

## **MODELOS 3D DE LIGAÇÕES AÇO-MADEIRA COM CAVILHAS EM CORTE SIMPLES SUBMETIDAS AO FOGO**

*Fernando M. G. Machado*<sup>1</sup>

*Elza M.M. Fonseca*<sup>2</sup>

<https://orcid.org/0000-0003-1854-6514>

### **RESUMO**

A utilização da madeira como material de construção em estruturas e edifícios representa, nos dias de hoje, um aumento significativo. Esse crescente aumento deve-se, entre outros aspetos, à preocupação ambiental (alterações climáticas) e ao facto deste material apresentar um comportamento seguro e previsível aquando da ocorrência de um incêndio. O presente trabalho tem como objetivo avaliar ligações tridimensionais (3D) de madeira-aço, em corte simples, submetidas ao fogo, utilizando o método de elementos finitos. As ligações foram estudadas atendendo a três tipos de madeira com massa volúmica distinta. Através das simulações efetuadas, foi possível determinar o campo de temperaturas em regime transiente. A presença dos elementos externos ou internos em aço, em situação de incêndio, conduz ainda a uma distribuição não uniforme da temperatura e posterior carbonização desenvolvida nos elementos em madeira. Com base nos resultados, observa-se que a velocidade de carbonização na madeira não permanece constante e aumenta com o tempo de exposição ao fogo.

**Palavras-Chave:** Ligação madeira-aço; Fogo; Carbonização; Temperaturas.

---

<sup>1</sup> Mestrando em Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Instituto Politécnico do Porto. Porto. PORTUGAL.

<sup>2</sup> Professor, Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Instituto Politécnico do Porto. Porto. PORTUGAL.

## **3D MODELS OF STEEL-WOOD CONNECTIONS WITH DOWELS IN SINGLE SHEAR SUBJECTED TO FIRE**

### **ABSTRACT**

The use of wood as a construction material in structures and buildings represents, nowadays, a significant increase. This growing increase is due, among other things, to environmental concerns (climate changes) and the fact that this material has a safe and predictable behavior when a fire occurs. This work aims to evaluate tridimensional (3D) wood-steel connections, in simple shear, subjected to fire, using the finite element method. The connections were studied considering three types of wood with different density. Through the simulations carried out, it was possible to determine the temperature field in a transient regime. The presence of external or internal steel elements, in a fire situation, also leads to a non-uniform distribution of temperature and subsequent char layer developed in the wooden elements. Based on the results, it is observed that the charring rate in wood does not remain constant and increases with the time of exposure to fire.

**KEYWORDS:** Wood-Steel connection; Fire; Charring rate; Temperatures

**Artigo Recebido em 05/06/2023**  
**Aceito em 29/09/2023**  
**Publicado em 10/10/2023**

## 1. INTRODUÇÃO

As ligações em madeira são referenciadas em pesquisas de diferentes países. Modelos analíticos e experimentais são desenvolvidos com vista a resolverem questões sobre este tipo de elementos. As ligações são a parte mais importante da estrutura em madeira, devido à sua capacidade de unir diferentes elementos, transmitindo cargas. Por esse motivo, o dimensionamento das ligações, com especial importância no projeto de estruturas em madeira à temperatura ambiente e sob a ação do fogo, é extremamente importante (MACHADO, FONSECA 2023).

(M. AUDEBERT et al., 2011) referiram que nas estruturas constituídas maioritariamente por madeira, as ligações entre os diferentes elementos são as zonas mais frágeis ao nível da resistência da estrutura. Em situações de incêndio e em condições normais, as ligações garantem a capacidade de carga e o comportamento mecânico da estrutura. Devido à sua complexa geometria e variedade de materiais, o comportamento das ligações é difícil de prever (M. AUDEBERT et al., 2011).

(ANDREA FRANGI et al., 2010) realizaram ensaios experimentais de ligações em aço e madeira sob a ação do fogo. Numa primeira fase, verificaram a resistência das ligações dimensionadas à temperatura ambiente, concluindo que as ligações com chapas de aço no seu interior resistiam ao fogo cerca de 30min e com proteção de madeira ou gesso, a resistência ao fogo aumentava para 60min. Relativamente ao dimensionamento para elevadas temperaturas, as ligações com chapas externas em aço resistiram ao fogo 12 min e com a proteção da chapa externa com tinta intumescente 30 min (ANDREA FRANGI et al., 2010), (ERCHINGER et al., 2010).

(LEI PENG et al., 2011) analisaram alguns modelos de cálculo, baseados em dados relativos à resistência ao fogo de ligações em duplo corte. Foram criadas correlações que permitiram verificar a resistência ao fogo de

ligações não protegidas utilizando parafusos ou cavilhas. Concluíram que a escolha de cavilhas em detrimento do uso de parafusos traduz numa maior resistência ao fogo (LEI PENG et al., 2011).

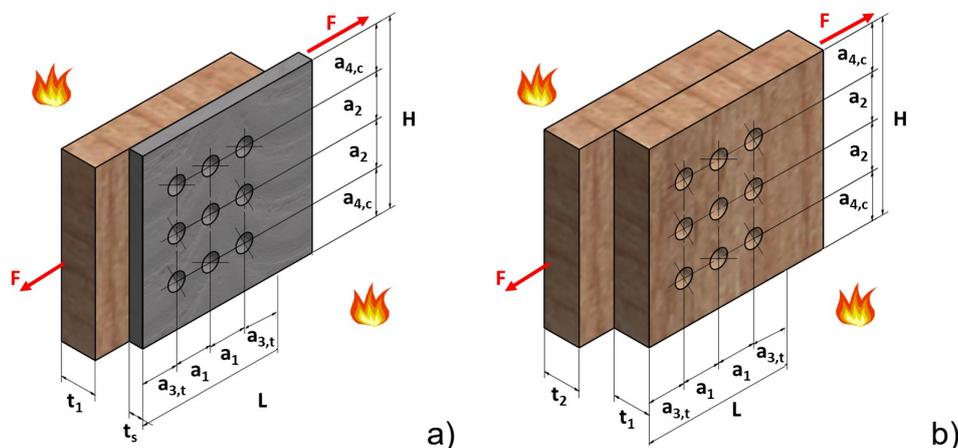
Na literatura há ainda poucos resultados, experimentais ou numéricos, que permitam a avaliação da resistência de ligações em madeira sob a ação do fogo. Relativamente aos resultados numéricos a maior lacuna encontra-se na análise térmica em modelos construídos a três dimensões.

O presente trabalho tem como objetivo avaliar o campo de temperaturas obtido em ligações 3D de madeira-aço em corte simples ao fogo, utilizando métodos numéricos. Inicialmente são estudadas as ligações projetadas à temperatura ambiente, de acordo com o Eurocódigo 5 parte 1-1 (CEN, 2004) para obtenção do seu dimensionamento. Posteriormente, e com base nos elementos finitos, as mesmas ligações são submetidas ao fogo. Com os resultados obtidos é possível prever a variação de temperaturas e calcular a camada de madeira carbonizada produzida pela determinação da adiabática de 300°C (CEN, 2004).

## **2. METODOLOGIA**

Os modelos geométricos 3D das ligações aço-madeira e madeira-madeira são projetados de acordo com o Eurocódigo 5 parte 1-1 (CEN, 2004), conforme se representa na Figura 1. As dimensões da ligação são o comprimento (L), a altura (H), a profundidade ( $W=t_1+t_2$  ou  $W=t_s+t_1$ ) e o posicionamento das cavilhas ( $a_1, a_2, a_3, e a_4,t$ ), (MACHADO, FONSECA 2023).

**Figura 1:** Modelos de ligação: a) madeira-aço, b) madeira-madeira.



Após o dimensionamento das ligações, é desenvolvido um modelo de análise térmico em regime transiente no programa ANSYS®. São consideradas as propriedades não lineares dos materiais envolvidos. Para satisfazer a imposição das condições de fronteira térmicas em presença da ação de incêndio (convecção e radiação), é utilizado um procedimento incremental no tempo e iterativo. As propriedades da madeira e do aço, consideradas para a análise térmica, são a condutividade, o calor específico e a emissividade, estabelecidas de acordo com os Eurocódigos (CEN, 2004), (CEN-2005). Os membros em madeira foram considerados em madeira lamelada colada GL24h, GL28h e GL32h (MACHADO, FONSECA 2023).

### 3. DIMENSIONAMENTO DAS LIGAÇÕES

As ligações em estudo foram projetadas de acordo com as equações simplificadas apresentadas no Eurocódigo 5 parte 1-1 (CEN, 2004), à temperatura ambiente. Foram consideradas três espécies de madeira lamelada colada GL24h, GL28h e GL32h, cujos valores da massa volúmica são

respetivamente 370, 420 e 480 kg/m<sup>3</sup>. De acordo com o Eurocódigo 5 parte 1-1 (CEN, 2004), é determinada a capacidade de carga característica por plano de corte e por ligador, com base no valor mínimo obtido através das equações 1 a 3, relativas a cada tipo de ligação em estudo. Com base nesse valor e na carga aplicada à ligação, é determinado o número de cavilhas para cada ligação. São ainda estabelecidas as posições respetivas das cavilhas, tendo-se fixado sempre duas linhas na sua disposição. Nas equações 1 a 3, as variáveis utilizadas são:

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

$f_{h,i,k}$  é a resistência característica ao esmagamento dos membros de madeira ( $i=1, 2$ );

$t_i$  representa a espessura do membro em madeira ( $i=1, 2$ );

$d$  é o diâmetro da cavilha;

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

$F_{ax,Rk}$  representa a resistência à tração axial característica do ligador.

A equação 1 é utilizada para ligações madeira-madeira.

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

A equação 2 utiliza-se para ligações de madeira com placa externa de aço considerada com espessura fina.

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} 0,4 f_{h,1,k} t_1 d \\ 1,15 \sqrt{2 M_{y,Rk} f_{h,1,k} d + \frac{F_{\alpha x,Rk}}{4}} \end{array} \right\} \quad (2)$$

A equação 3 utiliza-se para ligações de madeira com placa externa de aço considerada com espessura espessa.

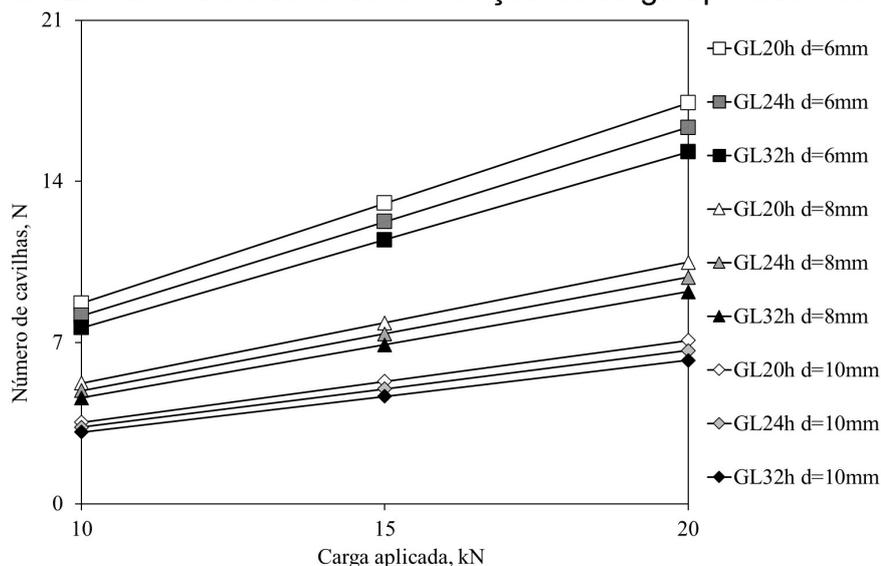
$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{h,1,k} d \left[ \sqrt{2 + \frac{4M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_1^2}} - 1 \right] + \frac{F_{\alpha x,Rk}}{4} \\ 2,3 \sqrt{M_{y,Rk} f_{h,1,k} d + \frac{F_{\alpha x,Rk}}{4}} \\ f_{h,1,k} t_1 d \end{array} \right\} \quad (3)$$

As chapas de aço com espessura menor ou igual a  $0,5d$  são classificadas como finas e as chapas de aço com espessura maior ou igual a  $d$  são classificadas espessas, Eurocódigo 5 parte 1-1 (CEN, 2004). Para a verificação do efeito da aplicação da carga externa no dimensionamento da ligação e comparação com o efeito na alteração da massa volúmica da madeira, foram considerados diferentes diâmetro de cavilha e valores de carga. A Figura 2 permite observar essa relação para as diferentes ligações em estudo: madeira-madeira MM, madeira-chapa fina MMf e madeira-chapa espessa MMe.

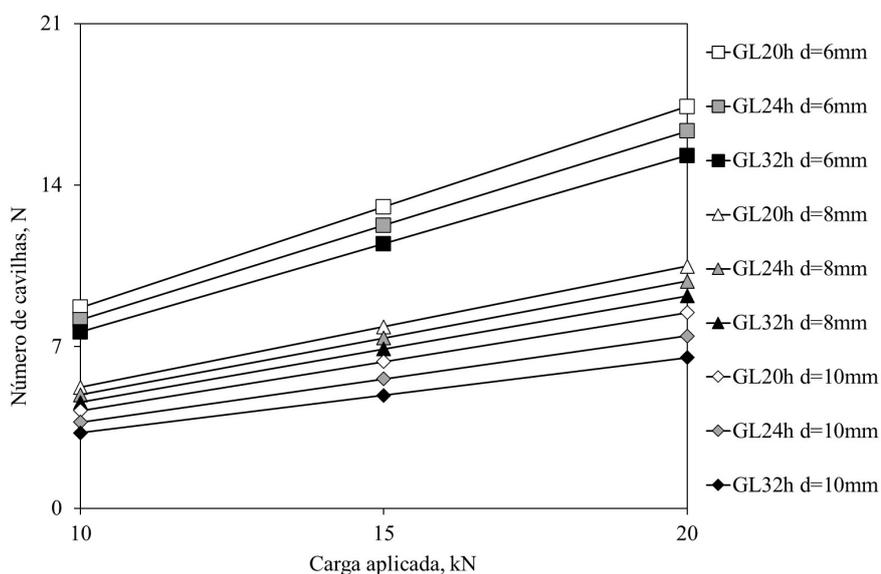
Com base no dimensionamento efetuado, observa-se que o número de cavilhas é função linear do aumento da carga de tração aplicada na ligação. O número de cavilhas aumenta com a carga aplicada. Nas ligações em que se utilizam madeiras com menor massa volúmica, o número de cavilhas é maior. Esta tendência aumenta quando o diâmetro da cavilha é menor, sendo que a proporcionalidade de aumento entre os tipos de madeira não se mantém constante. A utilização de cavilhas com maior diâmetro em madeiras de elevada massa volúmica, resulta na utilização de um menor número de ligadores no correto dimensionamento. Nas ligações de corte simples em estudo, as ligações madeira-chapa espessas são as que necessitam de

maior número de cavilhas, madeira foram considerados em madeira lamelada colada GL24h, GL28h e GL32h (MACHADO, FONSECA 2023). No estudo já efetuado em ligações de corte duplo, as conclusões observadas foram idênticas (FONSECA et al., 2020) (SILVA et al., 2019).

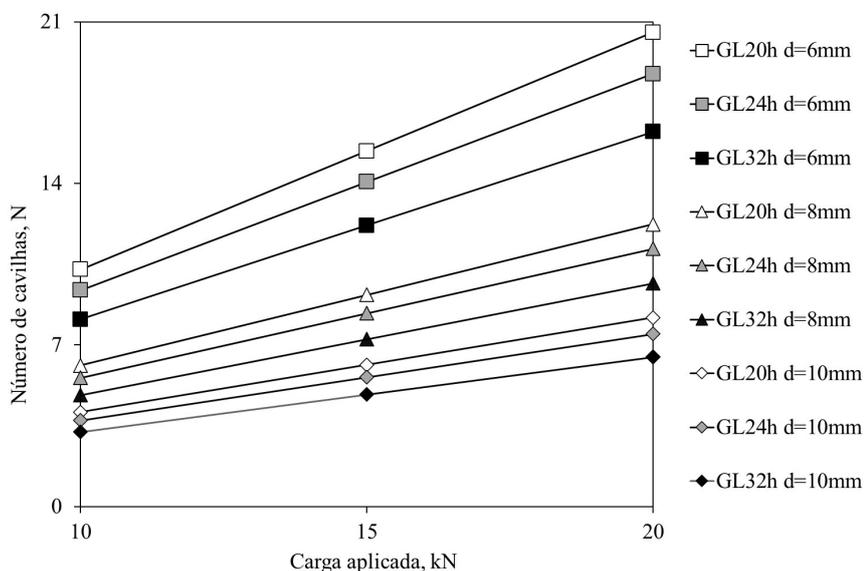
Figura 2: Número de cavilhas em função da carga aplicada nas ligações.



MM



MMf



Mme

#### 4. MODELO TÉRMICO DAS LIGAÇÕES

Do cálculo efetuado, foram selecionados os modelos apresentados na Tabela 1 para o desenvolvimento da análise térmica.

**TABELA 1** – Dimensões das ligações.

Ligação	<i>d</i> mm	<i>N</i>	<i>W</i> mm	<i>a</i> <sub>1</sub> mm	<i>a</i> <sub>2</sub> mm	<i>a</i> <sub>3,t</sub> mm	<i>a</i> <sub>4,c</sub> mm	<i>t</i> <sub>1</sub> mm	<i>L</i> mm	<i>H</i> mm	<i>t</i> <sub>2</sub> mm	<i>t</i> <sub>s</sub> mm
a) MM	10	2x4	90	50	30	80	30	45	310	90	45	-
b) MMf	10	2x5	48	50	30	80	30	45	360	90	-	3
c) MMe	10	2x5	55	50	30	80	30	45	360	90	-	10

De modo a avaliar a capacidade térmica das ligações quando submetidas ao fogo, foram consideradas as condições normalizadas definidas

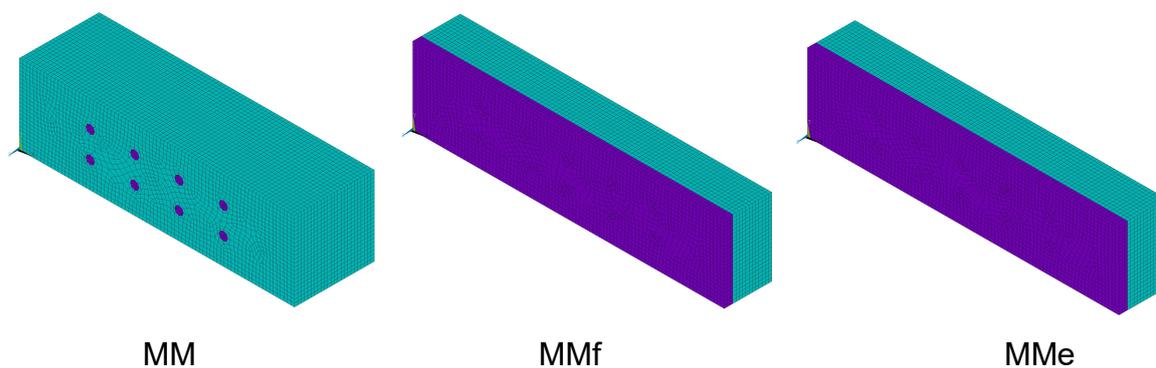
pela imposição da curva de fogo ISO 834 (ISO, 1999), sendo consideradas as condições de fronteira de convecção e radiação, na frente de exposição.

No instante inicial, os modelos foram considerados à temperatura ambiente de 20°C. Foi utilizado um coeficiente de convecção igual a 25W/m<sup>2</sup>K na superfície exposta e um fator de emissividade de 1 para a ação do fogo, Eurocódigo 3 parte 1-2 (CEN, 2005). Foi utilizado o método dos elementos finitos com recurso ao algoritmo térmico.

Na Figura 3 estão representadas as malhas de elementos finitos utilizadas para o estudo.

Na simulação foi utilizado o elemento 3D SOLID 278 com 8 nós e um grau de liberdade de temperatura por nó. O tamanho fixo de aresta para cada elemento finito é 4 mm.

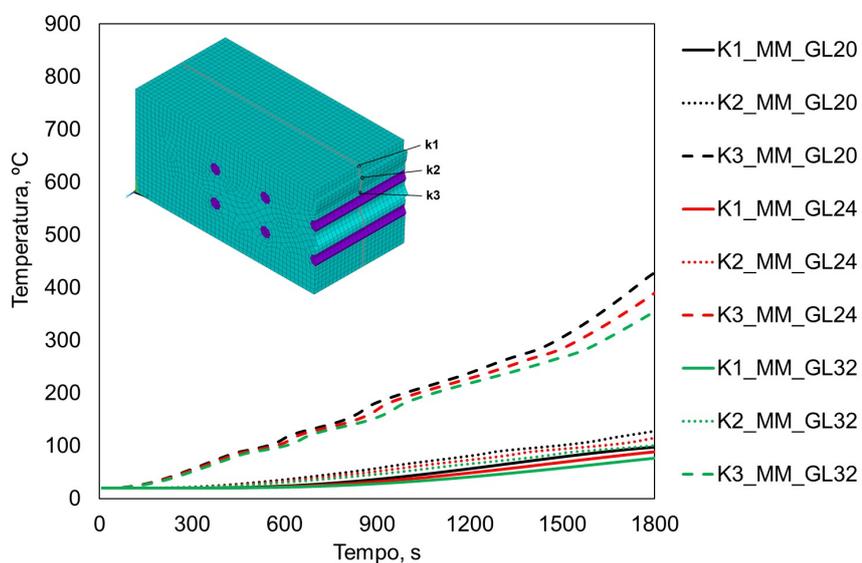
**Figura 3:** Malhas de elementos finitos



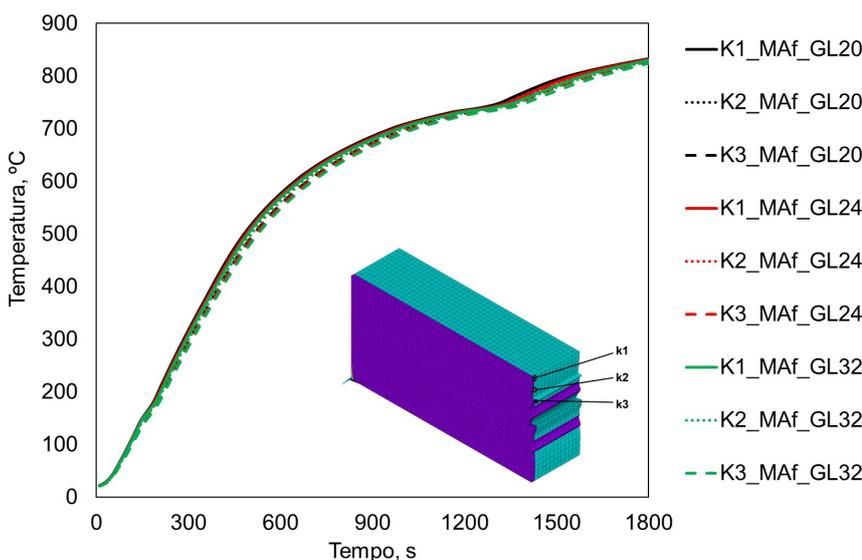
## 5. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Para analisar a evolução da temperatura ao longo do tempo, recorreu-se a três pontos distintos K1, K2 e K3 no plano de interface dos materiais dos componentes a ligar, Figura 4. O ponto K1 encontra-se à superfície, K2 no interior e K3 posicionado na madeira, sendo o ponto mais próximo da cavilha.

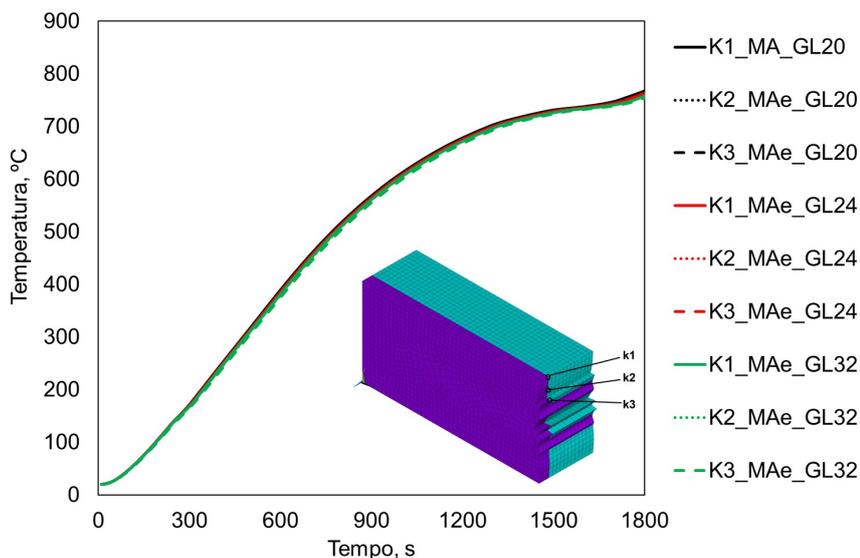
**Figura 4:** Evolução da temperatura nas diferentes ligações.



MM



MMf



MMe

Verifica-se que no interior do modelo MM as temperaturas são baixas, sendo as maiores temperaturas obtidas no ponto K3 próximo da cavilha. Também é visível a influência da alteração da massa volúmica da madeira.

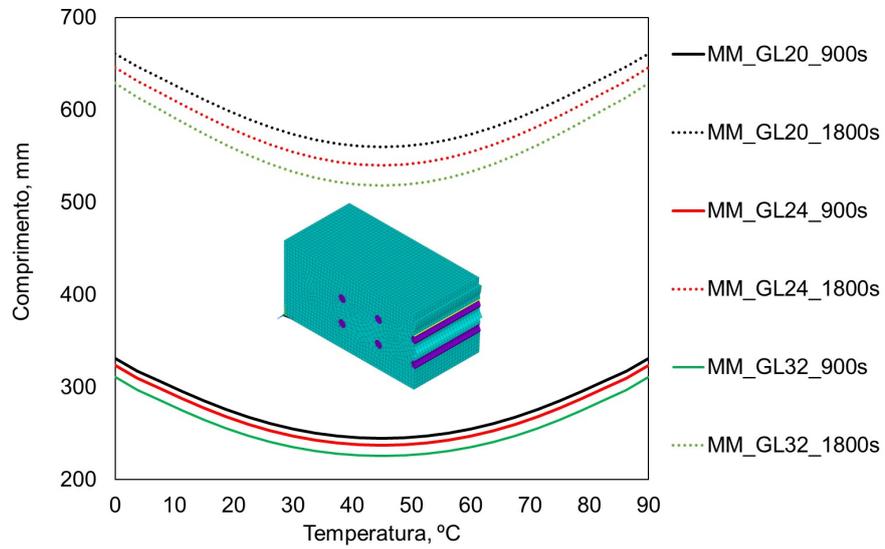
Nos modelos MMf e MMe não há qualquer variação entre as temperaturas obtidas nos pontos, seja pela posição que ocupam ou pela alteração da massa volúmica da madeira. O comportamento é devido à influência do aquecimento da chapa. Na chapa fina as temperaturas são ligeiramente superiores às obtidas com a chapa espessa.

A Figura 5 representa o campo de temperaturas ao longo do comprimento das cavilhas para dois instantes de exposição ao fogo (900 e 1800 s).

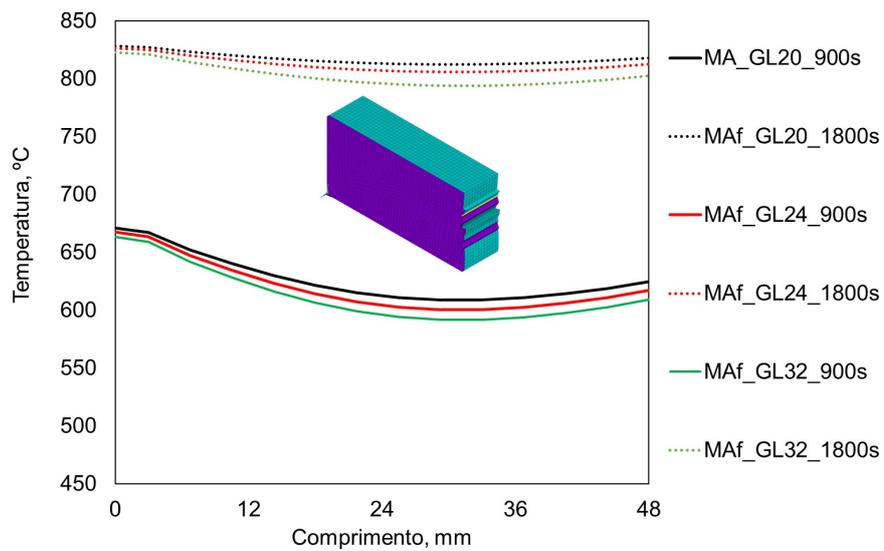
Os resultados permitem verificar que as cavilhas mantêm um registo de temperaturas quase constante, com ligeira variação nos modelos MMf e MMe.

Nestes modelos, a cavilha apresenta ao longo da espessura da chapa, um valor de temperatura constante diminuindo ligeiramente para o interior da ligação em madeira. As cavilhas apresentam os valores máximos nas faces externas. Verifica-se também a influência da massa volúmica da madeira no registo dos campos de temperaturas.

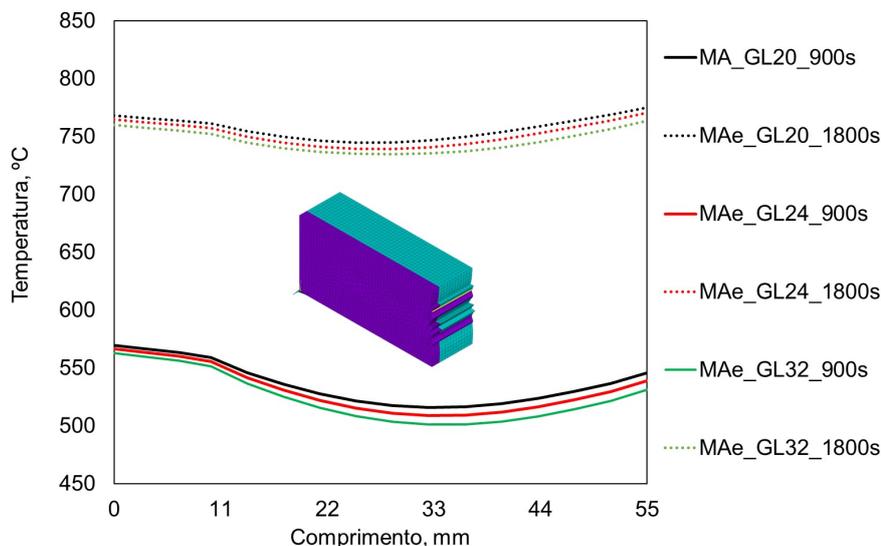
Figura 5: Temperatura na cavilha para dois instantes de tempo.



MM



MMf



MMe

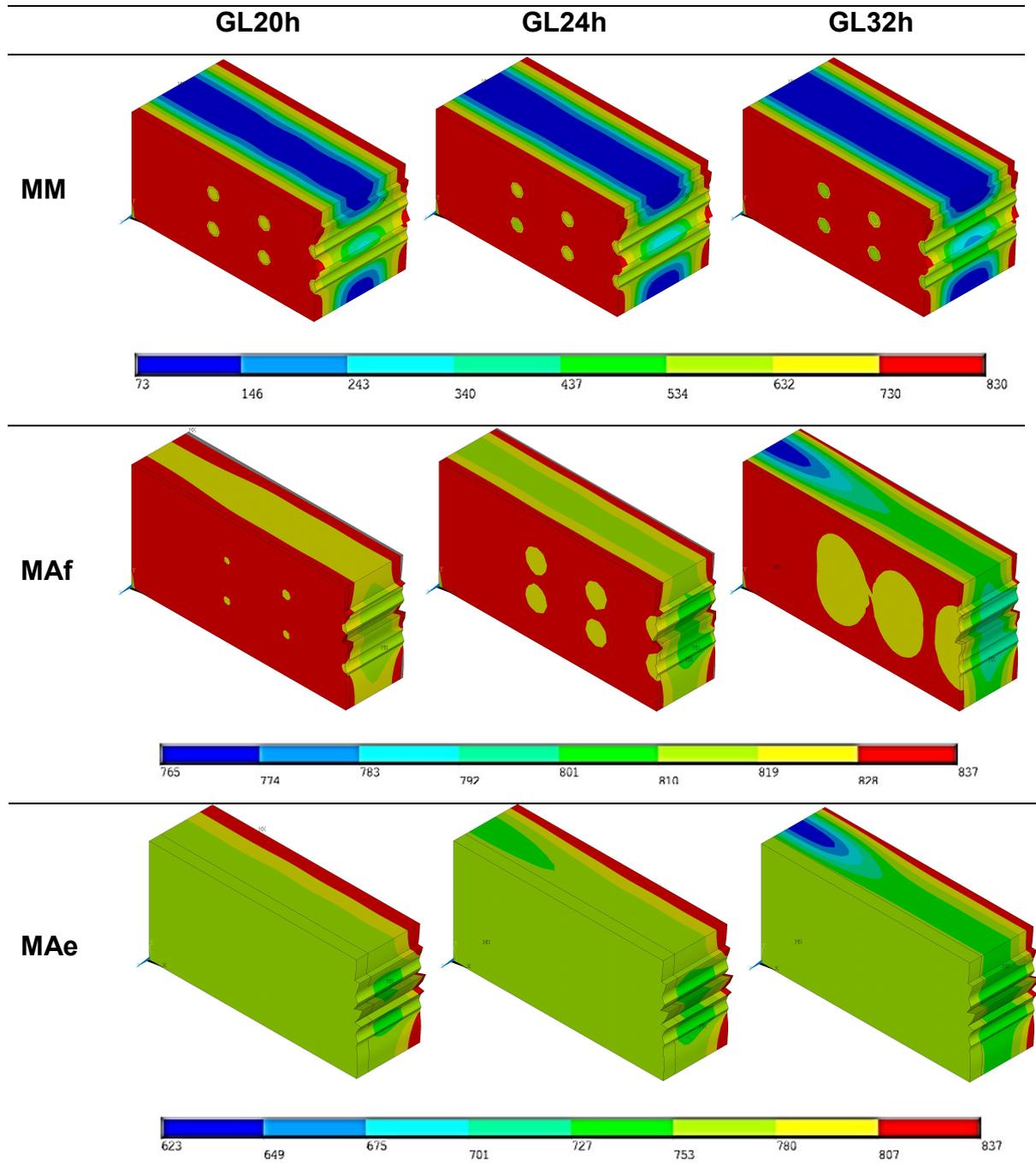
A Figura 6 apresenta os resultados da temperatura nos modelos 3D das ligações, considerando os planos de corte para a verificação do interior da ligação.

Assim, é possível a visualização da temperatura registada no interior da madeira, bem como a influência das cavilhas e das placas em aço nessa evolução, neste caso, para o instante de tempo analisado (1800s).

A análise revela que para a ligação MM, a temperatura máxima no exterior é elevada (830°C), mantendo o seu interior a temperatura baixa (73°C), que é justificado pelo facto da ligação ser de madeira e apresentar uma elevada espessura e, conseqüentemente, dificultar a propagação do calor.

As ligações MAf e MAe, ambas apresentam uma variação de temperaturas num patamar de valores consideravelmente alto (765°C-837°C na ligação MAf e 623°C-837°C na ligação MAe). Toda a ligação estará totalmente carbonizada ao fim de 1800s. Em ambas as ligações são visíveis, uma vez mais, a influência da massa volúmica na propagação de calor, onde a ligação com maior massa volúmica (GL32) representa a ligação com temperaturas mais baixas.

**FIGURA 6:** Campos de temperatura das ligações após 1800s

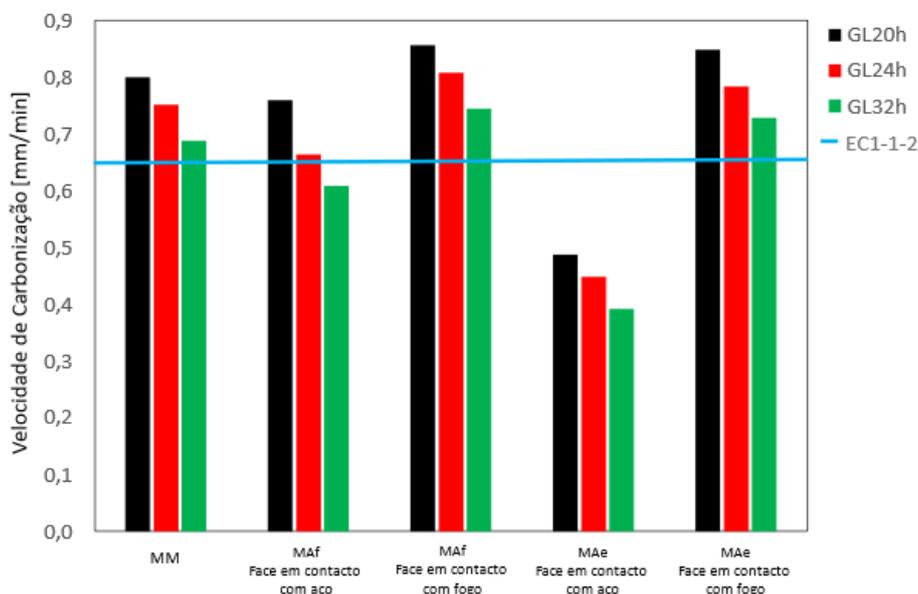


Comparativamente à ligação MAf, a ligação MAe é caracterizada por uma gama de temperaturas mais diferenciada em ambas as faces, verificando-

se temperaturas mais baixas (na ordem dos 100°C) na face da chapa de aço, comparada com a face de madeira, justificando a maior dissipação do calor, aquando do aumento da espessura da chapa de aço.

Com base em três instantes de tempo de exposição ao fogo (900s, 1000s e 1100s) foi efetuada também a medição da profundidade de carbonização para cada ligação em cada face (sendo que na ligação MM apenas é necessária a observação de uma face, tendo em conta a simetria da ligação). Partindo do tamanho da aresta de cada elemento da malha (4 mm) foi possível realizar a medição. Posteriormente efetuou-se a média dos intervalos de tempo, bem como da profundidade de carbonização, calculando-se a velocidade média de carbonização para cada face da ligação, variando a massa volúmica da madeira. Na Figura 7 podem observar-se os resultados obtidos.

**Figura 7:** Velocidade de carbonização média para as ligações em estudo



Após a análise das diferentes velocidades de carbonização, comparando-se com o estipulado no Eurocódigo 5, parte 1-2 (CEN, 2004), é possível tirar-se algumas conclusões. Inicialmente, verifica-se que a velocidade

de carbonização (com exceção da ligação MAe na face em contacto com o aço) globalmente é maior do que a considerada no Eurocódigo 5, parte 1-2 (CEN, 2004), de 0.65 mm/min. Isto ocorre devido ao facto de no Eurocódigo 5, parte 1-2 (CEN, 2004), a consideração é para a existência de um único material (madeira) ao fogo e para uma espessura da madeira de 20 mm, menor do que a considerada no presente estudo. Por último, verifica-se que a massa volúmica interfere na velocidade de carbonização, na medida em que quanto maior for, menor será a velocidade de carbonização. Este comportamento é verificado em todas as ligações estudadas, independentemente das velocidades registadas.

## **6. CONCLUSÕES**

Através das análises numéricas realizadas, foi possível observar o efeito da massa volúmica da madeira nas propriedades das ligações. Concluiu-se que a madeira com maior massa volúmica, apresentou a maior resistência térmica das ligações, quando comparada às outras classes, atribuído à menor transferência de calor para a ligação. Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que a ligação MM demonstrou uma melhor resistência do ponto de vista térmico em comparação com a ligação MAf. A ligação MM apresentou uma resistência térmica mais elevada, o que indica uma capacidade superior em suportar temperaturas elevadas sem sofrer degradação significativa. Por outro lado, a ligação MAf revelou resultados inferiores, sugerindo que essa ligação é mais suscetível a danos quando submetida a condições de temperatura elevada.

## **REFERÊNCIAS**

CEN, EN1995-1-1: **Eurocode 5: Design of timber structures. Part 1-1: General Common rules and rules for buildings**, Brussels, 2004.

CEN, EN1995-1-2: **Eurocode 5: Design of timber structures. Part 1-2: General Structural fire design**, Brussels, 2004.

CEN, EN1993-1-1: Eurocode 3: **Structural fire design. Part 1-1**: Brussels, 2005.

CEN, EN1993-1-2: Eurocode 3: **Structural fire design. Part 1-2**: Brussels, 2005.

ELZA M.M. FONSECA; PEDRO A.S. LEITE; LINO SILVA. **Wood Connections Under Fire Conditions Protected with Gypsum Plasterboard Types A and F**. Chapter No:7, Book: *Advances in Fire Safety Engineering*. CILASCI 2019. P. A. G. Piloto et al (Eds), Lecture Notes in Civil Engineering, 1 Cham, Springer Nature Switzerland AG, p.93-106, 2020.

ERCHINGER C.; FRANGI, A.; FONTANA, M. **Fire design of steel-to-timber dowelled connections**, *Engineering Structures*. 32, p.580-589, 2010.

FERNANDO M. G. MACHADO, ELZA M. M. FONSECA. **Avaliação Térmica de Ligações Aço-Madeira em Corte Simples Quando Submetidas ao Fogo**. *Atas das 8.as Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos (8JORNINC) e as 3as Jornadas de Proteção Civil (3JORPROCIV)*, ISBN: 978-989-35087-3-2, p.38-47, 2023.

FRANGI, A.; ERCHINGER, C.; FONTANA, M. **Experimental fire analysis of steel-to-timber connections using dowels and nails**. *Fire and Materials*, 34(1), p.1-19, 2010.

FONSECA E.M.M.; SILVA L.; LEITE P.A.S. **Numerical model to predict the effect of wood density in wood-steel-wood connections with and without passive protection under fire**. *Journal of Fire Sciences*, 38(2), p.122-135, 2020.

ISO, ISO834-1: **Fire-resistance tests - Elements of building construction – Part 1: General requirements**. International Organization for Standardization, 1999.

M. AUDEBERT, D. DHIMA, M. TAAZOUNT, AND A. BOUCHAÏR. **Numerical investigations on the thermo-mechanical behavior of steel-to-timber joints exposed to fire**. *Eng Struct*. 33(12), p.3257-3268,2011.

PENG, L.; HADJISOPHOCLEUS, G.; MEHAFFEY, J.; MOHAMMAD, M. **On the Fire Performance of Double-shear Timber Connections**. *Fire Safety Science*, p.1207-1218, 2011.