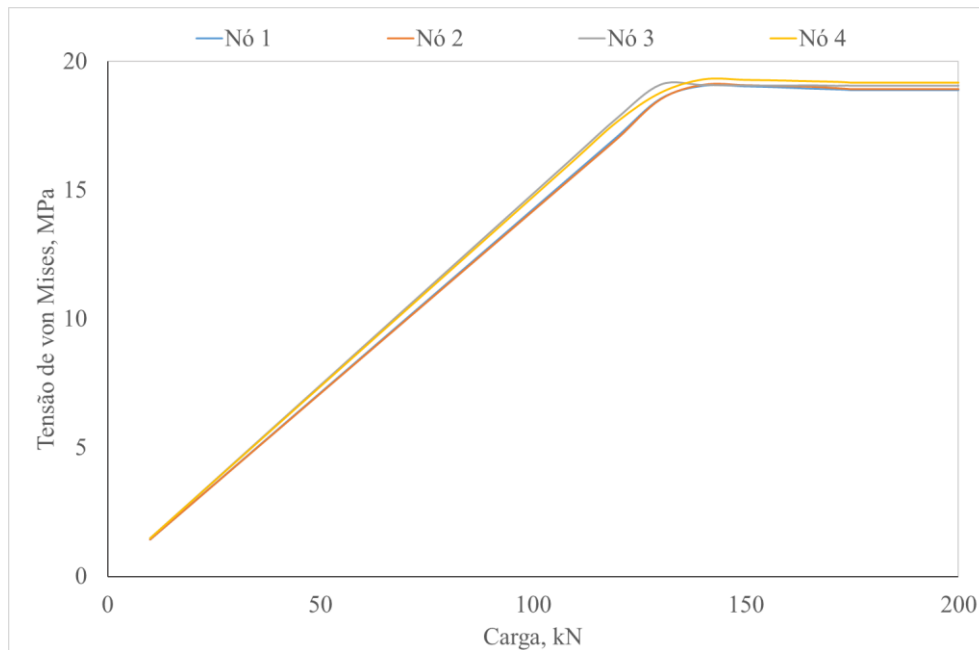
Ligação A



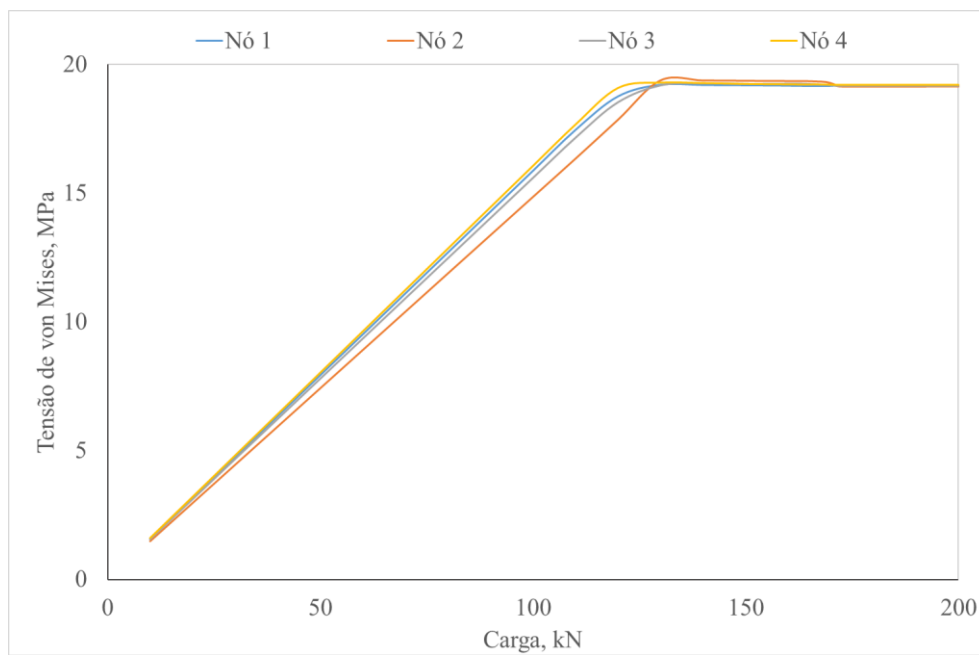
Ligação B



Ligação C

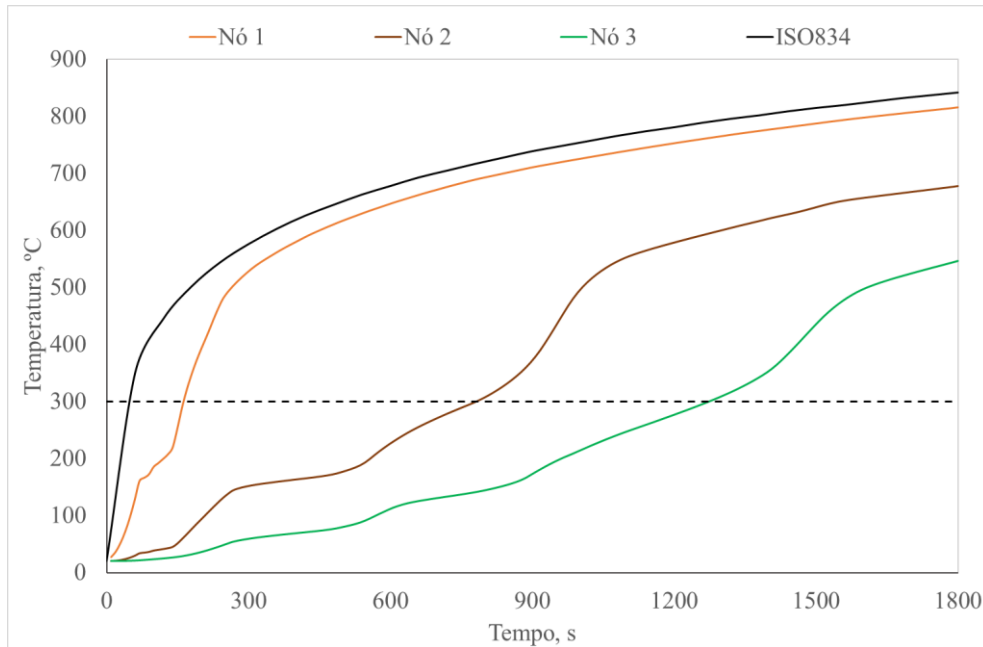


Ligação D

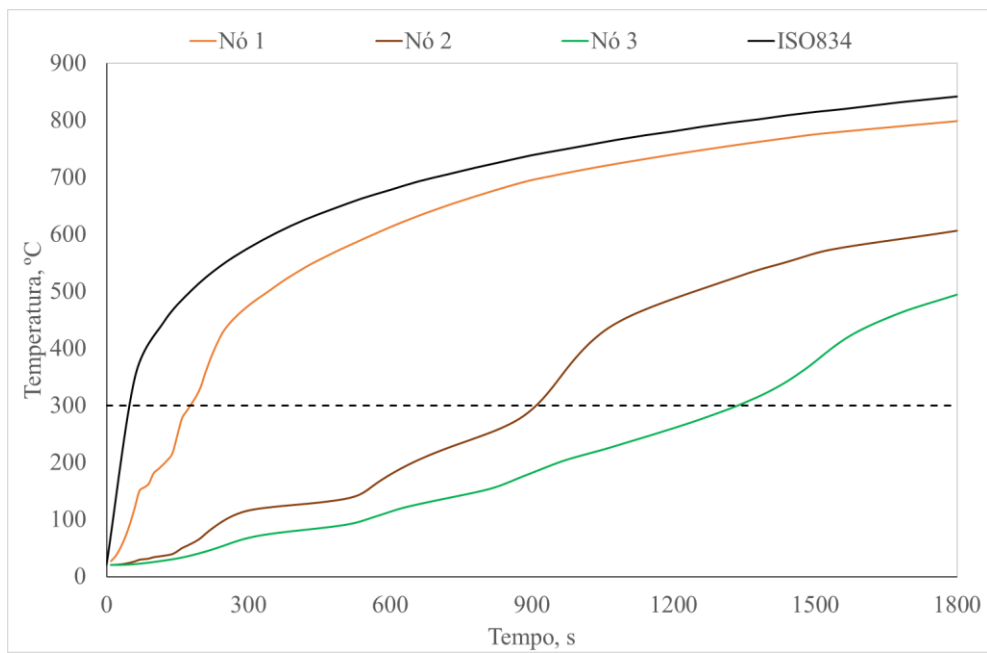


Anexo 9 – Temperatura de diferentes nós a 0, 5 e 10 mm de profundidade em função do tempo e curva ISO-834, ligações não protegidas

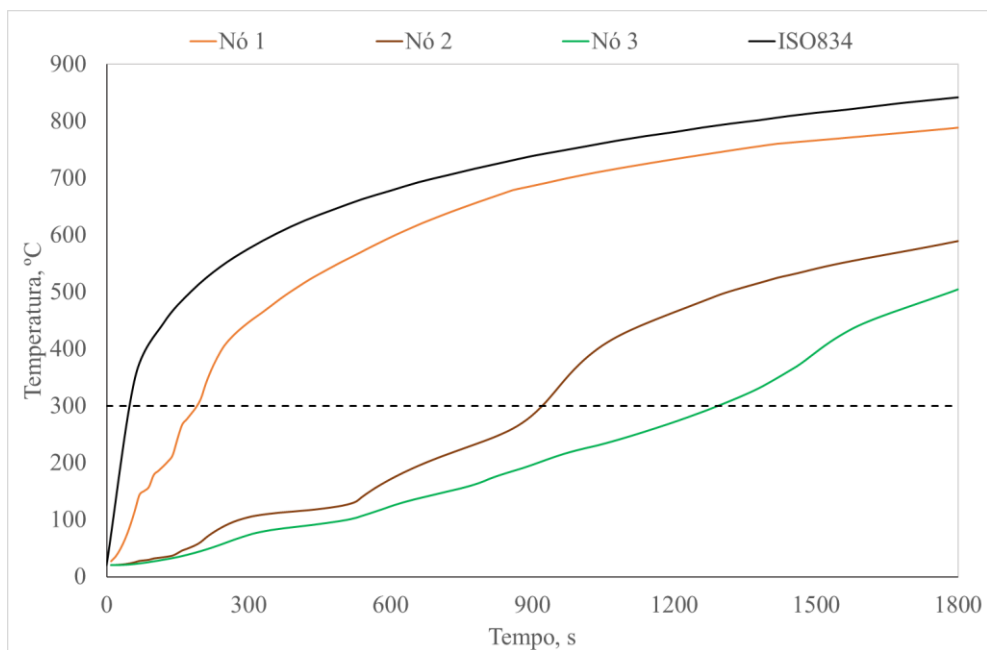
Ligação A



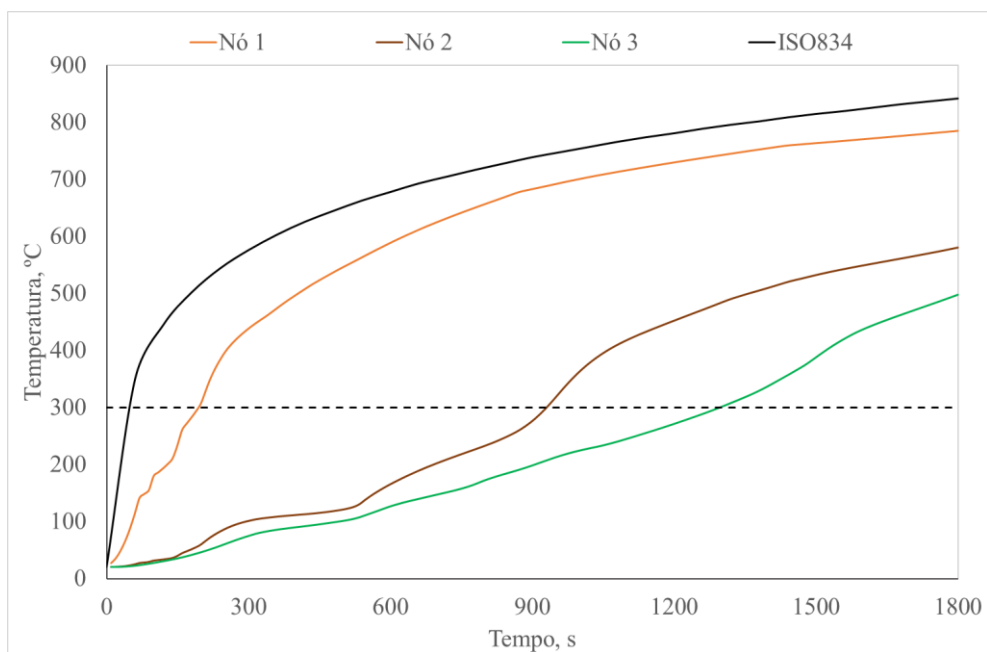
Ligação B



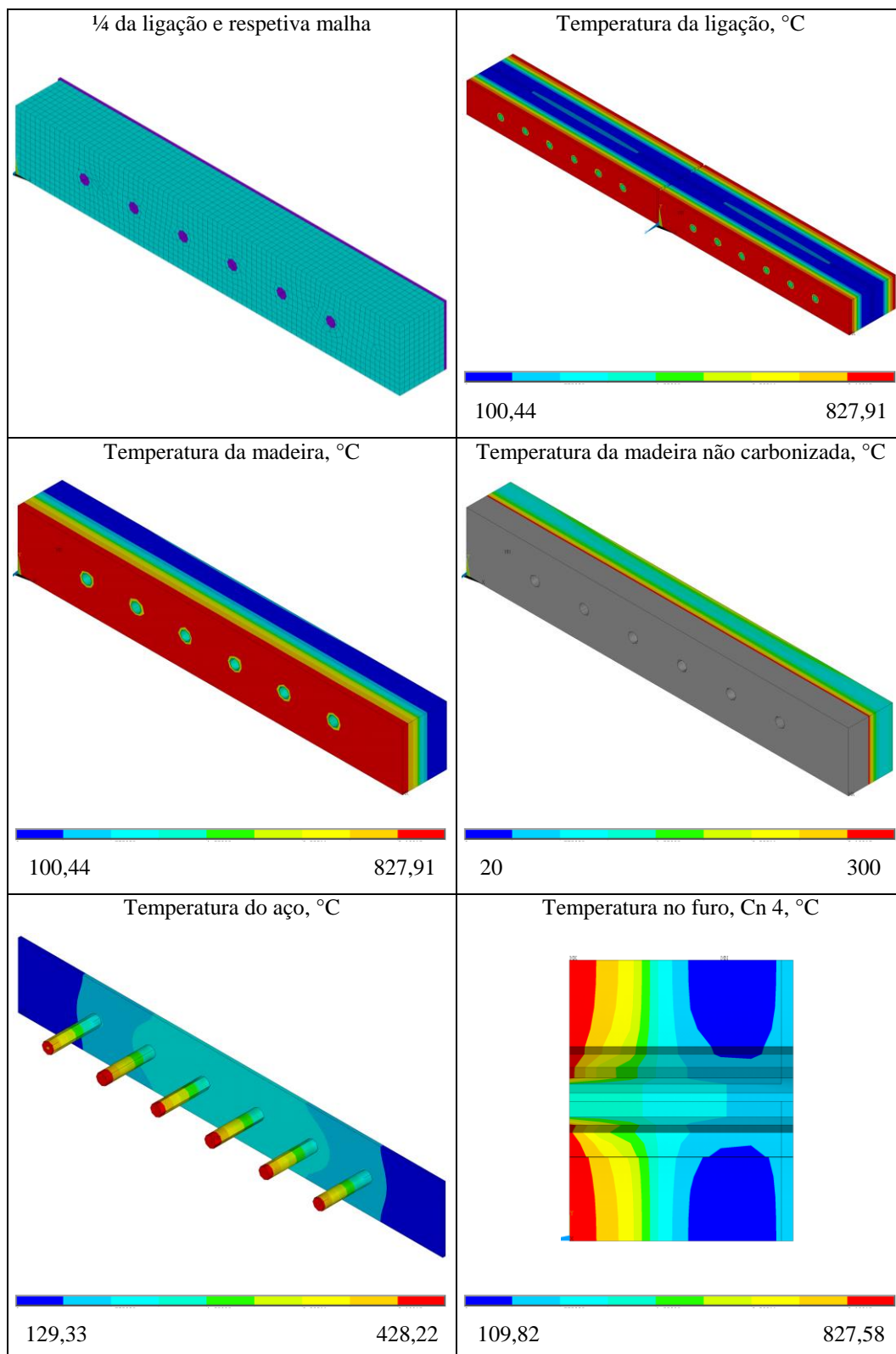
Ligação C



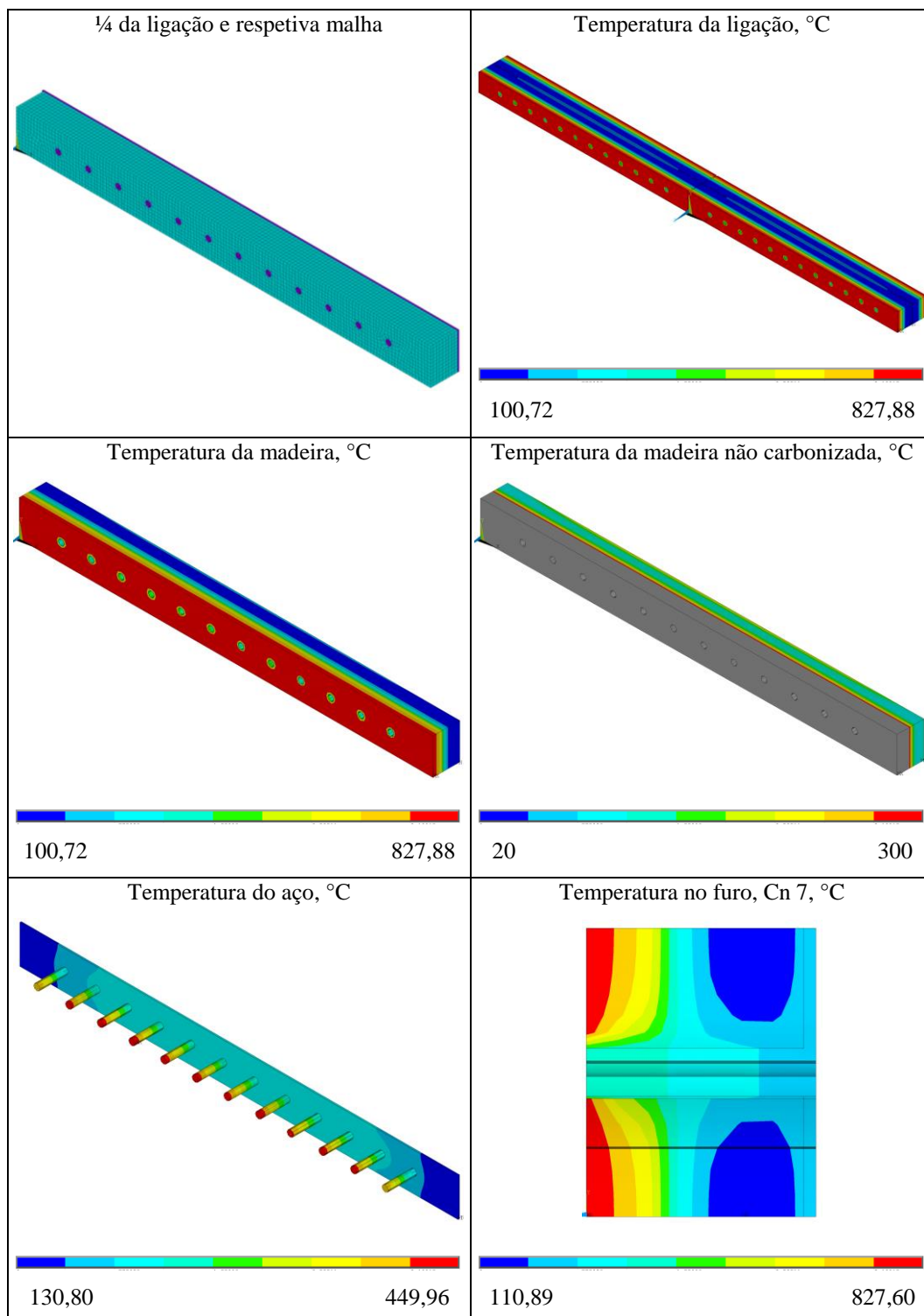
Ligação D



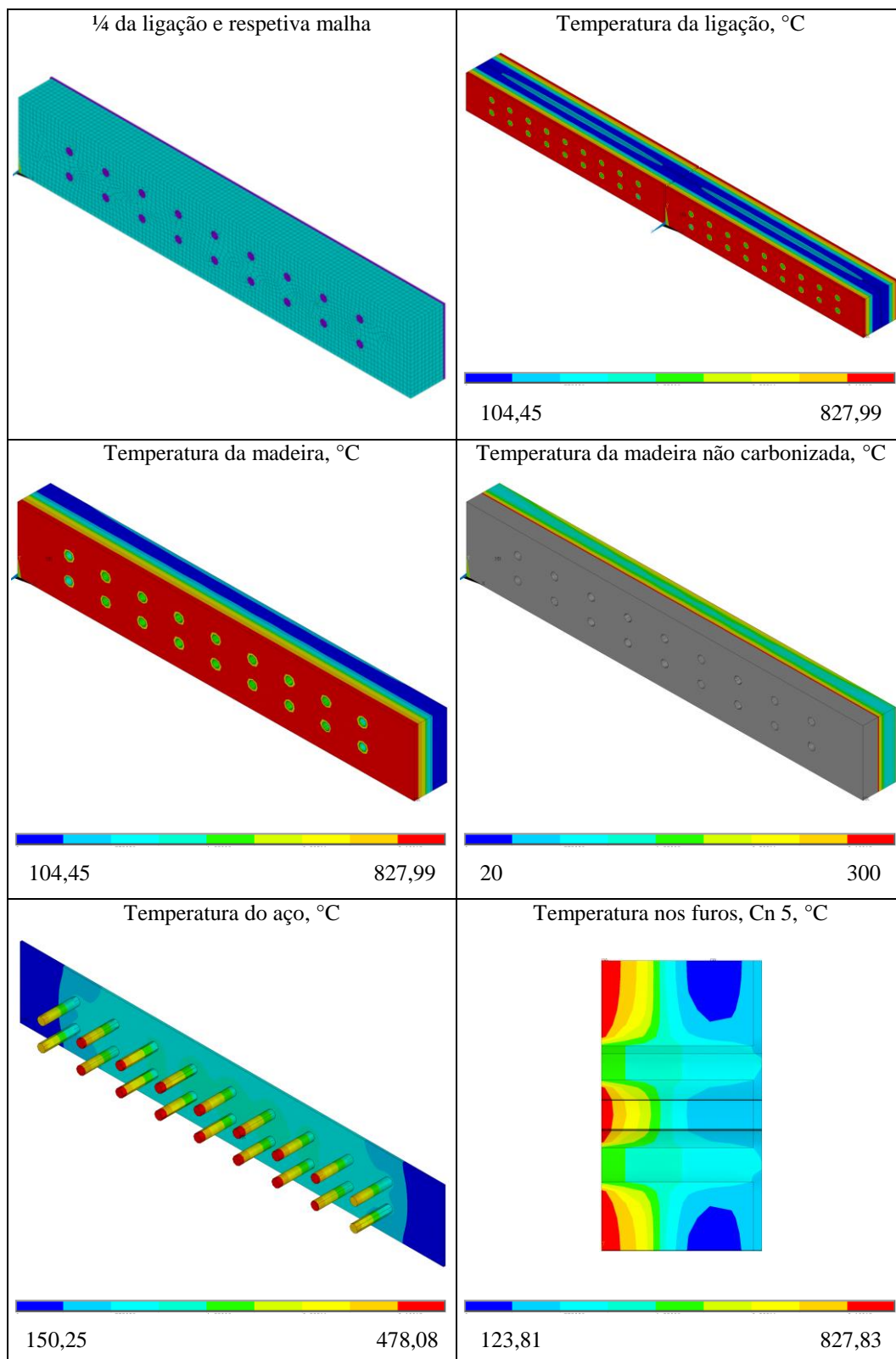
Anexo 10 – Ligação A, a temperatura de fogo, ao fim de 30 minutos



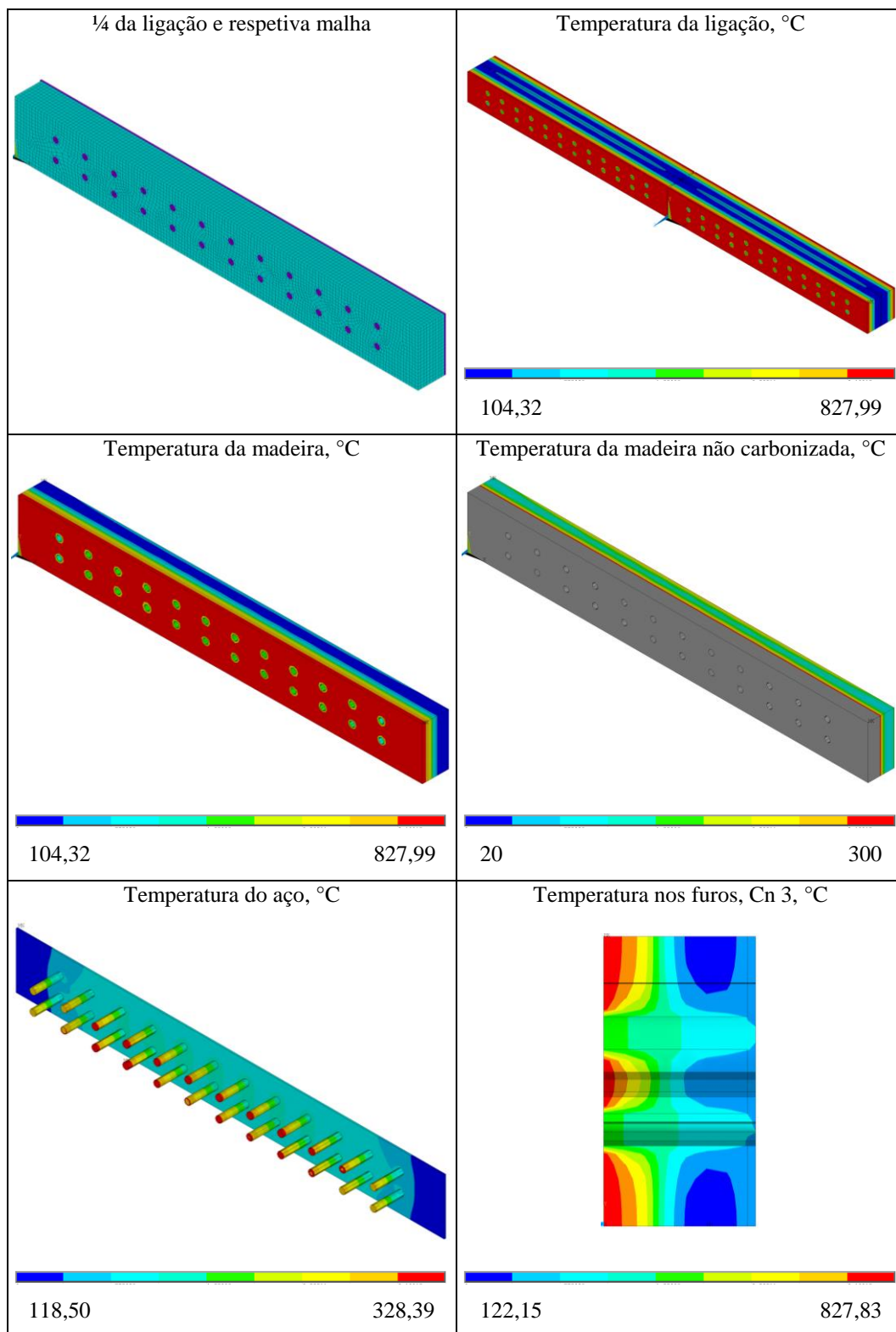
Anexo 11 – Ligação B, a temperatura de fogo, ao fim de 30 minutos



Anexo 12 – Ligação C, a temperatura de fogo, ao fim de 30 minutos



Anexo 13 – Ligação D, a temperatura de fogo, ao fim de 30 minutos



Anexo 14 – Propriedades térmicas do gesso segundo diferentes autores

(Alves & Batista, 2007)

| Densidade, (kg/m ³) | Condutividade térmica (W/m °C) | | Calor específico (J/kg °C) | |
|---------------------------------|-----------------------------------|---------|----------------------------|--------|
| 727 | 0,2 | 10 °C | 925,04 | 10 °C |
| | 0,218 | 150 °C | 941,5 | 95 °C |
| | 0,103 | 155 °C | 24572,32 | 125 °C |
| | 0,3195 | 1200 °C | 953,14 | 155 °C |
| | | | 1097,5 | 900 °C |

(Sultan, 1996)

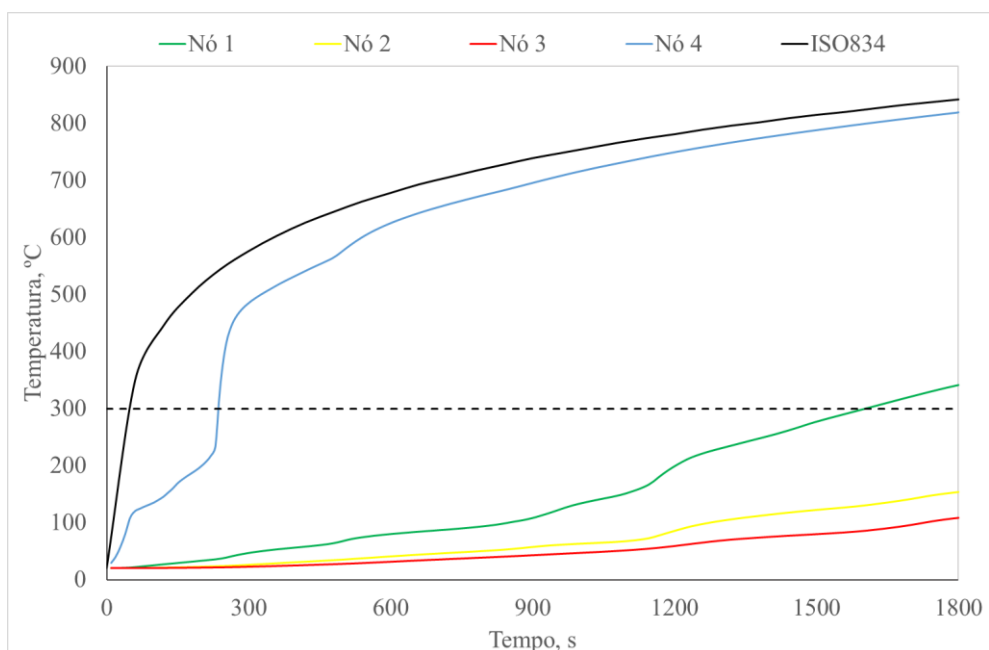
| Densidade, kg/m ³ | | Condutividade térmica (W/m °C) | | Calor específico (J/kg °C) | |
|------------------------------|-------|-----------------------------------|---------|----------------------------|--------|
| 698 | 20 °C | 0,25 | 10 °C | 1499,92 | 10 °C |
| 576 | 80 °C | 0,25 | 20 °C | 1499,92 | 20 °C |
| | | 0,12 | 100 °C | 1842 | 78 °C |
| | | 0,13 | 400 °C | 2769 | 85 °C |
| | | 0,27 | 800 °C | 5861 | 97 °C |
| | | 0,53 | 1200 °C | 18479 | 124 °C |
| | | | | 2006 | 139 °C |
| | | | | 1001,04 | 148 °C |
| | | | | 714 | 373 °C |
| | | | | 714,98 | 430 °C |
| | | | | 570,78 | 571 °C |
| | | | | 617,8 | 609 °C |
| | | | | 3000 | 662 °C |
| | | | | 3070 | 670 °C |
| | | | | 571 | 685 °C |
| | | 571 | 900 °C | | |

(Aissa, 2017)

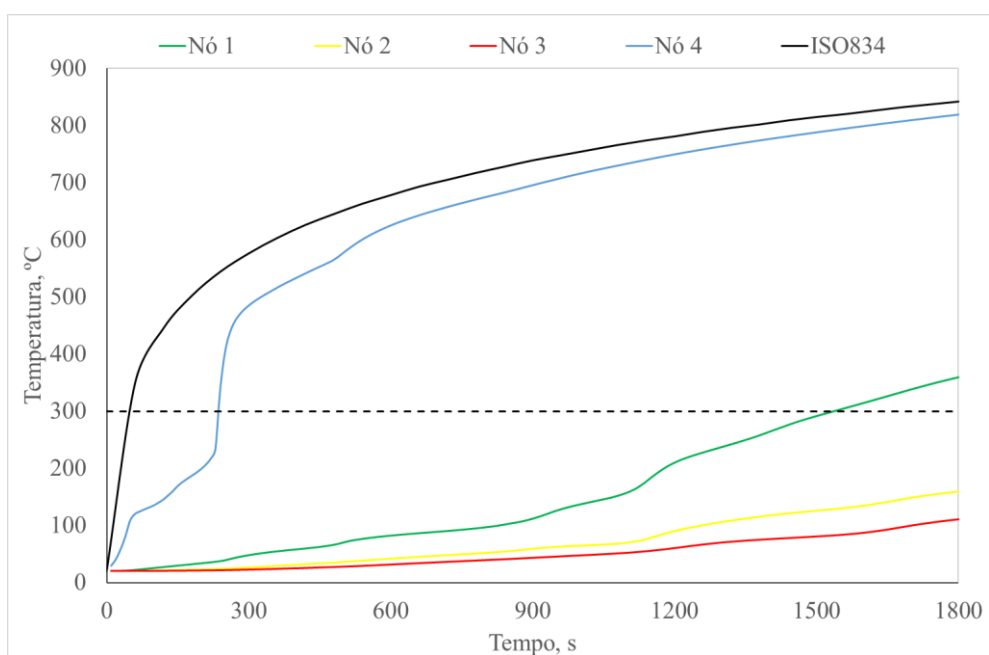
| Densidade, kg/m ³ | Condutividade térmica (W/m °C) | Calor específico (J/kg °C) |
|------------------------------|-----------------------------------|----------------------------|
| 727 | 0,21 | 1000 |

Anexo 15 – Temperatura de diferentes nós 0, 12,1 17,1 e 22,1 mm de profundidade em função do tempo e curva ISO-834, ligações protegidas por gesso (Alves & Batista, 2007)

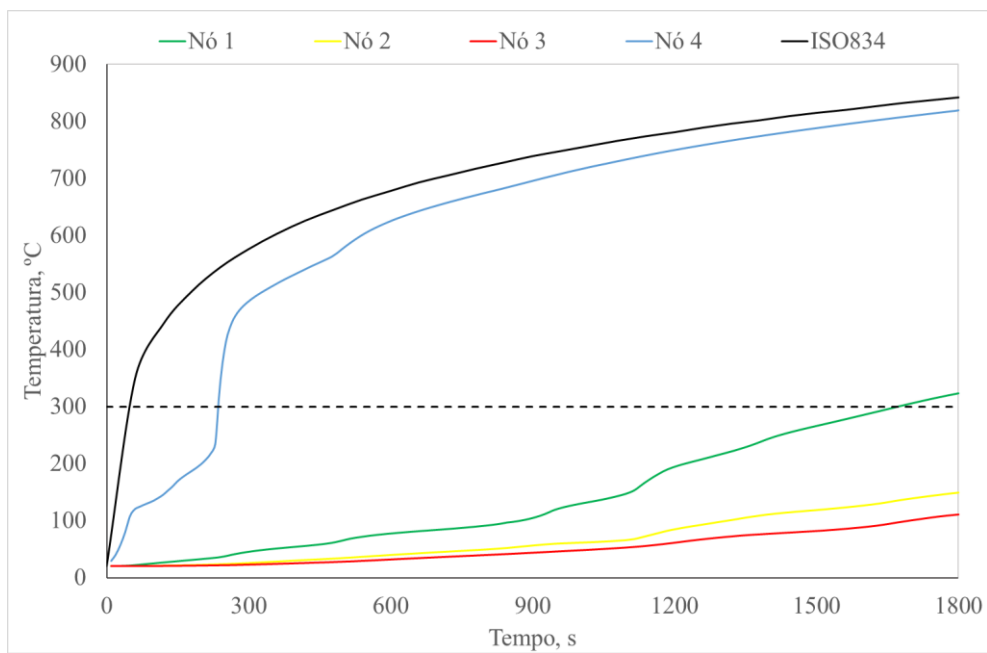
Ligação A



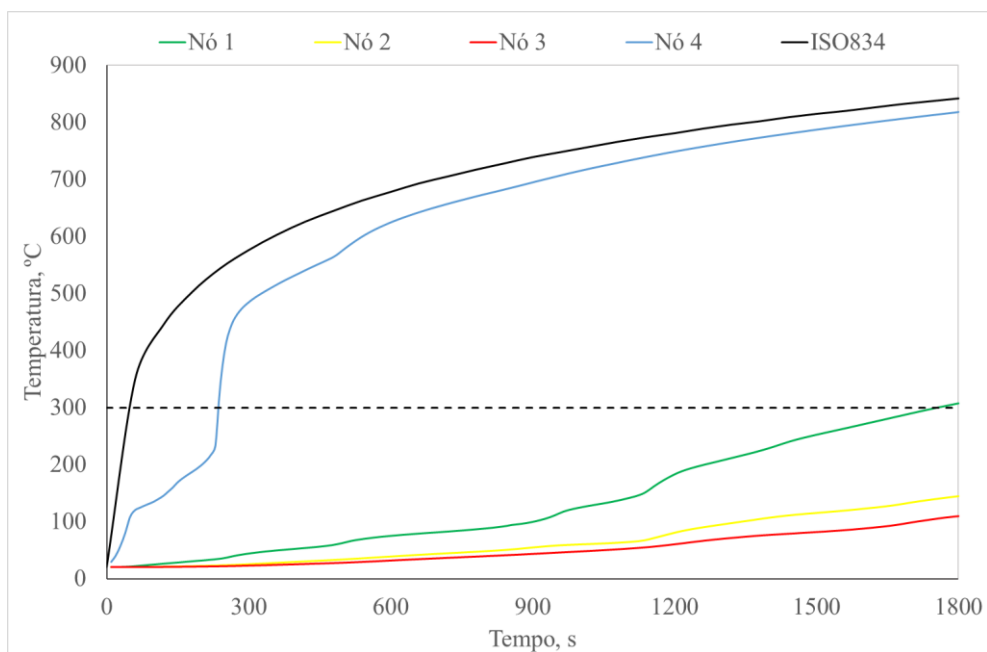
Ligação B



Ligação C

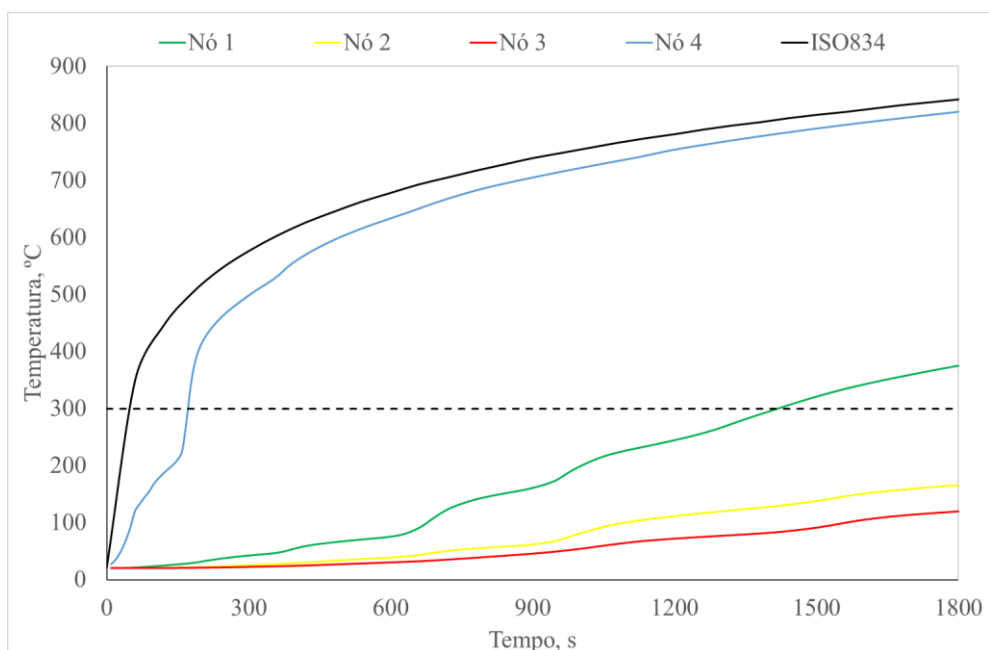


Ligação D

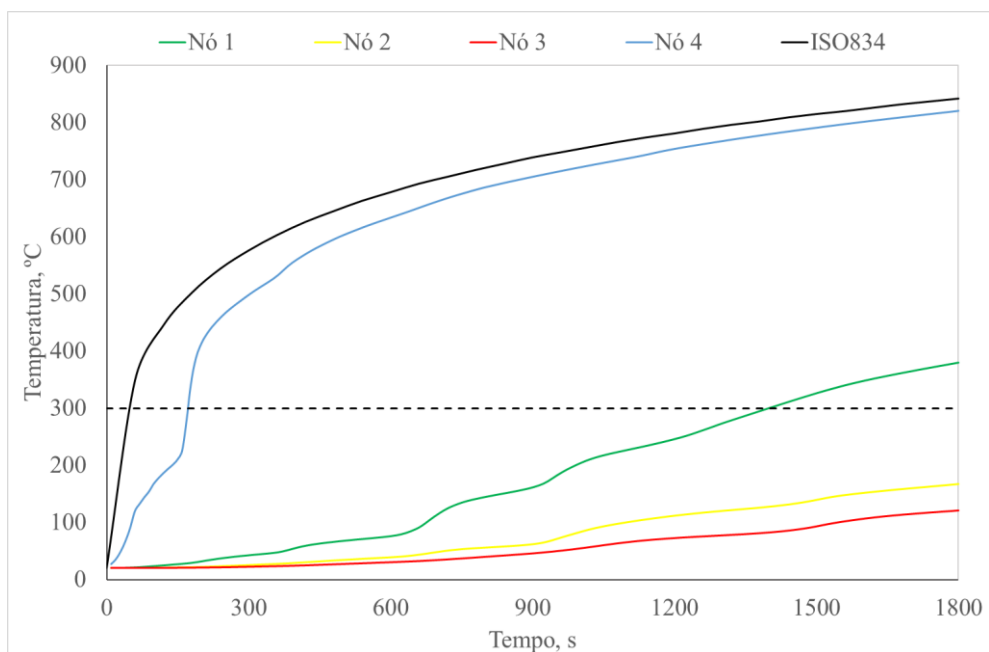


Anexo 16 – Temperatura de diferentes nós 0, 12,1 17,1 e 22,1 mm de profundidade em função do tempo e curva ISO-834, ligações protegidas por gesso (Sultan, 1996)

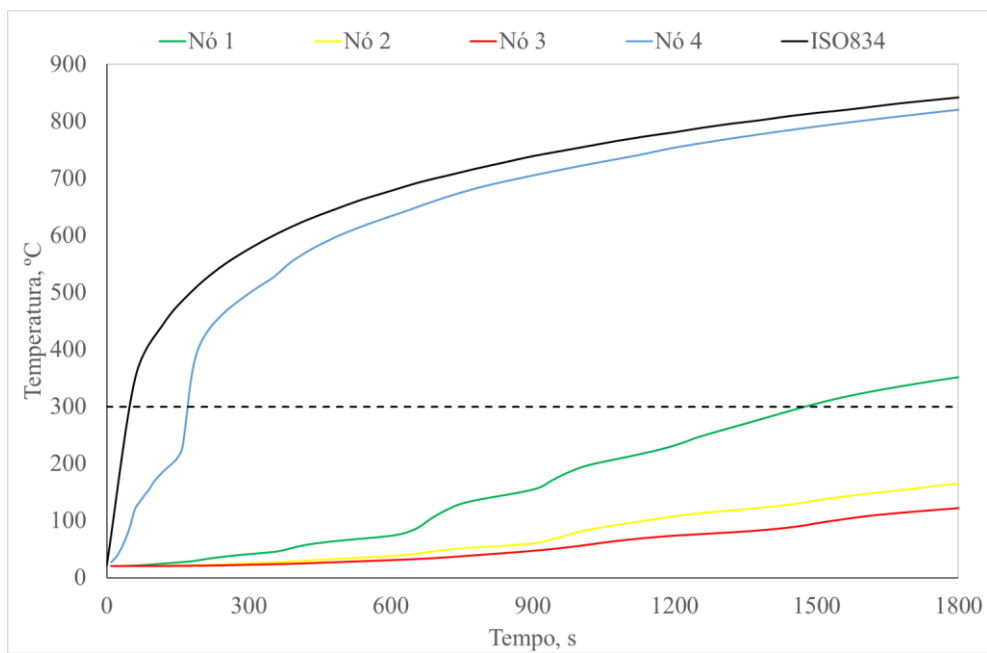
Ligação A



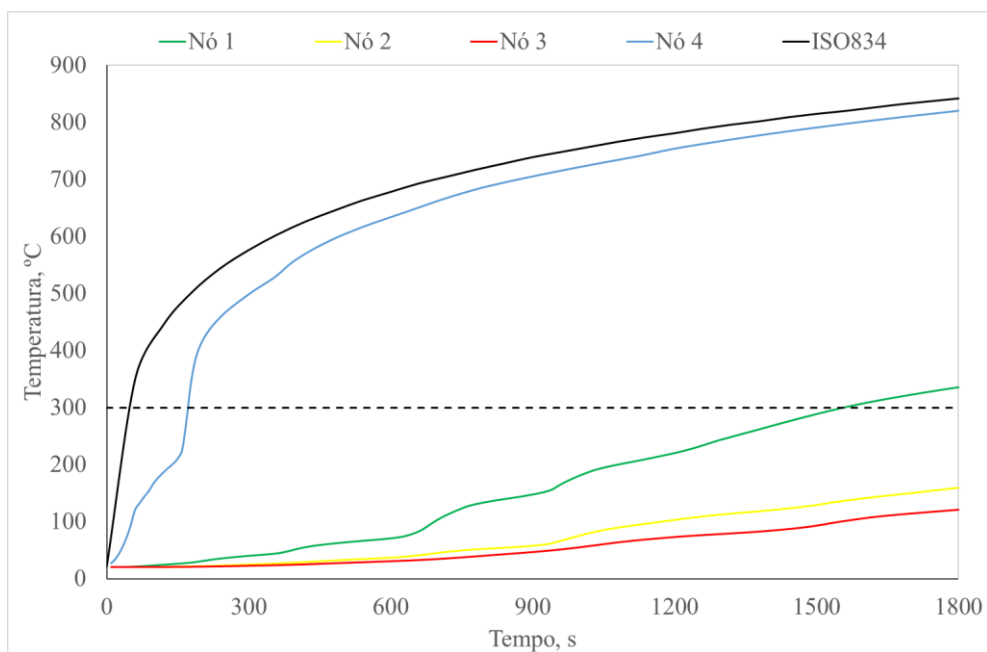
Ligação B



Ligação C

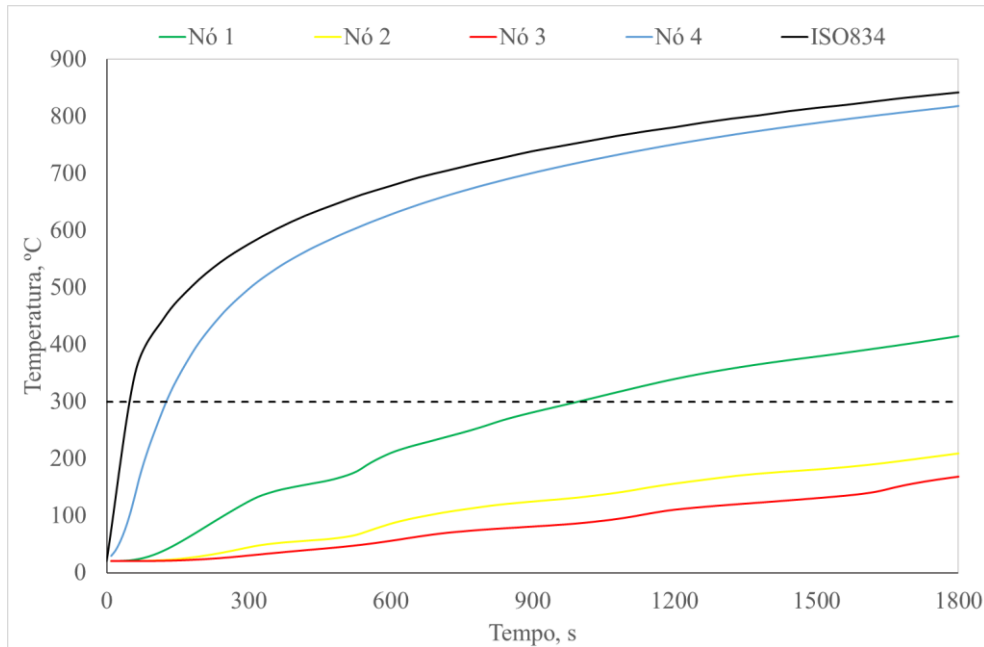


Ligação D

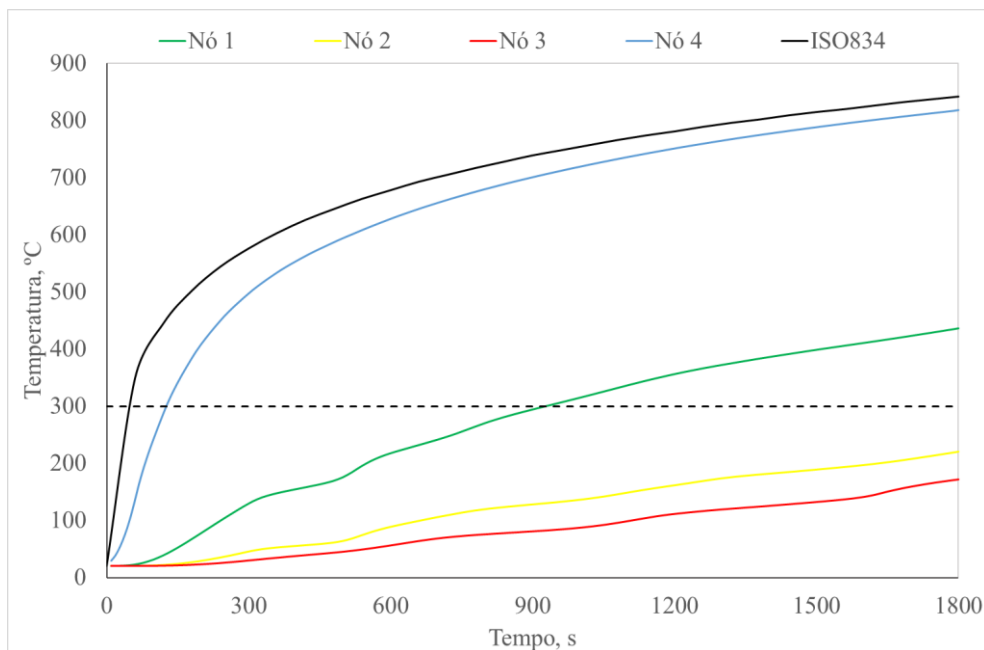


Anexo 17 – Temperatura de diferentes nós 0, 12,1 17,1 e 22,1 mm de profundidade em função do tempo e curva ISO-834, ligações protegidas por gesso (Aissa, 2017)

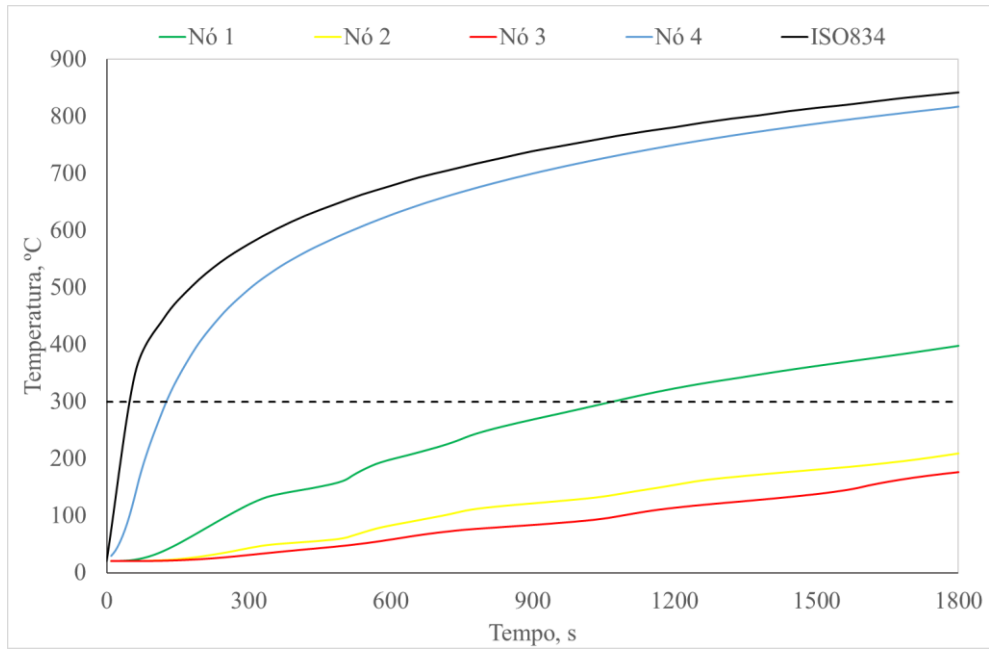
Ligação A



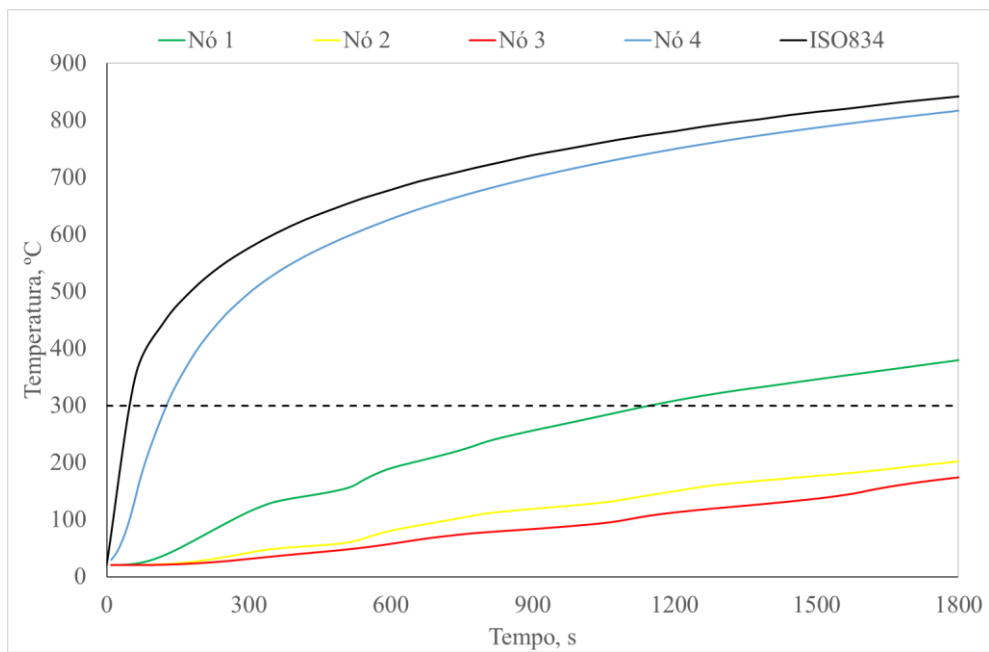
Ligação B



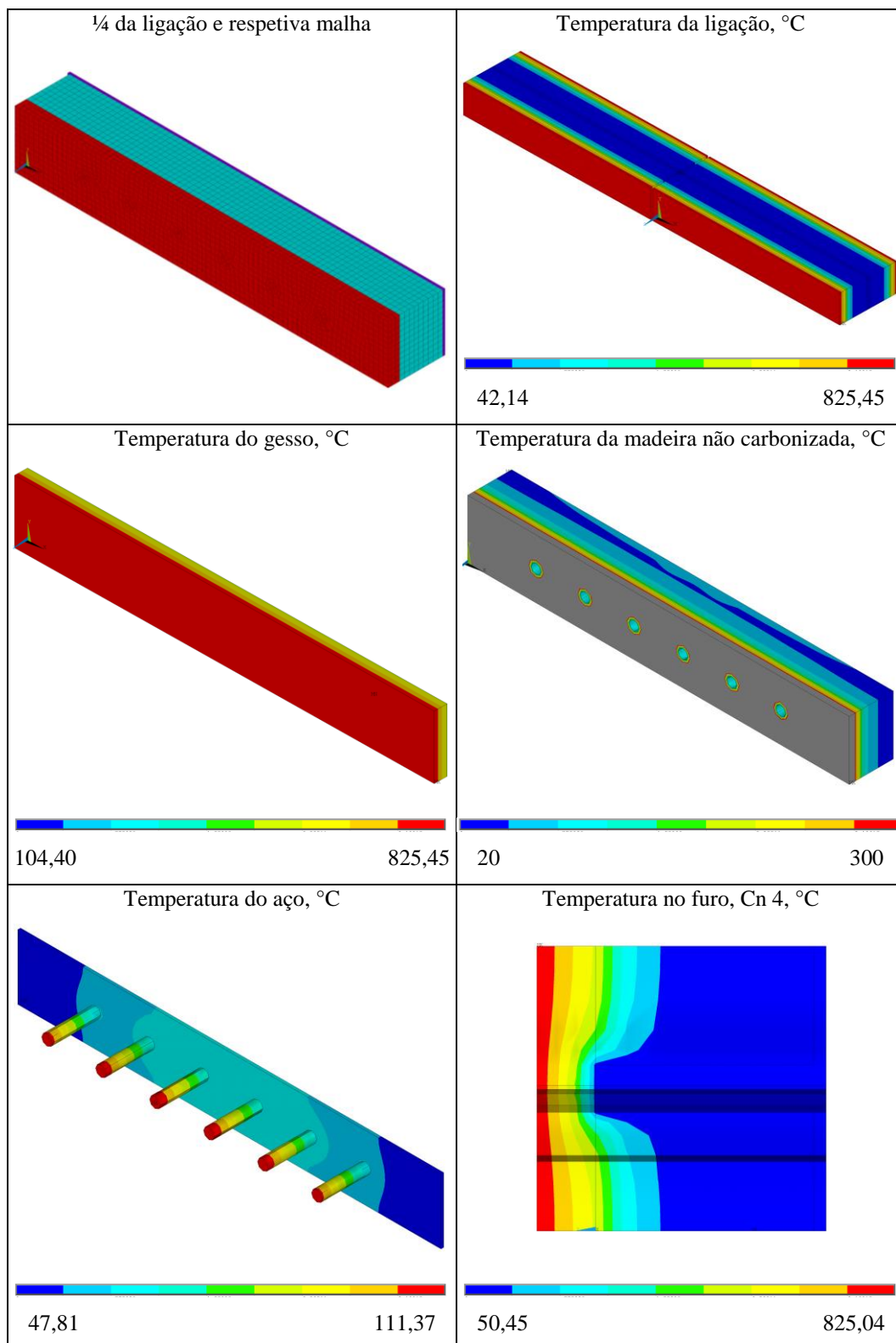
Ligação C



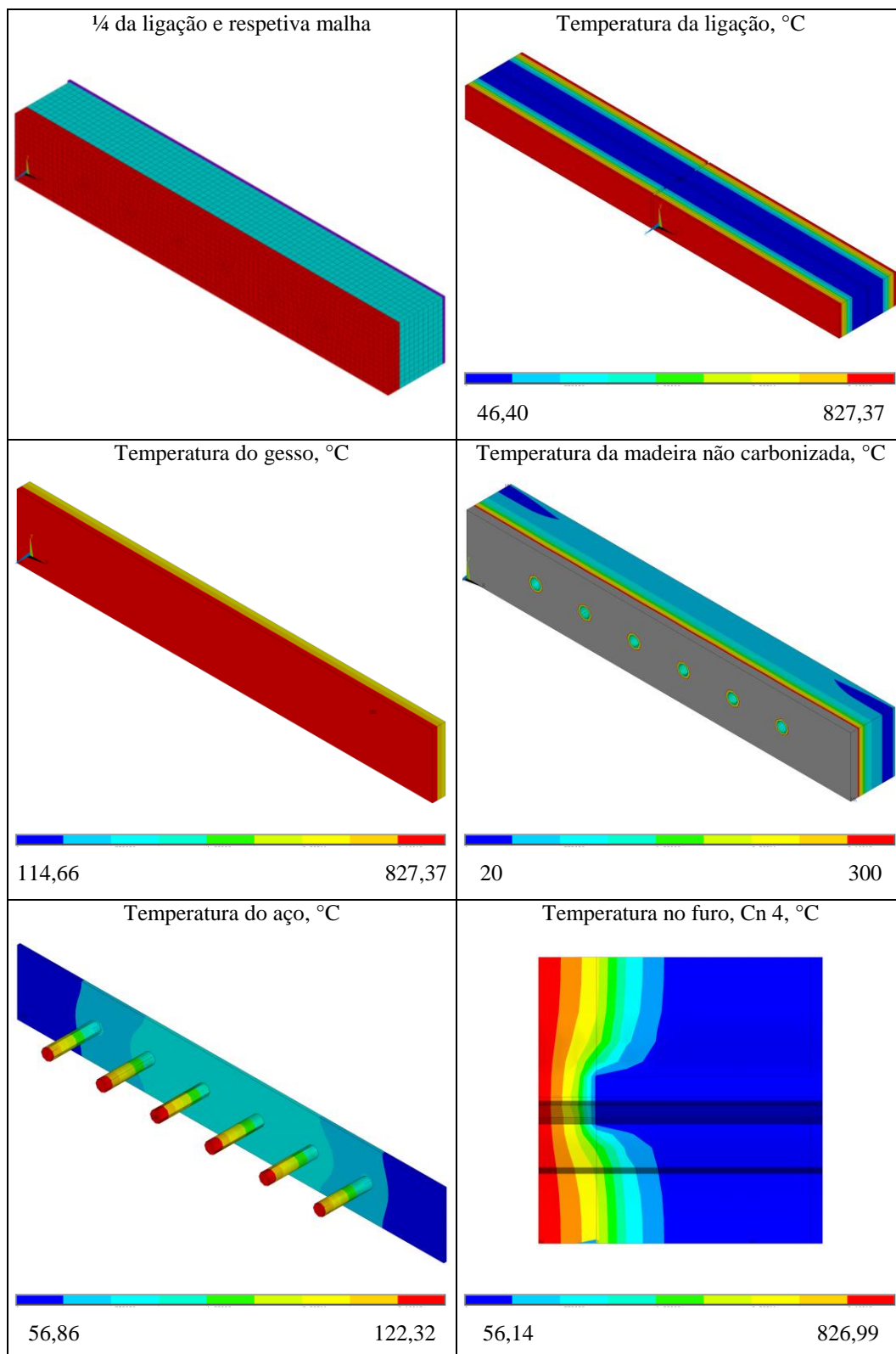
Ligação D



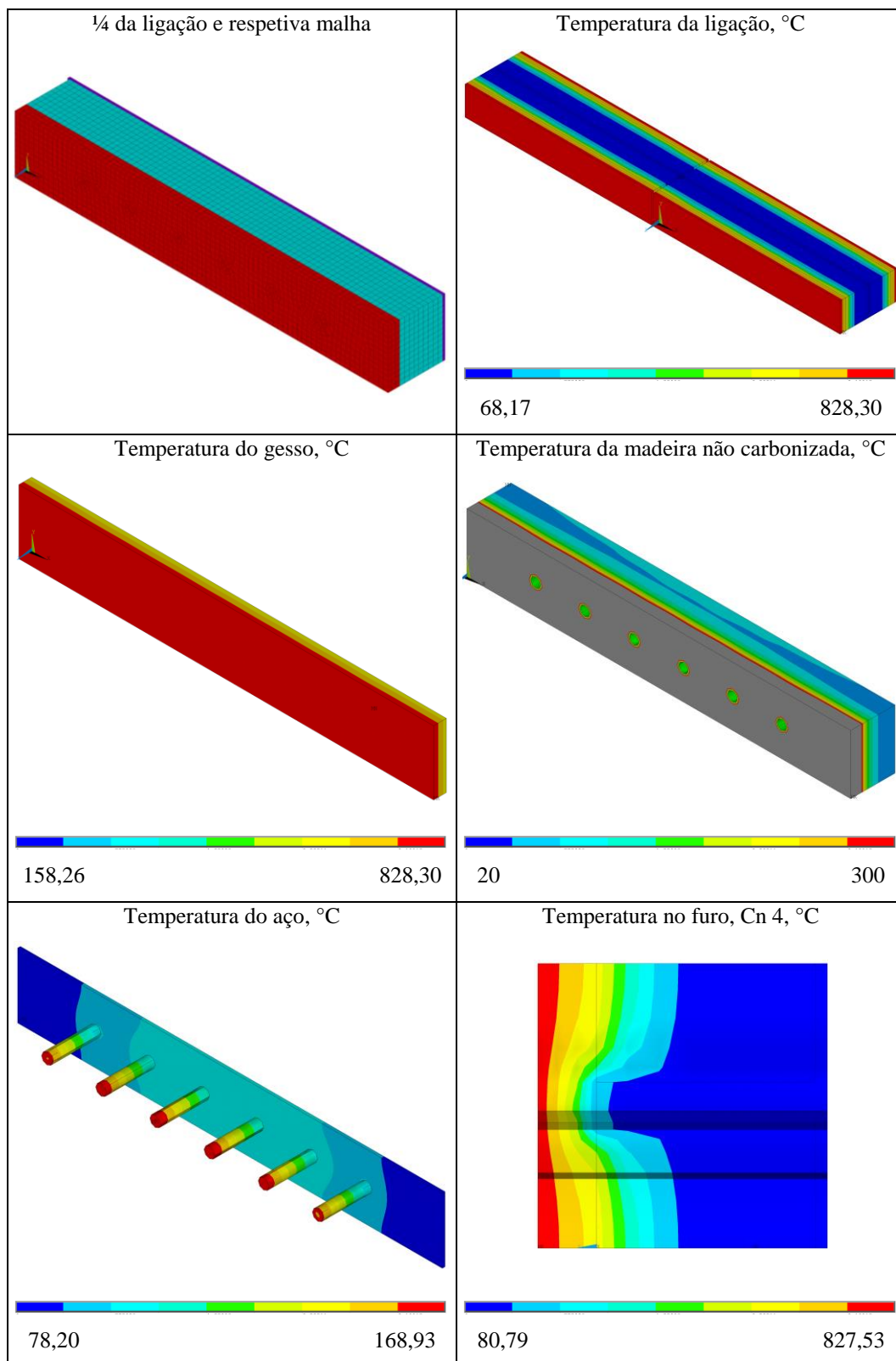
Anexo 18 – Ligação A, a temperatura de fogo, isolamento de gesso (Alves & Batista, 2007) ao fim de 30 minutos



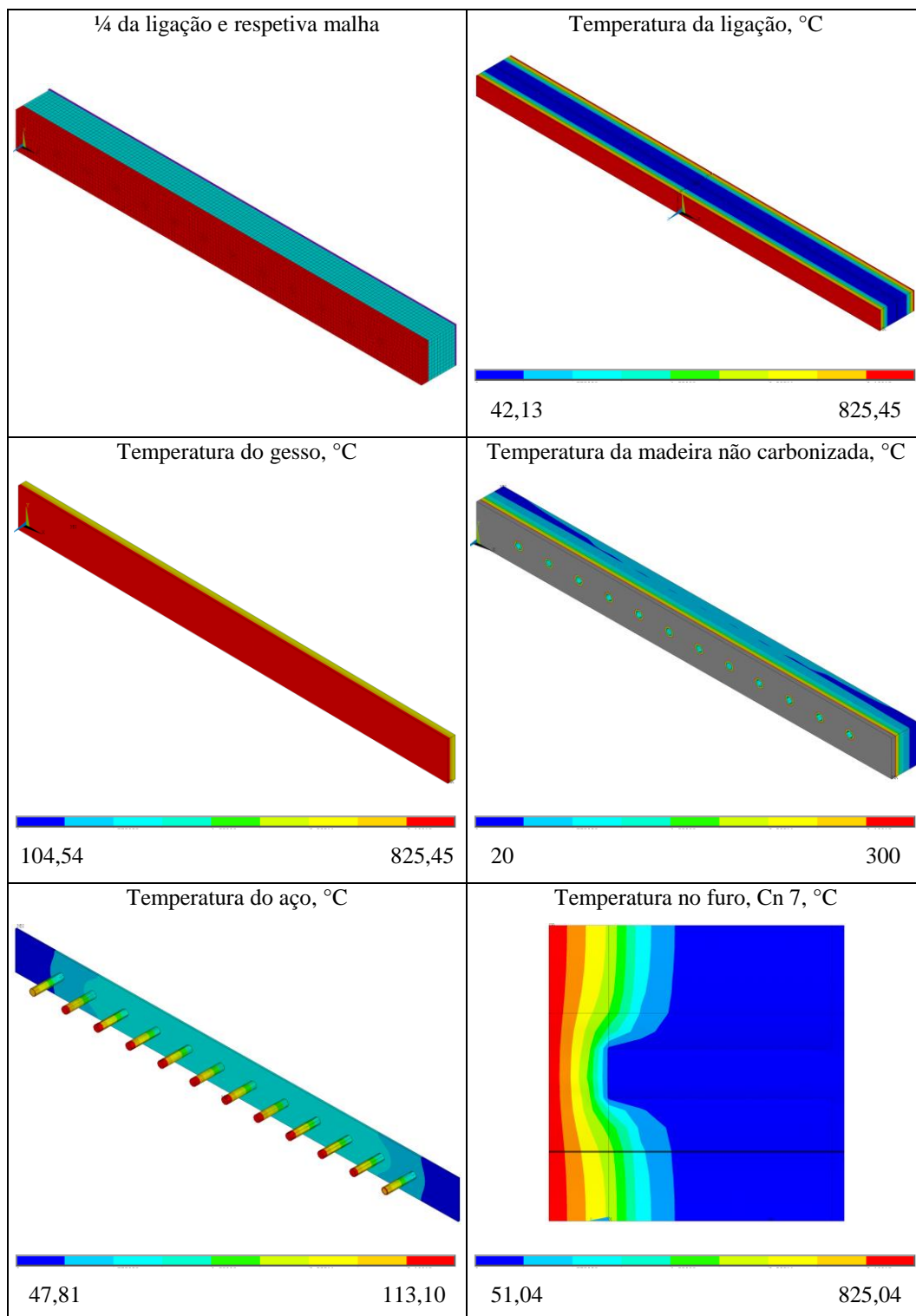
Anexo 19 – Ligação A, a temperatura de fogo, isolamento de gesso (Sultan, 1996) ao fim de 30 minutos



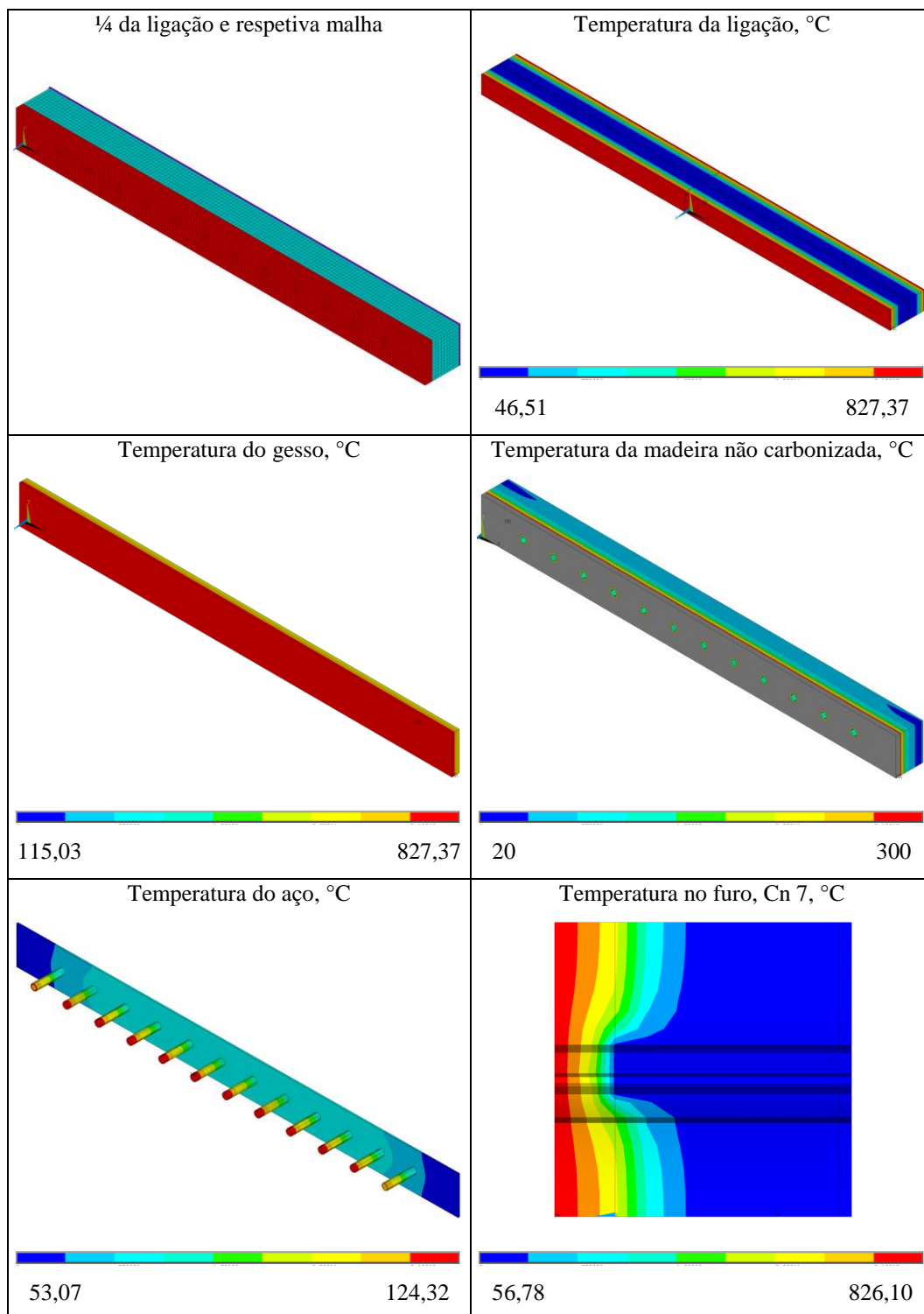
Anexo 20 – Ligação A, a temperatura de fogo, isolamento de gesso (Aissa, 2017) ao fim de 30 minutos



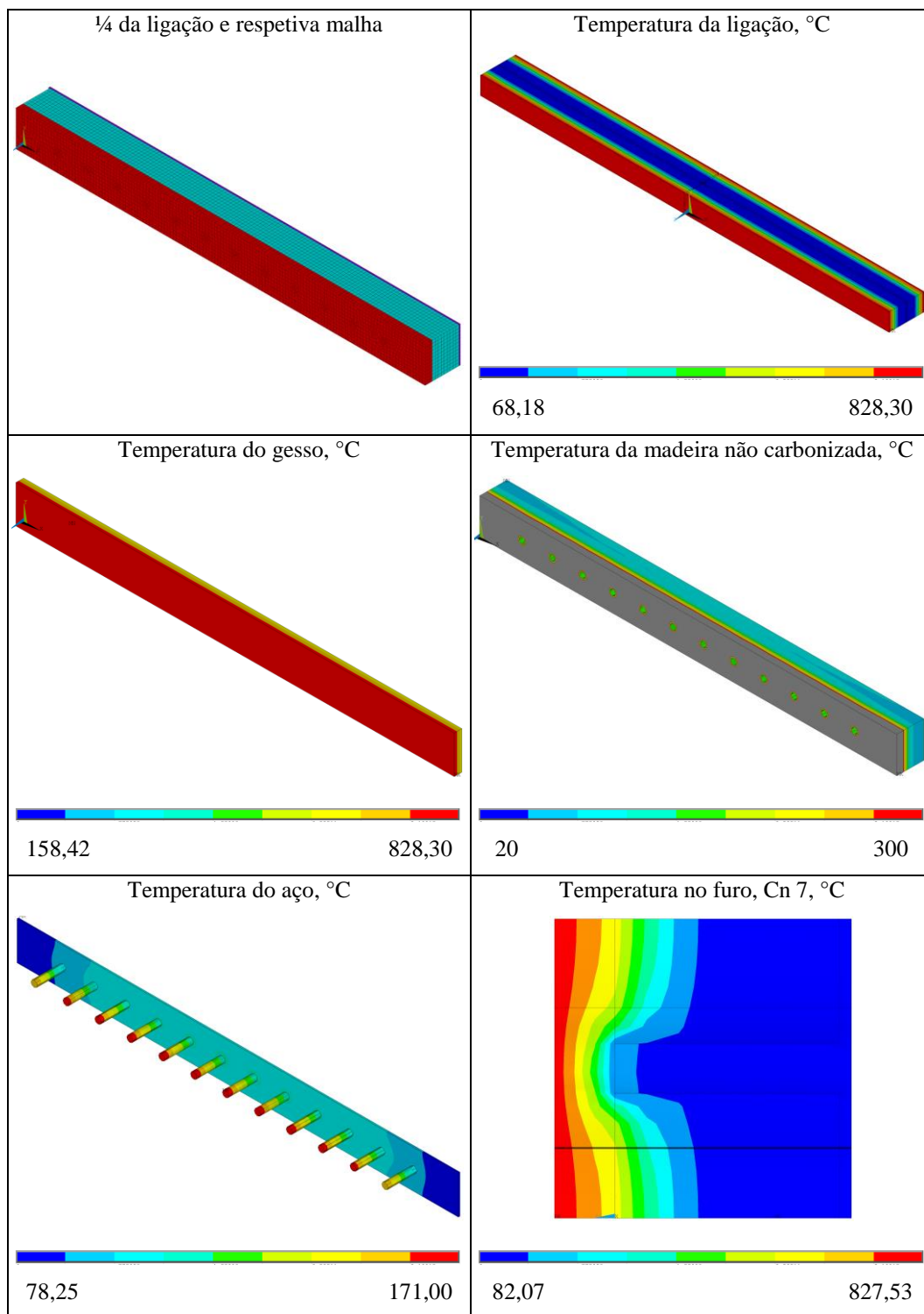
Anexo 21 – Ligação B, a temperatura de fogo, isolamento de gesso (Alves & Batista, 2007) ao fim de 30 minutos



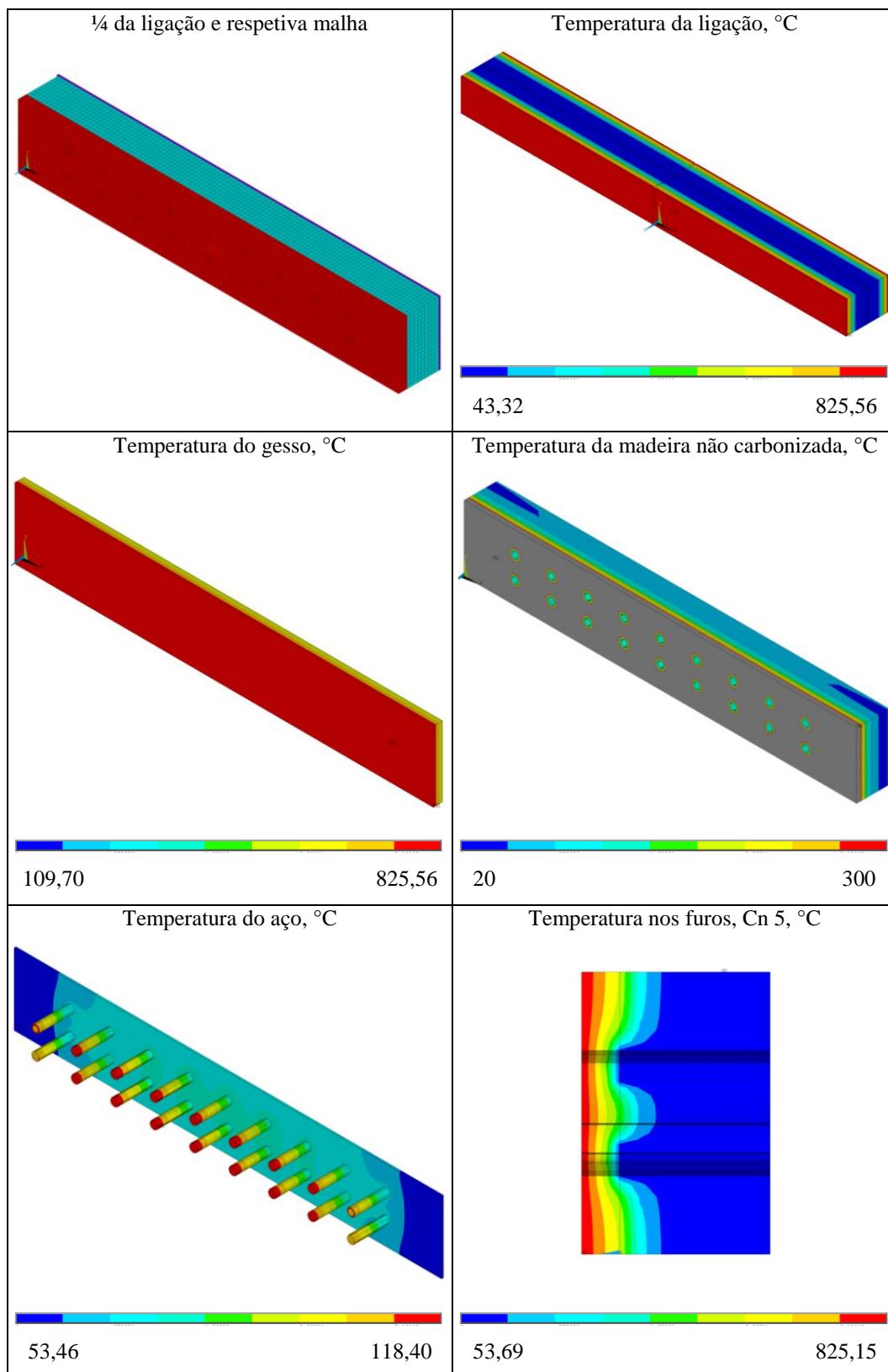
Anexo 22 – Ligação B, a temperatura de fogo, isolamento de gesso (Sultan, 1996) ao fim de 30 minutos



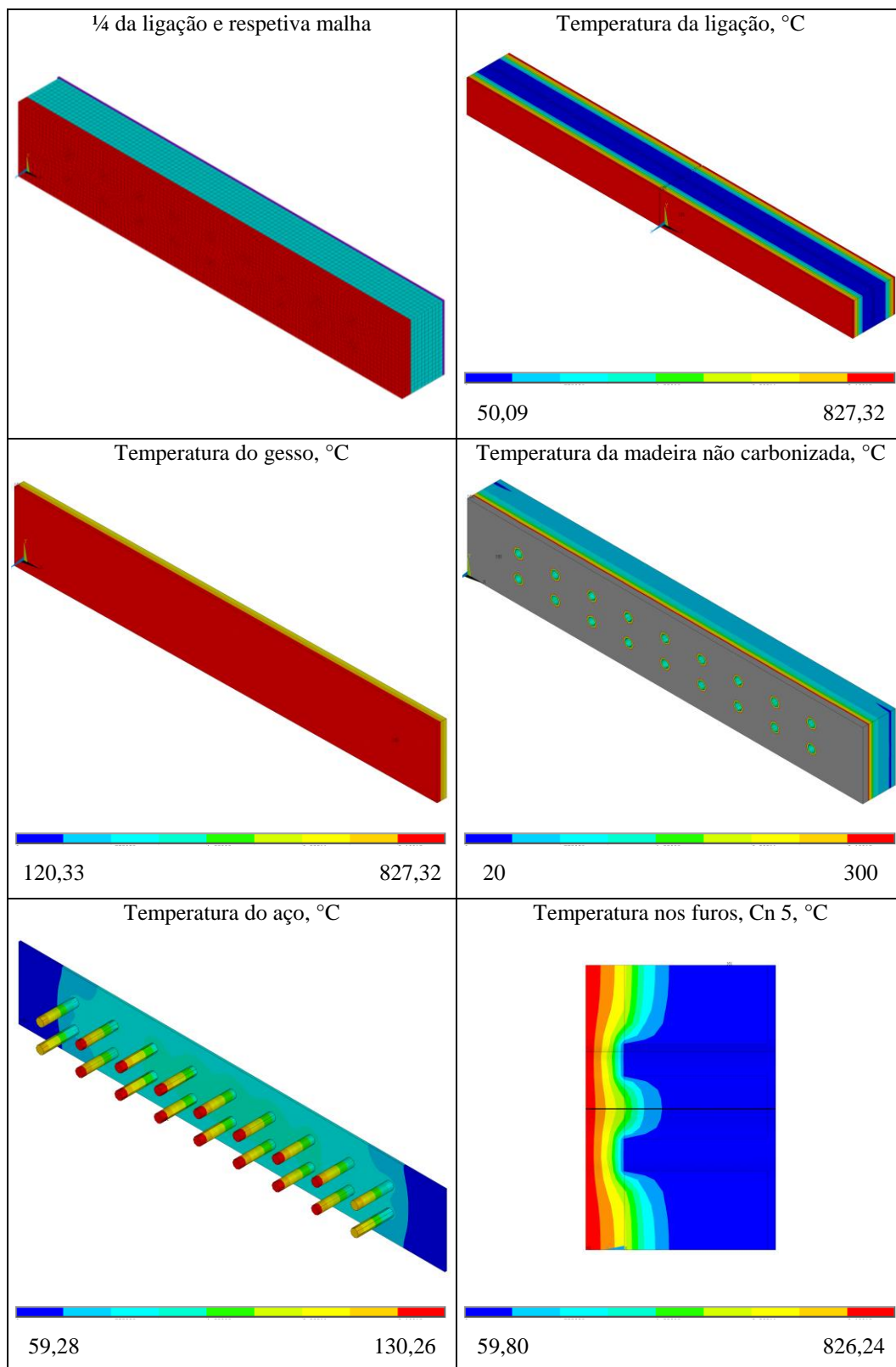
Anexo 23 – Ligação B, a temperatura de fogo, isolamento de gesso (Aissa, 2017) ao fim de 30 minutos



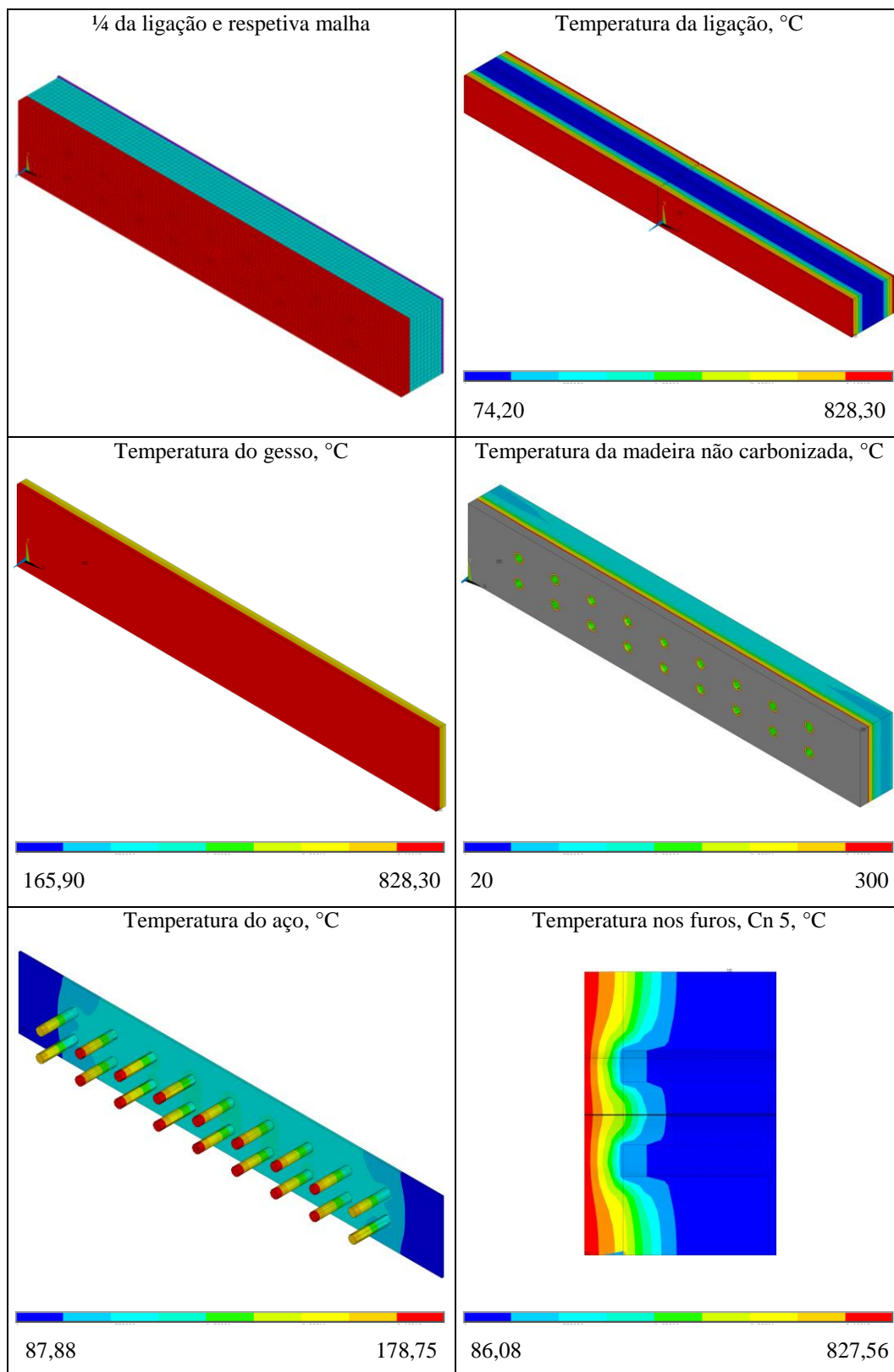
Anexo 24 – Ligação C, a temperatura de fogo, isolamento de gesso (Alves & Batista, 2007) ao fim de 30 minutos



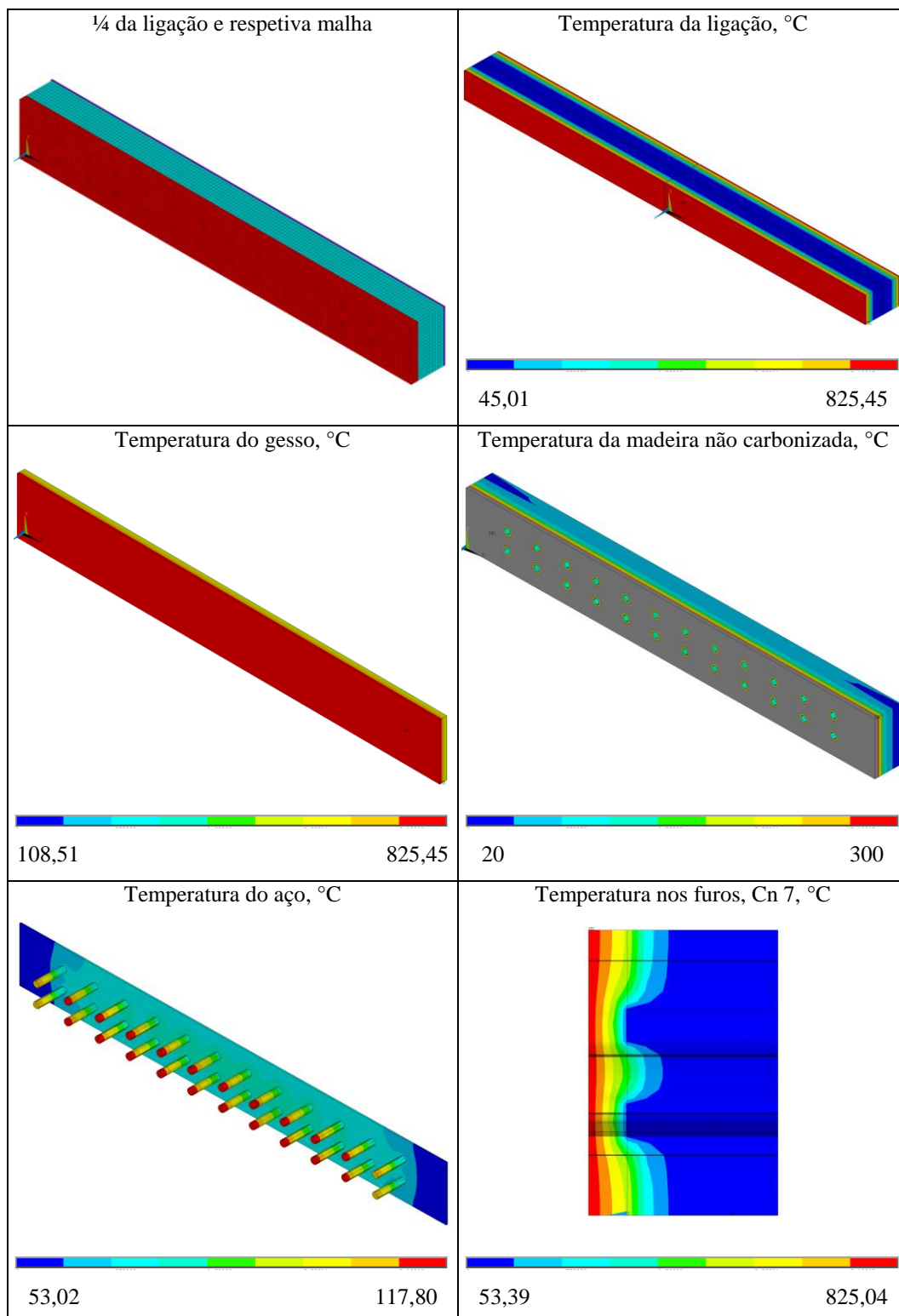
Anexo 25 – Ligação C, a temperatura de fogo, isolamento de gesso (Sultan, 1996) ao fim de 30 minutos



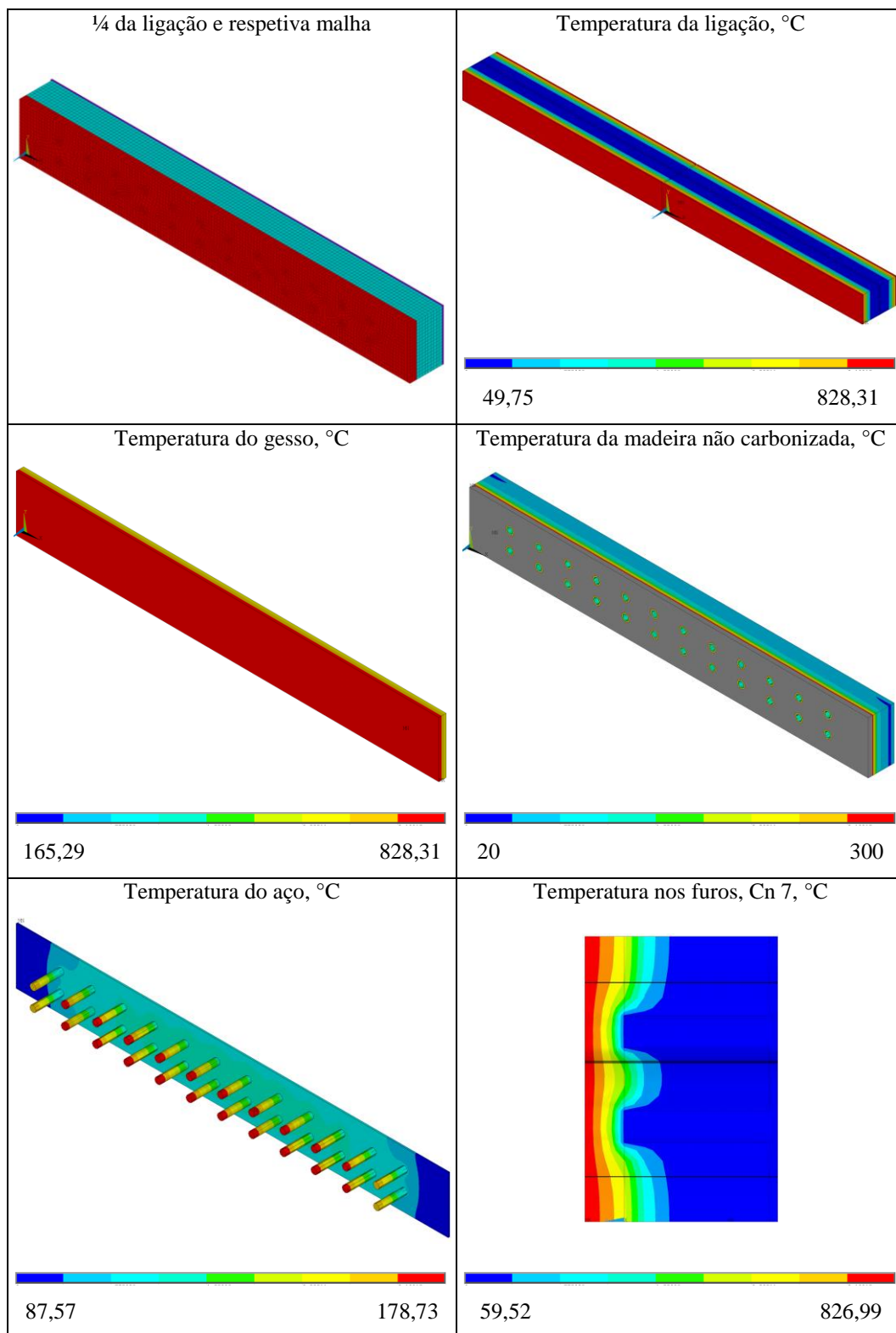
Anexo 26 – Ligação C, a temperatura de fogo, isolamento de gesso (Aissa, 2017) ao fim de 30 minutos



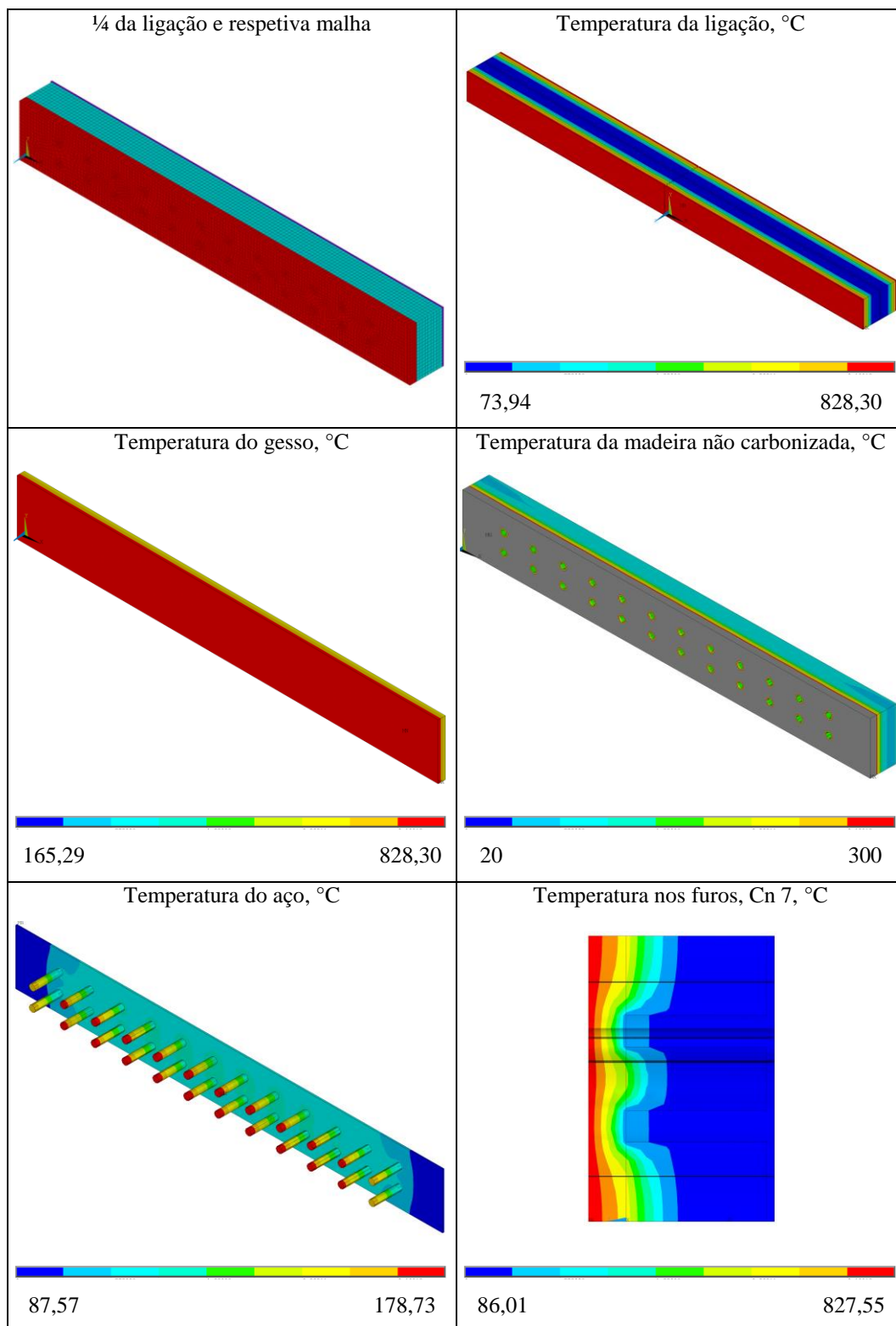
Anexo 27 – Ligação D, a temperatura de fogo, isolamento de gesso (Alves & Batista, 2007) ao fim de 30 minutos



Anexo 28 – Ligação D, a temperatura de fogo, isolamento de gesso (Sultan, 1996) ao fim de 30 minutos



Anexo 29 – Ligação D, a temperatura de fogo, isolamento de gesso (Aissa, 2017) ao fim de 30 minutos



Anexo 30 – Código utilizado para a execução da simulação numérica mecânica para a Ligação A

Seleção do tipo de análise

```
KEYW,PR_SET,1  
KEYW,PR_STRUC,1  
KEYW,PR_THERM,0  
KEYW,PR_FLUID,0  
KEYW,PR_ELMAG,0  
KEYW,MAGNOD,0  
KEYW,MAGEDG,0  
KEYW,MAGHFE,0  
KEYW,MAGELC,0  
KEYW,PR_MULT1,0
```

Introdução do elemento utilizado e dos principais parâmetros

```
ET,1,SOLID185  
KEYOPT,1,2,1  
KEYOPT,1,3,0  
KEYOPT,1,6,0  
KEYOPT,1,8,0  
*SET,ts,5  
*SET,t1,45  
*SET,d,10  
*SET,Cn,6  
*SET,Ln,1  
*SET,a1,50  
*SET,a2,30  
*SET,a3t,70  
*SET,a4c,30  
*SET,h,60  
*SET,L,390  
*SET,tpk,2
```

Introdução das propriedades dos materiais

```
MPTEMP,,,,,,,,  
MPTEMP,1,0  
MPDATA,EX,1,,11000  
MPDATA,EY,1,,550  
MPDATA,EZ,1,,850  
MPDATA,PRXY,1,,0.451  
MPDATA,PRYZ,1,,0.697  
MPDATA,PRXZ,1,,0.426  
MPDATA,GXY,1,,748  
MPDATA,GYZ,1,,187  
MPDATA,GXZ,1,,814  
TB,MISO,1,1,1,0  
TBTEMP,0  
TBPT,,0.00177273,19.5  
MPTEMP,,,,,,,,  
MPTEMP,1,0  
MPDATA,EX,2,,210000  
MPDATA,PRXY,2,,0.3  
TB,MISO,2,1,1,0  
TBTEMP,0  
TBPT,,0.00130952,275
```

Criação da geometria da ligação

```
K,1,0,0,0,  
K,2,L,0,0,  
K,3,0,h,0,
```

K,4,L,h,0,
 LSTR, 1, 2
 LSTR, 2, 4
 LSTR, 4, 3
 LSTR, 3, 1
 FLST,2,4,4
 FITEM,2,1
 FITEM,2,2
 FITEM,2,3
 FITEM,2,4
 AL,P51X
 GPLOT
 FLST,2,1,5,ORDE,1
 FITEM,2,1
 VEXT,P51X, , ,0,0,-t1,,,,,
 FLST,2,1,5,ORDE,1
 FITEM,2,2
 VEXT,P51X, , ,0,0,-ts/2,,,,,
 FLST,2,1,5,ORDE,1
 FITEM,2,11
 VEXT,P51X, , , -tpk,0,0,,,,,
 CYL4,a3t,a4c,d/2
 CYL4,a3t+a1,a4c,d/2
 CYL4,a3t+a1*2,a4c,d/2
 CYL4,a3t+a1*3,a4c,d/2
 CYL4,a3t+a1*4,a4c,d/2
 CYL4,a3t+a1*5,a4c,d/2
 FLST,2,6,5,ORDE,2
 FITEM,2,17
 FITEM,2,-22
 VEXT,P51X, , ,0,0,-t1-ts/2,,,,,
 FLST,2,2,6,ORDE,2
 FITEM,2,1
 FITEM,2,-2
 FLST,3,6,6,ORDE,2
 FITEM,3,4
 FITEM,3,-9
 VSBV,P51X,P51X
 FLST,2,4,4
 FITEM,2,31
 FITEM,2,30
 FITEM,2,29
 FITEM,2,32
 AL,P51X
 FLST,2,4,4
 FITEM,2,35
 FITEM,2,36
 FITEM,2,33
 FITEM,2,34
 AL,P51X
 FLST,2,4,4
 FITEM,2,39
 FITEM,2,40
 FITEM,2,37
 FITEM,2,38
 AL,P51X
 FLST,2,4,4
 FITEM,2,43
 FITEM,2,44
 FITEM,2,41
 FITEM,2,42
 AL,P51X

FLST,2,4,4
 FITEM,2,47
 FITEM,2,48
 FITEM,2,45
 FITEM,2,46
 AL,P51X
 FLST,2,4,4
 FITEM,2,51
 FITEM,2,52
 FITEM,2,49
 FITEM,2,50
 AL,P51X
 FLST,2,6,5,ORDE,5
 FITEM,2,1
 FITEM,2,-2
 FITEM,2,7
 FITEM,2,17
 FITEM,2,-19
 VEXT,P51X, , ,0,0,-t1-ts/2,,,,

Atribuição de cada material aos respetivos volumes

FLST,5,8,6,ORDE,3
 FITEM,5,1
 FITEM,5,-7
 FITEM,5,11
 CM,_Y,VOLU
 VSEL, , , ,P51X
 CM,_Y1,VOLU
 CMSEL,S,_Y
 CMSEL,S,_Y1
 VATT, 2, , 1, 0
 CMSEL,S,_Y
 CMDELE,_Y
 CMDELE,_Y1

Criação dos parâmetros de malha

NUMMRG,ALL, ,0.001, ,LOW
 NUMCMP,ALL
 LESIZE,ALL,5, , , ,1, , ,1,
 FLST,5,9,6,ORDE,2
 FITEM,5,1
 FITEM,5,-9
 CM,_Y,VOLU
 VSEL, , , ,P51X
 CM,_Y1,VOLU
 CHKMSH,'VOLU'
 CMSEL,S,_Y
 VSWEEP,_Y1
 CMDELE,_Y
 CMDELE,_Y1
 CMDELE,_Y2

Criação dos elementos de contacto

FLST,5,9,6,ORDE,2
 FITEM,5,1
 FITEM,5,-9
 CM,_Y,VOLU
 VSEL, , , ,P51X
 CM,_Y1,VOLU
 CHKMSH,'VOLU'
 CMSEL,S,_Y
 VSWEEP,_Y1
 CMDELE,_Y

```

CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
CM,_TARGET,AREA
CM,_CONTACT,AREA
CM,_NODECM,NODE
CM,_ELEMCM,ELEM
CM,_KPCM,KP
CM,_LINECM,LINE
CM,_AREACM,AREA
CM,_VOLUCM,VOLU
MP,MU,1,0.03
MAT,1
MP,EMIS,1,7.88860905221e-031
R,3
REAL,3
ET,2,170
ET,3,174
R,3,,0.1,0.1,0.
RMORE,,1.0E20,0.0,1.0,
RMORE,0.0,0,1.0,,1.0,0.5
RMORE,0,1.0,1.0,0.0,,1.0
RMORE,,,,,1.0
KEYOPT,3,4,0
KEYOPT,3,5,0
KEYOPT,3,7,0
KEYOPT,3,8,0
KEYOPT,3,9,0
KEYOPT,3,10,0
KEYOPT,3,11,0
KEYOPT,3,12,0
KEYOPT,3,14,0
KEYOPT,3,18,0
KEYOPT,3,2,1
KEYOPT,2,5,0
ASEL,S,,,3
ASEL,A,,,4
ASEL,A,,,5
...
ASEL,A,,,99
ASEL,A,,,100
CM,_TARGET,AREA
TYPE,2
NSLA,S,1
ESLN,S,0
ESLL,U
ESEL,U,ENAME,,188,189
NSLE,A,CT2
ESURF
CMSEL,S,_ELEMCM
ASEL,S,,,1
ASEL,A,,,2
...
ASEL,A,,,48
ASEL,A,,,49
CM,_CONTACT,AREA
TYPE,3
NSLA,S,1
ESLN,S,0
NSLE,A,CT2 ! CZMESH patch (fsk qt-40109 8/2008)
ESURF
ALLSEL
ESEL,ALL

```

```

ESEL,S,TYPE,,2
ESEL,A,TYPE,,3
ESEL,R,REAL,,3
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,2
ESEL,A,TYPE,,3
ESEL,R,REAL,,3
CMSEL,A,_NODECM
CMDEL,_NODECM
CMSEL,A,_ELEMCM
CMDEL,_ELEMCM
CMSEL,S,_KPCM
CMDEL,_KPCM
CMSEL,S,_LINECM
CMDEL,_LINECM
CMSEL,S,_AREACM
CMDEL,_AREACM
CMSEL,S,_VOLUCM
CMDEL,_VOLUCM
CMDEL,_TARGET
CMDEL,_CONTACT
FLST,2,172,4,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,-172

```

Introdução das condições fronteira e zonas de simetria

```

DA,P51X, ,UY,0
DA, 100,SYMM
DA, 12,SYMM
DA, 15,SYMM

```

Introdução da carga incremental

```

*DIM,Carga,TABLE,2,1,1, , ,
*SET,CARGA(0,1,1) , 7.8886090522101e-031
*SET,CARGA(1,0,1) , 0
*SET,CARGA(2,0,1) , 200
*SET,CARGA(2,1,1) , -37.037037037037
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,4
/GO
SFA,P51X,1,PRES, %CARGA%

```

Método de solução, com a indicação do método de convergência, time steps, numero de iterações e “tempo” limite de simulação

```

/SOL
ANTYPE,4
TRNOPT,FULL
LUMPM,0
CNVTOL,F, .0001,1, ,
DELTIM,10,1,10
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,ALL
NCNV,2,0,0,0,0
NEQIT,6
TIME,200

```

Anexo 31 – Código utilizado para a execução da simulação numérica térmica protegida para a Ligação A

- Para a realização das simulações não protegidas, basta retirar a superfície do gesso.
- O código apresentado de seguida é para o gesso fornecido pelo autor (Alves & Batista, 2007). Para introduzir os outros tipos de gesso, será necessário alterar as propriedades do material.

Seleção do tipo de análise

```
KEYW,PR_SET,1  
KEYW,PR_STRUC,1  
KEYW,PR_THERM,0  
KEYW,PR_FLUID,0  
KEYW,PR_ELMAG,0  
KEYW,MAGNOD,0  
KEYW,MAGEDG,0  
KEYW,MAGHFE,0  
KEYW,MAGELC,0  
KEYW,PR_MULT1,0
```

Introdução do elemento utilizado e dos principais parâmetros

```
ET,1,SOLID278  
*SET,ts,5  
*SET,t1,45  
*SET,ti,12.1  
*SET,d,10  
*SET,a1,50  
*SET,a2,30  
*SET,a3t,70  
*SET,a4c,30  
*SET,h,60  
*SET,l,390  
*SET,cn,1  
*SET,ln,6
```

Introdução das propriedades dos materiais

```
MPTEMP,,,,,,,,  
MPTEMP,1,20  
MPTEMP,2,200  
MPTEMP,3,350  
MPTEMP,4,500  
MPTEMP,5,800  
MPTEMP,6,1200  
MPDATA,KXX,1,,0.12e-3  
MPDATA,KXX,1,,0.15e-3  
MPDATA,KXX,1,,0.07e-3  
MPDATA,KXX,1,,0.09e-3  
MPDATA,KXX,1,,0.35e-3  
MPDATA,KXX,1,,1.5e-3  
MPTEMP,,,,,,,,  
MPTEMP,1,20  
MPTEMP,2,99  
MPTEMP,3,110  
MPTEMP,4,120  
MPTEMP,5,130  
MPTEMP,6,200  
MPTEMP,7,250  
MPTEMP,8,300  
MPTEMP,9,350  
MPTEMP,10,400
```

MPTEMP,11,600
MPTEMP,12,800
MPTEMP,13,1200
MPDATA,C,1,,1.53e3
MPDATA,C,1,,1.77e3
MPDATA,C,1,,13.6e3
MPDATA,C,1,,13.5e3
MPDATA,C,1,,2.12e3
MPDATA,C,1,,2e3
MPDATA,C,1,,1.62e3
MPDATA,C,1,,.71e3
MPDATA,C,1,,.85e3
MPDATA,C,1,,1e3
MPDATA,C,1,,1.4e3
MPDATA,C,1,,1.65e3
MPDATA,C,1,,1.65e3
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,20
MPTEMP,2,99
MPTEMP,3,120
MPTEMP,4,200
MPTEMP,5,250
MPTEMP,6,300
MPTEMP,7,350
MPTEMP,8,400
MPTEMP,9,600
MPTEMP,10,800
MPTEMP,11,1200
MPDATA,DENS,1,,459.2e-9
MPDATA,DENS,1,,459.2e-9
MPDATA,DENS,1,,.410e-9
MPDATA,DENS,1,,.410e-9
MPDATA,DENS,1,,.381.3e-9
MPDATA,DENS,1,,.311.6e-9
MPDATA,DENS,1,,.213.2e-9
MPDATA,DENS,1,,.155.8e-9
MPDATA,DENS,1,,.114.8e-9
MPDATA,DENS,1,,.106.6e-9
MPDATA,DENS,1,,1e-9
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EMIS,1,,.08
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EMIS,2,,.07
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,20
MPTEMP,2,799
MPTEMP,3,1200
MPDATA,KXX,2,,.53.33e-3
MPDATA,KXX,2,,.27.3933e-3
MPDATA,KXX,2,,.27.3e-3
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,DENS,2,,.7.85e-6
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,20
MPTEMP,2,50
MPTEMP,3,100
MPTEMP,4,150
MPTEMP,5,200
MPTEMP,6,250

MPTEMP,7,300
MPTEMP,8,350
MPTEMP,9,400
MPTEMP,10,450
MPTEMP,11,500
MPTEMP,12,550
MPTEMP,13,600
MPTEMP,14,650
MPTEMP,15,700
MPTEMP,16,730
MPTEMP,17,735
MPTEMP,18,750
MPTEMP,19,785
MPTEMP,20,800
MPTEMP,21,825
MPTEMP,22,850
MPTEMP,23,890
MPTEMP,24,1200
MPDATA,C,2,,439.802
MPDATA,C,2,,459.70
MPDATA,C,2,,487.62
MPDATA,C,2,,510.42
MPDATA,C,2,,529.76
MPDATA,C,2,,547.31
MPDATA,C,2,,564.74
MPDATA,C,2,,583.71
MPDATA,C,2,,605.88
MPDATA,C,2,,632.92
MPDATA,C,2,,666.5
MPDATA,C,2,,708.28
MPDATA,C,2,,760.22
MPDATA,C,2,,813.75
MPDATA,C,2,,1008.16
MPDATA,C,2,,2291.25
MPDATA,C,2,,5000
MPDATA,C,2,,1482.89
MPDATA,C,2,,875
MPDATA,C,2,,803.26
MPDATA,C,2,,734.57
MPDATA,C,2,,694.75
MPDATA,C,2,,657.08
MPDATA,C,2,,650
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,20
MPTEMP,2,150
MPTEMP,3,155
MPTEMP,4,1200
MPDE,KXX,1
MPDATA,KXX,1,,0.2e-3
MPDATA,KXX,1,,0.218e-3
MPDATA,KXX,1,,0.103e-3
MPDATA,KXX,1,,0.3195e-3
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,10
MPTEMP,2,95
MPTEMP,3,125
MPTEMP,4,155
MPTEMP,5,900
MPTEMP,6,1200
MPDATA,C,3,,925.04
MPDATA,C,3,,941.5
MPDATA,C,3,,24572.32

MPDATA,C,3,,953.14
 MPDATA,C,3,,1097.5
 MPDATA,C,3,,1097.5
 MPTEMP,,,,,,,,
 MPTEMP,1,0
 MPDATA,EMIS,3,,0.8
 MPTEMP,,,,,,,,
 MPTEMP,1,0
 MPDATA,DENS,3,,727e-9
 MPTEMP,,,,,,,,
 MPTEMP,1,20
 MPTEMP,2,200
 MPTEMP,3,350
 MPTEMP,4,500
 MPTEMP,5,800
 MPTEMP,6,1200
 MPDE,KXX,1
 MPDATA,KXX,1,,0.12e-3
 MPDATA,KXX,1,,0.15e-3
 MPDATA,KXX,1,,0.07e-3
 MPDATA,KXX,1,,0.09e-3
 MPDATA,KXX,1,,0.35e-3
 MPDATA,KXX,1,,1.5e-3
 MPTEMP,,,,,,,,
 MPTEMP,1,10
 MPTEMP,2,150
 MPTEMP,3,155
 MPTEMP,4,1200
 MPDATA,KXX,3,,0.2e-3
 MPDATA,KXX,3,,0.218e-3
 MPDATA,KXX,3,,0.103e-3
 MPDATA,KXX,3,,0.3195e-3

Criação da geometria da ligação

K,1,,,
 K,2,1,,
 K,3,,h,,
 K,4,1,h,,
 LSTR, 1, 2
 LSTR, 2, 4
 LSTR, 4, 3
 LSTR, 3, 1
 FLST,2,4,4
 FITEM,2,1
 FITEM,2,2
 FITEM,2,3
 FITEM,2,4
 AL,P51X
 GPLOT
 FLST,2,1,5,ORDE,1
 FITEM,2,1
 VEXT,P51X, , ,0,0,-t1,,,,
 CYL4,a3t,a4c,d/2
 CYL4,a3t+a1,a4c,d/2
 CYL4,a3t+2*a1,a4c,d/2
 CYL4,a3t+3*a1,a4c,d/2
 CYL4,a3t+4*a1,a4c,d/2
 CYL4,a3t+5*a1,a4c,d/2
 FLST,2,6,5,ORDE,2
 FITEM,2,7
 FITEM,2,-12
 VEXT,P51X, , ,0,0,-t1,,,,
 FLST,3,6,6,ORDE,2

FITEM,3,2
FITEM,3,-7
VSBV, ,1,P51X
FLST,2,4,4
FITEM,2,15
FITEM,2,16
FITEM,2,13
FITEM,2,14
AL,P51X
FLST,2,4,4
FITEM,2,19
FITEM,2,20
FITEM,2,17
FITEM,2,18
AL,P51X
FLST,2,4,4
FITEM,2,23
FITEM,2,24
FITEM,2,22
FITEM,2,21
AL,P51X
FLST,2,4,4
FITEM,2,28
FITEM,2,27
FITEM,2,26
FITEM,2,25
AL,P51X
FLST,2,4,4
FITEM,2,31
FITEM,2,32
FITEM,2,29
FITEM,2,30
AL,P51X
FLST,2,4,4
FITEM,2,35
FITEM,2,36
FITEM,2,33
FITEM,2,34
AL,P51X
FLST,2,6,5,ORDE,4
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,7
FITEM,2,-10
VEXT,P51X, , ,0,0,-t1,,,,
FLST,2,7,5,ORDE,7
FITEM,2,11
FITEM,2,28
FITEM,2,44
FITEM,2,47
FITEM,2,52
FITEM,2,57
FITEM,2,62
VEXT,P51X, , ,0,0,-ts/2,,,,
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,81
VEXT,P51X, , , -2,0,0,,,,
FLST,2,7,5,ORDE,5
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,7
FITEM,2,-10

FITEM,2,43
VEXT,P51X, , ,0,0,12.1,,,

Atribuição de cada material aos respectivos volumes

FLST,5,7,6,ORDE,2
FITEM,5,16
FITEM,5,-22
CM,_Y,VOLU
VSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,VOLU
CMSEL,S,_Y
CMSEL,S,_Y1
VATT, 3, , 1, 0
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
FLST,5,14,6,ORDE,4
FITEM,5,1
FITEM,5,-7
FITEM,5,9
FITEM,5,-15
CM,_Y,VOLU
VSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,VOLU
CMSEL,S,_Y
CMSEL,S,_Y1
VATT, 2, , 1, 0
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1

Criação dos parâmetros de malha

NUMMRG,ALL, ,0.0001, ,LOW
NUMCMP,ALL
LESIZE,ALL,5, , ,1, ,1,
FLST,5,24,4,ORDE,12
FITEM,5,41
FITEM,5,-44
FITEM,5,49
FITEM,5,-52
FITEM,5,57
FITEM,5,-60
FITEM,5,65
FITEM,5,-68
FITEM,5,73
FITEM,5,-76
FITEM,5,81
FITEM,5,-84
CM,_Y,LINE
LSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
LESIZE,_Y1, , ,7, , , ,1
NUMMRG,ALL, ,0.0001, ,LOW
NUMCMP,ALL
FLST,5,22,6,ORDE,2
FITEM,5,1
FITEM,5,-22
CM,_Y,VOLU
VSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y

VSWEEP,_Y1
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2

Introdução de um nó exterior à ligação

N,150000,l/2,h/2,t1,,,

Introdução da curva standard de fogo ISO834

*DIM,ISO834,TABLE,181,1,1,,

*SET,ISO834(1,0,1),0

*SET,ISO834(1,1,1),20

...

*SET,ISO834(180,0,1),10740

*SET,ISO834(180,1,1),1108.9

*SET,ISO834(181,0,1),10800

*SET,ISO834(181,1,1),1109.7

Introdução de algumas opções térmicas

STEF,0.567E-13

TOFFST,273.15

RADOPT,0.10000000149,0.999999974738E-04,0,1000,0.10000000149,0.10000000149,, , ,0

SPCNOD,1,150000

Introdução da temperatura inicial

FLST,2,13359,1,ORDE,3

FITEM,2,1

FITEM,2,-13358

FITEM,2,150000

IC,P51X,TEMP,20,

Aplicação, no nó exterior à ligação, a curva de fogo ISO834

FLST,2,1,1,ORDE,1

FITEM,2,150000

/GO

D,P51X, , %ISO834% , , ,TEMP, , , ,

Introdução da convecção e radiação na superfície exposta

FLST,2,7,5,ORDE,7

FITEM,2,83

FITEM,2,88

FITEM,2,93

FITEM,2,98

FITEM,2,103

FITEM,2,108

FITEM,2,113

/GO

SFA,P51X,1,CONV,25e-6, %ISO834%

FLST,2,7,5,ORDE,7

FITEM,2,83

FITEM,2,88

FITEM,2,93

FITEM,2,98

FITEM,2,103

FITEM,2,108

FITEM,2,113

SFA,P51X, ,RDSF,1,1,

Método de solução, com a indicação do método de convergência, time steps, numero de iterações e "tempo" limite de simulação

/SOL

ANTYPE,4

TRNOPT,FULL

LUMPM,1

CNVTOL,HEAT, ,0.9,2, ,
DELTIM,10,0.5,10
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,ALL
AUTOTS,1
NCNV,2,0,0,0,0
TIME,1800