

MÉTODOS NUMÉRICO E SIMPLIFICADO PARA CÁLCULO DA TEMPERATURA EM PERFIS DE ALUMÍNIO AO FOGO

*Bruna M. S. Costa*¹

*Elza M.M. Fonseca*²

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

RESUMO

Efetou-se um estudo para avaliar o perfil de temperaturas, função do tempo, em secções transversais de perfis em alumínio sob a ação do fogo, através do método de cálculo simplificado, proposto pelo Eurocódigo 9 Parte 1-2, e do método numérico, baseado nos elementos finitos. Foram estudadas diferentes secções retas de perfis normalizados em alumínio com e sem proteção. As placas de gesso foram as soluções adotadas para a proteção dos perfis em alumínio no presente estudo. Os métodos de cálculo mostraram-se concordantes no caso dos perfis não protegidos, o mesmo não acontecendo nos perfis protegidos. Com base nesse resultado, a equação de cálculo para o fator de massividade em perfis protegidos foi reajustada. O efeito das cavidades de ar, presentes nessas secções retas dos perfis, apresentam uma influência no valor da temperatura final, efeito este não considerado na equação simplificada. Constatou-se também, que para os perfis não protegidos, quanto maior o fator de massividade, maior é o gradiente térmico do perfil. No caso dos perfis protegidos, quando maior a secção reta transversal, maior é a resistência térmica do perfil.

Palavras-Chave: Proteção; Fogo; Perfis em Alumínio; Fator de Massividade.

¹ Mestre em Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Instituto Politécnico do Porto. Porto. PORTUGAL.

² Professor, Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Instituto Politécnico do Porto. Porto. PORTUGAL.

NUMERICAL AND SIMPLIFIED METHODS FOR TEMPERATURE CALCULATION IN ALUMINUM PROFILES UNDER FIRE

ABSTRACT

A study was carried out to evaluate the temperature profile, as a function of time, in cross-sections of aluminum profiles under the fire action, through the simplified calculation method, proposed by Eurocode 9 Part 1-2, and the numerical method, based on finite elements. Different cross-sections of standard aluminum profiles with and without protection were studied. Gypsum plasterboards were the solutions adopted for the protection of aluminum profiles in the present study. The calculation methods agreed upon in the case of unprotected profiles, the same not happening in protected profiles. Based on this result, the calculation equation for the massivity factor in protected profiles was readjusted. The effect of air cavities, present in these cross-sections of the profiles, has an influence on the final temperature value, an effect not considered in the simplified equation. It was also found that for unprotected profiles, the higher the massivity factor, the greater the thermal gradient of the profile. In the case of protected profiles, the larger the cross-section, the greater the thermal resistance of the profile.

Keywords: Insulation; Fire; Aluminum profile; Massivity factor

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

1. INTRODUÇÃO

O alumínio é um metal que tem como principal vantagem a sua baixa massa volúmica e elevada resistência à corrosão. Por esse motivo, tem diversas aplicações, como na indústria automóvel, aeronáutica, construção civil e maquinaria. A evolução da temperatura, em estruturas de alumínio submetidas ao fogo, é um fator relevante no dimensionamento, uma vez que, o mais importante é retardar o tempo de aquecimento da estrutura. Para este fim, existem diferentes materiais referenciados como proteção passiva contra incêndio (COSTA, 2022). Neste trabalho é utilizado o gesso tipo F como elemento de proteção exterior ao perfil, (COSTA e FONSECA, 2023).

Os objetivos do presente estudo focaram-se no cálculo da temperatura desenvolvida na secção reta transversal de perfis de alumínio, com e sem proteção, submetidos à curva de incêndio padrão ISO 834, Eurocódigo 1 Parte 1-2 (CEN, 2002), (COSTA e FONSECA, 2023). Foram considerados perfis com diferentes geometrias: I, retangular e U. A obtenção do campo de temperaturas foi obtida através do método simplificado, proposto pelo Eurocódigo 9 Parte 1-2 (CEN, 2007), e pelo método numérico, baseado nos elementos finitos, com o programa ANSYS®.

O método numérico foi validado pelo método de cálculo analítico simplificado através da aproximação das curvas de temperatura obtidas. Nos perfis não protegidos pretendeu-se ainda, compreender a influência da geometria e conseqüentemente do fator de massividade de cada perfil.

O estudo incidiu também sobre a análise dos perfis protegidos, que neste caso, com a utilização dos dois métodos de cálculo, se verificaram limitações à utilização da equação de cálculo analítica simplificada, propondo-se assim o ajuste da variável de cálculo do fator de massividade.

2. MATERIAIS E ENQUADRAMENTO BIBLIOGRÁFICO

O Eurocódigo 9 Parte 1-2 (CEN, 2007) fornece as propriedades do alumínio através de equações analíticas definidas por intervalos de tempo e temperatura. A temperatura varia no máximo até 500 °C, valor imposto pela norma aplicada.

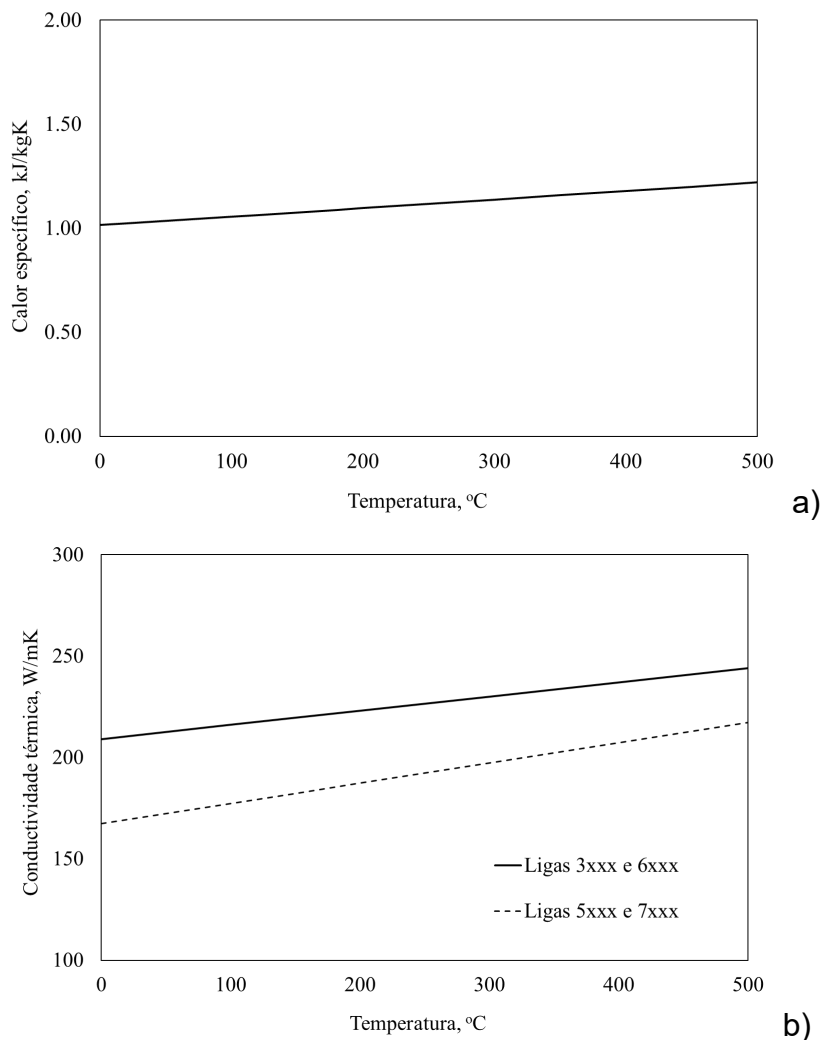
A massa volúmica do alumínio foi considerada constante e com valor igual a 2700 kg/m³. A curva de calor específico em função da temperatura do alumínio, Figura 1.a), é obtida pela equação referida em (CEN, 2007). A condutibilidade térmica do alumínio é determinada em função da temperatura, pelas equações apresentadas no Eurocódigo 9 Parte 1-2 (CEN, 2007), variando de acordo com a série de liga do alumínio, Tabela 1, (COSTA e FONSECA, 2023).

Tabela 1: Variação da condutibilidade térmica do alumínio, função da temperatura

Série liga	Temperatura	Condutibilidade térmica
Séries 3xxx e 6xxx	0 °C < θ_{al} < 500 °C	$\lambda_{al} = 0,07(\theta_{al}) + 190$ W/mK
Séries 5xxx e 7xxx	0 °C < θ_{al} < 500 °C	$\lambda_{al} = 0,10(\theta_{al}) + 140$ W/mK

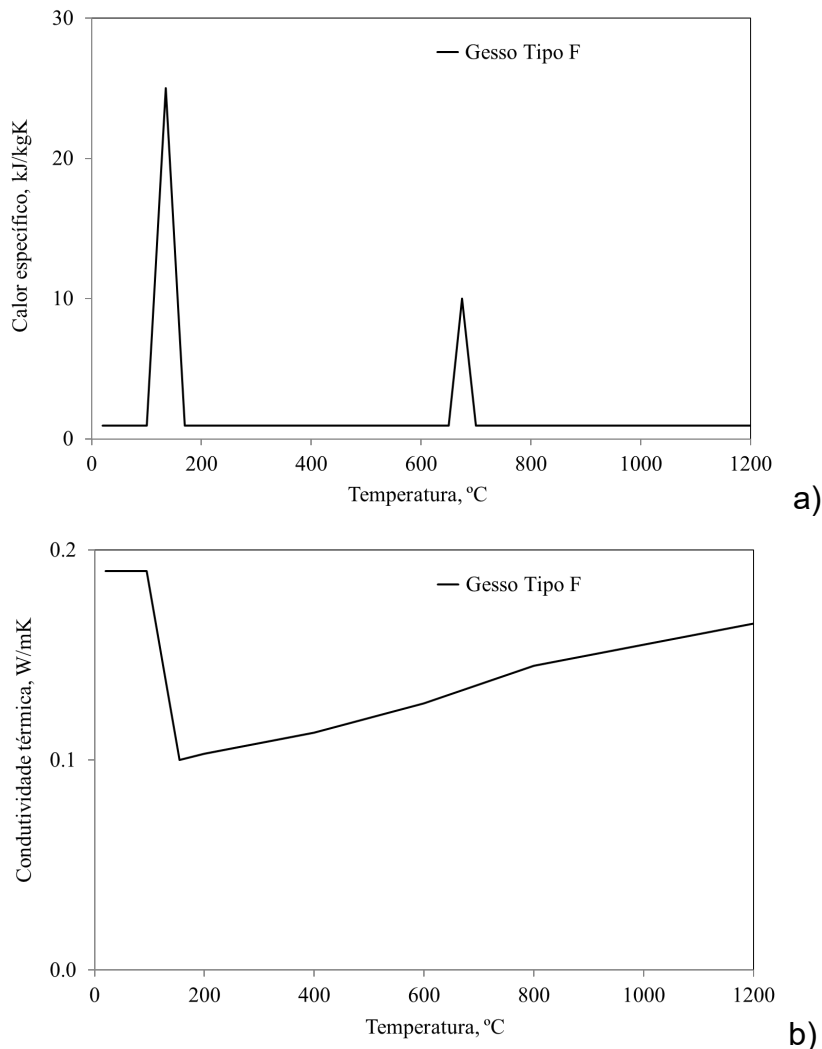
A Figura 1.b) representa a condutibilidade térmica do alumínio e resulta das equações analíticas apresentadas pelo Eurocódigo 9 – Parte 1-2 (CEN, 2007). No que diz respeito às ligas de alumínio, as séries 3xxx e 6xxx apresentam um valor mais elevado de condutibilidade térmica em relação às séries 5xxx e 7xxx.

Figura 1: a) Calor específico e b) condutibilidade térmica do alumínio.



O gesso é um material de proteção para estruturas expostas ao fogo. Segundo a norma BS 520:2004 (BSI, 2009), existem vários tipos de gesso entre os quais, os tipos A e F, ambos para efeitos estéticos. No entanto, o gesso tipo F possui uma melhor coesão do núcleo que permite ser o mais apropriado para proteção de estruturas contra incêndio, tendo sido o utilizado no presente estudo.

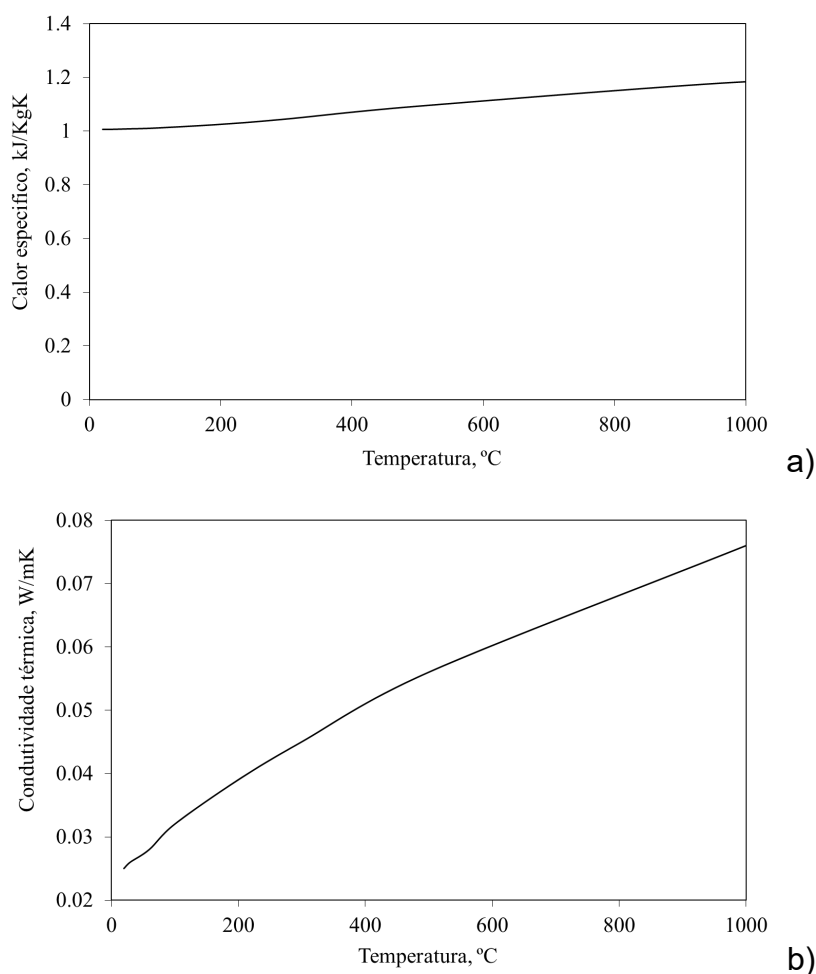
Figura 2: a) Calor específico e b) condutibilidade térmica do gesso tipo F.



No que diz respeito às propriedades térmicas do gesso, existem algumas diferenças nos vários registos bibliográficos, essencialmente devido à sua porosidade e homogeneidade. Segundo (RAHMANIAN e WANG, 2009), o calor específico do gesso tipo F, em função da temperatura, é representado na Figura 2.a). O calor específico do gesso mantém-se praticamente constante no valor de 950 J/kg°C, apresentando dois picos, relacionados com as perdas de massa (PARK et al, 2009). A condutibilidade térmica do gesso tipo F, em função da temperatura, é dada pela Figura 2.b). Os autores (FRANGI et al.,

2010) analisaram experimentalmente a variação de massa de painéis de gesso sujeitos a um aquecimento de 20°C por minuto. No final dos testes aferiram a curva da massa volúmica em função da temperatura para o gesso tipo F, pelo que pode ser considerado um valor constante de 889 kg/m³, valor proposto neste estudo.

Figura 3: a) Calor específico e b) condutividade térmica do ar.

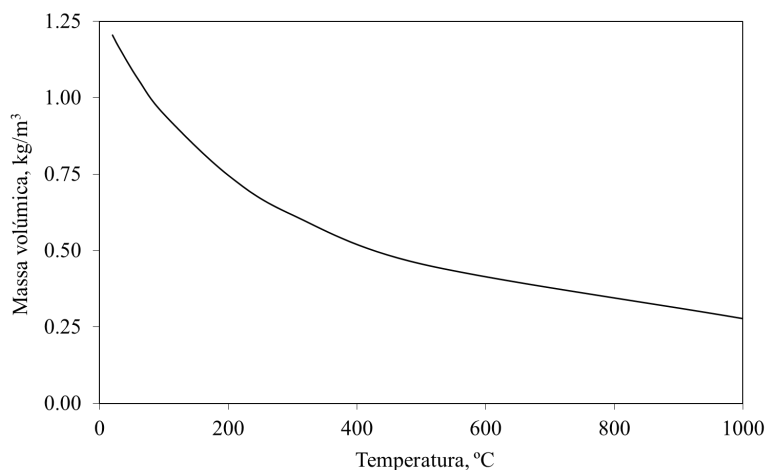


Para o estudo de perfis de alumínio submetidos à ação do fogo, existem várias configurações, tais como, perfis em I, L, U ou até mesmo tubulares. Estes perfis protegidos com placas de gesso, por exemplo, originam cavidades de ar no seu interior.

Assim, para a realização dos estudos numérico e analítico é importante conhecer as propriedades térmicas do ar. A variação do calor específico do ar com a temperatura varia entre os 1000 J/kgK e os 1200 J/kgK, como se verifica na Figura 3.a).

A Figura 3.b) representa a variação da condutibilidade térmica com a temperatura. Tal como o calor específico, esta propriedade aumenta com a temperatura, sendo a variação entre 0,024 W/mK e 0,094 W/mK. Estes valores são relativamente baixos o que permite concluir que o ar apresenta dificuldade na condução de calor. A massa volúmica do ar, função da temperatura, encontra-se representada na Figura 4.

Figura 4: Massa volúmica do ar em função da temperatura.



3. CÁLCULO ANALÍTICO COM A EQUAÇÃO SIMPLIFICADA

De acordo com o Eurocódigo 9 parte 1-2 (CEN, 2007), a Equação 1 indica o cálculo da variação da temperatura num perfil de alumínio não protegido ao longo de um intervalo de tempo, mantida constante na seção reta.

$$\Delta\theta_{al}(t) = k_{sh} \frac{A_m/V}{c_{al}\rho_{al}} \dot{h}_{net} \Delta t \tag{1}$$

Em que:

$\Delta\theta_{al(t)}$ - Variação da temperatura da secção transversal do perfil de alumínio;

k_{sh} - Fator adimensional de correção para o efeito de sombra;

A_m/V - Fator de massividade em m^{-1} ;

c_{al} - Calor específico alumínio em J/kgK;

ρ_{al} - Massa volúmica do alumínio em kg/m^3 ;

\hat{h}_{net} - Fluxo de calor por unidade de área W/m^2 , Eurocódigo 1 Parte-1-2 (CEN, 2002);

Δt - Intervalo de tempo em s.

A distribuição de temperaturas num perfil de alumínio protegido ao longo de um intervalo de tempo, é obtida pela Equação 2.

$$\Delta\theta_{al(t)} = \frac{\lambda_p/d_p}{c_{al}\rho_{al}} \frac{A_p}{V} \left[\frac{1}{1 + \phi/3} \right] (\theta_{(t)} - \theta_{al(t)})\Delta t - (e^{\phi/10} - 1)\Delta\theta_{(t)} \quad (2)$$

Onde,

$$\phi = \frac{c_p\rho_p}{c_{al}\rho_{al}} d_p \frac{A_p}{V} \quad (3)$$

Em que:

λ_p, d_p - Condutividade térmica do material de proteção [W/mK] e a espessura do material de proteção utilizado [m];

c_p, ρ_p - Calor específico [J/kgK] e a massa volúmica [kg/m^3] do material de proteção;

A_p/V - Fator de massividade do perfil de alumínio protegido [m^{-1}];

$\theta_{(t)}$ - Temperatura em função do tempo dos gases na superfície do material de proteção [$^{\circ}C$];

$\theta_{al(t)}$ - Temperatura da superfície do perfil de alumínio protegido [$^{\circ}C$];

$\Delta\theta(t)$ - Variação da temperatura dos gases na superfície do material de proteção ao longo do tempo;

Δt - Intervalo de tempo em s, não deve ser superior a 30 s (CEN, 2007).

4. MODELO NUMÉRICO

A análise por elementos finitos implica a seleção de vários parâmetros dependendo do tipo de solução que se pretende realizar. Neste caso, é selecionada uma análise térmica em regime transiente, através da utilização do programa ANSYS®. A presente análise é não linear material e transiente, recorrendo ao método iterativo de *Newton-Raphson* para a solução numérica.

Foi selecionado o elemento finito PLANE77 de oito nós, com um grau de liberdade por nó (a temperatura). A modelação dos perfis em alumínio foi realizada de acordo com a geometria e as dimensões pretendidas. Na Tabela 2 observam-se as malhas obtidas para cada tipo de perfil em análise.

Tabela 2: Perfis de alumínio não protegidos submetidos ao fogo

I	U	Retangular	Retangular e reforço

Na elaboração da malha foi definida uma dimensão para a aresta do elemento igual a 2 mm, de forma a existir pelo menos dois elementos de malha na menor espessura do perfil.

Os perfis analisados foram sujeitos à curva nominal ISO 834 (CEN, 2002) para a simulação da exposição ao fogo em todos os lados. As condições

de fronteira impostas foram de convecção e radiação na frente de exposição ao fogo, (CEN, 2002). Foi considerada uma temperatura inicial de 20 °C em todos os modelos.

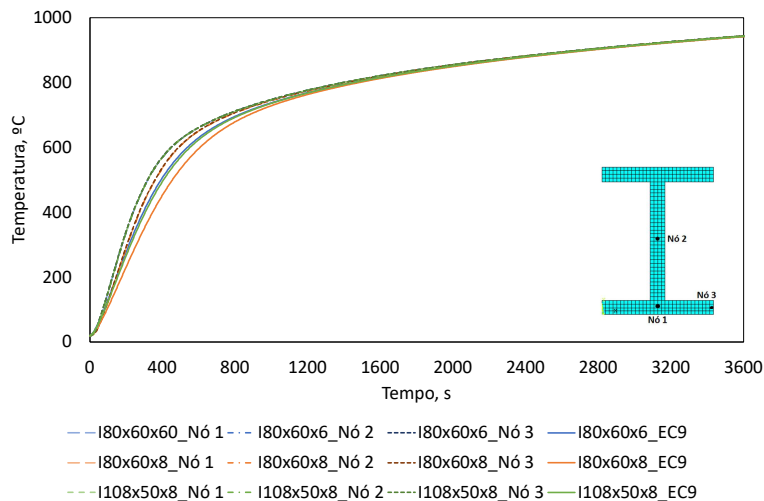
Alguns dos perfis apresentam vazios internos, ou cavidades, nomeadamente o retangular e o retangular com reforço intermédio. Os interiores destes perfis contêm ar, pelo que foi ainda realizado um estudo numérico para modelar a cavidade.

5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Nos perfis em alumínio não protegidos, foram realizados gráficos comparativos entre os métodos de cálculo utilizados, de forma a averiguar a semelhança entre a equação de cálculo analítica simplificada preconizada pelo Eurocódigo 9 Parte 1-2 (CEN, 2007) e as simulações numéricas. A exposição ao fogo incidiu em todos os lados do perfil, ao longo de 3600 s. Nestes perfis pretendeu-se compreender a influência da geometria e conseqüentemente o fator de massividade do elemento quando exposto ao fogo. Neste caso, houve concordância de resultados, pelo que é possível a utilização do modelo numérico em situações de projeto com estas características. A Figura 5 representa a distribuição de temperaturas no perfil em I, considerado como exemplo neste trabalho.

Os resultados apresentados na Figura 5 permitem verificar uma pequena diferença entre os dois métodos até aos 1200 s. No entanto, a partir desse valor, os gráficos permanecem iguais até aos 3600 s. De notar que não são visíveis diferenças entre as temperaturas registadas em cada nó. Os perfis em alumínio protegidos apresentam vazios internos não só devido à geometria, mas também resultado da proteção em caixão. Deste modo, estudou-se a presença de uma malha de ar para simular a condução de energia térmica interna na cavidade.

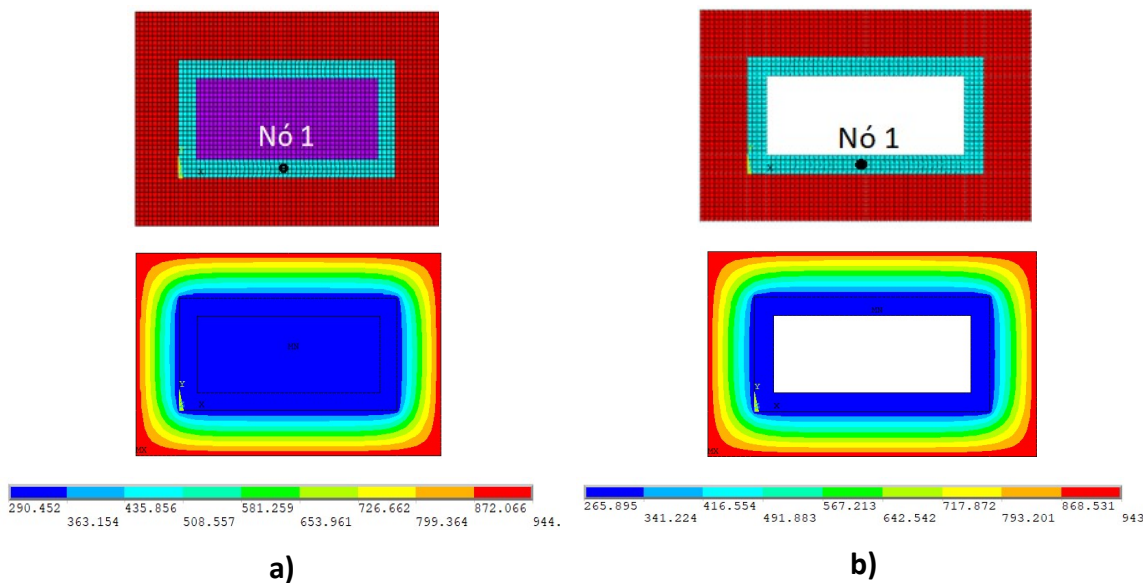
Figura 5: Comparação da temperatura entre os métodos numérico e analítico.



Foram estudados diferentes perfis, sendo aqui apresentado o resultado para o perfil retangular 100x50x8, que possui um vazio interno devido à sua geometria, Figura 6.

Figura 6: Temperatura dos perfis protegidos aos 3600 s de exposição ao fogo.

a) Perfil R100x50x8 com malha de ar; b) Perfil R100x50x8 sem malha de ar.



A Figura 6.a) representa o perfil retangular 100x50x8 com malha de ar e a Figura 6.b) representa o perfil retangular 100x50x8 sem malha de ar no seu interior. Nas Figuras é possível visualizar a diferença do aquecimento no interior.

A Figura 7 apresenta a evolução da temperatura no nó 1 para as situações anteriores a) e b). As curvas de temperatura do perfil exposto ao fogo, obtidas para este nó, permitem concluir que até aos 2500 s de exposição ao fogo não existe influência na introdução da malha de ar. A partir deste instante, as curvas divergem ligeiramente. Numa primeira análise comparativa entre os dois métodos de cálculo verificou-se uma discrepância entre as curvas de evolução da temperatura. Posteriormente, foi efetuado um reajuste ao cálculo do fator de massividade, o que permitiu ajustar as curvas de temperatura conforme se apresentam na Figura 7. De salientar que o cálculo para o fator de massividade A_p/V , conforme sugerido pelo Eurocódigo 9 parte 1-2 (CEN, 2007), para os perfis protegidos depende unicamente das dimensões da base (b), da altura da seção (h) e da área da seção transversal do perfil em alumínio (A_{al}), Equação 4. Não há aqui a influência da proteção no perfil.

$$\frac{2(b + h)}{A_{al}} \quad (4)$$

Nas análises comparativas, verificou-se que a partir do instante 2700 s existia um aumento exponencial da temperatura na cavidade de ar (resultante da proteção em caixão) e que esta variação influencia a temperatura final do perfil. Esse aumento exponencial da temperatura, poderá ser justificado pela diferença obtida entre a curva resultante do método numérico e a preconizada pela Equação 2 do Eurocódigo 9 Parte 1-2 (CEN, 2007), que inclui no cálculo a Equação 4.

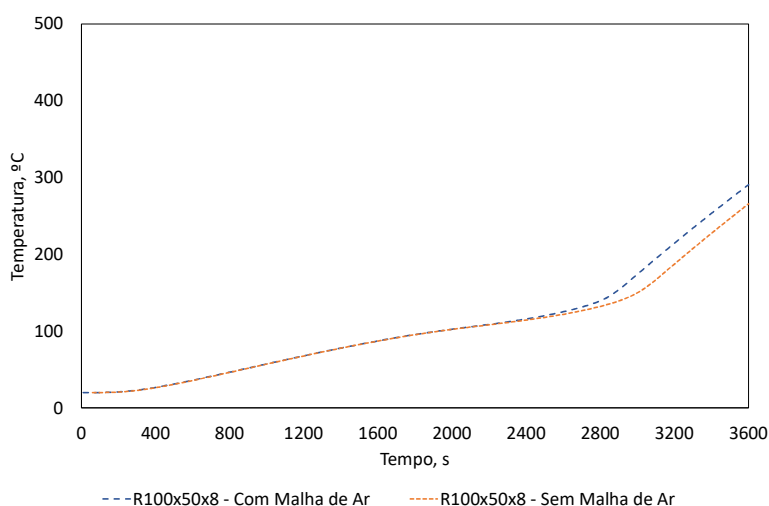
Assim, propõe-se um reajuste à Equação 4, para o cálculo do fator de massividade em perfis expostos ao fogo com proteção em caixão, envolvendo

no cálculo, o perímetro da proteção pela área da secção transversal, que inclui a própria proteção (A_{total} incluindo proteção), Equação 5.

$$\frac{2(b+h)}{A_{total \text{ incluindo proteção}}} \tag{5}$$

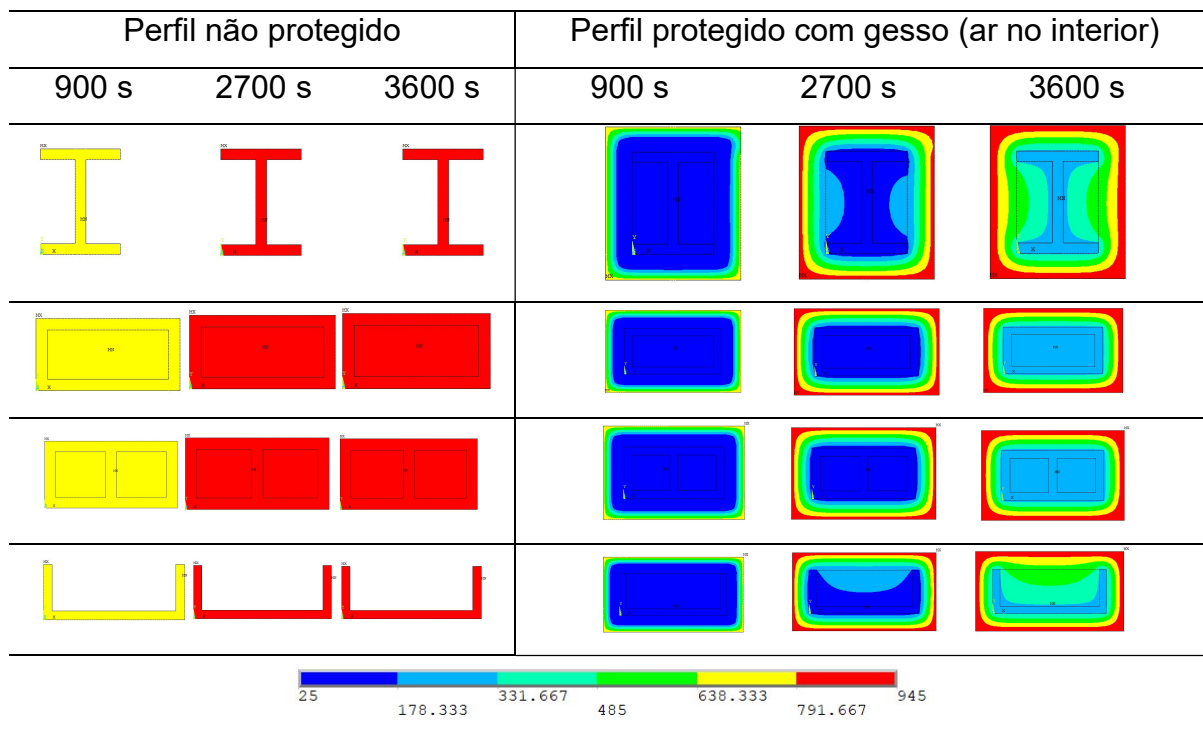
A inclusão do reajuste do fator de massividade na equação simplificada do Eurocódigo 9 Parte 1-2 (CEN, 2007), permitiu obter os resultados concordantes entre os dois métodos, conforme observado na Figura 7.

Figura 7: Temperatura do perfil retangular protegido.



Após a validação entre os dois métodos, conclui-se que o numérico permitirá ainda a observação da variação do perfil de temperaturas para qualquer seção reta do perfil em estudo. A Figura 8 representa alguns dos campos de temperatura obtidos em diferentes instantes de tempo de exposição ao fogo, para alguns dos perfis, com e sem proteção, bem como o efeito da inclusão de uma malha de ar sólida na cavidade dos modelos, permitindo o efeito único da condução de calor interna.

Figura 8: Temperaturas nos perfis não protegidos e protegidos com gesso tipo F.



Ao realizar a modelação de malha de ar nos perfis com cavidades interiores não se verificam grandes alterações na evolução da temperatura do perfil metálico. No entanto, a imagem gráfica da secção reta do perfil permite verificar a variação do aquecimento no interior da cavidade.

6. CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo o estudo de perfis de alumínio submetidos ao fogo para obtenção a evolução da temperatura na secção reta dos perfis. Foram utilizados dois métodos de cálculo para a posterior comparação de resultados: método analítico simplificado preconizado pelo Eurocódigo 9 Parte 1-2 e método numérico com utilização de elementos finitos aplicado no programa ANSYS®. Foram analisados os perfis de alumínio não

protegidos e protegidos com diferentes geometrias de seções retas transversais.

No caso dos perfis não protegidos os métodos de cálculo revelaram-se concordantes e permitiram validar o método numérico. Ainda nos perfis não protegidos foi possível verificar que quanto maior é o fator de massividade do perfil maior é o gradiente térmico, logo menor é a sua resistência térmica.

A avaliação do efeito da proteção nos diferentes perfis foi realizada também através dos dois métodos. Neste caso, foram identificadas divergências iniciais, tendo sido proposto um reajuste à equação de cálculo do fator de massividade. Os resultados posteriores mostraram-se concordantes entre os dois métodos de cálculo. Verificou-se que a secção transversal reta do perfil está relacionada com a evolução da temperatura do perfil, ou seja, a diminuição da área da secção reta resulta numa diminuição da resistência térmica dos perfis protegidos. A utilização do gesso como elemento de proteção dos perfis de alumínio mostrou-se eficaz, uma vez que as temperaturas registadas diminuíram significativamente em relação aos não protegidos.

REFERÊNCIAS

CEN, EN 1991-1-2: Eurocode 1: **Actions on structures Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire**, Brussels. CEN, 2002.

CEN, EN 1999-1-2: Eurocode 9: **Design of aluminium structures Part 1-2: Structural fire design**, Brussels. CEN, 2007.

BS EN 520:2004+A1:2009. **Gypsum Plasterboards - Definitions, Requirements and Test Methods**. BSI, 2009.

COSTA, B. **Análise Térmica de Perfis em Alumínio Protegidos e Não Protegidos sob Ação do Fogo**, *Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica*, ISEP, Porto, 2022.

FRANGI, A. et al. **Experimental and numerical analysis of gypsum plasterboards in fire**, *Fire technology* 46(1): p.149, 2010.

RAHMANIAN, I. and Y. WANG. **Thermal conductivity of gypsum at high temperatures, a combined experimental and numerical approach**, *Acta Polytechnica* 49(1), 2009.

PARK, S.H., et al. **Determining thermal properties of gypsum board at elevated temperatures**, *Fire and Materials* 34: p.237-250, 2009.

COSTA B. M. S., ELZA M. M. FONSECA. **Perfis em Alumínio com e sem Proteção ao Fogo: Comparação entre o Método Simplificado e Numérico**, *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.28-37, 2023.