



ANÁLISE TÉRMICA DE PERFIS EM ALUMÍNIO PROTEGIDOS E NÃO PROTEGIDOS SOB AÇÃO DO FOGO

BRUNA MANUELA SILVA COSTA

outubro de 2022

ANÁLISE TÉRMICA DE PERFIS EM ALUMÍNIO PROTEGIDOS E NÃO PROTEGIDOS SOB AÇÃO DO FOGO

Bruna Manuela Silva Costa

1170853

2022

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



ANÁLISE TÉRMICA DE PERFIS EM ALUMÍNIO PROTEGIDOS E NÃO PROTEGIDOS SOB AÇÃO DO FOGO

Bruna Manuela Silva Costa

1170853

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação da Professora Elza Maria Morais Fonseca.

2022

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



JÚRI

Presidente

Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Orientador

Doutora Elza Maria Morais Fonseca

Professor Coordenador, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Arguente

Doutor Carlos Jorge da Rocha Balsa

Professor Adjunto, Instituto Politécnico de Bragança

AGRADECIMENTOS

A presente dissertação faz parte de uma viagem de desafios e aprendizagens, de momentos bons e menos bons, de passos atrás e passos em frente. Este percurso dá-se por concluído não só pelo trabalho e resiliência, mas também pelo contributo de várias instituições e pessoas que felizmente se cruzaram no meu caminho.

Ao Instituto Superior de Engenharia do Porto por me ter acolhido estes cinco anos.

À minha orientadora, Professora Elza Fonseca, pela atenção, pela disponibilidade e pela exigência. Reuniu as ferramentas fundamentais para me permitir pensar de forma criteriosa a cada desafio.

Aos meus amigos pelo companheirismo e motivação. Em particular àqueles que fazem parte de Mecânica. Torna-se mais simples quando existem mais pessoas a lutar pelo mesmo fim.

A toda a minha família pelo orgulho demonstrado. Em especial à minha mãe pela amizade, pelo carinho, e por me transmitir a força para sempre continuar. Ao meu pai pelo gosto pela construção, por acreditar em tudo o que sou capaz e por sempre me incentivar a ser melhor. Ao Amado por ser tudo o que de um companheiro se espera, por ter estado do meu lado nas maiores conquistas e adversidades ao longo de toda a minha formação em engenharia.

PALAVRAS-CHAVE

Análise térmica; perfis em alumínio; curvas de incêndio; proteções de incêndio.

RESUMO

Uma situação de incêndio caracteriza-se como uma ocorrência de fogo não planejada que é prejudicial tanto para os seres vivos como para as estruturas. No caso de estruturas de alumínio, o risco de perda das propriedades do material é enorme podendo originar o colapso da estrutura. Assim, torna-se fundamental a análise térmica deste material no desenvolvimento da proteção para garantir a segurança das estruturas em caso de incêndio.

Neste trabalho, para além do estudo de perfis em alumínio não protegidos sob ação do fogo, também é pertinente a mesma abordagem, no entanto para soluções de proteção em caso de incêndio. As placas de gesso e a lã de rocha são as soluções abordadas neste trabalho.

A análise térmica de perfis requer o conhecimento das propriedades dos materiais, tanto do alumínio como os respetivos isolamentos. As curvas nominais de incêndio são fundamentais para simular o desenvolvimento da temperatura do fogo ao longo do tempo. As equações e os métodos de transferência de calor para aplicação são também importantes para o posterior cálculo da variação da temperatura.

O cálculo da variação da temperatura em função do tempo, da secção transversal de perfis em alumínio será realizado tanto por meio de métodos analíticos (Método simplificado proposto pelo Eurocódigo 9 Parte 1-2) como por métodos numéricos (Método de Elementos Finitos), sendo os mesmos comparados numa fase final.

Os métodos de cálculo revelaram-se concordantes no caso dos perfis não protegidos e apresentaram divergências no caso dos perfis protegidos. O fator de massividade para perfis protegidos foi reajustado de forma a aproximar as curvas até cerca de 2700 segundos. A partir deste instante, conclui-se que as cavidades de ar, presentes nas seções retas dos perfis, apresentam influência na temperatura final e que os efeitos das mesmas não constam na equação simplificada proposta pelo Eurocódigo 9 Parte 1-2.

Apurou-se também, que para os perfis não protegidos quanto maior o fator de massividade maior é o gradiente térmico do perfil. E para os perfis protegidos quando maior a secção reta transversal, maior é a resistência térmica do perfil.

KEYWORDS

Thermal analysis, aluminium profiles, fire curves, fire protections.

ABSTRACT

A fire situation is characterised as an accidental occurrence of fire that is harmful to both living beings and structures. In the case of aluminium structures, the loss risk of the material properties is enormous, which can lead to the structural collapse. Thus, the thermal analysis of this material becomes essential in the development of protection to ensure the safety of structures in case of fire.

In this work, in addition to the study of unprotected aluminium profiles under the fire action, the same approach is also relevant. However, for protection solutions in case of fire, gypsum plasterboards and rockwool insulation are the solutions addressed in this work.

The thermal analysis of profiles submitted to fire requires knowledge of the material properties of both aluminium and its protection. Nominal fire curves are fundamental to simulate the development of fire temperature over time. The heat transfer equations and methods for application are essential for subsequent use in the calculation of the temperature variation.

The calculation of the temperature variation depending on the time of the cross-section of aluminium profiles should be performed both by analytical methods (simplified method proposed by Eurocode 9 Part 1-2) and numerical methods (Finite Element Method), these methods should be compared in a final stage.

The calculation methods shown to be concordant in the case of unprotected profiles and presented divergences in the case of protected profiles. The massivity factor for the protected profiles was changed to approximate the curves until about 2700 seconds. From this time instant, it was concluded that the air cavities present in the cross-section profiles have influence on the final temperature and that they are not included in the simplified equation proposed by Eurocode 9 Part 1-2.

It was also found that for the unprotected profiles, the greater the massivity factor, the greater the thermal gradient of the profile. And for protected profiles, the larger the cross-section, the greater the thermal resistance of the profile.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
ISO	Normal Internacional
MEF	Método de Elementos Finitos
BS	<i>British Standard</i>
EN	<i>European Standard</i>
LSF	<i>Ligth Steel Frame</i>

Lista de Unidades

°C	Graus Celcius
J	Joule
K	Kelvin
kg	Quilograma
m	Metro
min	Minuto
s	Segundo
W	Watt

Lista de Símbolos

A	Área
A_m	Área da superfície do elemento por unidade de comprimento

C_p	Calor específico
C_{al}	Calor específico do alumínio
h_c	Coefficiente de transferência de calor por convecção
h_r	Coefficiente de transferência de calor por radiação
L	Comprimento
λ	Condutibilidade térmica
σ	Constante de Stefan-Boltzman
α	Difusibilidade térmica
ε	Emissividade
k_{sh}	Fator adimensional de correção para o efeito de sombra
Φ	Fator de vista
q	Fluxo de calor
$\dot{h}_{net,c}$	Fluxo de calor efetivo por convecção por unidade de área
$\dot{h}_{net,r}$	Fluxo de calor efetivo por radiação por unidade de área
\dot{h}_{net}	Fluxo de calor efetivo por unidade de área
Δt	Intervalo de tempo
ρ	Massa volúmica
P	Perímetro
Q	Quantidade de calor
θ_{al}	Temperatura do alumínio
θ_g	Temperatura dos gases no compartimento do incêndio
t	Tempo decorrido do incêndio
V	Volume

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Calor específico das ligas de alumínio em função da temperatura	13
Figura 2.2 – Condutibilidade térmica do alumínio em função da temperatura	14
Figura 2.3 – Calor específico do gesso tipo F em função da temperatura	15
Figura 2.4 – Condutibilidade térmica do gesso tipo F em função da temperatura	16
Figura 2.5 – Densidade do gesso tipo F em função da temperatura.....	16
Figura 2.6 – Calor específico do ar em função da temperatura	18
Figura 2.7 – Condutividade térmica do ar em função da temperatura.....	18
Figura 2.8 – Massa específica do ar em função da temperatura	19
Figura 2.9 – Edifícios com elementos exteriores – EXEO Office Campus em Lisboa (em construção) [35].	24
Figura 2.10 – a) Incêndio <i>World Trade Center</i> [37]; b) Incêndio <i>Deepwater Horizon</i> [38]	25
Figura 2.11 – Representação gráfica das curvas de incêndio nominais	26
Figura 3.1 – a) Perfil R100x50x8 com malha de ar; b) Perfil R100x50x8 sem malha de ar.....	40
Figura 3.2 - Temperatura do perfil exposto à curva de incêndio nominal ISO 834, considerando dois cenários.....	41
Figura 3.3 – Representação gráfica da temperatura dos perfis aos 500 segundos de exposição a) Perfil R100x50x8 com malha de ar; b) Perfil R100x50x8 sem malha de ar	41
Figura 4.1 – a) Perfil R100x50x8 com malha de ar; b) Perfil R100x50x8 sem malha de ar.....	48
Figura 4.2 – Representação gráfica da temperatura dos perfis protegidos aos 3600 segundos de exposição a) Perfil R100x50x8 com malha de ar; b) Perfil R100x50x8 sem malha de ar.....	48
Figura 4.3 - Temperatura do perfil retangular protegido exposto à curva de incêndio nominal ISO 834, considerando dois cenários	49
Figura 4.4 – a) Perfil U130x50x8 com malha de ar; b) Perfil U130x50x8 sem malha de ar.....	49
Figura 4.5 - Temperatura do perfil U protegido exposto à curva de incêndio nominal ISO 834, considerando dois cenários	50
Figura 4.6 – Representação gráfica da temperatura dos perfis protegidos aos 3600 segundos de exposição a) Perfil U130x50x8 com malha de ar; b) Perfil U130x50x8 sem malha de ar	50
Figura 5.1 - Temperatura dos perfis I expostos à curva de incêndio nominal ISO 834. Comparação entre o método numérico e o Método Simplificado do Eurocódigo 9 Parte 1-2	54

Figura 5.2 - Temperatura dos perfis retangular expostos à curva de incêndio nominal ISO 834. Comparação entre o método numérico e o Método Simplificado do Eurocódigo 9 Parte 1-2	56
Figura 5.3 - Temperatura dos perfis I protegidos expostos à curva de incêndio nominal ISO 834. Comparação entre o método numérico e o Método Simplificado do Eurocódigo 3	58
Figura 5.4 - Temperatura dos perfis I protegidos expostos à curva de incêndio nominal ISO 834. Comparação entre o método numérico e o Método Simplificado do Eurocódigo 9 Parte 1-2 reajustado	59
Figura 5.5 – Evolução gráfica da temperatura no perfil I80x60x6 no instante de tempo: (a) 1000s; (b) 2700s; (c) 3600s.....	60
Figura 5.6 - Temperatura do perfil I80x60x6 protegido e temperatura na malha de ar com exposição à curva de incêndio nominal ISO 834	61
Figura 5.7 - Temperatura do perfil I80x60x6 protegido considerando três análises distintas na cavidade de ar	62
Figura 5.8 - Temperatura dos perfis R protegidos expostos à curva de incêndio nominal ISO 834. Comparação entre o método numérico e o Método Simplificado do Eurocódigo 9 Parte 1-2 reajustado	63
Figura 5.9 - Temperatura dos perfis RR protegidos expostos à curva de incêndio nominal ISO 834. Comparação entre o método numérico e o Método Simplificado do Eurocódigo 3 reajustado	64
Figura 5.10 - Temperatura do perfil R100x50x8 com proteção interior exposto à curva de incêndio nominal ISO 834	65
Figura 5.11 - Representação gráfica da temperatura dos perfis aos 500 segundos de exposição a) Perfil R100x50x8 com malha de ar; b) Perfil R100x50x8 com proteção interior lã de rocha.....	65
Figura 5.12 - Temperatura do perfil R100x50x8 com proteção interior e exterior exposto à curva de incêndio nominal ISO 834	66
Figura 5.13 - Representação gráfica da temperatura dos perfis aos 3600 segundos de exposição a) Perfil R100x50x8 proteção exterior (gesso) e com malha de ar interna; b) Perfil R100x50x8 proteção exterior (gesso) e interior (lã de rocha)	67

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1.1 – Metodologia de trabalho	5
Tabela 2.1 - Variação do calor específico do alumínio em função da temperatura	12
Tabela 2.2 - Variação da condutibilidade térmica do alumínio em função da temperatura.....	13
Tabela 2.3 – Propriedades térmicas da lã de rocha	20
Tabela 3.1 – Fator de massividade (Am/V) para perfis não protegidos expostos ao fogo de acordo com Eurocódigo 9 – Parte 1-2 [3].	32
Tabela 3.2 – Coeficientes de transferência de calor em superfícies expostas ao fogo	33
Tabela 3.3 – Perfis de alumínio não protegidos submetidos ao fogo (figuras de elaboração própria).....	35
Tabela 3.4 – Perfis de alumínio não protegidos submetidos ao fogo (figuras de elaboração própria).....	39
Tabela 4.1 – Fator de massividade (Ap/V) para perfis protegidos expostos ao fogo, Eurocódigo 9 – Parte 1-2	45
Tabela 4.2 – Perfis de alumínio alvo de estudo com indicação do tipo de análise	47
Tabela 5.1 - Valores de perímetro, área e fator de massividade dos perfis I em alumínio	55
Tabela 5.2 - Valores de perímetro, área e fator de massividade dos perfis retangulares em alumínio.....	56
Tabela 5.3 – Valores fator de massividade de perfis I com proteção em caixão, de acordo com o Eurocódigo 9 Parte 1-2.....	57
Tabela 5.4 – Valores reajustados do fator de massividade de perfis I com proteção em caixão.....	59

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	3
1.1	Considerações Iniciais	3
1.2	Motivação	3
1.2.1	Objetivos	4
1.2.2	Metodologia	4
1.3	Descrição dos Capítulos	5
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
2.1	Estado da Arte	9
2.2	Propriedades dos Materiais	12
2.2.1	Alumínio	12
2.2.2	Gesso	14
2.2.3	Ar	17
2.2.4	Lã de Rocha	19
2.3	Transferência de calor	20
2.3.1	Transferência de calor por condução	20
2.3.2	Transferência de calor por convecção.....	22
2.3.3	Transferência de calor por radiação.....	22
2.4	Curvas de incêndio nominais	23
3	PERFIS EM ALUMÍNIO NÃO PROTEGIDOS.....	29
3.1	Introdução	29
3.2	Método simplificado proposto pelo Eurocódigo 9	30
3.3	Método de cálculo avançado	34
3.3.1	Equação Diferencial de Condução de Calor e Condições Fronteira	35

3.3.2	Aplicação do método de elementos finitos à equação de condução de calor	36
3.3.3	Processo iterativo para problemas não-lineares	37
3.4	Aplicação do método numérico no ANSYS®	38
3.4.1	Vazios Internos	40
4	PERFIS EM ALUMÍNIO PROTEGIDOS	44
4.1	Introdução	44
4.2	Método simplificado proposto pelo Eurocódigo 9	44
4.3	Método de cálculo avançado	46
4.3.1	Vazios Internos	48
5	DISCUSSÃO DE RESULTADOS	53
5.1	Perfis não protegidos	53
5.2	Perfis protegidos	57
5.2.1	Lã de Rocha	64
6	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	69
6.1	Conclusões	69
6.2	Propostas de trabalhos futuros	70
7	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO	75
8	ANEXOS	81
8.1	Anexo 1	81
8.2	Anexo 2	104
8.3	Anexo 3	114
8.4	Anexo 4	115

INTRODUÇÃO

- 1.1 Considerações Iniciais
- 1.2 Motivação
- 1.3 Descrição dos Capítulos

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

Uma situação de incêndio constitui um perigo tanto para as estruturas como para a segurança dos seres vivos. Assim, as preocupações durante um incêndio são: a proteção do ser humano, a proteção dos bens presentes no edifício e a proteção do próprio edifício impedindo o desenvolvimento de novos incêndios e passagem para edifícios vizinhos [1]. É importante que as estruturas estejam preparadas para situações de incêndio e permitam evacuar o mais rápido possível as pessoas nela presentes. Estas quando sujeitas a uma situação de incêndio são submetidas a elevadas temperaturas e dependendo do seu nível de proteção poderão aumentar o tempo disponível de evacuação.

Ao longo da exposição ao fogo, os materiais podem ter um aquecimento mais retardado mediante as suas propriedades térmicas. Desta forma, torna-se importante a análise térmica dos diversos materiais, tendo em conta a variação da temperatura ao longo do tempo de exposição ao fogo.

O alumínio é um metal que tem como principal vantagem a sua baixa densidade e elevada resistência à corrosão, e por esse motivo tem diversas aplicações, como na indústria automóvel, aeronáutica, construção civil e maquinaria. A evolução da temperatura em estruturas de alumínio submetidas à ação do fogo é um fator revelante no seu dimensionamento. Uma vez que, numa situação de incêndio o mais importante é retardar o tempo de aquecimento da estrutura. Para esse fim, existem no mercado materiais referenciados como proteção passiva contra incêndio. A conjugação destes materiais, com os elementos de alumínio podem diminuir o aquecimento da estrutura.

1.2 Motivação

O estudo e o desenvolvimento de métodos de cálculo simplificado no protejo de engenharia torna-se cada vez mais importante, sobretudo de forma a facilitar o trabalho dos engenheiros e projetistas. No que respeita à proteção contra incêndio é fundamental conhecer o desenvolvimento da temperatura dos perfis ao longo da exposição, para consequentemente retirar conclusões sobre a resistência de um dado material a elevadas temperaturas.

Inicialmente, os estudos realizados tiveram por base a utilização de fornos onde os resultados eram obtidos experimentalmente. Estes ensaios foram revelantes no desenvolvimento de equações simplificadas que atualmente são apresentadas em regulamentação normativa. O avanço da tecnologia permitiu introduzir simulações através de programas computacionais preconizadas por métodos numéricos e desta forma, reduzir não só os custos associados como o tempo de obtenção de resultados. Assim, torna-se pertinente tanto o estudo dos métodos analíticos, como a comparação destes últimos com os métodos numéricos.

1.2.1 Objetivos

A realização deste trabalho tem por base a concretização de curvas de evolução da temperatura na secção reta transversal de perfis de alumínio submetidos à curva de incêndio ISO 834, de acordo com o Eurocódigo 1 Parte 1-2 [2]. Serão considerados perfis com diferentes geometrias: em I, retangular, retangular com reforço e em U.

Inicialmente, o objetivo prende-se em analisar os perfis em alumínio não protegidos submetidos à curva ISO 834. Esta análise será feita através da equação analítica preconizada pelo Eurocódigo 9 Parte 1-2 [3] e pelo método numérico, com o apoio do programa ANSYS®. O método numérico deverá ser validado pelo método analítico através da aproximação das curvas obtidas. Ainda nos perfis não protegidos pretende-se compreender a influência da geometria e consequentemente do fator de massividade de cada perfil ao longo da exposição ao fogo.

De seguida, o estudo irá incidir sobre as proteções dos perfis de alumínio, tanto proteção interna como externa. A avaliação do efeito da proteção nos perfis será realizada através da equação analítica preconizada pelo Eurocódigo 9 Parte 1-2 e pelo método numérico. Neste caso, pretende-se consolidar os dois métodos de cálculo e verificar possíveis limitações das equações simplificadas. Em caso da verificação de divergências serão executados ajustes à equação proposta pelo Eurocódigo 9 Parte 1-2 [3]. A influência da geometria dos perfis será dessa forma, novamente analisada.

Por fim, os resultados deverão ser discutidos e apresentados na sua totalidade nos anexos.

1.2.2 Metodologia

De forma a cumprir os objetivos enumerados será aplicado o método de trabalho apresentado na Tabela 1.1.

Tabela 1.1 – Metodologia de trabalho

Fase	Tópicos a Desenvolver
Fase Inicial – Estudo Prévio	<ul style="list-style-type: none"> • Revisão bibliográfica sobre segurança contra incêndio, importância do alumínio, artigos e estudos já realizados sobre aplicação dos vários métodos de cálculo; • Consolidação das propriedades dos materiais: ar, alumínio, gesso e lã de rocha; • Estudo dos processos de transferência de calor; • Análise das curvas de incêndio.
Desenvolvimento	<ul style="list-style-type: none"> • Cálculo da evolução da temperatura nos perfis não protegidos e protegidos através da equação simplificada – desenvolvimento de gráficos em <i>Excel</i>; • Cálculo da evolução da temperatura nos perfis não protegidos e protegidos através de método de elementos finitos com recurso ao programa <i>ANSYS</i>[®].
Conclusões	<ul style="list-style-type: none"> • Comparação entre o método numérico e método analítico; • Comparação da evolução de temperatura de diferentes valores de fator de massividade; • Apresentação dos gráficos de evolução de temperatura provenientes de todos os resultados obtidos.

1.3 Descrição dos Capítulos

A presente dissertação encontra-se desenvolvida em vários capítulos: introdução, revisão bibliográfica, perfis em alumínio não protegidos, perfis em alumínio protegidos, discussão de resultados, conclusões e propostas de trabalhos futuros, bibliografia e anexos.

O presente capítulo representa a introdução ao trabalho desenvolvido, onde é apresentada a motivação para o estudo deste tema, são definidos os objetivos e delineada a metodologia de trabalho.

O segundo capítulo referente à revisão bibliográfica inclui vários subtemas:

- Estado da arte – apresentação de trabalhos relevantes para a consolidação de metodologias anteriormente utilizadas;
- Propriedades dos materiais – neste subcapítulo será realizada uma abordagem às propriedades térmicas do alumínio, gesso, ar e lã de rocha;
- Transferência de calor – estudo das equações aplicadas nos processos de transferência de calor por condução, convecção e radiação;

- Curvas nominais de incêndio – exposição das curvas nominais de incêndio preconizadas pelo Eurocódigo 1 Parte 1-2 [2].

O terceiro capítulo representa uma abordagem aos perfis de alumínio não protegidos no que respeita ao cálculo da evolução da temperatura tanto pela equação simplificada preconizada pelo Eurocódigo 9 Parte 1-2 [3], como também pelo método numérico. No caso do método numérico é realizada uma descrição detalhada da aplicação do MEF no programa ANSYS®. Ainda neste capítulo é discutida a influência da modelação de vazios internos, no caso de perfis que apresentam cavidades derivadas da sua geometria.

O quarto capítulo inclui uma abordagem muito semelhante ao capítulo anterior, no entanto para o caso dos perfis protegidos. Os métodos de cálculo são descritos de acordo com a inserção de um material de proteção. De salientar, que é apresentada uma tabela que permite não só ter uma visão dos perfis e proteções que serão analisadas como também em quais situações serão realizadas comparações dos dois tipos de métodos de cálculo. Neste capítulo também é discutida a influência de vazios internos, tanto para perfis que possuem cavidades derivadas da sua geometria, como para perfis que formam cavidades provenientes da proteção em caixão.

O quinto capítulo apresenta a análise e a discussão dos resultados obtidos tanto para os perfis não protegidos como para os perfis protegidos. É realizada a comparação entre os métodos de cálculo utilizados e a influência da geometria e o fator de massividade dos perfis.

O sexto capítulo expõe as conclusões dos resultados obtidos e a consolidação dos mesmos com os objetivos pretendidos. Ainda serão apresentadas propostas de trabalhos futuros.

Os últimos capítulos incluem a revisão bibliográfica onde serão apresentadas as referências de artigos e outras fontes de informação de apoio à realização deste trabalho. Por último, os anexos compõem todos os resultados obtidos e são apresentados os códigos em linguagem APDL para as curvas de incêndio nominal aplicados no ANSYS®.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Estado da arte

2.2 Propriedades dos Materiais

2.3 Transferência de calor

2.4 Curvas de incêndio nominais

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Estado da Arte

No início do século dezanove (1807) Sir Humphry Davy sugeriu a possibilidade de isolar o elemento alumínio, no entanto apenas passados vinte anos Whoeler conseguiu determinar os primeiros resultados, e desta forma a produção do alumínio surgiu em 1886. A partir da década de cinquenta este material começou a ser utilizado em estruturas de engenharia como elemento competitivo em relação ao aço. Contudo, o desenvolvimento destas estruturas tornava-se cada vez mais difícil pela falta de recursos no que respeita a normativas e recomendações para o dimensionamento em alumínio. Assim, em 1987 o Comité ECCS T2 apresentou o primeiro regulamento ECCS Recommendations [4]. Atualmente, é utilizado o Eurocódigo 9 para o dimensionamento de estruturas em alumínio, apresentado em 2004 pelo Technical Committee CEN-TC 250/SC9, Mazzolani [4].

A utilização de ligas de alumínio como um material estrutural, tem aumentado nos últimos anos. Cerca de 25% da produção deste material é utilizada no setor da construção, isto porque permite a obtenção de perfis com secção complexa através do processo de extrusão, não sendo essas geometrias possíveis em outros materiais estruturais. No que diz respeito à sustentabilidade, o alumínio é um material que mantém um compromisso com as mudanças climáticas. Os mais recentes avanços tecnológicos levaram a inovações na produção, onde a energia necessária foi reduzida mais de 75% desde 1995 [5]. Acrescentando o facto de que estas ligas podem ser 100% recicláveis, traduzindo-se assim num impacto tanto a nível ambiental, como a nível económico [5].

Na década de 90, realizaram-se na Europa e no Reino Unido vários estudos sobre estruturas em situação de incêndio. Nomeadamente, em setembro de 1996, completou-se no Reino Unido, no *“Cardington Laboratory of the Building Research Establishment”*, uma série de testes à escala real em edifícios contruídos com diversos materiais [6]. O facto de submeterem estes edifícios à ação natural do fogo permitiu recolher dados para aplicação em programas computacionais, isto permitindo evoluir e melhorar o projeto de estruturas sob a ação de incêndio. A verdade, é que, após a realização destes testes, a comunidade científica obteve uma evolução nas normas e regulamentos de segurança contra incêndio [6].

Inúmeros modelos matemáticos de cálculo de estruturas expostas ao fogo têm vindo a ser desenvolvidos nos últimos anos, sendo que o importante para estes estudos é o

conhecimento das propriedades mecânicas e térmicas dos materiais a elevadas temperaturas [7].

Entre os anos 2006 e 2009, na Holanda, foram realizados dois estudos relacionados com estruturas de alumínio expostas ao fogo [8]. Estes estudos foram realizados de forma distinta, um teve como princípio um modelo tradicional e o outro como base no modelo *Fire Safety Engineering (FSE)*. O último método aplicado revelou-se o mais eficaz e aproximado da realidade, uma vez que aplicou o método de elementos finitos, enquanto o último aplicou equações simplificadas, baseadas na transferência de calor. Concluiu-se que em materiais como o alumínio, sensíveis à exposição do fogo, torna-se importante uma aproximação mais realista e pouco conservadora [8].

Em 2010, foi realizado um estudo por Fragiacom, Menis [9], cujo objetivo foi o estudo laminados em madeira *LVL (Laminated venner lumber)* com intenção de testar termicamente e mecanicamente várias placas de madeira com diferentes tipos de carregamento submetidas ao fogo. Inicialmente, realizaram testes experimentais e compararam as curvas de temperatura obtidas com a curva de incêndio nominal ISO 834. Com base nos resultados, obtiveram uma função linear para aproximar aos resultados a obter no Método de Elementos Finitos (MEF). O modelo numérico foi desenvolvido no programa *ABAQUS®*, para quatro valores diferentes de espessuras da secção transversal da placa em madeira, do exterior até ao centro da secção da placa. Os resultados obtidos revelaram-se um pouco diferentes dos obtidos experimentalmente, nomeadamente nas regiões mais próximas do centro da placa. Segundo os autores, isto justificou-se pelas grandes variações que existem na condução de calor da madeira e por esse motivo é importante a realização de novas pesquisas sobre a exposição da madeira ao fogo, a fim de obter resultados numéricos mais próximos da realidade.

Em 2019, Liu, Yang [10], analisaram experimentalmente e numericamente dezoito colunas de secção quadrada *STCRC (Steel tube confined reinforced concrete)*, em intervalos de 0, 45 e 90 minutos e com secções de 200 mm e 250 mm. As temperaturas por intervalo de tempo foram registadas nas várias camadas das colunas, primeiro num tubo de aço, depois na junção dos materiais aço e betão, e finalmente no betão. De maneira a aferir os resultados experimentais, desenvolveram um modelo de elementos finitos no programa *ABAQUS®*, e realizaram gráficos tempo-temperatura onde foi possível comparar os resultados experimentais e os numéricos. Isto, permitiu concluir que o método numérico desenvolvido, para este tipo de colunas, revelou-se eficaz, uma vez que a média entre as diferenças de temperatura foi de apenas 1,064 e um desvio padrão de 0,091. No que se refere à distribuição de temperaturas ao longo das colunas é possível concluir, pela análise dos gráficos apresentados, que quanto maior é o tempo de exposição ao fogo mais elevada é a temperatura máxima registada. Neste tipo de colunas, a variação de 45 minutos resultou num aumento de cerca 200°C. A espessura da coluna também influencia termicamente a estrutura. Quanto maior a espessura,

menor é a temperatura máxima, e por fim, o material que sofreu maior aquecimento foi o tubo de aço, uma vez que em relação ao betão apresenta uma condutibilidade térmica superior.

Em 2020, Perera, Poologanathan [11], focaram-se no estudo de estruturas em aço leve (*Ligth Steel Frame*) sobre a ação do fogo. De notar que, as estruturas LSF são constituídas por combinações de perfis de aço, placas de gesso e materiais de isolamento, como lã de rocha, fibras de vidro, fibras de celulose, entre outros. Assim, foi possível desenvolver vários tipos de estruturas dependendo da posição do isolamento. O presente estudo aborda seis configurações para o isolamento, pela colocação do isolamento no lado exposto ao fogo, ou no interior da estrutura de aço. Para o desenvolvimento das curvas de temperatura em função tempo, nas paredes sujeitas ao fogo, os autores utilizaram o método de elementos finitos no programa *ABAQUS* e realizaram a validação destes resultados com os testes experimentais realizados por Gunalan, Kolarkar [12]. Conseguiram concluir que a utilização de placas de gesso e de isolamento do lado exposto ao fogo, aumenta cerca de 150% a resistência a altas temperaturas, elevando a segurança contra incêndio destas estruturas.

Em 2020, Oliveira, Fonseca [13], realizaram uma análise comparativa entre o método simplificado proposto pelo Eurocódigo 3 Parte 1-2 [14] e o método da capacitância global aplicados a estruturas expostas ao fogo. Para esta análise foram considerados perfis tubulares em aço com secção IPE, HEM, L e UAP e expostos ao fogo em todos os lados considerando a curva nominal ISO 834. As curvas de temperatura em função do tempo obtidas para cada secção permitiram obter conclusões no que respeita aos métodos analíticos utilizados e às dimensões das secções analisadas. Em primeiro lugar, os resultados obtidos tanto para o método simplificado proposto pelo Eurocódigo 3 Parte 1-2 como para o método da capacitância global revelaram-se bastante próximos. Em último lugar, constatou-se que perfis com fator de massividade inferior serão aquecidos mais lentamente, e que quanto maior for a secção do perfil mais robusta deve ser a proteção de incêndio utilizada.

Em 2021, Xu, Li [15], propuseram um método de cálculo simplificado para a distribuição não-linear da temperatura em estruturas de aço protegidas por tinta intumescente. Este método aplica as equações de temperatura propostas pelo Eurocódigo 3 – parte 1-2 [14] e pelo código chinês para segurança contra incêndio em estruturas de aço, GB 51249-2017 [16]. Para a proteção de tinta intumescente, foi utilizado o modelo desenvolvido por Han, Li [17], que contempla três intervalos de temperatura em função da condutibilidade térmica. Em primeiro lugar compararam os valores obtidos numericamente com os valores experimentais, tanto da distribuição da temperatura ao longo do comprimento dos perfis, como da secção transversal, e realizaram curvas de temperatura em função do tempo. Em segundo lugar, avaliaram a máxima temperatura registada com a máxima resultante do modelo numérico. O estudo permitiu concluir que o método numérico desenvolvido pode ser aplicado em situações de estruturas

de aço protegidas por tinta intumescente sobre ação do fogo, uma vez que os resultados obtidos estão bastante próximos da realidade com variações de apenas 10% nas temperaturas máximas e 7,2% na média das distribuições de temperatura. O desenvolvimento da temperatura ao longo da mesma secção dos perfis apresentou uma variação mínima.

2.2 Propriedades dos Materiais

2.2.1 Alumínio

O Eurocódigo 9 Parte 1-2 [3] 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. Esta é considerada a temperatura de fusão do alumínio.

O estudo realizado apenas impõe a influência de temperatura, pelo que o material não irá sofrer perdas de massa, assim considerou-se a massa volúmica constante e com valor igual a 2700 kg/m³.

O calor específico C_{al} , representa a energia que o alumínio necessita para elevar um grau por metro cúbico [18]. A curva de calor específico em função da temperatura do alumínio é obtida pela equação da Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Variação do calor específico do alumínio em função da temperatura

Temperatura	Calor específico - C_{al} [J/kgK]
$0\text{ °C} < \theta_{al} < 500\text{ °C}$	$C_{al} = 0.41(\theta_{al}) + 903$

A aplicação da equação imposta pelo Eurocódigo 9 – Parte 1-2 [3] para o cálculo do calor específico, em função da temperatura, resulta no gráfico representado na Figura 2.1. O aumento de temperatura traduz-se numa variação ligeira do calor específico, sendo esta de 1015 J/kgK a 0 °C para sensivelmente 1220 J/kgK a 500 °C.

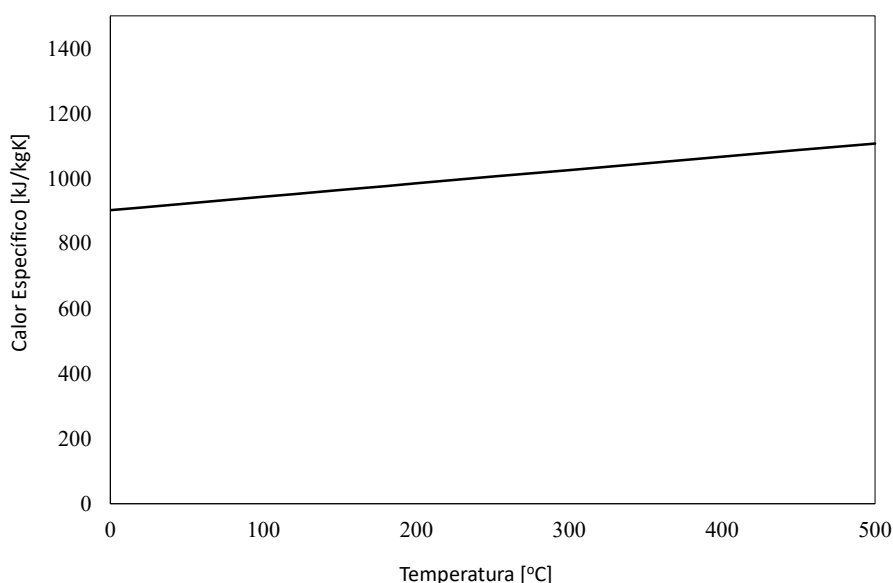


Figura 2.1 – Calor específico das ligas de alumínio em função da temperatura

A condutibilidade térmica é a propriedade termofísica que quantifica a habilidade dos materiais no processo de condução de calor. Assim, cada material possui valores específicos que dependem do nível de pureza e da temperatura a que são sujeitos [4].

Esta propriedade térmica é determinada em função da temperatura pelas equações apresentadas na Tabela 2.2. De notar que, a condutibilidade térmica varia de acordo com a série de liga do alumínio.

Tabela 2.2 - Variação da condutibilidade térmica do alumínio em função da temperatura

Série liga	Temperatura	Condutibilidade térmica – λ_{al} [W/mK]
Séries 3xxx e 6xxx	$0\text{ °C} < \theta_{al} < 500\text{ °C}$	$\lambda_{al} = 0,07(\theta_{al}) + 190$
Séries 5xxx e 7xxx	$0\text{ °C} < \theta_{al} < 500\text{ °C}$	$\lambda_{al} = 0,1(\theta_{al}) + 140$

O gráfico representado na Figura 2.2 resulta das equações analíticas apresentadas pelo Eurocódigo 9 – Parte 1-2 [3] e permite perceber que a condutibilidade térmica do alumínio aumenta à medida que aumenta a temperatura. 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. No entanto, a variação em função da temperatura é menor.

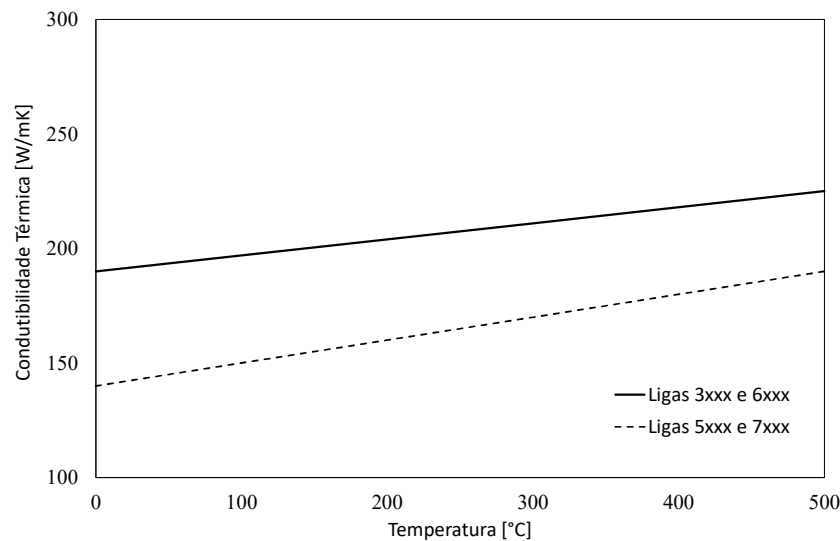


Figura 2.2 – Condutibilidade térmica do alumínio em função da temperatura

2.2.2 Gesso

Como mencionado anteriormente, o gesso é um material de proteção para estruturas expostas ao fogo. Assim, torna-se importante o estudo das suas propriedades térmicas. Este material também denominado por sulfato de cálcio, pode encontrar-se sobre a forma de sulfato de cálcio di-hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e desidratado (CaSO_4) [19]. O núcleo de gesso pode ser constituído por gesso natural, gesso industrial e/ou placas de gesso recicladas. A diferença entre o gesso natural e o gesso industrial está na sua cristalização, enquanto o processo natural dá-se pela evaporação da água. O processo industrializado consiste na utilização de um subproduto de limpeza de gases de combustão provenientes de centrais elétricas, sendo assim constituído por calcário misturado com água, ar e dióxido de enxofre [20]. Segundo norma BS 520:2004 [21], existem vários tipos de gesso entre os quais, o tipo A e o tipo F, ambos utilizados 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 [21]. Assim, este último revela-se ser o mais interessante para alvo de estudo no presente trabalho.

No que diz respeito às propriedades térmicas do gesso, existem algumas diferenças nos vários registos literários, essencialmente devido à sua porosidade, homogeneidade. Segundo o estudo realizado por Rahmanian and Wang [22], o calor específico do gesso tipo F, em função da temperatura, é dado pelo gráfico representado na Figura 2.3. O calor específico do gesso mantém-se praticamente constante no valor de $950 \text{ J/kg } ^\circ\text{C}$, apresentando apenas dois picos que estão diretamente relacionados com as perdas de massa do gesso [23]. Estes picos representam a energia consumida na dissociação e na

evaporação da água e incluem o movimento das moléculas de água e a condensação nas regiões mais frias do gesso. O primeiro pico registado entre os 100°C e os 170°C tem um valor de 25 kJ/kgK, e o segundo piso registado entre os 650°C e os 700°C tem um valor de 10 kJ/kgK.

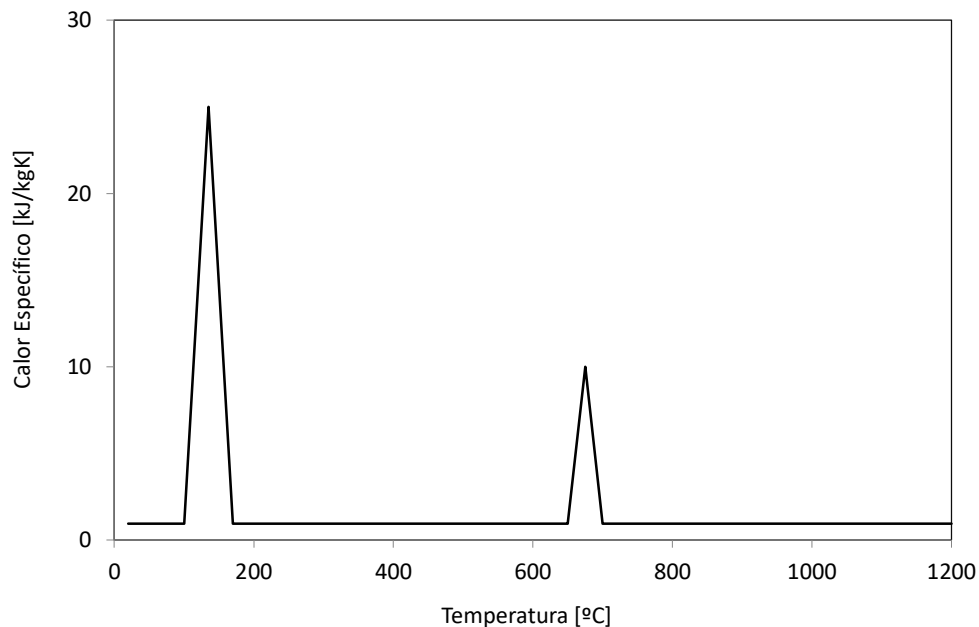


Figura 2.3 – Calor específico do gesso tipo F em função da temperatura

A condutibilidade térmica do gesso tipo F em função da temperatura é dada pelo gráfico da Figura 2.4. Os dados apresentados foram retirados do estudo realizado por Rahmanian and Wang [22], o autor desenvolveu um método numérico para o cálculo da condutibilidade térmica com base em vários testes experimentais considerando o gesso como um substrato sólido, as porosidades e a radiação nas cavidades.

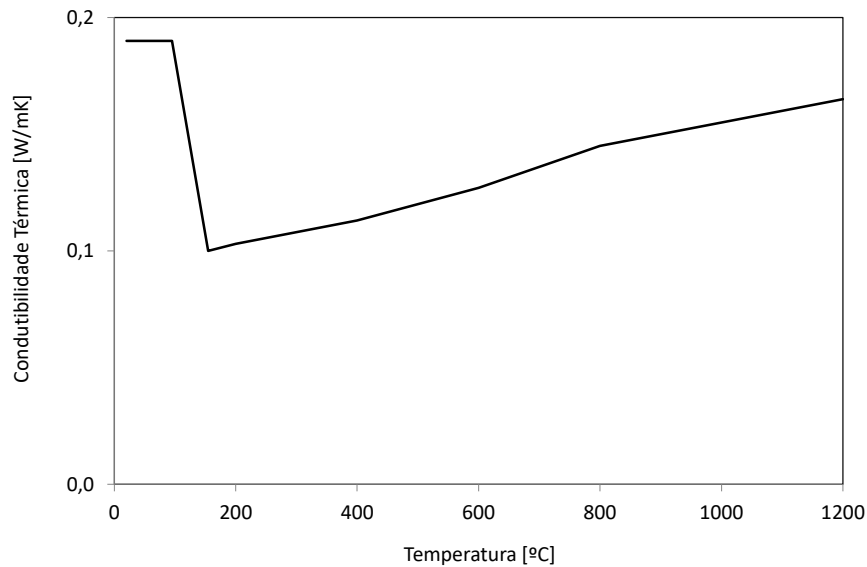


Figura 2.4 – Condutibilidade térmica do gesso tipo F em função da temperatura

Em 2010, Frangi, Schleifer [24], analisaram experimentalmente a variação de massa de painéis de gesso sujeitos a um aquecimento de 20°C por minuto. No final destes testes foi possível aferir a curva de densidade em função da temperatura para o gesso tipo F, representada na Figura 2.5. Pode ser considerado um valor de massa volúmica constante de 889 kg/m³, proposto inclusive neste mesmo estudo.

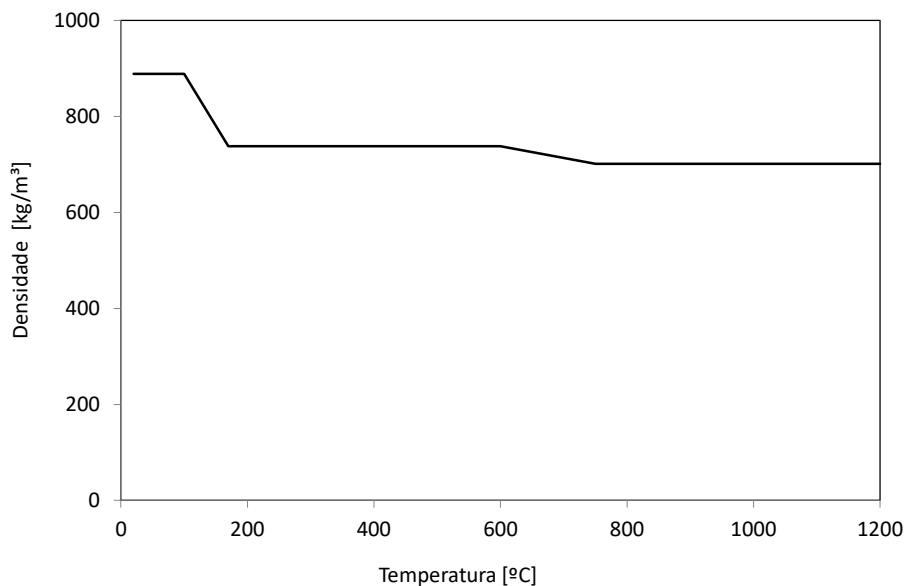


Figura 2.5 – Densidade do gesso tipo F em função da temperatura

Para a utilização das propriedades não lineares do gesso até ao 600°C, apresentadas em forma gráfica, serão necessárias formular as equações analíticas. Estas equações foram obtidas a partir dos gráficos de cada uma das propriedades em função da temperatura. O sistema de Equações 2.1 representa a condutividade térmica do gesso em função da temperatura.

$$\left\{ \begin{array}{ll} \lambda_p = 0,19 & 20^\circ\text{C} < \theta_p \leq 95^\circ\text{C} \\ \lambda_p = -0,0015\theta_p + 0,3325 & 95^\circ\text{C} \leq \theta_p \leq 155^\circ\text{C} \\ \lambda_p = 6,67 * 10^{-5}\theta_p + 0,0897 & 155^\circ\text{C} \leq \theta_p \leq 200^\circ\text{C} \\ \lambda_p = 5,00 * 10^{-5}\theta_p + 0,0930 & 200^\circ\text{C} \leq \theta_p \leq 400^\circ\text{C} \\ \lambda_p = 7,00 * 10^{-5}\theta_p + 0,0850 & 400^\circ\text{C} \leq \theta_p \leq 600^\circ\text{C} \end{array} \right. \quad (2.1)$$

O sistema de equações em 2.2 representa o calor específico do gesso em função da temperatura.

$$\left\{ \begin{array}{ll} C_p = 950 & 20^\circ\text{C} < \theta_p \leq 100^\circ\text{C} \\ C_p = 687,14\theta_p - 6,7764 * 10^4 & 100^\circ\text{C} \leq \theta_p \leq 135^\circ\text{C} \\ C_p = -687,14\theta_p + 1,1776 * 10^5 & 135^\circ\text{C} \leq \theta_p \leq 170^\circ\text{C} \\ C_p = 950 & 170^\circ\text{C} \leq \theta_p \leq 600^\circ\text{C} \end{array} \right. \quad (2.2)$$

Finalmente, o sistema de equações em 2.3 representa a massa volúmica em função da temperatura.

$$\left\{ \begin{array}{ll} \rho_p = 889 & 20^\circ\text{C} < \theta_p \leq 100^\circ\text{C} \\ \rho_p = -2,1590\theta_p + 1104,9 & 100^\circ\text{C} \leq \theta_p \leq 170^\circ\text{C} \\ \rho_p = 737,87 & 170^\circ\text{C} \leq \theta_p \leq 600^\circ\text{C} \end{array} \right. \quad [\text{kg/m}^3] \quad (2.3)$$

2.2.3 Ar

No seguimento do 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 pelo gesso, por exemplo, originam cavidades de ar no seu interior. Desta forma, para a realização de um estudo numérico e analítico poderá ser importante conhecer as propriedades térmicas do ar a serem consideradas.

A variação do calor específico do ar com a temperatura é entre os 1000 J/kgK e os 1200 J/kgK, como se verifica na Figura 2.6. Este valor aumenta pouco significativamente com o aumento da temperatura.

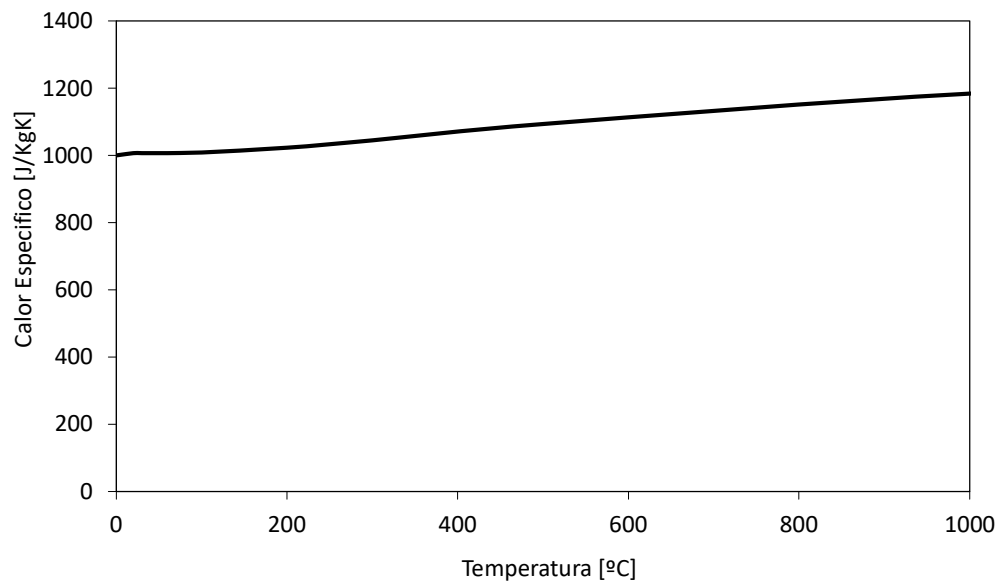


Figura 2.6 – Calor específico do ar em função da temperatura

A Figura 2.7 representa a variação da condutividade térmica com a temperatura. Tal como o calor específico, esta propriedade aumenta à medida que aumenta 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 alguma dificuldade na condução de calor.

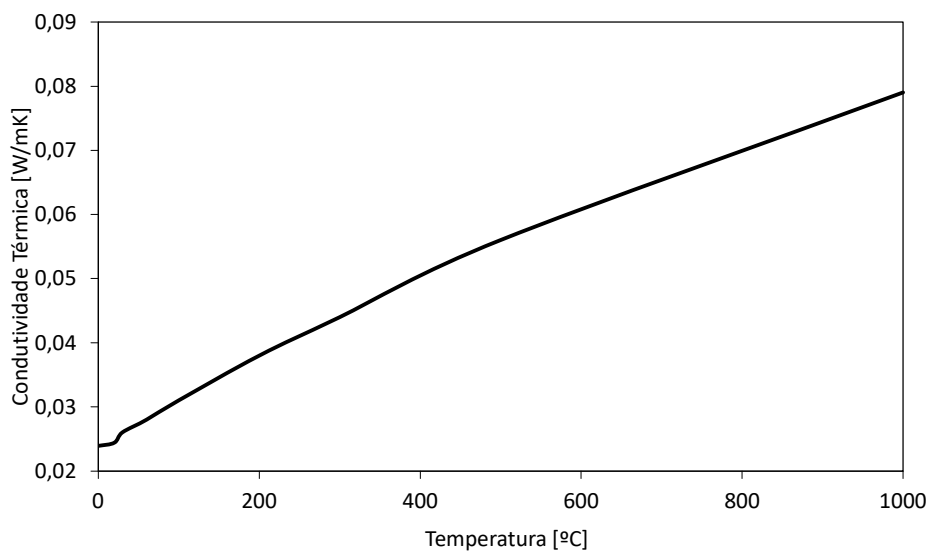


Figura 2.7 – Condutividade térmica do ar em função da temperatura

A massa volúmica do ar pela *Internacional Standard Atmospheric (ISA)* [25], apresenta um valor constante de $1,225 \text{ kg/m}^3$ ao nível do mar e a uma temperatura de 15°C . No entanto, a sua variação em função da temperatura é observada na Figura 2.8. É possível verificar um decréscimo de 1 kg/m^3 desta propriedade, com o aumento de temperatura.

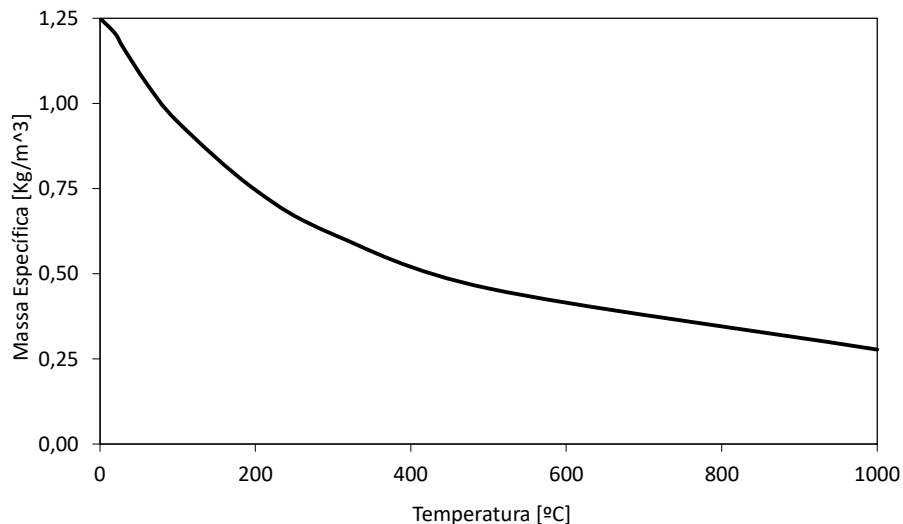


Figura 2.8 – Massa específica do ar em função da temperatura

2.2.4 Lã de Rocha

A lã de rocha é considerada um produto de isolamento com bastante excelência no que respeita ao revestimento térmico e acústico. Este produto pode apresentar resiliência a temperaturas superiores a 1000°C [26]. Existe no mercado uma grande variedade de produtos em lã de rocha consequentemente com variações das propriedades térmicas. Segundo o trabalho desenvolvido por German [27], as propriedades térmicas da lã de rocha podem considerar-se constantes, assim a Tabela 2.3 apresenta as propriedades térmicas da lã de rocha de acordo com alguns fabricantes.

De acordo com o fabricante Knaufinsulation existe um painel incombustível na reação ao fogo. Assim, serão aplicadas as propriedades térmicas deste painel presentes também na Tabela 2.3. Foi considerada uma emissividade igual a 0,9.

Tabela 2.3 – Propriedades térmicas da lã de rocha

Fabricante	Condutibilidade Térmica [W/mK]	Calor Específico [kJ/kgK]	Massa Volúmica [kg/m ³]
PAROC	0,043	0,78	85
ROCKWOOL	0,045	0,82	90
Knaufinsulation	0,048	0,81	85
TechnoNicol	0,047	0,79	81-99
Knaufinsulation – Painei incombustível na reação ao fogo	0,035	1,030	90

2.3 Transferência de calor

De uma forma simplificada pode definir-se a transferência de calor como a energia térmica em movimento devido a uma diferença de temperaturas no espaço. Isto significa que, quando existem diferenças de temperaturas num meio, haverá necessariamente, transferência de calor [28].

A análise do comportamento da temperatura num elemento estrutural pode ser subdividida em duas partes. Por um lado, dá-se a transferência de calor através da fronteira de um fogo até à superfície da estrutura por combinação de convecção e radiação. Por outro lado, dá-se a transferência de calor no interior do membro estrutural, denominada por condução de calor, traduzida pela equação de Fourier [29]. Assim, no decorrer de um incêndio estão envolvidos três mecanismos de transferência de calor: condução, convecção e radiação, que serão analisados de seguida.

2.3.1 Transferência de calor por condução

A condução é um processo de transferência de calor que se desenvolve ao nível atómico e molecular, ou seja, é a interação entre partículas que possuem maior nível de energia cinética com partículas que possuem menor nível de energia cinética. Esta interação traduz-se na presença de um gradiente de temperatura, que deve ocorrer no sentido da temperatura mais elevada para a menos elevada [28].

A energia transferida pelo mecanismo de condução pode ser quantificada por unidade de tempo. Segundo a lei de Jean Fourier, a quantidade de calor transferida por condução por unidade de área, é proporcional ao gradiente de temperatura, comprovado pela Equação 2.4 [30].

$$Q = -\lambda A \frac{\partial \theta}{\partial x} \quad (2.4)$$

Em que:

λ – Condutividade térmica [W/mK];

A – Área da secção transversal da qual ocorre a transferência [m²];

$\partial\theta/\partial x$ – Gradiente de temperatura [K/m]

Da Equação 2.4 é possível deduzir que o sinal negativo na condutividade térmica do material comprova a segunda lei da termodinâmica. O fluxo de calor, pode também ser determinado por esta equação, uma vez que traduz a quantidade de calor por unidade de área [30].

A lei fundamental de Fourier aplica-se à condução de calor num sólido de uma dimensão. No entanto, quando se trata de mais que uma dimensão é necessário considerar a transferência de calor em três sistemas de coordenadas. Esta relação é apresentada pela Equação 2.5, para um material isotrópico.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + Q = \rho c_p \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (2.5)$$

Em que:

Q – Calor gerado no interior do sólido [W];

ρ – Massa volúmica [kg/m³]

c_p – Calor específico [J/kgK]

No caso de a condutividade térmica ser constante aplica-se a Equação 2.6, onde α representa a difusibilidade térmica do material.

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} + \frac{Q}{\lambda} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (2.6)$$

2.3.2 Transferência de calor por convecção

O mecanismo de transferência de calor por convecção engloba dois fenômenos diferentes. Em primeiro lugar, a difusão, ou seja, a presença de um gradiente de temperatura dentro do fluido que provoca movimento molecular. Em segundo lugar, a transferência de energia dentro do fluido que provoca a sua movimentação macroscópica [31]. Existem dois processos de convecção: natural e forçada. Quando não existe interferência de qualquer equipamento externo na movimentação de um fluido, e apenas existe movimento devido à diferença de temperatura, denomina-se de convecção natural. Já a convecção forçada, como o próprio nome indica, é imposto o movimento do fluido por meio de um equipamento, como uma bomba ou ventilador, ou até mesmo situações de incêndio e explosões [30].

A quantidade de calor transferido por convecção é obtida pela Equação 2.7, referente à lei de arrefecimento proposta por Isaac Newton.

$$Q_{conv} = h_c A (\theta - \theta_\infty) \quad (2.7)$$

Em que:

Q_c – Quantidade de calor transferida por convecção [W];

h_c – Coeficiente de transferência de calor por convecção [W/m^2K];

A – Área da superfície perpendicular à interface sólido-fluido [m^2]

θ – Temperatura da superfície;

θ_∞ - Temperatura do fluido.

2.3.3 Transferência de calor por radiação

O processo de transferência de calor por radiação, pode estar automaticamente associado à transferência de energia solar. No entanto, quando se fala em transferência de calor por radiação, este engloba toda a transmissão calorífica por ondas eletromagnéticas, o que inclui a combustão (incêndios, fornos, foguetes, motores), e reações nucleares (energia solar, energia de fusão, bombas nucleares) [32]. Contrariamente ao processo de condução e convecção, a transferência por radiação não necessita de um meio para se propagar, o calor pode ser transmitido por vácuo. A termodinâmica considera um corpo negro como uma superfície ideal, uma vez que absorve toda a radiação eletromagnética que nele incide, e a quantidade de radiação emitida é proporcional ao produto da área pela quarta potência da temperatura [30].

No caso de um corpo real, a transferência de calor por radiação é dada pela Equação 2.8.

$$Q_{rad} = h_r A (\theta_1 - \theta_2) \quad (2.8)$$

Em que, o coeficiente de transmissão de calor por radiação (h_r) é função da equação 2.9.

$$h_r = \varepsilon \sigma (\theta_1 + \theta_2) (\theta_1^2 + \theta_2^2) \quad (2.9)$$

Em que,

ε - Emissividade de um corpo, valor compreendido entre 0 e 1;

σ – Constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$);

θ_1 – Temperatura corpo 1 [K];

θ_2 – Temperatura corpo 2 [K];

Em suma, tanto o processo de transferência de calor por radiação, como por convecção, são fundamentais no estudo de estruturas em situação de incêndio. Estes mecanismos representam a transferência de calor das chamas e do fumo para os elementos estruturais [29]. Desta forma, a quantificação de energia transferida pela junção destes dois fenómenos é obtida pela Equação 2.10.

$$Q_{total} = Q_{rad} + Q_{conv} = h_c A (\theta - \theta_\infty) + \varepsilon A \sigma (\theta_1^4 + \theta_2^4) \quad (2.10)$$

2.4 Curvas de incêndio nominais

As curvas de incêndio nominais são expressões analíticas de temperatura em função do tempo de incêndio decorrido. Estas curvas denominam-se de nominais, uma vez que não representam situações de fogo real, sendo consideradas convencionais ou arbitrárias. Deste modo, a resistência de uma estrutura submetida a uma curva de incêndio nominal não deve ser comparada à duração necessária de evacuação ou de intervenção [29]. Os três modelos de curvas nominais propostos pelo Eurocódigo 1 – Parte 1-2 [2]: a curva ISO 834, a curva para Elementos Exteriores e a curva de Hidrocarbonetos.

A curva ISO 834, é a métrica de resistência ao fogo utilizada globalmente. A sua principal vantagem reside na simplicidade de aplicação e na vasta experiência em ensaios de

avaliação de desempenho de estruturas e materiais de construção. Porém, esta curva apresenta algumas limitações, nomeadamente o facto de não considerar as fases de arrefecimento [33].

A norma ISO 834-1:1999 [34], serviu de base para o desenvolvimento da curva de incêndio padrão do Eurocódigo 1 Parte 1-2 [2]. A temperatura em função do tempo é dada pela Equação 2.11 e graficamente pela Figura 2.11.

$$\theta_g(t) = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1) \quad (2.11)$$

A curva para elementos exteriores, é utilizada para os elementos externos de um edifício, encontrando-se independentes das paredes externas. Por exemplo, fachadas em ferro e vidro (Figura 2.9) onde o incêndio pode desenvolver-se no exterior do edifício e as chamas transpor as janelas do edifício. Esta curva, não deve ser aplicada a estrutura externas que serão alvo de suporte de carga, como vigas e colunas.



Figura 2.9 – Edifícios com elementos exteriores – EXEO Office Campus em Lisboa (em construção) [35].

De acordo com o Eurocódigo 1 Parte 1-2 [2], o desenvolvimento da temperatura dos gases quentes, em função do tempo, é dado pela Equação 2.12 e graficamente pela Figura 2.11.

$$\theta_g(t) = 20 + 600(1 - 0,687e^{-0,32t} - 0,313e^{-3,8t}) \quad (2.12)$$

A curva de incêndio de hidrocarbonetos, é especialmente utilizada em projetos de túneis e ambientes industriais. A carga associada a este tipo de incêndios é composta por hidrocarbonetos, isto é, elementos químicos constituídos essencialmente por carbono e hidrogénio combinados com átomos de oxigénio, nitrogénio e enxofre, exemplo de

petróleo, gás natural, óleo mineral, plásticos, ceras, solventes e óleos derivados [36]. A Figura 2.10 apresenta alguns exemplos de incêndios dirigidos por esta curva.



(a)



(b)

Figura 2.10 – a) Incêndio *World Trade Center* [37]; b) Incêndio *Deepwater Horizon* [38]

Segundo o Eurocódigo 1 Parte 1-2 [2], a temperatura dos gases ao longo do tempo de um incêndio é dada pela Equação 2.13 e graficamente pela Figura 2.11.

$$\theta_g(t) = 20 + 1080(1 - 0,325e^{-0,167t} - 0,675e^{-2,5t}) \quad (2.13)$$

As curvas de incêndio encontram-se na Figura 2.11, onde é possível realizar comparações em relação à evolução da temperatura em função do tempo de aquecimento dos elementos estruturais. A curva de hidrocarbonetos apresenta um aumento drástico da temperatura dos gases em relação à curva ISO 834, isto porque a temperatura média da superfície da chama durante a combustão de hidrocarbonetos atinge rapidamente os 1000°C [39].

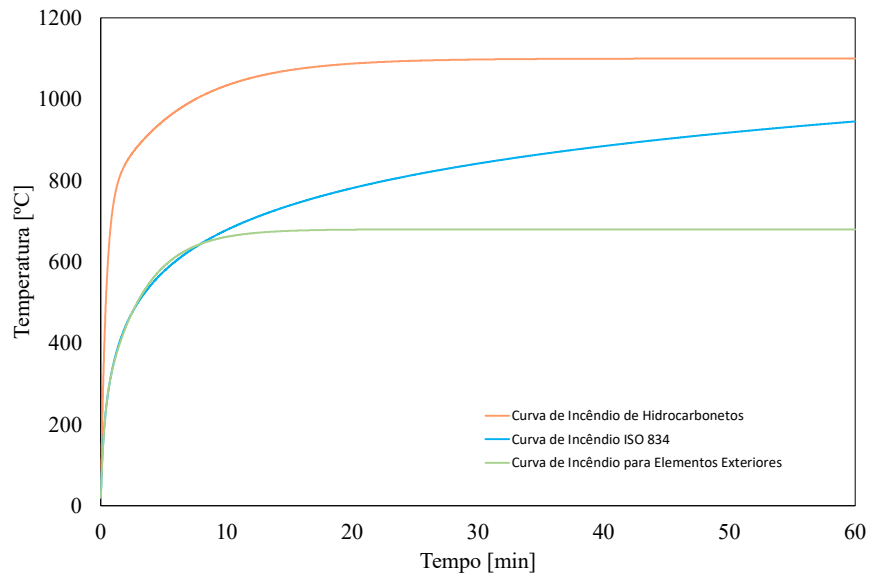


Figura 2.11 – Representação gráfica das curvas de incêndio nominais

PERFIS EM ALUMÍNIO NÃO PROTEGIDOS

3.1 Introdução

3.2 Método Simplificado Proposto pelo Eurocódigo 9

3.3 Método de cálculo avançado

3.4 Aplicação do método numérico no ANSYS®

3 Perfis em alumínio não protegidos

3.1 Introdução

Uma situação de incêndio provoca nas estruturas um aumento de temperatura, que por sua vez resulta num decréscimo da resistência dos materiais que a compõe. Isto é, os componentes estruturais, durante a exposição ao fogo, apresentam uma perda de rigidez e resistência com o aumento da temperatura. Desta forma, torna-se importante o estudo da distribuição de temperatura em função do tempo de exposição do fogo. No contexto numérico, esta avaliação pode ser realizada em duas fases: análise térmica e análise estrutural, que se interligam. A análise térmica permite a determinação da distribuição de temperaturas na secção transversal de um perfil. O tempo de exposição ao fogo revela-se importante nesta análise, uma vez que para cada instante, na estrutura afetada, ocorre uma variação das propriedades do material em função do aumento da temperatura.

O desenvolvimento de curvas de tempo-temperatura pode ser obtido tanto por métodos simplificados, como métodos de cálculo avançado. São exemplos de métodos simplificados no cálculo de perfis de alumínio submetidos ao fogo, as equações propostas pelos Eurocódigos 1 e 9 Partes 1-2 [2]-[3] e o Método da Capacitância Global, que permitem a aplicação de equações com base na transferência de calor. Com base nestes modelos de cálculo, resulta o valor da temperatura a que uma secção reta de um perfil está sujeita sob a ação do fogo, em função do tempo [40].

Os métodos de cálculo avançado têm por base, idealmente, o MEF. Estes métodos possibilitam a obtenção das curvas de temperaturas, em função do tempo, com elevada exatidão. Os resultados são obtidos através da utilização das equações de transferência de calor aplicadas ao MEF, com recurso a meios computacionais.

O presente trabalho, tem por base o estudo das equações simplificadas propostas pelos Eurocódigos 1 e 9 partes 1-2 [2]-[3], e a revisão bibliográfica de métodos de cálculo avançado, para que posteriormente sejam aplicados e comparados os seus resultados.

3.2 Método simplificado proposto pelo Eurocódigo 9

Os Eurocódigos são normas, aplicadas na Europa, que têm por objetivo uniformizar o dimensionamento de estruturas e projetos de engenharia. O Eurocódigo 9 reúne vários documentos com normas a serem aplicadas a estruturas de alumínio. O Eurocódigo 9 consiste num documento com regras gerais e por sua vez partes associadas a este documento base. No caso da segurança contra incêndios é aplicado o Eurocódigo 9 Parte 1-2 [3]. Este documento engloba o conjunto de regras para o dimensionamento, tanto a nível térmico como mecânico de estruturas de alumínio [4].

De acordo com o Eurocódigo 9 parte 1-2 [3], a Equação 3.1 preconiza a variação da temperatura num perfil de alumínio não protegido ao longo de um intervalo de tempo, Δt .

$$\Delta\theta_{al}(t) = k_{sh} \frac{A_m/V}{c_{al}\rho_{al}} \dot{h}_{net}\Delta t \quad (3.1)$$

Em que:

$\Delta\theta_{al}$ – 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 [m^{-1}];

c_{al} – Calor específico alumínio, de acordo com subcapítulo 2.2 do relatório [J/kgK];

ρ_{al} – Densidade do alumínio, de acordo com subcapítulo 2.2 do relatório [kg/m³];

\dot{h}_{net} – Fluxo de calor por unidade de área [W/m²], dado por Eurocódigo 1 Parte-1-2 [2];

Δt - Intervalo de tempo [s].

O fator de correção para o efeito de sombra tem como função corrigir o fator de massividade tendo em conta as zonas que não são diretamente expostas ao fogo, aplicável especialmente a secções côncavas. Este fator pode ser calculado pelas Equações 3.2 e 3.3, de acordo com Eurocódigo 9 Parte 1-2 [3].

$$k_{sh} = 0,9 \frac{(A_m/V)_b}{(A_m/V)} \quad (3.2)$$

$$k_{sh} = \frac{(A_m/V)_b}{(A_m/V)} = 1 \quad (3.3)$$

Onde, $(A_m/V)_b$ representa o fator de massividade no caso de um perfil protegido em caixa. Devido às zonas côncavas abordadas anteriormente, a Equação 3.2 é aplicável a secções I, e a equação 3.3 é aplicável às restantes secções.

O Eurocódigo 9 Parte 1-2 [3], sugere que para secções tubulares retangulares e circulares o fator de sombra seja igual à unidade. No entanto, a mesma norma sublinha que ao realizar-se esta consideração podem obter-se resultados conservativos.

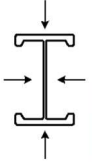
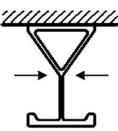
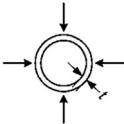
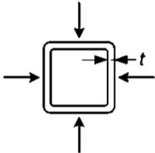
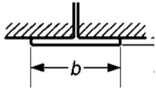
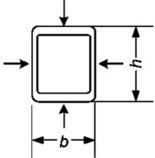
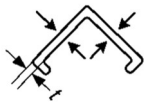
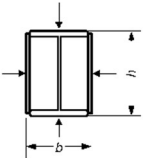
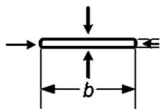
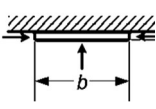
O fator de massividade, também conhecido como fator de forma, corresponde à relação entre a área exposta ao fogo da superfície do perfil pelo comprimento, A_m , e o seu volume, V . O Eurocódigo 9-1-2 [3], propõe o cálculo deste fator através das fórmulas apresentadas na tabela 3.1. As fórmulas são apresentadas para diferentes tipos de perfil e exposições ao fogo. A norma restringe o valor de forma para um máximo de 10 m^{-1} , e expõe ainda que perfis com entalhes superiores a 20 mm devem ser incluídos no cálculo da área de exposição ao fogo, A_m .

Ainda assim, por análise da Tabela 3.1, é possível concluir uma certa limitação das secções de perfis apresentadas. Desta forma, para barras prismáticas, a expressão que representa o fator de massividade (A_m/V) , pode ser simplificada de acordo com a Equação 3.4 [40].

$$\frac{A_m}{V} = \frac{P \times L}{A \times L} = \frac{P}{A} \text{ (m}^{-1}\text{)} \quad (3.4)$$

Onde L representa o comprimento da barra, e o fator de massividade é dado pela relação entre o perímetro da secção exposta ao fogo, P , e a área da secção A exposta ao fogo.

Tabela 3.1 – Fator de massividade (A_m/V) para perfis não protegidos expostos ao fogo de acordo com Eurocódigo 9 – Parte 1-2 [3].

<p>Secção aberta exposta ao fogo em todos os lados</p>	<p>Secção aberta exposta ao fogo em três lados</p>
 $\frac{A_m}{V} = \frac{\textit{perimetro}}{\textit{área secção transversal}}$	 $\frac{A_m}{V} = \frac{\textit{superfície exposta ao fogo}}{\textit{área secção transversal}}$
<p>Tubo exposto ao fogo em todos os lados</p>	<p>Secção tubular (ou secção soldada de espessura uniforme) exposta ao fogo em todos os lados</p>
 $\frac{A_m}{V} = \frac{1}{t}$	 <p>Se $t \ll b$: $\frac{A_m}{V} \approx \frac{1}{t}$</p>
<p>Banzo de secção I exposta ao fogo em três lados</p>	<p>Secção em caixa exposta ao fogo em todos os lados</p>
 $\frac{A_m}{V} = \frac{b + 2t_f}{bt_f}$ <p>Se $t \ll b$: $\frac{A_m}{V} \approx \frac{1}{t_f}$</p>	 $\frac{A_m}{V} = \frac{2b + h}{\textit{área secção transversal}}$
<p>Cantoneira (ou qualquer secção de espessura uniforme) exposta ao fogo em todos os lados</p>	<p>Secção I reforçada exposta ao fogo em todos os lados</p>
 $\frac{A_m}{V} = \frac{2}{t}$	 $\frac{A_m}{V} = \frac{2b + h}{\textit{área secção transversal}}$
<p>Barra plana exposta ao fogo em todos os lados</p>	<p>Barra plana exposta ao fogo em três lados</p>
 $\frac{A_m}{V} = \frac{2b + 2t}{bt}$ <p>Se $t \ll b$: $\frac{A_m}{V} \approx \frac{2}{t}$</p>	 $\frac{A_m}{V} = \frac{b + 2t}{bt}$ <p>Se $t \ll b$: $\frac{A_m}{V} \approx \frac{1}{t}$</p>

O fluxo de calor por unidade de área, \dot{h}_{net} de acordo com o Eurocódigo 1 Parte 1-2 [2] corresponde à soma da transferência de calor por convecção $\dot{h}_{net,c}$, com a transferência de calor por radiação $\dot{h}_{net,r}$, tal como apresentado na equação 3.5.

$$\dot{h}_{net} = \dot{h}_{net,c} + \dot{h}_{net,r} \quad [\text{W/m}^2] \quad (3.5)$$

A transferência de calor por convecção é dada pela Equação 3.6, também proposta por Eurocódigo 1 Parte 1-2 [2].

$$\dot{h}_{net,c} = \alpha_c (\theta_g - \theta_m) \quad [\text{W/m}^2] \quad (3.6)$$

Onde,

α_c – Coeficiente de transferência de calor por convecção [$\text{W/m}^2\text{K}$];

θ_g - Temperatura dos gases na proximidade do elemento exposto ao fogo [$^{\circ}\text{C}$];

θ_m – Temperatura da superfície do elemento [$^{\circ}\text{C}$].

O coeficiente de transferência de calor por convecção quando a superfície é exposta ao fogo depende das curvas de incêndio nominais apresentadas no subcapítulo 2.4 do presente relatório e os seus valores são indicados na Tabela 3.2. No caso de superfícies não expostas ao fogo, o Eurocódigo 1 Parte 1-2 [2] propõe um valor de 4 [W/m^2] quando se admite apenas a transferência de calor por convecção, e um valor de 9 [W/m^2] quando se inclui os efeitos de transferência de calor por radiação.

Tabela 3.2 – Coeficientes de transferência de calor em superfícies expostas ao fogo

Curva ISO 834	$\alpha_c = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$
Curva para elementos exteriores	$\alpha_c = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$
Curva de hidrocarbonetos	$\alpha_c = 50 \text{ W/m}^2\text{K}$

De acordo com o Eurocódigo 1 Parte 1-2 [2], a transferência de calor por radiação, por unidade de área de superfície, é obtida pela equação 3.7.

$$\dot{h}_{net,r} = \Phi \varepsilon_f \varepsilon_m \sigma [(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4] \quad [\text{W/m}^2] \quad (3.7)$$

Em que,

Φ – Fator de vista;

ε_f – Emissividade do fogo, geralmente igual à unidade;

ε_m – Emissividade da superfície do elemento, de acordo com o Eurocódigo 9 Parte 1-2 [3], a emissividade do alumínio, para uma superfície não protegida, é igual a 0,3;
 σ – Constante de Stephan Boltzman ($5,67 \times 10^{-8}$ [W/m²K⁴]);
 θ_r – Temperatura de radiação efetiva do ambiente de incêndio [°C];
 θ_m – Temperatura da superfície do elemento [°C];

O fator de vista, pode ser calculado pelo anexo G do Eurocódigo 1 Parte 1-2 [2], no entanto o mesmo propõe que este fator seja considerado igual à unidade. No caso de elementos totalmente expostos ao fogo, a temperatura de radiação efetiva poderá ser considerada igual à temperatura dos gases θ_g .

Por fim, de acordo com o Eurocódigo 9 Parte-1-2 [3], o intervalo de tempo aplicável ao cálculo da variação de temperatura, não deve ser superior a cinco segundos, sendo que acima deste valor poderá inviabilizar os resultados obtidos.

3.3 Método de cálculo avançado

Os métodos de cálculo avançado, utilizados em projetos de engenharia permitem obter resultados com boa exatidão para elevados níveis de complexidade. Estes métodos de cálculo estão, geralmente associados a modelos numéricos, como o Método de Elementos Finitos (MEF).

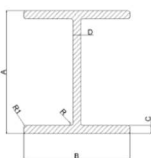
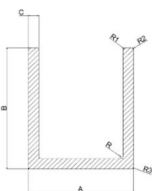
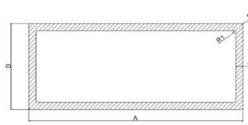
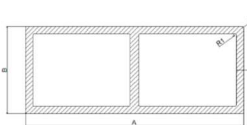
Como referido, o cálculo por modelos numéricos exige o recurso a meios computacionais. O ANSYS® e o ABAQUS® são exemplos de programas de elevado desempenho presentes no mercado, e que permitem, neste caso, a análise térmica de estruturas e elementos isolados expostos ao fogo em regime transiente. Em primeiro lugar, a grande vantagem associada às simulações computacionais é a diminuição significativa de ensaios experimentais. O crescente trabalho de investigação neste ramo tem vindo a comprovar os benefícios da aplicação destes métodos, sendo de realçar a investigação e a constante publicação de artigos científicos nesta área, [13, 40-42]. Em segundo lugar, os métodos de cálculo avançado, permitem tanto o estudo de uma estrutura global, como das suas partes integrantes, onde haverá necessidade em determinar condições fronteira que se consideram constantes ao longo do incêndio. Por último, estes programas permitem ainda a simulação de elementos estruturais isolados, sem que se considere qualquer interação entre eles [41].

O MEF é um método numérico que preconiza diferentes fenómenos físicos e que poderá ter vários níveis de sofisticação dependendo do problema a que se destina. De uma forma geral, existem vários parâmetros que afetam a qualidade dos resultados obtidos e que por esse motivo, exigem especial atenção por parte de quem está a efetuar os cálculos. A caracterização da malha de elementos finitos, o tipo e o grau de interpolação do elemento, e a escolha de critérios de convergência de acordo com a não linearidade do problema, são fatores a ter em conta no desenvolvimento do cálculo pelo MEF [43].

Desta forma, o modelo térmico será desenvolvido com vista a determinar os campos de temperatura em regime transiente tendo em consideração a variação não linear do comportamento do material, de acordo com as propriedades térmicas apresentadas anteriormente. Este modelo numérico tem por base a equação de condução de calor (Equação 3.8) [44].

Neste trabalho, o estudo de perfis de alumínio não protegidos, incidirá sobre as secções apresentadas na Tabela 3.3, para a situação de exposição ao fogo em todos os lados e de acordo com a curva nominal de incêndio ISO 834.

Tabela 3.3 – Perfis de alumínio não protegidos submetidos ao fogo (figuras de elaboração própria)

Perfil I	Perfil U	Perfil Retangular	Perfil Retangular com reforço
			

3.3.1 Equação Diferencial de Condução de Calor e Condições Fronteira

Tal como mencionado anteriormente, a determinação do campo de temperaturas dá-se através da equação diferencial de condução de calor, apresentada na Equação 3.8.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) = \rho c_p \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (3.8)$$

A equação diferencial de condução de calor tem de satisfazer as condições iniciais, que representam a distribuição de temperaturas no sólido no instante inicial e as condições e de fronteira, que são as temperaturas ou fluxos prescritos na superfície do material.

Existem dois tipos de condições fronteira: essenciais (condição de Dirichelet) e naturais (condição de Newman), que correspondem a um fluxo de calor prescrito posição da fronteira. Estas condições naturais podem corresponder à transferência de calor por convecção, à transferência de calor por radiação ou à transferência de calor simultânea por convecção e por radiação [45].

3.3.2 Aplicação do método de elementos finitos à equação de condução de calor

A aplicação do método de elementos finitos à equação de condução de calor consiste na divisão do domínio Ω em subdomínios ou elementos finitos Ω^e . À equação diferencial de calor e às condições fronteira é aplicado o método dos resíduos pesados. Por último, é realizada a discretização no espaço através do método de Galerkin, assim é obtido o sistema de equações global bidimensional para o domínio Ω , apresentado na Equação 3.9. Uma vez que, na presente dissertação, serão estudados domínios bidimensionais não foi considerado a direção z .

$$K\theta + C\dot{\theta} = F \quad (3.9)$$

Em que:

$$K_{ij} = \sum_{\theta=1}^E \int_{\Omega^e} \left[\frac{\partial N_i}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial N_j}{\partial x} \right) + \frac{\partial N_i}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial N_j}{\partial y} \right) \right] d\Omega^e + \sum_{\theta=1}^n \int_{\Gamma_{h^e}} h_{cr} N_i N_j d\Gamma_h^e, \quad 1 \leq i, j \leq m \quad (3.10)$$

$$C_{ij} = \sum_{\theta=1}^E \int_{\Omega^e} \rho c_p N_i N_j d\Omega^e, \quad 1 \leq i, j \leq m \quad (3.11)$$

$$F_{ij} = \sum_{\theta=1}^E \int_{\Omega^e} N_i \dot{Q} d\Omega^e - \sum_{\theta=1}^n \int_{\Gamma_{h^e}} N_i \bar{q} d\Gamma_q^e + \sum_{\theta=1}^p \int_{\Gamma_{h^e}} N_i h_{cr} \theta_{\infty} d\Gamma_h^e, \quad 1 \leq i, j \leq m \quad (3.12)$$

Onde n é o número de elementos que constituem fronteira do tipo Γ_h e p é o número de elementos que constituem fronteira do tipo Γ_q .

De forma a avançar a solução do sistema de Equações Diferenciais 3.9 é necessário adotar uma discretização no tempo. Esta discretização resulta na seguinte fórmula de recorrência:

$$\hat{K}_{n+\alpha} + \theta_{n+\alpha} = \hat{F}_{n+\alpha}, \quad 0 < \alpha \leq 1 \quad (3.13)$$

Onde:

$$\hat{K}_{n+\alpha} = K_{n+\alpha} + \frac{C_{n+\alpha}}{\alpha\Delta t} \quad (3.14)$$

$$\hat{F}_{n+\alpha} = F_{n+\alpha} + \frac{C_{n+\alpha}}{\alpha\Delta t} \theta_n \quad (3.15)$$

O sistema de Equações 3.13 é resolvido, para $\theta_{n+\alpha}$, no instante $t_{n+\alpha}$. Assim, o campo de temperaturas no final do intervalo de tempo é dado pela Equação 3.16.

$$\theta_{n+\alpha} = \frac{\theta_{n+\alpha}}{\alpha} + \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) \theta_n \quad (3.16)$$

A variação do parâmetro α resulta em vários esquemas de integração no tempo. Os esquemas mais usuais correspondem a $\alpha=1/2$ (Crank-Nicolson), $\alpha=2/3$ (Galerkin) e $\alpha=1$ (Euler Backward). Cada sistema possui as suas características de convergência, previsão e estabilidade [45].

3.3.3 Processo iterativo para problemas não-lineares

O alumínio é um material que possui propriedades térmicas não lineares, por este motivo a Equação 3.9 é reescrita na Equação 3.17.

$$K_{(\theta,t)}\theta(t) + C_{(\theta,t)}\dot{\theta}(t) = F_{(\theta,t)} \quad (3.17)$$

Variando as matrizes K, C e F no intervalo de tempo Δt , em função da temperatura θ , e do tempo t, as mesmas são obtidas para o instante de tempo $t_{n+\alpha}$:

$$K_{n+\alpha} = K(\theta_{n+\alpha}, t_{n+\alpha}) \quad (3.18)$$

$$C_{n+\alpha} = C(\theta_{n+\alpha}, t_{n+\alpha}) \quad (3.19)$$

$$F_{n+\alpha} = F(\theta_{n+\alpha}, t_{n+\alpha}) \quad (3.20)$$

Dada a não linearidade da equação, é necessário aplicar um método iterativo de forma a obter a convergência do método. Assim, aplica-se o método de Newton-Raphson que consiste num sistema de forças residuais, descrito pela Equação 3.21:

$$\Psi_{n+\alpha}^i = \hat{F}_{n+\alpha}^i + \hat{K}_{n+\alpha}^i \theta_{n+\alpha}^{i+1} \neq 0 \quad (3.21)$$

A solução corrigida em cada iteração é calculada pelas seguintes equações:

$$\Delta \theta_{n+\alpha}^i = [\hat{K}_{n+\alpha}^i]^{-1} \Psi_{n+\alpha}^i \quad (3.22)$$

$$\theta_{n+\alpha}^i = \theta_{n+\alpha}^i + \Delta \theta_{n+\alpha}^i \quad (3.23)$$

Por fim, a convergência é verificada através do cálculo do critério apresentado na equação 3.24.

$$\frac{\|\Delta \theta_{n+\alpha}^i\|}{\|\theta_{n+\alpha}^{i+1}\|} = \frac{\|\theta_{n+\alpha}^{i+1} - \theta_{n+\alpha}^i\|}{\|\theta_{n+\alpha}^{i+1}\|} < TOL \quad (3.24)$$

Em que:

TOL – Tolerância exigida

|| || - Norma euclidiana

$\Delta \theta_{n+\alpha}^i$ – Alteração do campo de temperaturas

$\theta_{n+\alpha}^{i+1}$ – Temperatura atual

3.4 Aplicação do método numérico no ANSYS®

Na presente dissertação, foi utilizado o programa de elementos finitos ANSYS® *Academic Student R3* para a determinação da variação da temperatura ao longo da secção reta dos perfis em estudo. A análise por elementos finitos no programa mencionado implica a seleção de vários parâmetros dependendo do tipo de algoritmo que se pretende realizar. Em primeiro lugar, é selecionado o tipo de análise, que neste caso trata-se de uma análise térmica.

De seguida, é necessário escolher o elemento finito que será utilizado em todas as simulações dos perfis de alumínio. Foi utilizado o elemento finito *PLANE77* de oito nós, em que para cada nó representado existe uma função de forma associada. Este

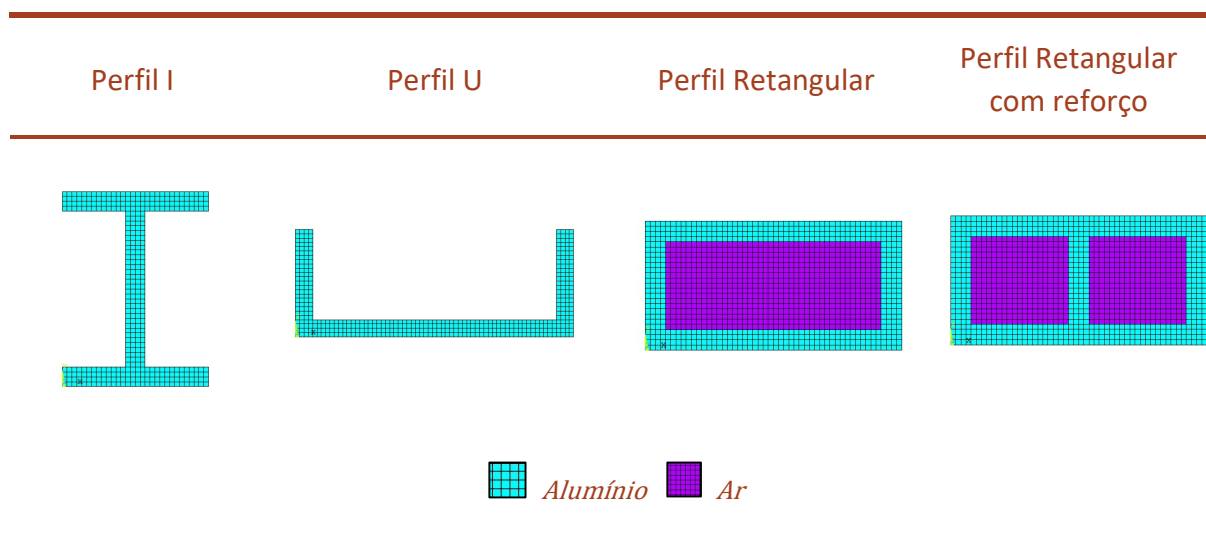
elemento é utilizado em estudos bidimensionais e aplica-se a análises térmica e regime transiente.

Na seleção e caracterização das propriedades térmicas do alumínio, foi considerado um material isotrópico e com propriedades não lineares, no caso do calor específico e da condutividade térmica, e propriedades constantes no caso da emissividade e da massa volúmica.

A modelação dos perfis em alumínio foi realizada de acordo com a geometria e as dimensões pretendidas. O processo de modelação deu-se pela criação de pontos, linhas e áreas, para a definição posterior da malha de elementos.

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. Na Tabela 3.4 é possível observar as malhas obtidas para cada tipo de perfil.

Tabela 3.4 – Perfis de alumínio não protegidos submetidos ao fogo (figuras de elaboração própria)



Os perfis analisados foram sujeitos à curva nominal ISO 834 e com exposição ao fogo em todos os lados. De forma a rentabilizar o tempo de pré processamento das simulações, foi gerado um código que permite obter a tabela tempo-temperatura da curva nominal de incêndio em linguagem APDL (ANSYS® Parametric Design Language). Nos anexos 3 e 4 apresenta-se um extrato do código gerado para a curva de incêndio ISO 834 e para as propriedades dos materiais, respetivamente.

Em relação às condições de fronteira impostas nos modelos, foi considerada uma temperatura inicial de 20 °C e devido à exposição ao fogo, foram considerados os fluxos de calor por radiação e convecção. No caso da transferência de calor por convecção foi aplicado o coeficiente de convecção correspondente à curva ISO 834, apresentado anteriormente. No caso da transferência de calor por radiação foi considerado uma

emissividade do fogo igual à unidade. Estas condições foram aplicadas nas fronteiras exteriores de todos os perfis.

A presente análise será não linear material e transiente, com recurso ao método iterativo de Newton-Raphson para a resolução da solução numérica. O intervalo de tempo definido no cálculo da solução foi de 60 segundos, admitida uma tolerância de convergência de 0,9 e a verificação realizada através da norma euclidiana L2, por sugestão do próprio programa.

3.4.1 Vazios Internos

Os perfis que serão alvo de estudo apresentam a particularidade de formar vazios internos, caso do perfil retangular e perfil retangular com reforço. Os interiores destes perfis contêm ar, por este motivo foi realizado um estudo de forma a verificar a influência de uma malha de ar no seu interior.

O perfil retangular 100x50x8 foi o selecionado para a realização deste estudo. A Figura 3.1 a) representa o perfil com a malha de ar e a Figura 3.2 b) representa o perfil sem malha de ar.

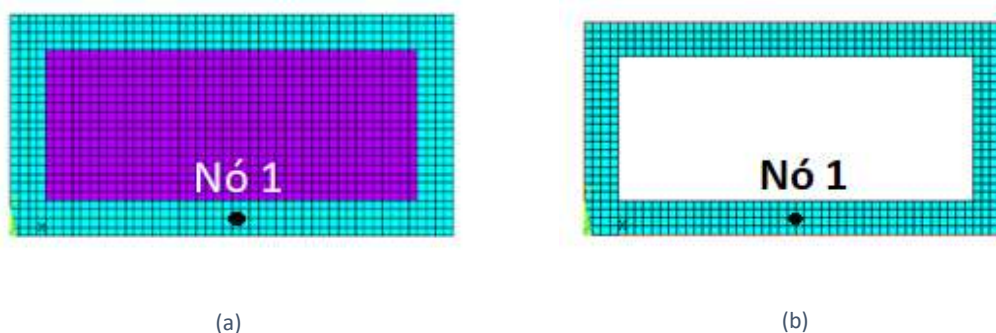


Figura 3.1 – a) Perfil R100x50x8 com malha de ar; b) Perfil R100x50x8 sem malha de ar

O gráfico da Figura 3.2 apresenta a temperatura dos perfis expostos à curva de incêndio nominal ISO 834 para as duas situações descritas anteriormente, considerando o nó 1 em ambos os perfis. É possível concluir que a malha de ar não influencia os resultados obtidos no caso dos perfis não protegidos, no nó em estudo. Contudo, a presença deste elemento é garantida em caso de cenário real e a Figura 3.3 representa de forma gráfica a diferença do aquecimento do interior do perfil. Por este motivo a malha de ar foi aplicada em todas as simulações numéricas realizadas.

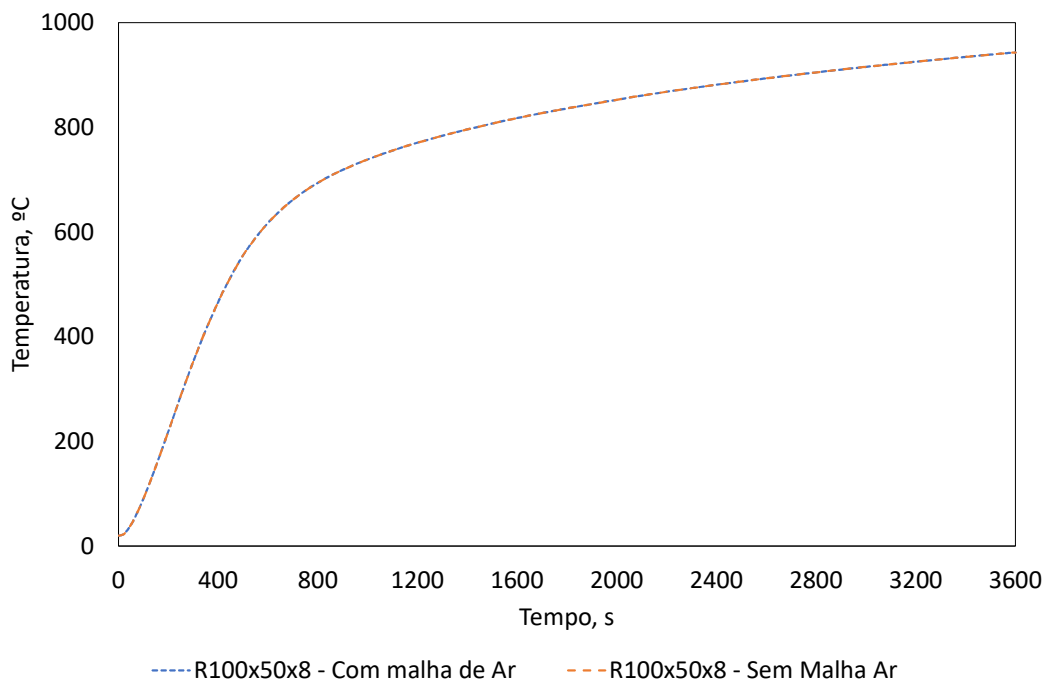


Figura 3.2 - Temperatura do perfil exposto à curva de incêndio nominal ISO 834, considerando dois cenários

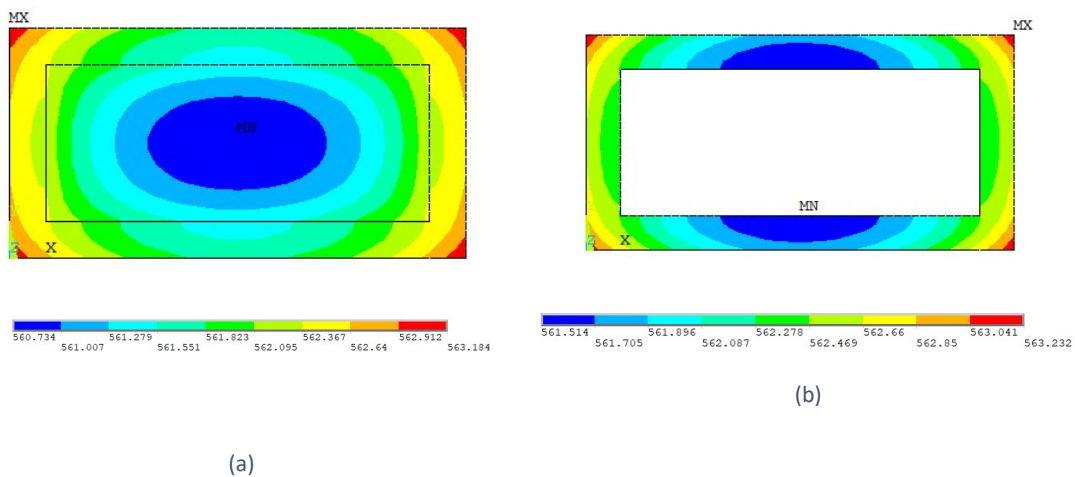


Figura 3.3 – Representação gráfica da temperatura dos perfis aos 500 segundos de exposição a) Perfil R100x50x8 com malha de ar; b) Perfil R100x50x8 sem malha de ar

PERFIS EM ALUMÍNIO PROTEGIDOS

4.1 Introdução

4.2 Método Simplificado proposto pelo Eurocódigo 9

4.3 Método de cálculo avançado

4 Perfis em alumínio protegidos

4.1 Introdução

A determinação da distribuição da temperatura para perfis em alumínio protegidos pode ser obtida pelo método simplificado proposto pelo Eurocódigo 9 e por métodos de cálculo avançado, tal como nos perfis não protegidos.

O estudo de proteções contra incêndio em estruturas alumínio e aço torna-se importante uma vez que estes materiais apresentam uma condutibilidade térmica muito elevada, o que sugere uma maior capacidade de atingir temperaturas elevadas num curto período. Segundo Boko, Skejic [46], ao fim de seis minutos de exposição ao fogo de perfis de alumínio não protegidos verificou-se uma variação substancial da temperatura e uma redução significativa das propriedades do material. Assim, o presente subcapítulo efetua uma abordagem à proteção contra incêndio de estruturas de alumínio.

4.2 Método simplificado proposto pelo Eurocódigo 9

De acordo com o método simplificado proposto pelo Eurocódigo 9 Parte 1-2 [3], a distribuição de temperaturas num perfil de alumínio protegido ao longo de um intervalo de tempo, Δt , é dada pela Equação 4.1 e complementada pela Equação 4.2.

$$\Delta\theta_{al}(t) = \frac{\lambda_p/d_p}{c_{al}\rho_{al}} \frac{A_p}{V} \left[\frac{1}{1 + \phi/3} \right] (\theta_{(t)} - \theta_{al(t)})\Delta t - (e^{\phi/10} - 1)\Delta\theta_{(t)} \quad (4.1)$$

Onde,

$$\phi = \frac{c_p\rho_p}{c_{al}\rho_{al}} d_p \frac{A_p}{V} \quad (4.2)$$

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/m³] 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 [°C]

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


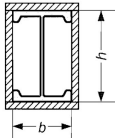
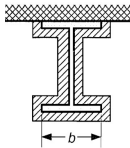
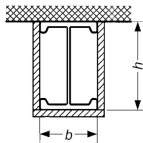
$\Delta\theta_{(t)}$ – Variação da temperatura dos gases na superfície do material de proteção ao longo do tempo;

Δt – Intervalo de tempo [s], segundo a norma [3], não deve ser superior a 30 segundos.

De salientar que, de acordo com o Eurocódigo 9 Parte 1-2 [3], para a maioria dos materiais de proteção contra a incêndio, o cálculo da variação da temperatura do alumínio pode apresentar alterações de forma a permitir um atraso no aumento da temperatura quando este atinge os 100°C.

O fator de massividade (A_p/V) para perfis de alumínio protegidos pode ser obtido pelos valores apresentados na Tabela 4.1. De referir que: P_{al} representa o perímetro do perfil de alumínio e A_{al} representa a área da secção transversal reta do perfil de alumínio.

Tabela 4.1 – Fator de massividade (A_p/V) para perfis protegidos expostos ao fogo, Eurocódigo 9 – Parte 1-2

Secção	Descrição Proteção	Fator de massividade
	Proteção ao longo do contorno do perfil exposto ao fogo em todos os lados – por exemplo tintas intumescentes e argamassas	$\frac{P_{al}}{A_{al}}$
	Proteção em caixão do perfil exposto ao fogo em todos os lados – por exemplo placas de gesso	$\frac{2(b + h)}{A_{al}}$
	Proteção ao longo do contorno do perfil exposto ao fogo em três lados	$\frac{P_{al} - b}{A_{al}}$
	Proteção em caixão do perfil exposto ao fogo em três lados	$\frac{2h + b}{A_{al}}$

4.3 Método de cálculo avançado

O método de cálculo avançado para perfis protegidos seguirá a mesma metodologia dos perfis em alumínio não protegidos. A proteção de perfis em caixão possui a particularidade de formar vazios internos, que podem ser constituídos por ar ou outro material isolante. A modelação de vazios internos é de extrema importância para determinar a evolução da temperatura durante a exposição ao fogo. Assim, a construção de uma malha de elementos finitos caracterizando o ar, para a simulação desses vazios internos, tornou-se um método interessante a propor neste trabalho para o cálculo das temperaturas. Com estes modelos de simulação pretende-se avaliar a eficácia da proteção nos perfis de alumínio quando sujeitos à ação de incêndio [42].

Tal como nos perfis de alumínio não protegidos, o elemento finito utilizado corresponde ao elemento *PLANE77* de oito nós. Foram considerados os mesmos materiais já anteriormente referidos. A lã de rocha foi agora considerada como um material adicional, considerada isotrópica e com todas as propriedades térmicas constantes.

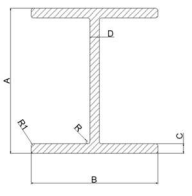
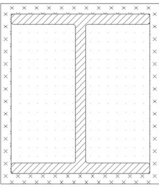
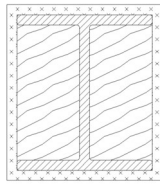

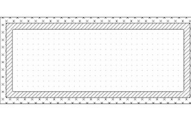
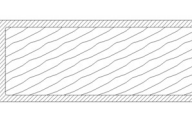
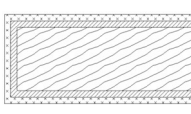
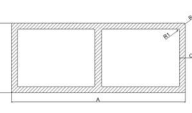
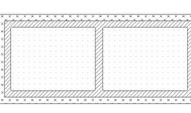
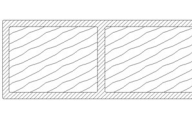
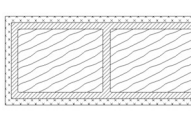
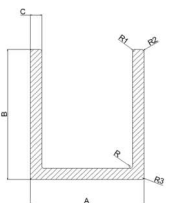
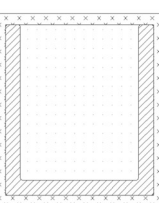
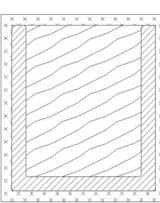
Os perfis analisados foram sujeitos à curva nominal ISO 834 e com exposição ao fogo em todos os lados.

Foi considerada uma temperatura inicial de 20 °C e as condições fronteira, devido à exposição ao fogo, fluxos de calor por radiação e convecção. Estas condições foram aplicadas nas fronteiras exteriores da proteção.

Nos perfis com proteção, a análise mantém-se térmica em regime transiente e não linear material, com recurso ao método iterativo de Newton-Raphson na resolução da solução numérica. Porém, o intervalo de tempo para o cálculo e convergência da solução foi reduzido para 10 segundos, uma vez que a complexidade do cálculo da solução aumentou pela introdução de mais um material. Foi admitida uma tolerância de convergência de 0,9 e a verificação realizada através da norma euclidiana L2, tal como anteriormente.

A Tabela 4.2 apresenta as secções de perfis de alumínio em estudo e que serão sujeitas à curva de incêndio ISO 834 com uma exposição em todos os lados. A proteção utilizada em cada secção será um fator variável, isto é, a utilização de perfis com proteção em caixão com placas de gesso, incluindo a introdução de vazios internos com uma malha de ar ou vazios internos protegidos por um material isolante, a lã de rocha. Na tabela é ainda indicado o(s) método(s) de análise utilizado(s) no estudo de cada seção reta do perfil (X), EC9 (equação simplificada do Eurocódigo 9 Parte 1-2) e MEF (simulação por elementos finitos).

Tabela 4.2 – Perfis de alumínio alvo de estudo com indicação do tipo de análise

Perfil - Dimensões	Não Protegido	Proteção Externa	Proteção Interna	Proteção Interna e Externa												
I80x60x6			-													
I80x60x8																
I108x50x8																
	EC9	X	MEF	X	EC9	X	MEF	X				EC9		MEF	X	
R100x50x8																
R160x80x10																
	EC9	X	MEF	X	EC9	X	MEF	X	EC9		MEF	X	EC9		MEF	X
RR100x50x8																
RR160x80x10																
	EC9	X	MEF	X	EC9	X	MEF	X	EC9		MEF	X	EC9		MEF	X
U130x50x8			-													
U150x75x13																
	EC9	X	MEF	X	EC9	X	MEF	X				EC9		MEF	X	

4.3.1 Vazios Internos

Os perfis em alumínio protegidos apresentam vazios internos não só devido à geometria, mas também resultado da proteção em caixão. Deste modo, também se torna relevante o estudo da presença da malha de ar em ambas as situações para simular a condução de energia térmica interna na cavidade. Assim, foi estudado o perfil retangular 100x50x8, que possui um vazio interno devido à sua geometria e o perfil U 130x50x8 que possui cavidades resultantes da proteção em caixão.

A Figura 4.1 a) representa o perfil retangular 100x50x8 com malha de ar e a Figura 4.1 b) representa o perfil retangular 100x50x8 sem malha de ar no seu interior. Na Figura 4.2 é possível visualizar graficamente a diferença do aquecimento no interior.

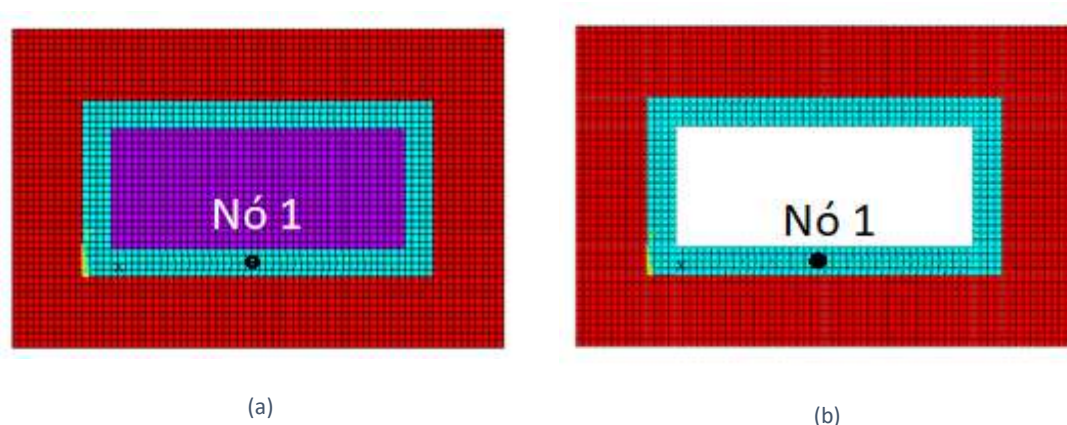


Figura 4.1 – a) Perfil R100x50x8 com malha de ar; b) Perfil R100x50x8 sem malha de ar

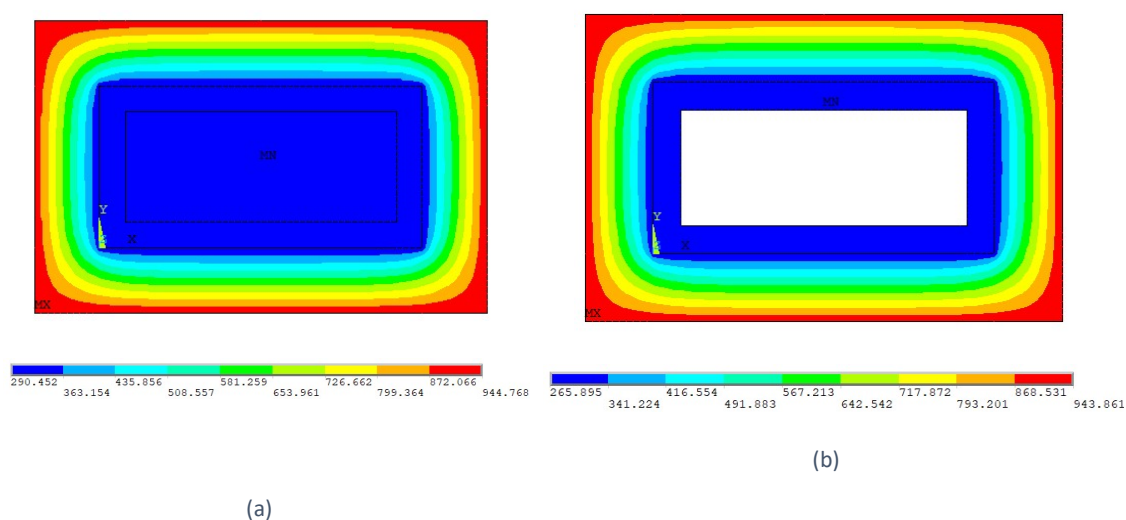


Figura 4.2 – Representação gráfica da temperatura dos perfis protegidos aos 3600 segundos de exposição a) Perfil R100x50x8 com malha de ar; b) Perfil R100x50x8 sem malha de ar

O gráfico da Figura 4.2 apresenta a evolução da temperatura no nó 1 para a situação a) e a situação b). As curvas de temperatura do perfil exposto ao fogo, obtidas para este nó, permitem concluir que até aos 2500 segundos de exposição não existe influência na introdução da malha de ar, a partir deste instante as curvas divergem ligeiramente.

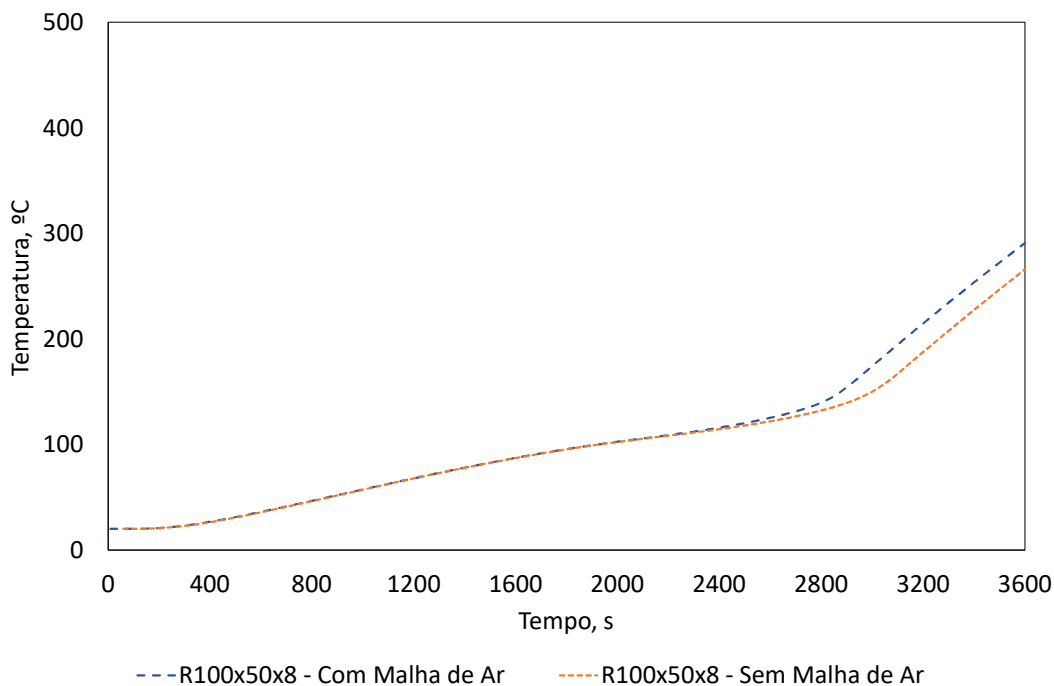


Figura 4.3 - Temperatura do perfil retangular protegido exposto à curva de incêndio nominal ISO 834, considerando dois cenários

De seguida, realizou-se o mesmo estudo para o perfil U 130x50x8. A Figura 4.3 a) mostra o perfil considerando a malha de ar e a Figura 4.3 b) mostra o perfil sem a malha de ar.

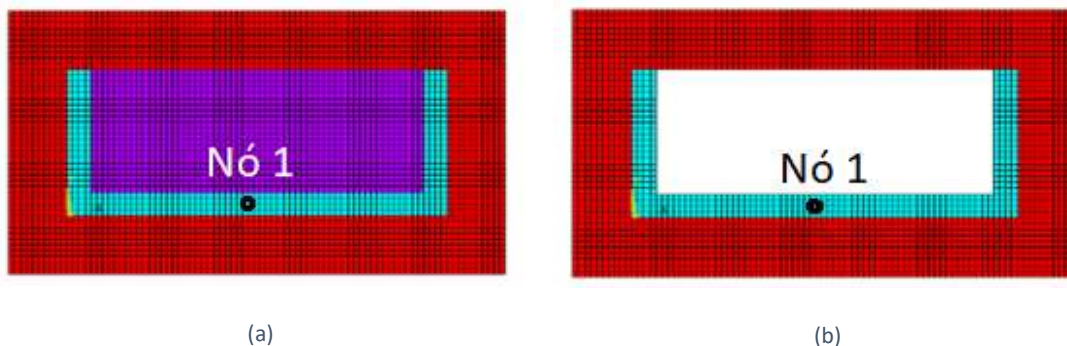


Figura 4.4 – a) Perfil U130x50x8 com malha de ar; b) Perfil U130x50x8 sem malha de ar

O gráfico da Figura 4.4 apresenta as curvas de temperatura no mesmo nó 1 (situado no perfil em alumínio) para as duas situações propostas. Tal como acontece no perfil retangular, não considerando a malha de ar não há influência na curva de temperatura até aos 2500 segundos, no entanto após este instante o perfil com a malha de ar apresenta um aumento superior da temperatura. Desta forma, é possível concluir que a malha de ar deve ser considerada na modelação dos perfis em estudos para que os resultados sejam mais próximos da realidade. A Figura 4.6 representa de forma gráfica o aquecimento do perfil.

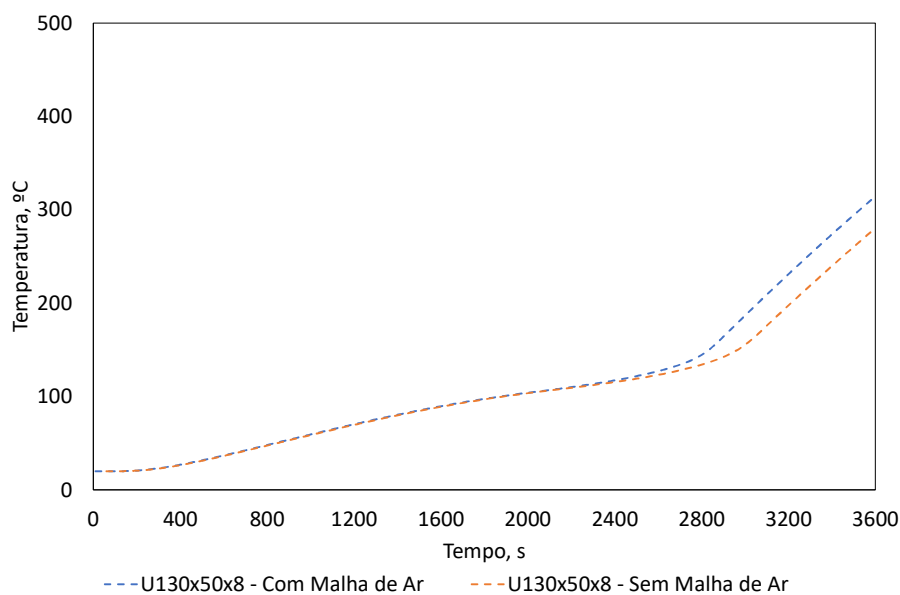


Figura 4.5 - Temperatura do perfil U protegido exposto à curva de incêndio nominal ISO 834, considerando dois cenários

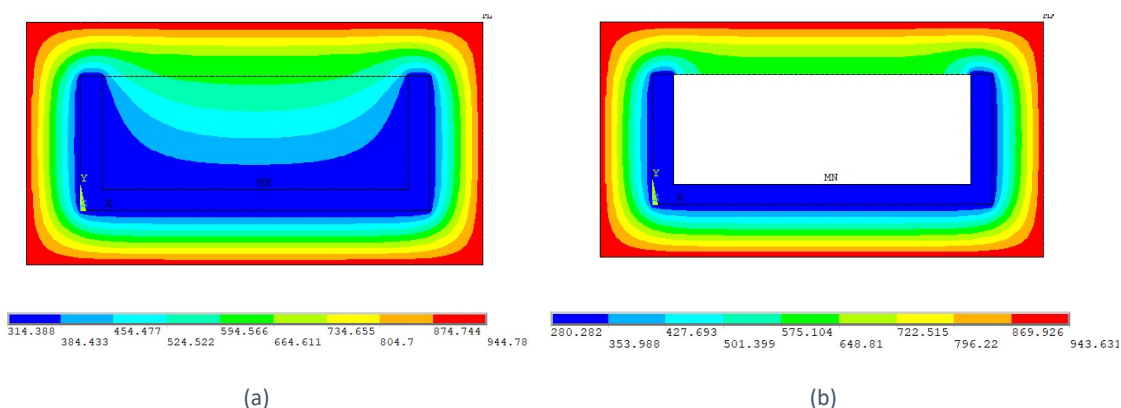


Figura 4.6 – Representação gráfica da temperatura dos perfis protegidos aos 3600 segundos de exposição a) Perfil U130x50x8 com malha de ar; b) Perfil U130x50x8 sem malha de ar

Discussão de Resultados

5.1 Perfis não protegidos

5.2 Perfis protegidos

5 Discussão de Resultados

A presente discussão de resultados tem por base o cálculo da distribuição de temperaturas na secção transversal de perfis em alumínio expostos ao fogo. O campo de temperaturas mencionado foi calculado, não só através de um método analítico: equação simplificada preconizada pelo Eurocódigo 9 Parte 1-2 [3], mas também através de simulações numéricas, com o auxílio do programa *Ansys*[®]. Os resultados obtidos permitem comparar os métodos de cálculo utilizados.

A obtenção de gráficos de temperatura em função do tempo permite avaliar o comportamento térmico dos perfis de alumínio expostos ao fogo ao longo de 3600 segundos. Os perfis em análise diferem tanto em geometria como em dimensão. As geometrias analisadas foram o perfil em I, o perfil retangular, o perfil retangular com reforço interior e o perfil em U. Será efetuada a comparação com base na massividade de cada perfil.

No que respeita às simulações numéricas, foram obtidos os resultados em três pontos nodais de cada perfil, de modo a perceber a uniformidade de aquecimento ao longo do mesmo.

Por fim, as simulações foram realizadas em perfis de alumínio não protegidos e protegidos, tanto exteriormente como interiormente, em função das cavidades provenientes de algumas das geometrias e da aplicação do gesso em formato de caixão.

5.1 Perfis não protegidos

Nos perfis em alumínio não protegidos, foram realizados gráficos comparativos entre a massividade dos perfis e os métodos de cálculo, de forma a averiguar a semelhança entre a equação preconizada pelo Eurocódigo 9 Parte 1-2 [3] e as simulações numéricas. Em caso de semelhança, será possível averiguar a utilização de simulações numéricas no projeto de construções de alumínio em situação de incêndio. Os dados referentes às simulações numéricas encontram-se legendados de acordo com a seguinte nomenclatura: perfil_Nó(1,2,3) e referente à equação simplificada preconizada pelo Eurocódigo 9 Parte 1-2 [3]: perfil_EC9, representados por uma linha contínua. A exposição ao fogo incide em todos os lados do perfil, ao longo de 3600 segundos.

A Figura 5.1 representa a distribuição de temperaturas no perfil em I sujeito à curva de incêndio nominal ISO 834. O gráfico permite perceber que existe uma pequena diferença entre os dois métodos de cálculo até aos primeiros 1200 segundos, no

entanto, a partir deste valor, os gráficos permanecem iguais até aos 3600 segundos. De notar que não são visíveis diferenças entre as temperaturas registadas em cada nó.

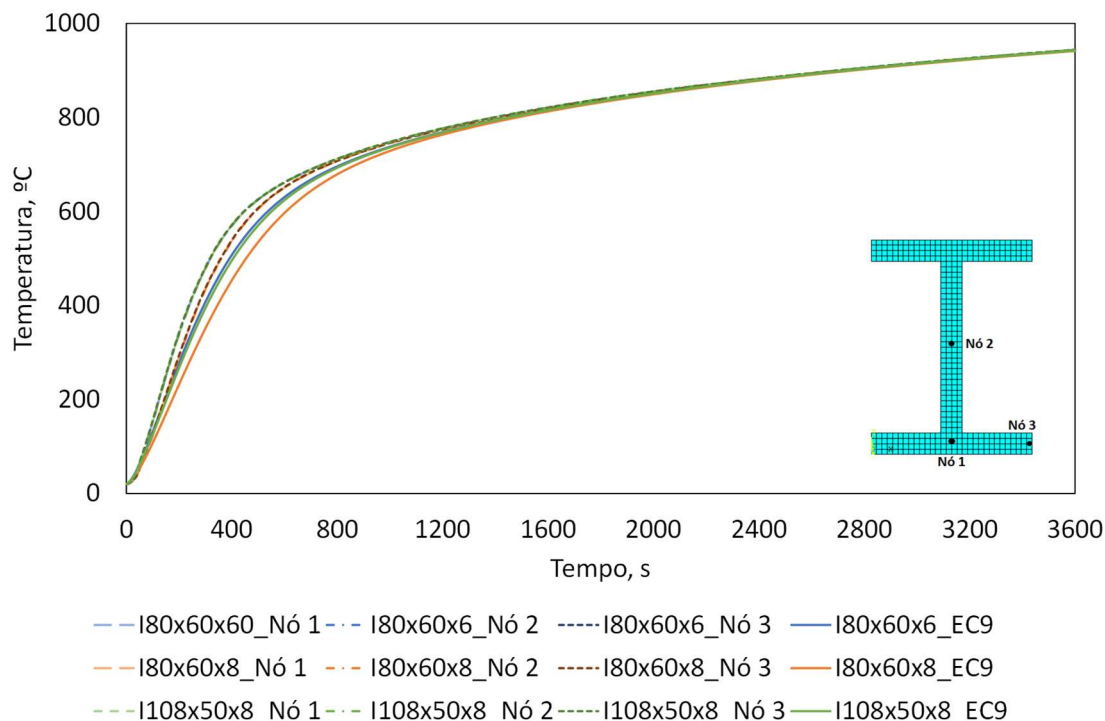


Figura 5.1 - Temperatura dos perfis I expostos à curva de incêndio nominal ISO 834. Comparação entre o método numérico e o Método Simplificado do Eurocódigo 9 Parte 1-2

No que diz respeito à geometria dos perfis e respetivas dimensões é possível observar que os perfis I80x60x6 e I108x50x8 apresentam comportamentos semelhantes, tanto nos resultados obtidos pelo método numérico como pelo método analítico. O perfil I80x60x8 apresenta uma diminuição do campo de temperaturas em relação aos outros perfis estudados. Estas diferenças são apenas visíveis nos primeiros 1200 segundos.

A Tabela 5.1 serve de auxílio à avaliação dos resultados para que se encontrem conclusões sobre a geometria e as dimensões dos perfis. Os dados apresentados permitem aferir a influência do fator de massividade na variação da temperatura no perfil exposto ao fogo. Esta diferença entre perfis verifica-se especialmente até aos primeiros 1200 segundos de exposição. O perfil com maior fator de massividade apresenta um aumento superior de temperatura em relação ao perfil com menor fator de massividade. A diferença de temperatura registada foi cerca de 30°C.

Tabela 5.1 - Valores de perímetro, área e fator de massividade dos perfis I em alumínio

	Perímetro [m]	Área Secção Transversal [m ²]	Fator de Massividade (Am/V) [m ⁻¹]
I80x60x6	0,388	0,001128	343,9716
I80x60x8	0,384	0,001472	260,8696
I108x50x8	0,406	0,001260	322,2222

Como já mencionado, foram realizadas análises noutros perfis de secção distinta e apresentados os resultados no Anexo 1 e Anexo 2. O perfil retangular foi um dos selecionados para dar continuidade a este estudo ao longo deste capítulo. A Figura 5.2 representa a distribuição de temperaturas no perfil retangular sujeito à curva de incêndio nominal ISO 834. À semelhança do observado nos perfis I, os resultados obtidos neste tipo de secção mantêm a tendência. A divergência entre os dois métodos de cálculo apenas acontece até um determinado tempo de exposição. Nos perfis em análise este tempo é de 1600 segundos.

As temperaturas registadas em cada nó mantêm-se iguais em cada perfil, o mesmo adquire um aquecimento uniforme ao longo de toda a secção durante a exposição ao fogo em todos os lados. Os resultados apresentados no Anexo 2 permitem concluir a afirmação anterior, dado que em cada instante apresentado as cores mantêm-se uniformes ao longo de todo o perfil.

No que relaciona a geometria dos perfis com as curvas de temperatura obtidas, a discrepância entre os dois métodos de cálculo é mais visível no caso do perfil R160x80x10. É possível observar um gradiente térmico superior no caso da curva de temperatura do perfil R100x50x8 em relação ao perfil R160x80x10, o que novamente reforça a influência do fator de massividade.

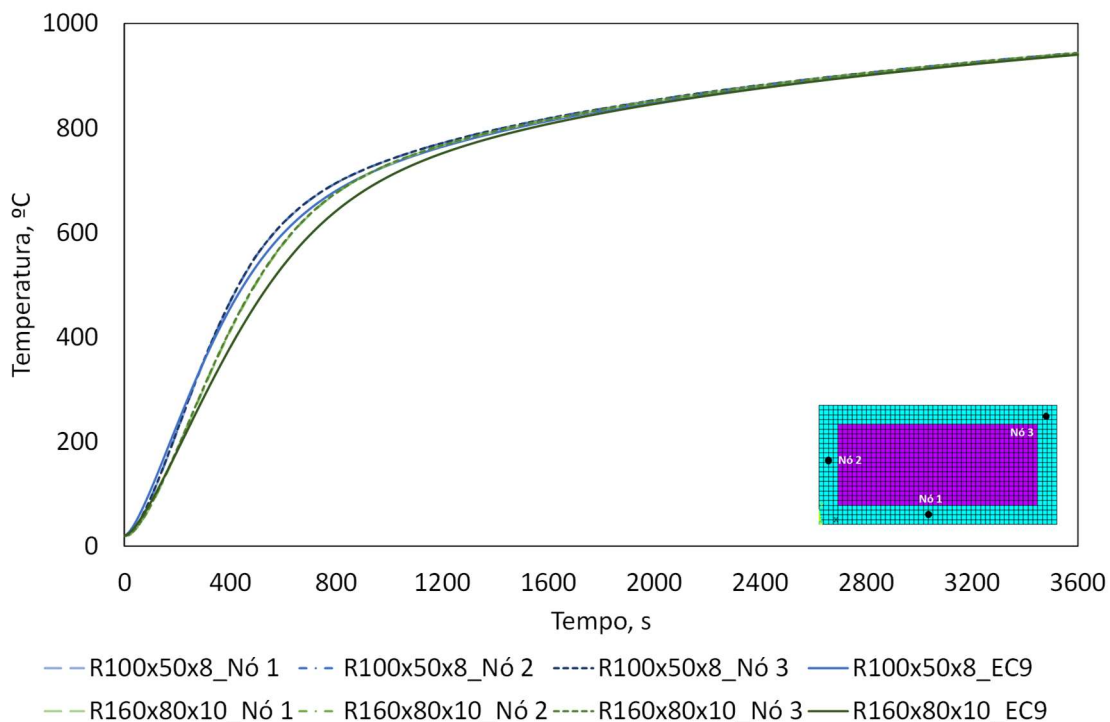


Figura 5.2 - Temperatura dos perfis retangular expostos à curva de incêndio nominal ISO 834. Comparação entre o método numérico e o Método Simplificado do Eurocódigo 9 Parte 1-2

A Tabela 5.2 permite avaliar que o perfil R100x50x8 apresenta um fator de massividade superior, o que reflete um gradiente térmico superior. No caso da exposição ao fogo pela curva ISO 834, esta afirmação é válida para os primeiros 1600 segundos de exposição.

Tabela 5.2 - Valores de perímetro, área e fator de massividade dos perfis retangulares em alumínio

	Perímetro [m]	Área Secção Transversal [m ²]	Fator de Massividade (Am/V) [m ⁻¹]
R100x50x8	0,30	0,0011	264,08
R160x80x10	0,48	0,0023	208,70

Com o intuito de obter mais resultados e consequentemente fomentar a conclusão de que, quanto maior o fator de massividade mais elevada é a evolução de temperatura em perfis de alumínio submetidos ao fogo, foram estudadas mais duas tipologias de perfis: perfil retangular com reforço interior e perfil U. Os resultados foram de encontro

ao esperado e reforçaram a conclusão obtida para os perfis de alumínio não protegidos. Os dados obtidos são apresentados no Anexo 1 e 2.

5.2 Perfis protegidos

Nos perfis protegidos em alumínio, um dos principais objetivos é a análise comparativa entre os métodos numérico e analítico, preconizado pelo Eurocódigo 9 Parte 1-2 [3]. No caso do método numérico, a temperatura é registada em três pontos nodais dos perfis, no caso do método analítico a temperatura é calculada através da equação simplificada proposta pelo Eurocódigo 9 Parte 1-2 [3], aplicando as propriedades não lineares do alumínio e da proteção passiva, o gesso. Para além das propriedades dos materiais, a equação também exige a determinação do fator de massividade de cada perfil. O Eurocódigo 9 Parte 1-2 [3] sugere a Equação 5.1 para o cálculo do fator de massividade, no caso do perfil I com proteção em caixão, exposto ao fogo em todos os lados.

$$\frac{2(b+h)}{A_{al}} \quad (5.1)$$

A Tabela 5.4 apresenta os valores do fator de massividade para os perfis I em análise, de acordo com a equação sugerida pelo Eurocódigo 9 Parte 1-2 [3].

Tabela 5.3 – Valores fator de massividade de perfis I com proteção em caixão, de acordo com o Eurocódigo 9 Parte 1-2.

	b [mm]	h [mm]	Área Secção Transversal [m ²]	Fator de Massividade (A _p /V) [m ⁻¹]
I80x60x6	80	60	0,001128	248,2270
I80x60x8	80	60	0,001472	190,2174
I108x50x8	108	50	0,001260	205,7292

As curvas de evolução de temperaturas para os três perfis I, tanto para o método analítico como para o método numérico, são apresentados na Figura 5.3. Com base na análise dos dados apresentados, verifica-se uma divergência significativa entre os métodos de cálculo utilizados. O método numérico apresenta uma evolução crescente da temperatura no perfil, a partir de aproximadamente 2700 segundos com aumento

exponencial. Por outro lado, o método analítico apresenta um aumento gradual de temperatura até atingir um pico aos 500 segundos, mantendo-se depois constante. De salientar ainda que, neste último método, não existe diferença na temperatura final dos perfis em estudo, o que não acontece com os resultados obtidos com o método numérico.

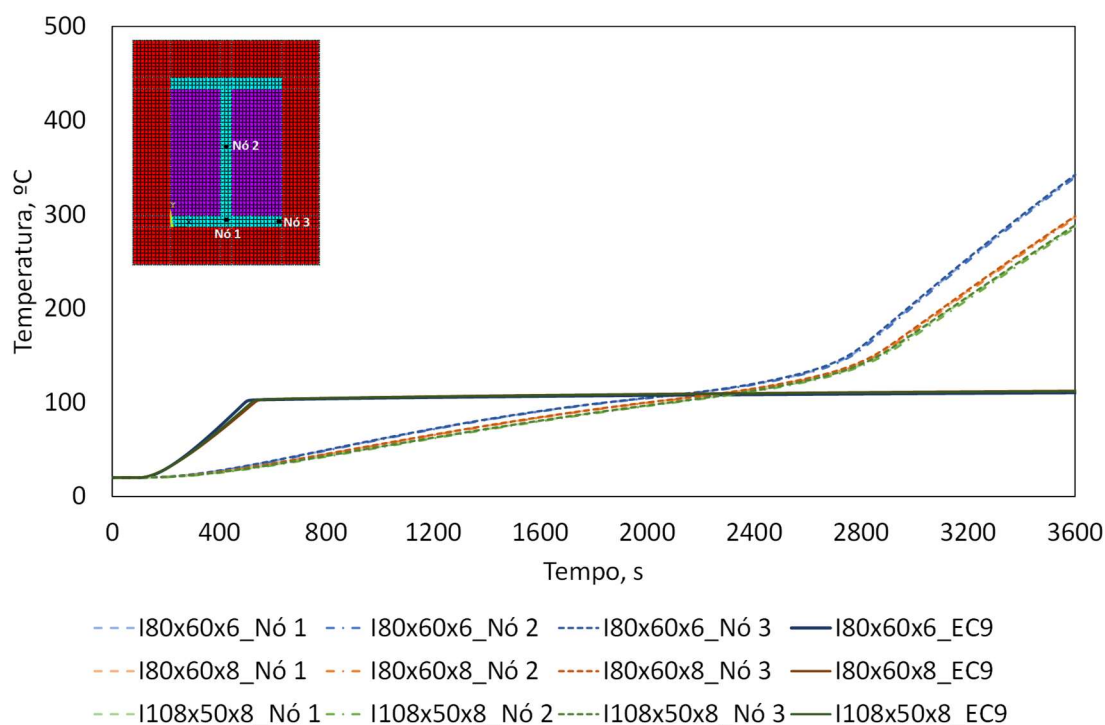


Figura 5.3 - Temperatura dos perfis I protegidos expostos à curva de incêndio nominal ISO 834. Comparação entre o método numérico e o Método Simplificado do Eurocódigo 3

Face aos resultados obtidos e à discrepância existente entre os dois métodos de cálculo foi realizado um reajuste à equação simplificada preconizada pelo Eurocódigo 9 Parte 1-2 [3], nomeadamente no cálculo do fator de massividade. Assim, é proposta a Equação 3.24 para o cálculo do fator de massividade em perfis expostos ao fogo com proteção em caixão.

$$A_{total\ incluindo\ proteção} = \frac{2(b + h)}{\dots} \tag{3.24}$$

A Equação 3.24 envolve o perímetro da proteção em caixão pela área da secção transversal, incluindo a proteção.

Assim, os valores reajustados, com base na nova proposta de cálculo para o fator de massividade dos perfis I em análise, encontram-se na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Valores reajustados do fator de massividade de perfis I com proteção em caixão

	b	h	Área Total incluindo Proteção	Fator de Massividade (A_p/V)
I80x60x6	80	60	0,0120	23,3333
I80x60x8	80	60	0,0120	23,3333
I108x50x8	108	50	0,0133	23,7337

Desta forma, com os valores anteriormente apresentados, foi obtido o gráfico representado na Figura 5.4. As curvas de evolução de temperatura preconizadas pela equação simplificada aproximaram-se dos resultados obtidos pelo método numérico até aproximadamente os 2700 segundos. A partir deste instante, a média da temperatura final de cada perfil apresenta um aumento até aos 340°C no caso do perfil I80x60x6, 296°C no caso do perfil I80x60x8 e 285°C no caso do perfil I108x50x8, de acordo com o método numérico. Já no método analítico, a temperatura a partir dos 2700 segundos mantém-se praticamente constante nos 130°C, nos três perfis em análise.

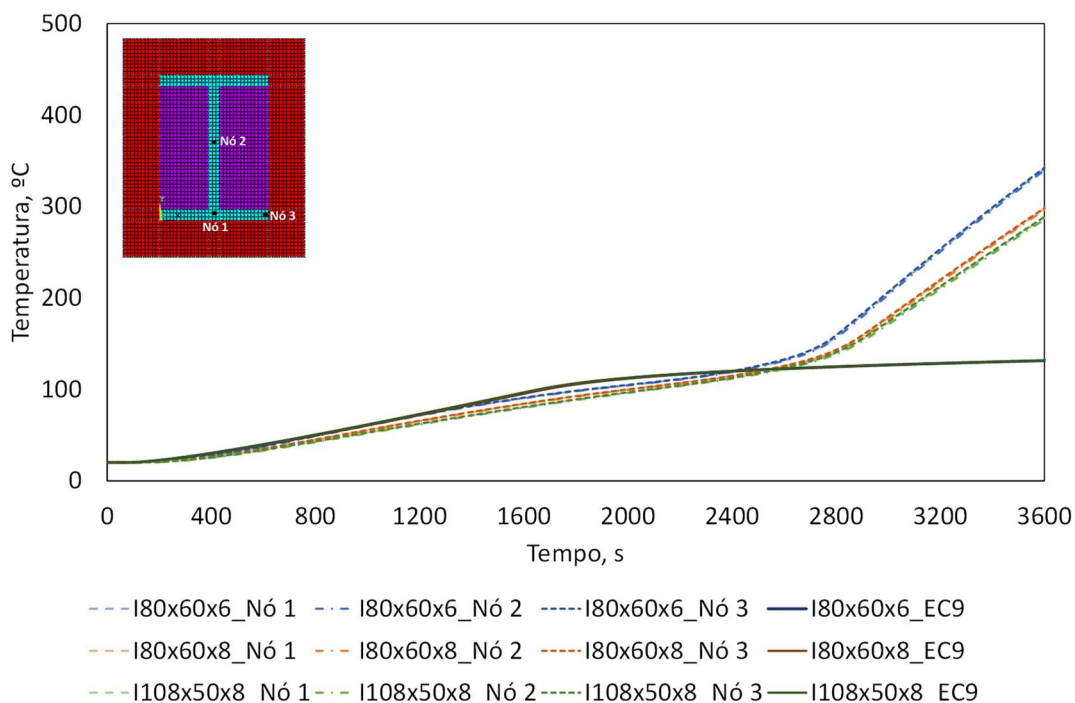


Figura 5.4 - Temperatura dos perfis I protegidos expostos à curva de incêndio nominal ISO 834. Comparação entre o método numérico e o Método Simplificado do Eurocódigo 9 Parte 1-2 reajustado

Perante os dados obtidos, surgiu a necessidade de perceber qual o motivo das curvas divergirem, a partir de determinado instante de tempo, nos resultados numéricos. A Figura 5.5 serviu de apoio a uma primeira análise, uma vez que mostra uma evolução gráfica da temperatura no perfil de alumínio, neste caso, o I80x60x6.

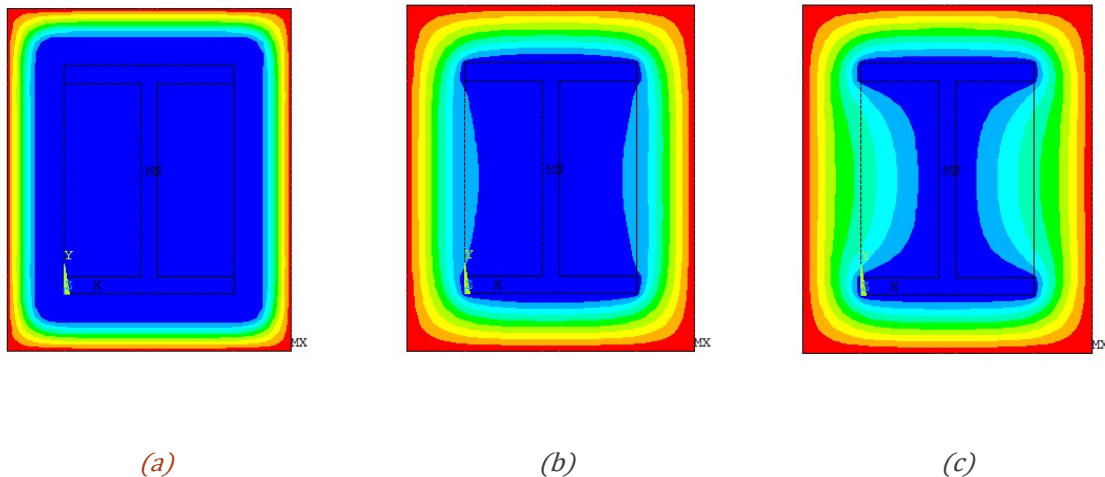


Figura 5.5 – Evolução gráfica da temperatura no perfil I80x60x6 no instante de tempo: (a) 1000s; (b) 2700s; (c) 3600s.

A partir do instante 2700 segundos o aumento da temperatura na cavidade do perfil começa a ser superior ao aumento registado aos 1000 segundos e inferior ao registado nos 3600 segundos. Isto permite entender que, a partir de 2700 segundos a temperatura obtida com o efeito da malha de ar nas cavidades tem alguma influência na temperatura final. De forma a efetuar uma segunda análise, foi registada a curva de temperatura preconizada por um nó disposto na cavidade de ar. A Figura 5.6 mostra o aumento exponencial da curva de temperatura numa das cavidades de ar. Este aumento exponencial da temperatura a partir dos 2700 segundos pode justificar a diferença obtida entre a curva resultante do método numérico e a curva preconizada pela equação analítica proposta pelo Eurocódigo 9 Parte 1-2, uma vez que esta equação não inclui as propriedades do ar.

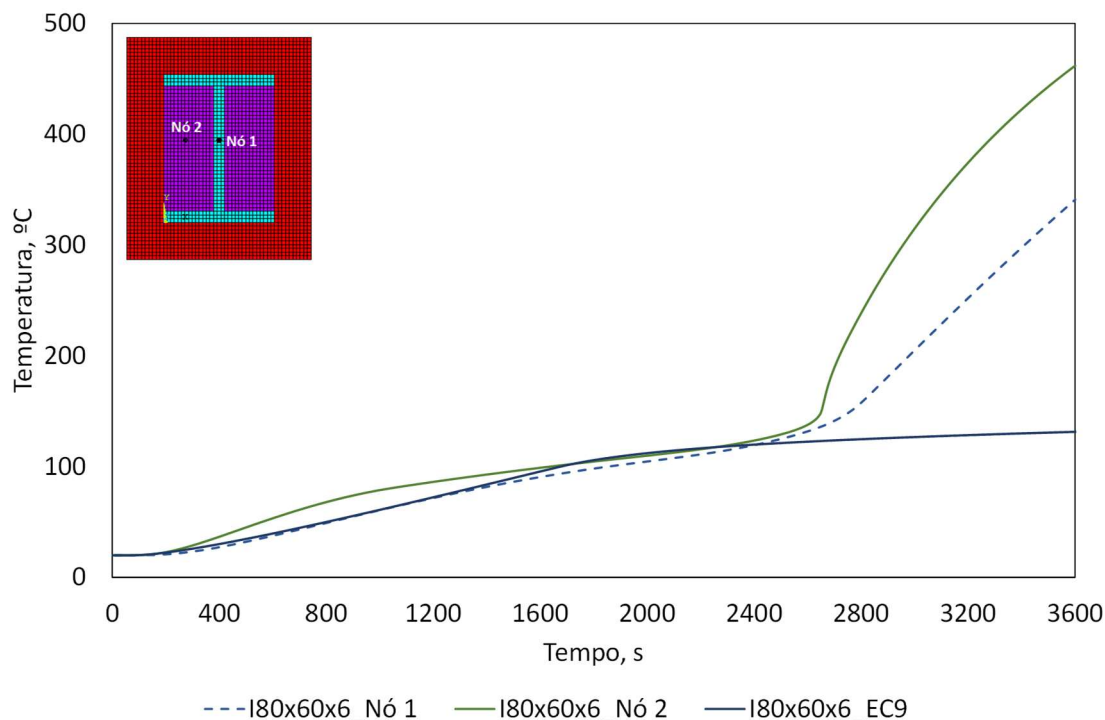


Figura 5.6 - Temperatura do perfil I80x60x6 protegido e temperatura na malha de ar com exposição à curva de incêndio nominal ISO 834

Seguindo as conclusões obtidas anteriormente, sucederam-se outras análises ao nível da influência das cavidades de ar. A Figura 5.7 contempla os resultados adicionais obtidos com as três análises realizadas: a) a evolução da temperatura no perfil com gesso e a malha da cavidade de ar, b) a temperatura no perfil com gesso e ausência de malha de ar e c) a temperatura no perfil com preenchimento total das cavidades com gesso. Estas três análises têm por objetivo a comparação com o Eurocódigo 9 Parte 1-2 [3]. Assim, conclui-se que a primeira análise a) é a que diverge mais da curva correspondente ao método analítico, ao fim de 2700 segundos de exposição, e o segundo caso b) prevê uma ligeira aproximação a esta curva. Por último, a evolução da temperatura na análise c) é a que mais se aproxima da curva descrita pela equação simplificada. Estes resultados permitem concluir que a equação simplificada é conservadora no que respeita à proteção de perfis em caixão, uma vez que não prevê a existência de cavidades possíveis de existirem pela aplicação da própria proteção.

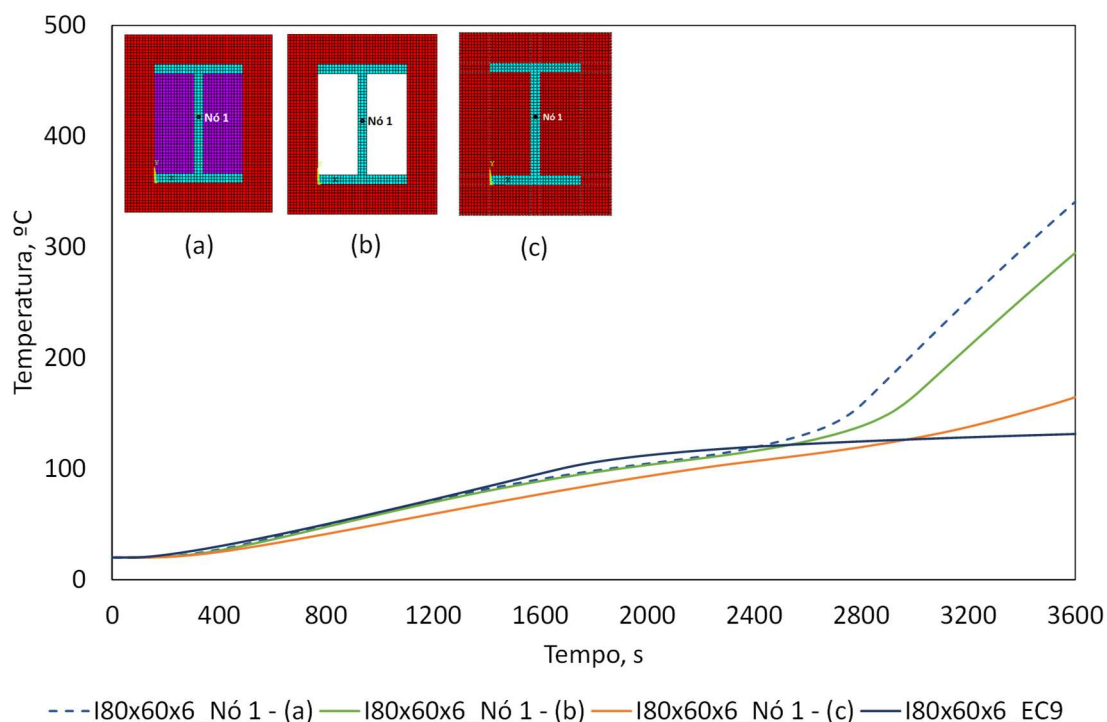


Figura 5.7 - Temperatura do perfil I80x60x6 protegido considerando três análises distintas na cavidade de ar

Os resultados obtidos nos perfis não protegidos mostraram-se próximos (numérico e equação simplificada), o que permitiu calibrar o modelo numérico desenvolvido. Assim, e no caso dos perfis protegidos, utilizou-se o método numérico como validado para se comparar com a solução proposta pela equação simplificada. Pelas análises efetuadas, concluiu-se que esta equação, dependente do tipo de perfil, deve também atender ao tipo e forma da aplicação da proteção. Assim, propõe-se um reajuste ao método analítico proposto pelo Eurocódigo 9 Parte 1-2 [3] a aplicar nos restantes perfis.

Ao contrário do sucedido nos perfis não protegidos, não é possível avaliar o efeito do fator de massividade no caso dos perfis protegidos. No entanto, a secção transversal dos perfis de alumínio está diretamente relacionada com a variação da temperatura no perfil protegido, quanto menor é a área da secção reta do perfil maior é o gradiente térmico das temperaturas obtidas. Isto significa que, a diminuição da área da secção reta do perfil resulta numa diminuição da resistência térmica dos perfis protegidos. A Figura 5.8 representa a evolução da temperatura no perfil retangular protegido, as curvas obtidas permitem fomentar a afirmação anterior. A diferença de temperaturas registada entre perfis foi cerca de 50°C. O mesmo sucede com a secção I, a menor secção transversal reta é a que obtém uma temperatura final mais elevada.

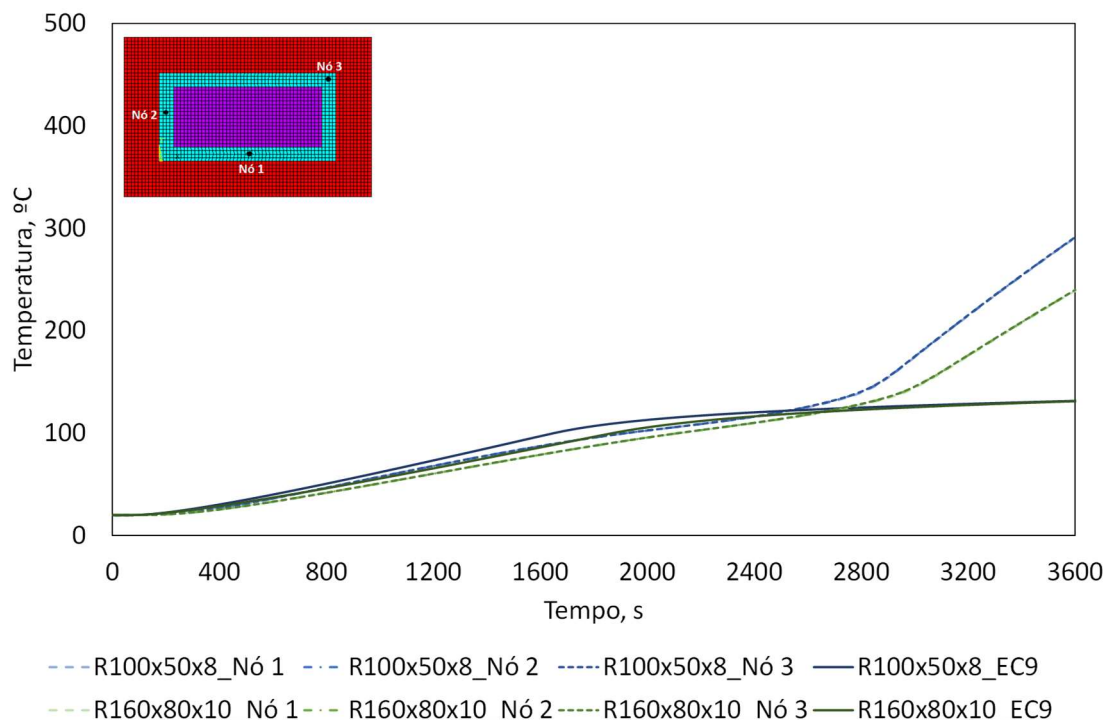


Figura 5.8 - Temperatura dos perfis R protegidos expostos à curva de incêndio nominal ISO 834. Comparação entre o método numérico e o Método Simplificado do Eurocódigo 9 Parte 1-2 reajustado

Outra análise é relativa ao perfil retangular com reforço no interior, de forma a avaliar se a presença deste elemento interior, altera a evolução da temperatura em relação ao perfil sem reforço. No caso do perfil protegido, a diferença de temperatura obtida foi de 20°C, a evolução da temperatura na seção retangular com reforço no interior encontra-se registada na Figura 5.9.

O perfil U também foi estudado, tendo sido obtidos resultados que permitem concordância nas duas conclusões obtidas para o caso de perfis protegidos em alumínio. Em primeiro lugar, a evolução da temperatura nos perfis obtida pelo método numérico aproxima-se da curva obtida pela equação preconizada pelo Eurocódigo 9 parte 1-2 [3], até aproximadamente os 2700 segundos, desde que aplicado o fator de massividade reajustado e sugerido na presente dissertação. Em segundo lugar, que no caso de proteção, quanto maior a secção transversal reta do perfil maior a resistência térmica adquirida. Os restantes resultados serão apresentados em anexo.

Em conclusão, o principal objetivo no estudo de perfis protegidos seria a comparação dos métodos de cálculo utilizados, no entanto, também é possível afirmar que a utilização de gesso no exterior dos perfis revelou ser eficiente, dado que as temperaturas dos perfis diminuíram substancialmente, obtendo resultados de temperatura final entre os 200 °C e os 300 °C.

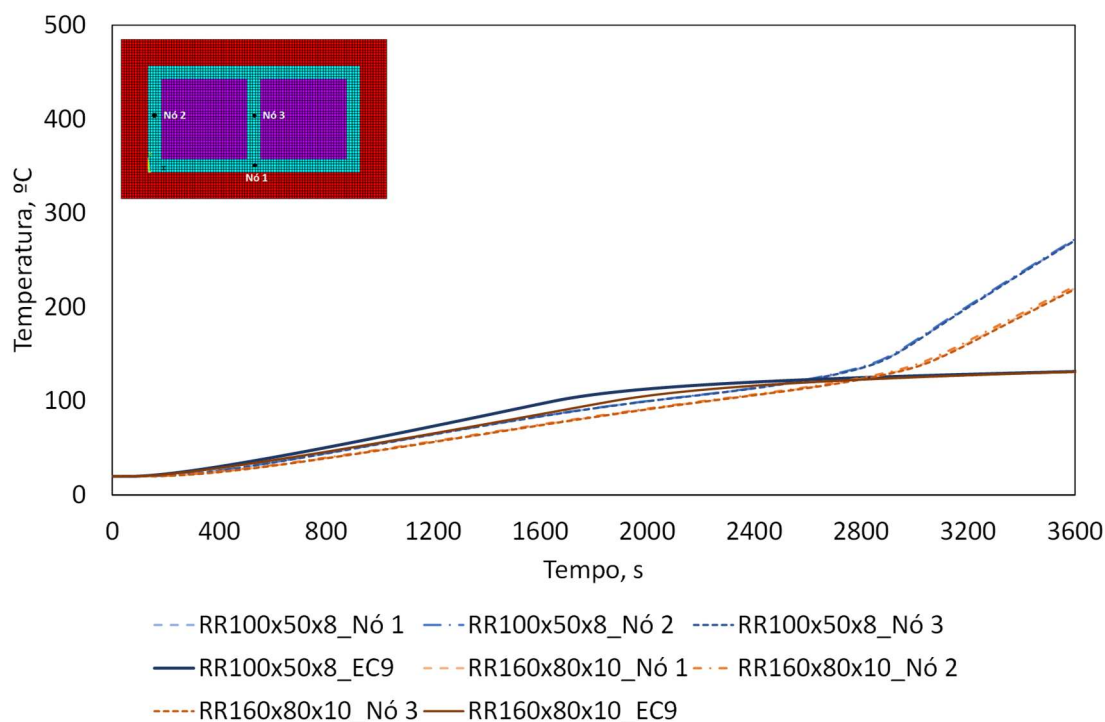


Figura 5.9 - Temperatura dos perfis RR protegidos expostos à curva de incêndio nominal ISO 834. Comparação entre o método numérico e o Método Simplificado do Eurocódigo 3 reajustado

5.2.1 Lã de Rocha

Para além da análise de proteção com gesso no exterior dos perfis, também foi avaliada a utilização de proteção interna nas cavidades dos perfis, tanto nos perfis não protegidos externamente como nos perfis protegidos pelo gesso.

A Figura 5.10 representa a evolução da temperatura no perfil retangular não protegido com inclusão de malha de lã de rocha. Tal como no perfil sem inclusão de malha de ar não se verificou alterações nas curvas de temperatura, a inclusão do isolamento com lã de rocha apenas permite observar ligeiras alterações nas temperaturas nos perfis, tendo-se registado apenas uma diferença de apenas 10°C. Assim, é possível concluir que a proteção interior não retarda o aquecimento do perfil, no entanto pode finalmente retardar o aquecimento do interior do perfil. A Figura 5.11 comprova a afirmação anterior, dado que na figura a) a diferença da temperatura na cavidade para o perfil é de 2°C, já na figura b) esta diferença é de cerca de 270°C.

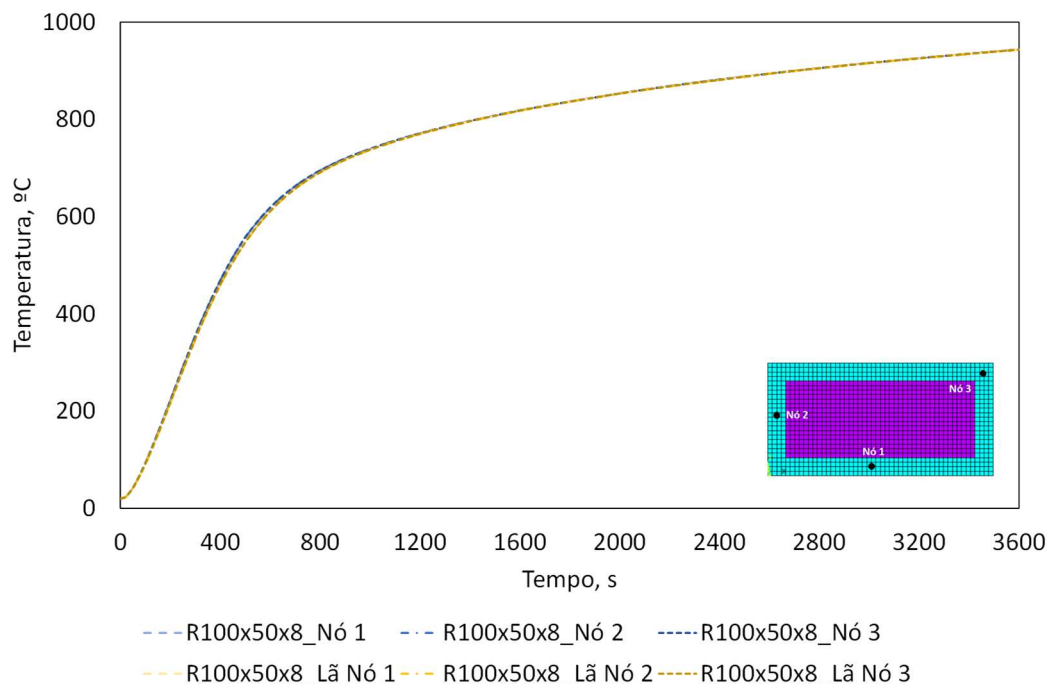
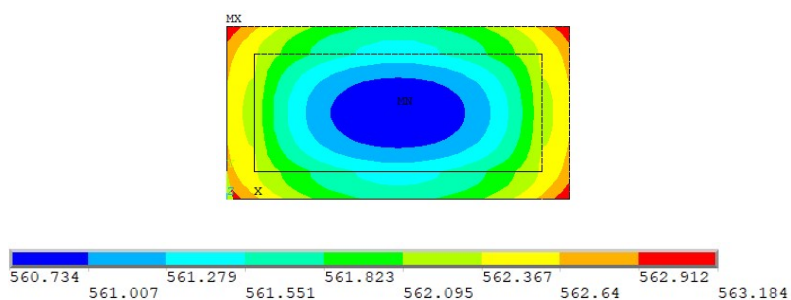
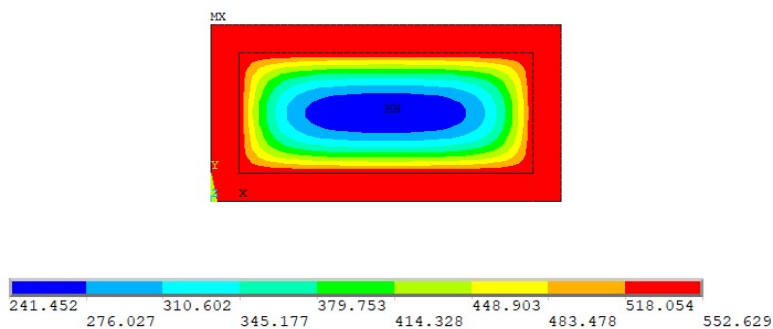


Figura 5.10 - Temperatura do perfil R100x50x8 com proteção interior exposto à curva de incêndio nominal ISO 834



(a)



(b)

Figura 5.11 - Representação gráfica da temperatura dos perfis aos 500 segundos de exposição a) Perfil R100x50x8 com malha de ar; b) Perfil R100x50x8 com proteção interior lã de rocha

De seguida, apresenta-se outra análise do mesmo perfil, porém com proteção exterior e interior. A Figura 5.12 mostra a evolução da temperatura para a situação descrita. Previsivelmente não foram registadas diferenças de temperatura até aos 2700 segundos de exposição, a partir deste instante as curvas começam a divergir apresentando no final uma diferença de cerca de 20°C. A temperatura registada no perfil sem proteção interior ao fim de 3600 segundos é de 290 °C e no perfil com proteção interior é de 207 °C. Da perspetiva de proteção contra incêndio, o isolamento interior não se revelou tão eficaz quanto a proteção externa, o que para o efeito pode não compensar financeiramente.

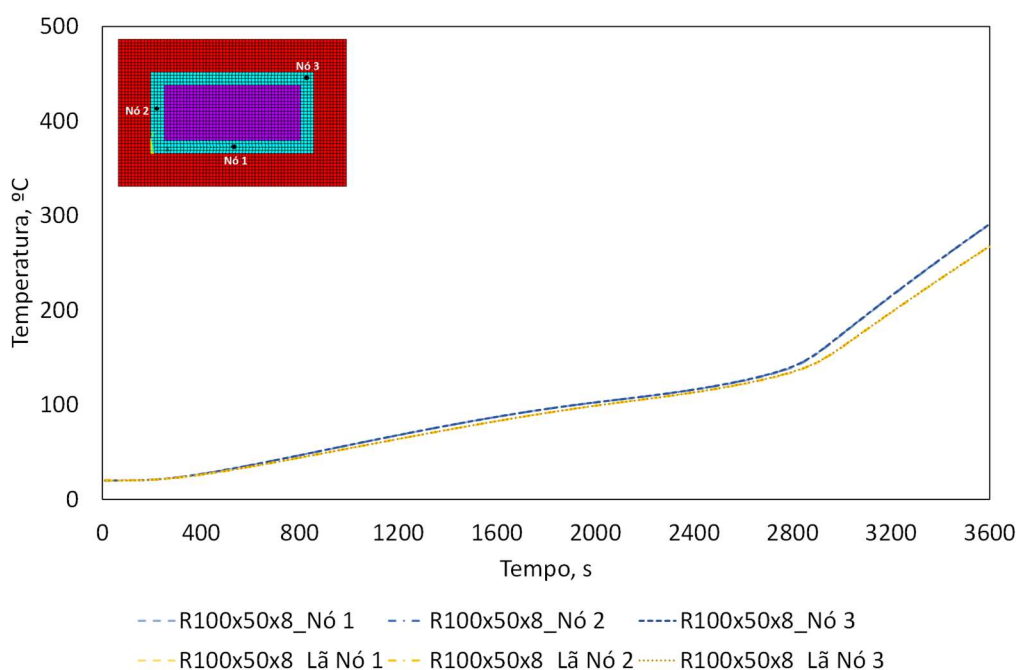
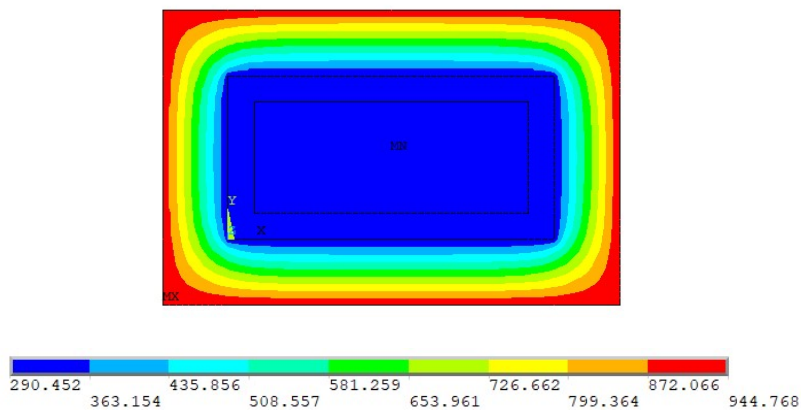
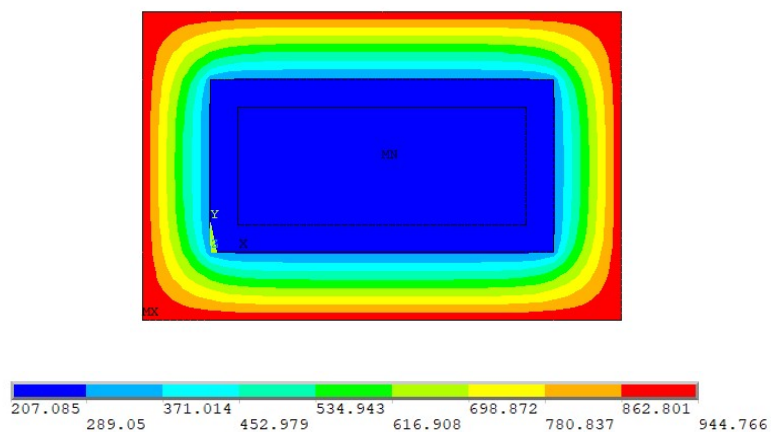


Figura 5.12 - Temperatura do perfil R100x50x8 com proteção interior e exterior exposto à curva de incêndio nominal ISO 834

A Figura 5.13 representa a distribuição das temperaturas dos vários elementos ao longo da secção transversal para 3600 segundos de exposição ao fogo. O Anexo 2 apresenta a variação da temperatura ao longo dos perfis e materiais de proteção através de uma escala de cores. Os resultados apresentados graficamente permitem comparar de forma intuitiva as diferenças resultantes da aplicação da proteção interior e concluir que a lã de rocha retarda o aquecimento no interior dos perfis. Verificou-se ainda que o aumento do fator massividade diminui a temperatura no interior.



(a)



(b)

Figura 5.13 - Representação gráfica da temperatura dos perfis aos 3600 segundos de exposição a) Perfil R100x50x8 proteção exterior (gesso) e com malha de ar interna; b) Perfil R100x50x8 proteção exterior (gesso) e interior (lã de rocha)

CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

6.1 CONCLUSÕES

6.2 PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

6 Conclusões e propostas de trabalhos futuros

6.1 Conclusões

A presente dissertação teve como objetivo o estudo de perfis de alumínio submetidos ao fogo com o intuito de obter a evolução da temperatura na secção reta dos perfis. Foram utilizados dois métodos de cálculo para a posterior comparação de resultados: método simplificado preconizado pelo Eurocódigo 9 Parte 1-2 [3] 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. A equação simplificada preconizada pelo Eurocódigo 9 Parte 1-2 [3] prevê uma evolução constante da temperatura ao longo da secção reta do perfil. Como tal, no caso do método numérico, foi registada a evolução da temperatura em três pontos diferentes da secção reta do perfil sendo que não foram registadas diferenças significativas entre os mesmos.

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

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 utilização de 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.

Numa primeira análise comparativa entre os dois métodos de cálculo verificou-se uma grande discrepância entre as curvas de evolução da temperatura. Assim, surgiu a necessidade de compreender esta divergência. O reajuste do fator de massividade permitiu ajustar as curvas de temperatura até ao instante 2700 segundos. A partir deste instante, a curva preconizada pelo método analítico mantém-se constante e a curva preconizada pelo método numérico aumenta de forma significativa registando uma temperatura final do perfil muito superior. De salientar que o fator de massividade sugerido para os perfis protegidos depende das dimensões da base e da altura da secção, e da área da secção transversal incluindo a espessura do material de proteção. Ao fim

de algumas análises verificou-se que a partir do instante 2700 segundos existe um aumento exponencial da temperatura na cavidade de ar (resultante da proteção em caixão) e que esta variação representa influência na temperatura final do perfil. Desta forma, conclui-se que o aumento exponencial da temperatura, a partir dos 2700 segundos, pode justificar a diferença obtida entre a curva resultante do método numérico e a curva preconizada pela equação analítica proposta pelo Eurocódigo 9 Parte 1-2 [3], uma vez que esta equação não inclui as propriedades do ar.

Os restantes resultados foram obtidos através da equação simplificada com o fator de massividade proposto e reajustado, de maneira a aproximar aos valores obtidos pelo método numérico. Não foi possível retirar conclusões quanto à influência do fator de massividade. No entanto, a secção transversal reta está relacionada com a evolução da temperatura do perfil. Isto porque segundo os dados registados a diminuição da área da secção reta resulta numa diminuição da resistência térmica dos perfis protegidos.

A fim de realizar uma análise sobre a proteção interna dos perfis foi adicionada lã de rocha nas cavidades dos perfis, naqueles em que a geometria permitia a formação de cavidades após a proteção em caixão. Nos perfis não protegidos não foram registadas diferenças na evolução da temperatura do perfil. Nos perfis protegidos verificou-se uma ligeira diminuição da temperatura final do perfil.

6.2 Propostas de trabalhos futuros

Uma vez que foi apresentado um possível reajuste à equação simplificada preconizada pelo Eurocódigo 9 Parte 1-2 [3] para perfis protegidos, a grande proposta para o seguimento deste trabalho seria a verificação desse reajuste proposto através de um estudo de um maior número de perfis e geometrias. Seria interessante a aplicação do mesmo procedimento para perfis de aço protegidos e comparação de ambos os métodos de cálculo, dado que a equação simplificada preconizada pelo Eurocódigo 3 Parte 1-2 [14] para perfis de aço protegidos é igual à equação proposta para perfis de alumínio protegidos, no entanto com as propriedades do aço. Verificar se o fator de massividade proposto pelo presente trabalho também se aplica a perfis de aço. Como trabalhos futuros ainda poderiam ser realizados ensaios experimentais de forma a realizar uma validação final do método numérico e conseqüentemente reajuste da equação simplificada para perfis protegidos.

Sugere-se ainda a repetição de toda a metodologia, no entanto para as curvas de incêndio de hidrocarbonetos e de elementos exteriores. Realizar novamente comparações entre os métodos de cálculo e verificar o fator de massividade proposto. A análise do efeito da utilização da curva de elementos exteriores seria interessante, uma vez que o alumínio é usualmente aplicado em fachadas de edifícios.

No que respeita ao desenvolvimento de projeto seria pertinente uma análise de uma estrutura completa. E a proteção interna poderia ser abordada no âmbito de estruturas de alumínio, como pavilhões industriais, portas e janelas contra incêndio.

**BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES
DE INFORMAÇÃO**

7 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

1. Pannoni, F.D., *Proteção de Estruturas Metálicas Frente ao Fogo*. Steel Times, 1993: p. 383.
2. CEN, *EN 1991-1-2: Actions on structures - Parte 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire*, B. The European Union: Brussels, Editor. 2002.
3. CEN, *EN 1999-1-2: Eurocode 9: Design of aluminium structures-Part 1-2: Structural fire design*, B. The European Union: Brussels, Editor. 2007.
4. Mazzolani, F.M., *Design of Aluminium Structures*.
5. Georgantzia, E., M. Gkantou, and G.S. Kamaris, *Aluminium alloys as structural material: A review of research*. Engineering Structures, 2021. **227**: p. 111372.
6. Newman, G. and I. Simms. *The Cardington fire tests*. in *Proceedings, North American Steel Construction Conference, New Orleans, LA, American Institute of Steel Construction, Chicago, IL*. 1999.
7. X.F. Hu, T.T.L., G.M. Polomark and J.W. MacLaurin, *Thermal properties of building materials at elevated temperatures* 1993.
8. Maljaars, J., et al., *Aluminium structures exposed to fire conditions—an overview*. Heron, 2010. **55**(2): p. 85-122.
9. Fragiaco, M., et al. *Numerical and experimental thermal-structural behaviour of laminated veneer lumber (LVL) exposed to fire*. in *Proceedings of the 10th World Conference on Timber Engineering, Riva del Garda, Trentino, Italy*. 2010.
10. Liu, F., et al., *Experimental and numerical study on behaviour of square steel tube confined reinforced concrete stub columns after fire exposure*. Thin-Walled Structures, 2019. **139**: p. 105-125.
11. Perera, D., et al., *Fire performance of cold, warm and hybrid LSF wall panels using numerical studies*. Thin-Walled Structures, 2020. **157**.
12. Gunalan, S., P. Kolarkar, and M. Mahendran, *Experimental study of load bearing cold-formed steel wall systems under fire conditions*. Thin-Walled Structures, 2013. **65**: p. 72-92.
13. Oliveira, P., E. Fonseca, and R. Campilho, *Easy Trends to Analyse Structural Profiles: Lumped Capacitance Vs Simplified Equation*. International Journal of Safety and Security Engineering, 2020. **10**: p. 625-629.
14. CEN, *EN 1993-1-2, Eurocode 3: Design of Steel Structures - Parte 1-2: General Rules - Structural fire design*, B. The European Union: Brussels, Editor. 2010.
15. Xu, Q., G.-Q. Li, and Y.C. Wang, *A simplified method for calculating non-uniform temperature distributions in thin-walled steel members protected by intumescent coatings under localized fires*. Thin-Walled Structures, 2021. **162**: p. 107580.
16. *GB 51249-2017: Code for fire safety of steel structures in buildings*, N. Standard, Editor. 2017.

17. Han, J., et al., *An experimental study to assess the feasibility of a three stage thermal conductivity model for intumescent coatings in large space fires*. Fire Safety Journal, 2019. **109**: p. 102860.
18. Durgun, M.Y., *Experimental research on gypsum-based mixtures containing recycled roofing tile powder at ambient and high temperatures*. Construction and Building Materials, 2021. **285**.
19. *Gypsum in construction: origin and properties: J. Karni & E. Y. Karni, Materials & Structures, 28(176), 1995, pp 92–100*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1995. **32(6)**: p. A263.
20. König, A.J.J.S.J., *Gypsum plasterboards used as fire protection - Analysis of a database*. p. 30.
21. *BS 520:2009, Gypsum Plasterboards - Definitions, Requirements and Test Methods.*, I.B. Standards, Editor. 2010.
22. Rahmanian, I. and Y. Wang, *Thermal conductivity of gypsum at high temperatures—a combined experimental and numerical approach*. Acta Polytechnica, 2009. **49(1)**.
23. Park, S.-H., et al., *Determining thermal properties of gypsum board at elevated temperatures*. Fire and Materials, 2009. **34**: p. 237-250.
24. Frangi, A., et al., *Experimental and numerical analysis of gypsum plasterboards in fire*. Fire technology, 2010. **46(1)**: p. 149.
25. Cavcar, M., *The International Standard Atmosphere (ISA)*. Anadolu University, Turkey.
26. Rockwool, *Libertar o poder natural da rocha*. 2018.
27. German, C., *Comparison of Thermal Insulation Materials for Building Envelopes of the Multi-storey Buildings in Saint-Petersburg*. 2010. p. 67.
28. Bergman, T.L., et al., *Fundamentals of heat and mass transfer*. 2011: John Wiley & Sons.
29. Purkiss, J.A. and L.-Y. Li, *Fire safety engineering design of structures*. 2013: CRC press.
30. Holman, J.P., *Heat Transfer*. Tenth ed. 2010.
31. Schmidt, F.W., R.E. Henderson, and C.H. Wolgemuth, *Introdução às ciências térmicas: termodinâmica, mecânica dos fluidos e transferência de calor*. 1996: Editora Blucher.
32. Modest, M.F. and S. Mazumder, *Radiative heat transfer*. 2021: Academic press.
33. Gales, J., B. Chorlton, and C. Jeanneret, *The Historical Narrative of the Standard Temperature–Time Heating Curve for Structures*. Fire Technology, 2020. **57**: p. 1-30.
34. *ISO 834-1, Fire Resistance Tests - Elements of building Construction.*, G.I.O.f. Standardization, Editor. 1999.
35. *EXEO Office Campus*. Available from: <https://www.exeo.pt/>. [Acedido a 23-01-2022]
36. Costa, C.N. and V.P. Silva, *Revisão histórica das curvas padronizadas de incêndio*. Seminário Internacional NUTAU: Tecnologia de Durabilidade, 2006.

37. Sohm, J. *World Trade Center*. 2019; Available from: <https://www.history.com/topics/landmarks/world-trade-center>. [Acedido a 23-01-2022]
38. BORUNDA, A. *We still don't know the full impacts of the BP oil spill, 10 years later*. 2020; Available from: <https://www.nationalgeographic.com/science/article/bp-oil-spill-still-dont-know-effects-decade-later>. [Acedido a 23-01-2022]
39. Gravit, M., E. Golub, and S. Antonov, *Fire protective dry plaster composition for structures in hydrocarbon fire*. *Инженерно-строительный журнал*, 2018(3): p. 86-94.
40. Oliveira, P.N., et al., *Analytical Equations Applied to the Study of Steel Profiles under Fire According to Different Nominal Temperature-Time Curves*. *Mathematical and Computational Applications*, 2021. **26**(2): p. 48.
41. Piloto, P.A. *Utilização de métodos avançados de cálculo na avaliação do comportamento termomecânico de estruturas metálicas em situação de incêndio*. in *Proceedings of the 3º Congresso Luso Moçambicano de Engenharia*. 2003.
42. Fonseca, E. and C.A.M. Oliveira, *Numerical modelling of internal voids in fire exposed structures*, in *5º Interamerican Congress on Computers Applied to the Process Industry*, C.J.R. José O. Valderrama, Editor. 2001: Brasil. p. 195-199.
43. Marques, L., L.S. da Silva, and C. Rebelo. *Métodos Avançados de análise por elementos finitos para verificação da estabilidade de estruturas metálicas*. in *Congresso de Construção Metálica e Mista VII*. 2009.
44. Morais, E.M. and C. Magalhães, *Métodos avançados de cálculo de estruturas metálicas submetidas à acção do fogo*. *Revista Internacional De Metodos Numericos Para Calculo Y Diseno En Ingenieria*, 2002. **18**: p. 367-384.
45. Ferreira, E.M.M., *Modelação Numérica do Comportamento Termo-Mecânica de Perfis Metálicos Sujeitos à Acção do Fogo*. 1998, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
46. Boko, I., et al., *An optimum selection of alloy for aluminium structures exposed to fire*. *Gradevinar*, 2020. **72**: p. 225-235.

ANEXOS

8.1 ANEXO 1

8.2 ANEXO 2

8.3 ANEXO 3

8.4 ANEXO 4

8 ANEXOS

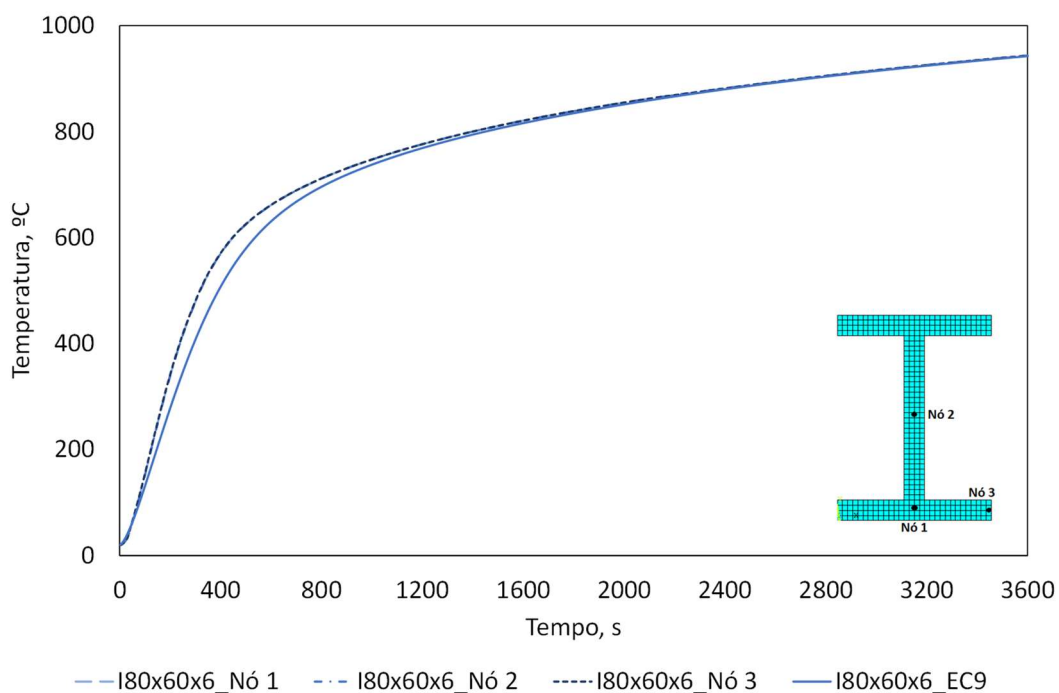
8.1 Anexo 1

O presente anexo inclui os gráficos da evolução de temperatura dos perfis em alumínio não protegidos e protegidos.

Perfil I 80x60x6

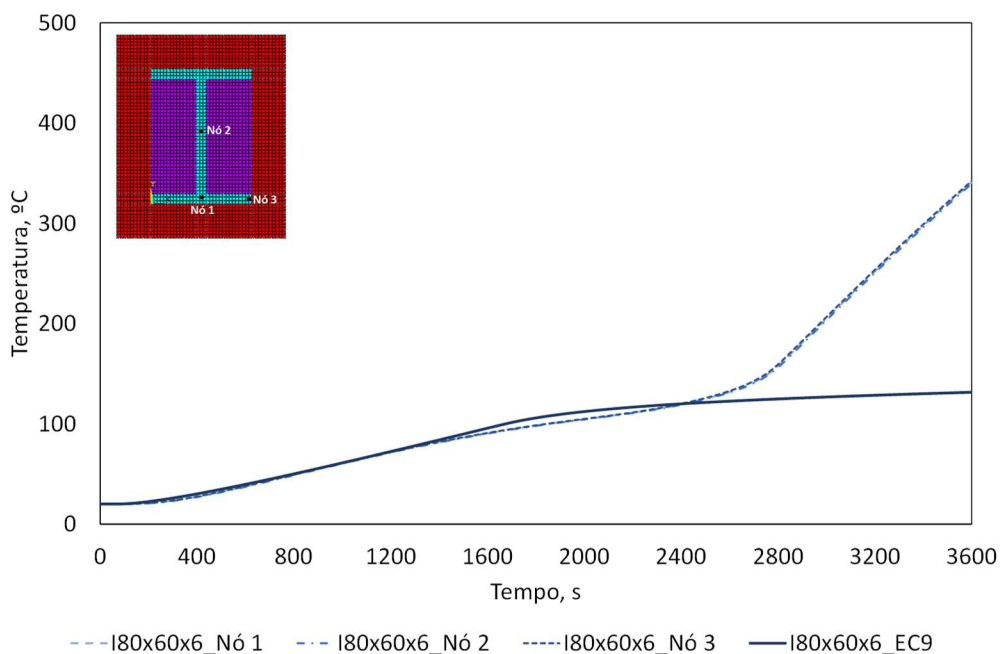
Perímetro [m]	0,388	Área Secção Reta [m ²]	0,001128	Fator de massividade [m ⁻¹]	343,9716
---------------	-------	------------------------------------	----------	---	----------

Perfil Não Protegido

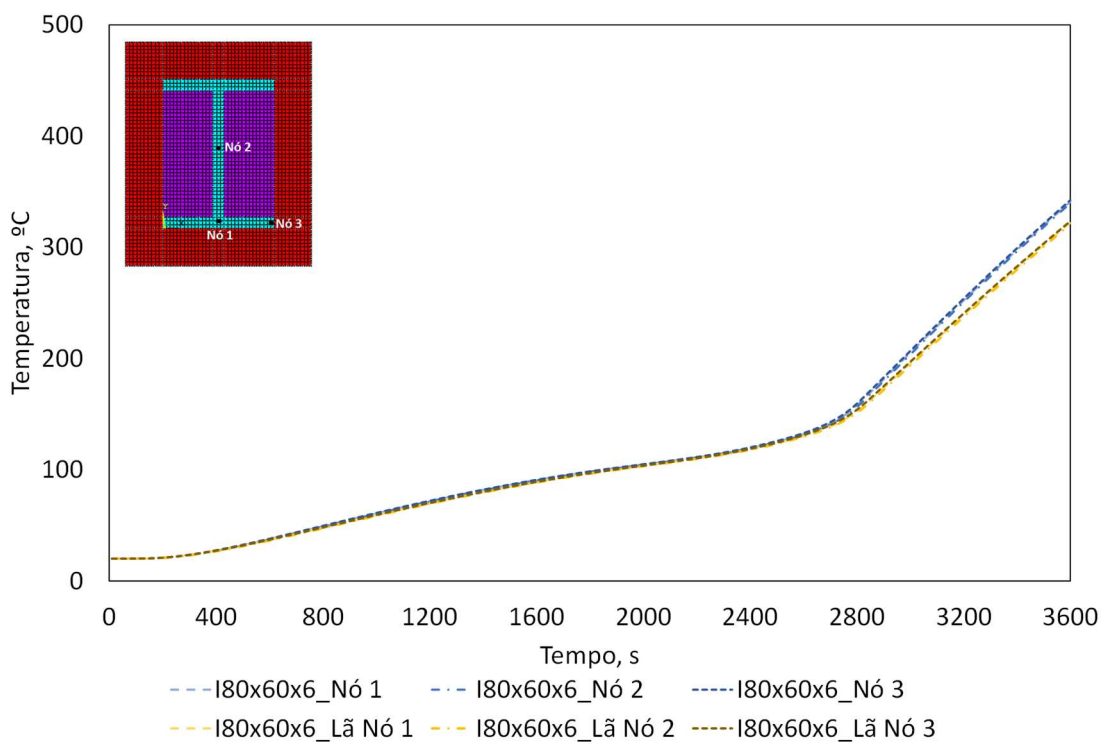


Perímetro Protegido [m] $2(b+h)$	0,28	Área Secção Reta com Proteção [m ²]	0,012	Fator de Massividade Protegido [m ⁻¹]	23,33
-------------------------------------	------	---	-------	---	-------

Perfil Protegido - Gesso



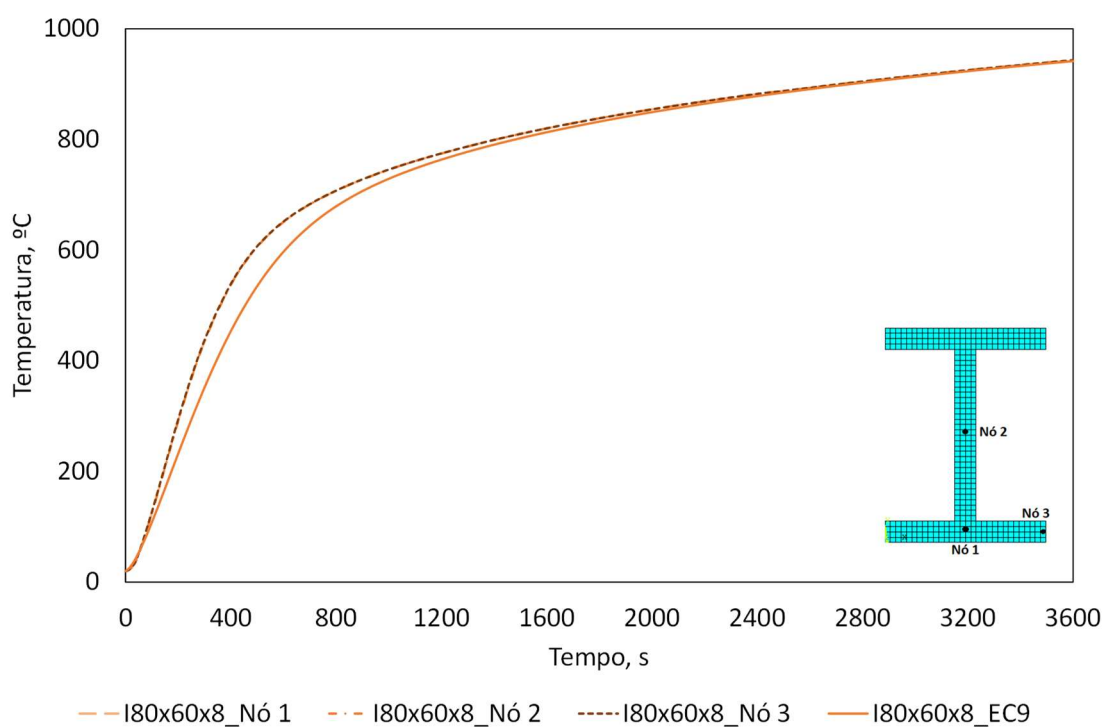
Perfil Protegido – Gesso e Lã de Rocha



Perfil I 80x60x8

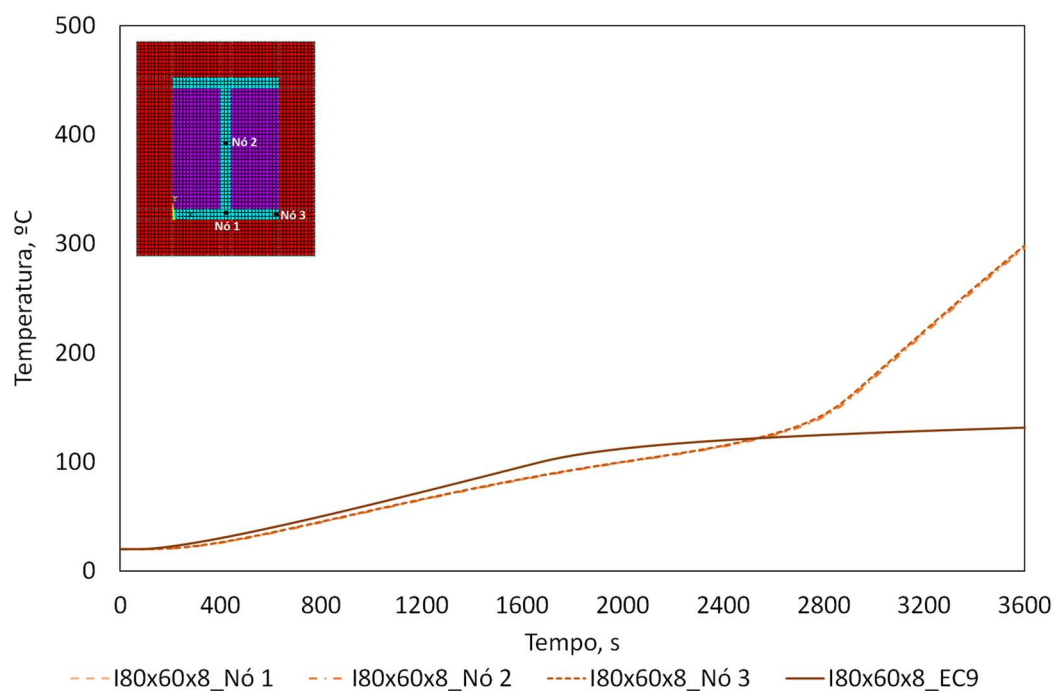
Perímetro [m]	0,384	Área Secção Reta [m ²]	0,001472	Fator de massividade [m ⁻¹]	260,8696
---------------	-------	------------------------------------	----------	---	----------

Perfil Não Protegido

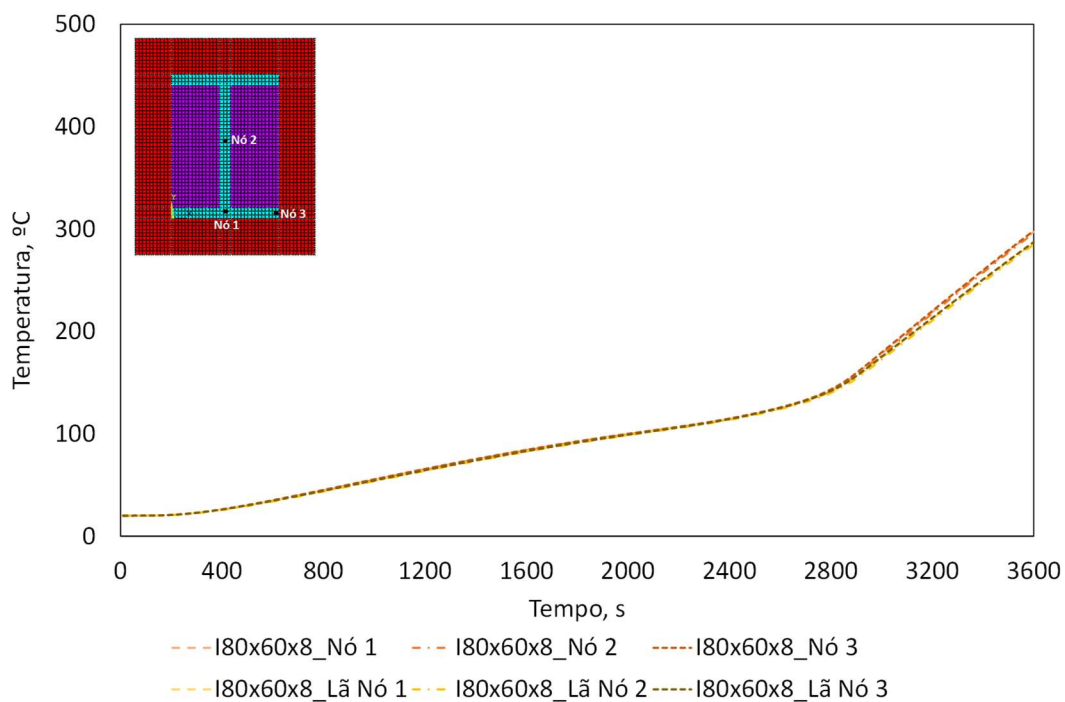


Perímetro Protegido [m]	0,28	Área Secção Reta com Proteção [m ²]	0,012	Fator de Massividade Protegido [m ⁻¹]	23,33
$2(b+h)$					

Perfil Protegido - Gesso



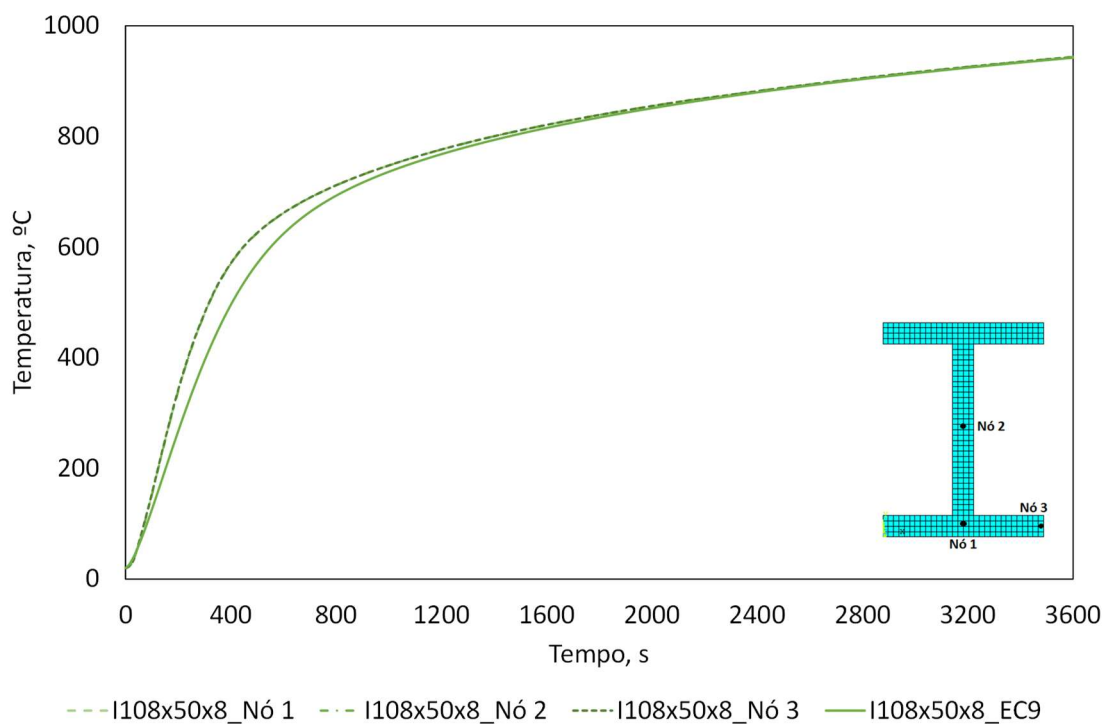
Perfil Protegido – Gesso e Lã de Rocha



Perfil I 108x50x8

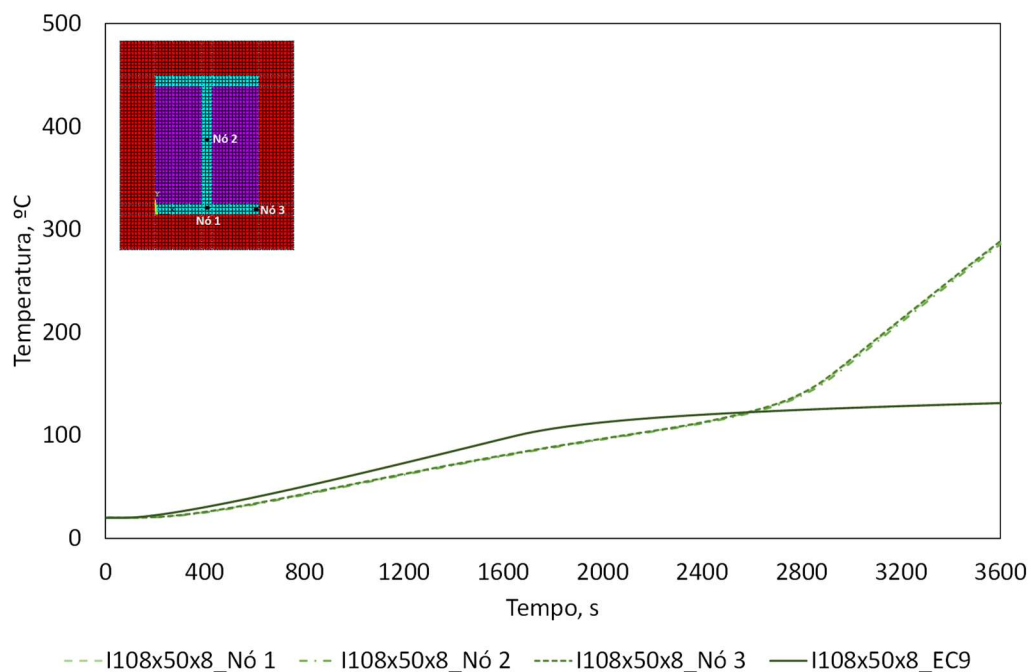
Perímetro [m]	0,406	Área Secção Reta [m ²]	0,001260	Fator de massividade [m ⁻¹]	322,2222
---------------	-------	--	----------	---	----------

Perfil Não Protegido

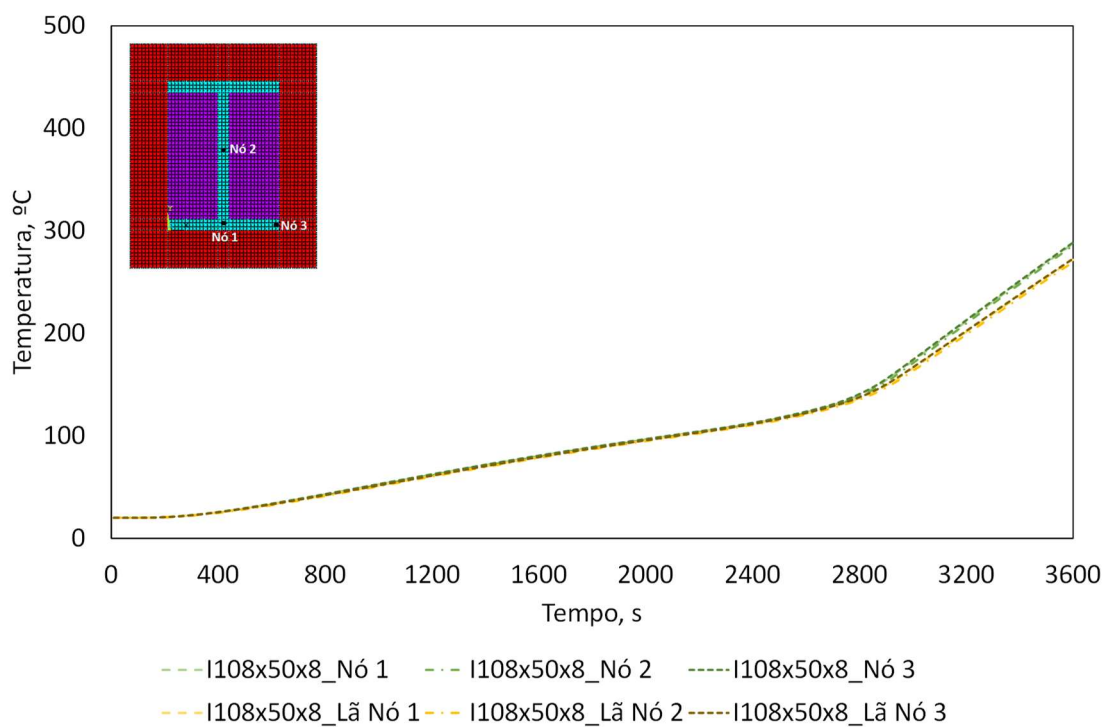


Perímetro		Área		Fator de	
Protegido [m]	0,32	Secção	0,0133	Massividade	23,723
2(b+h)		Proteção		Protegido [m ⁻¹]	
		[m ²]			

Perfil Protegido - Gesso

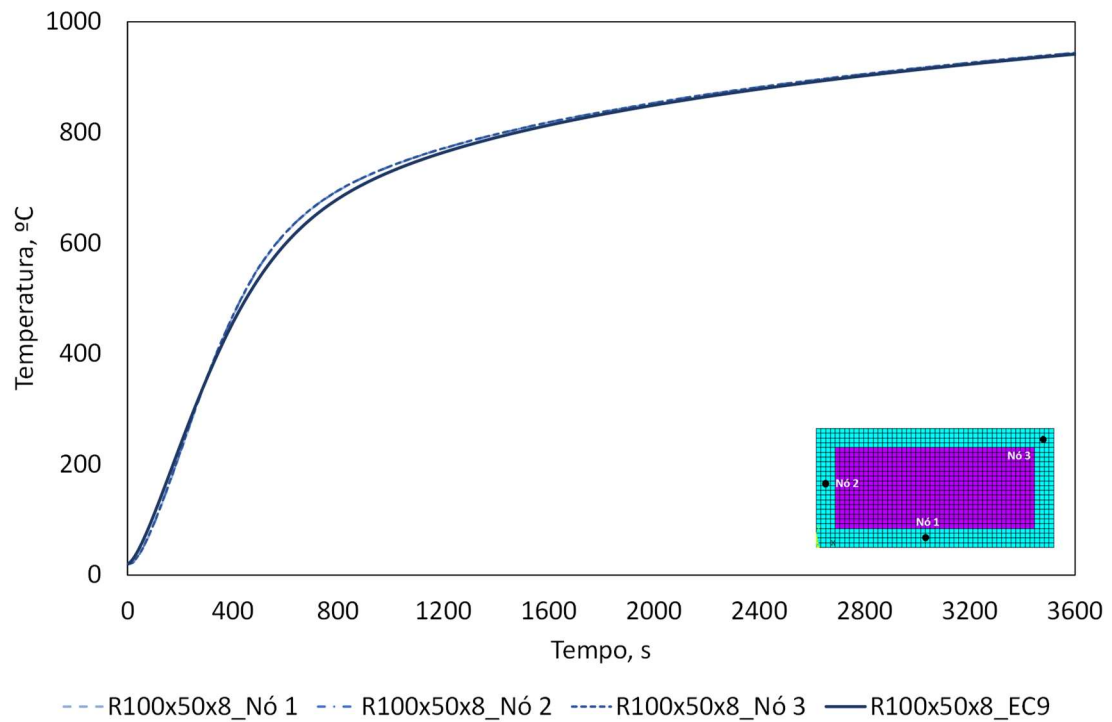


Perfil Protegido – Gesso e Lã de Rocha

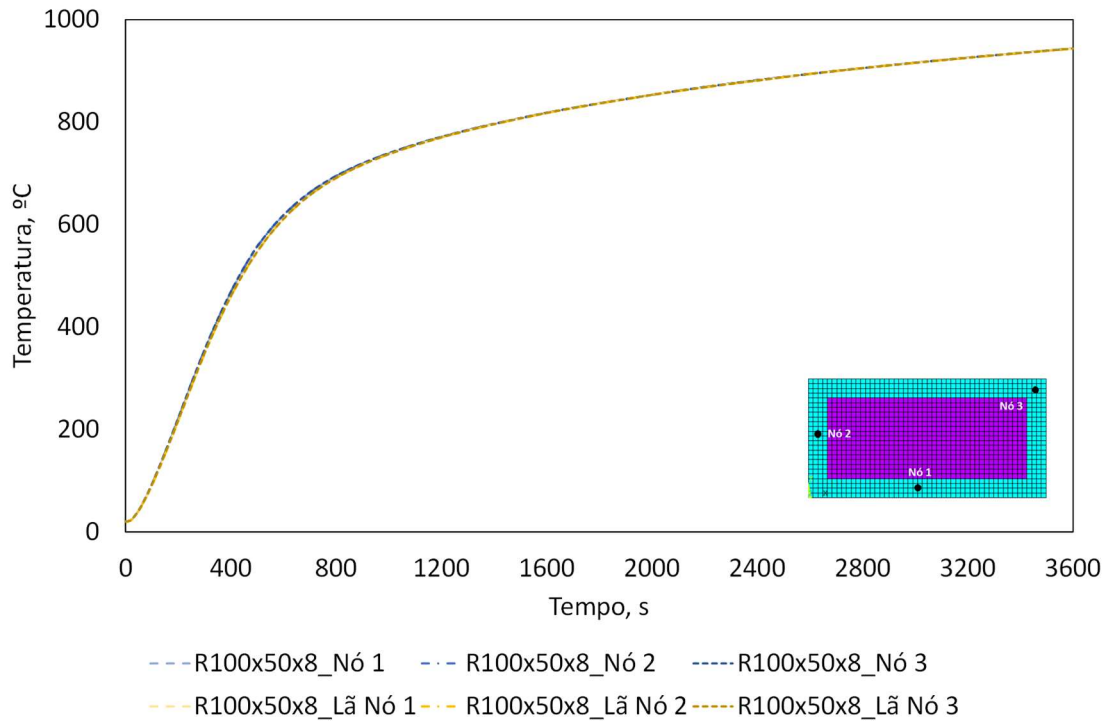


Perfil R 100x50x8

Perímetro [m]	0,300	Área Secção Reta [m ²]	0,001136	Fator de massividade [m ⁻¹]	264,0845
---------------	-------	--	----------	---	----------

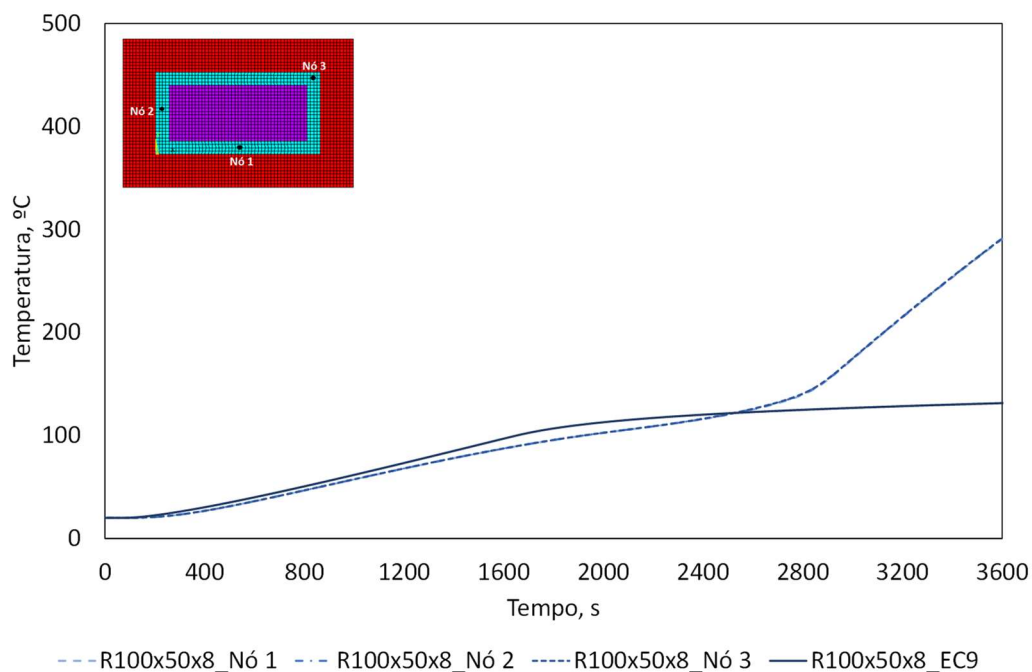
Perfil Não Protegido

Perfil Protegido – Lã de Rocha

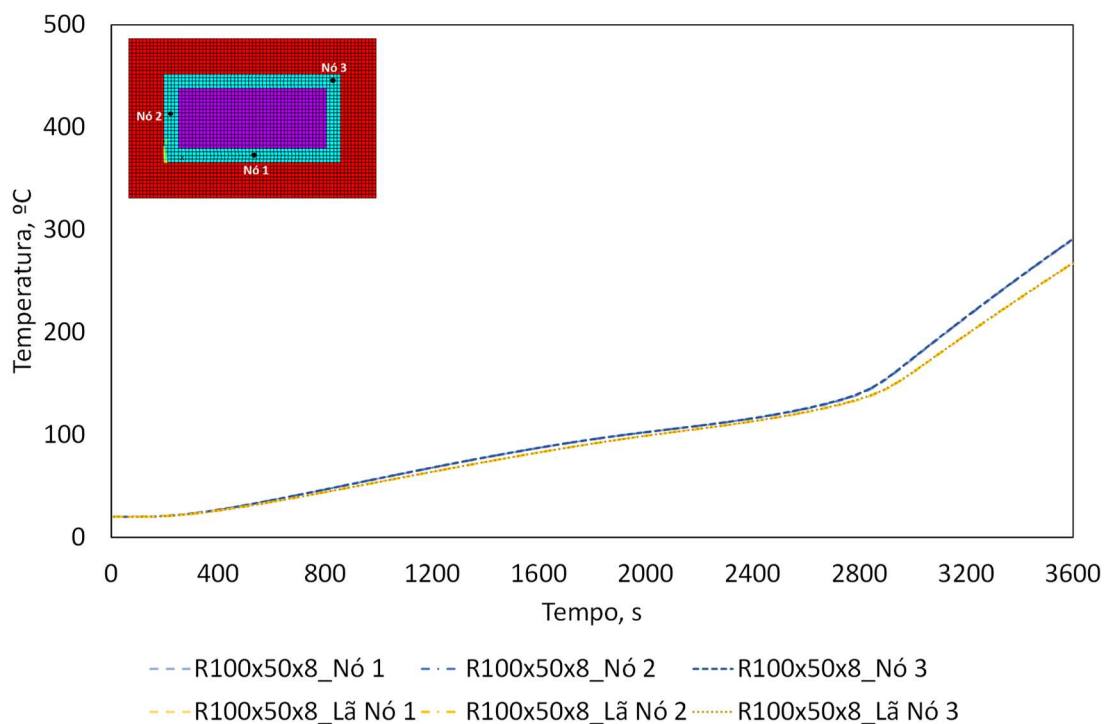


Perímetro Protegido [m]	Área Secção Reta com Proteção [m ²]	Fator de Massividade Protegido [m ⁻¹]
2(b+h)	0,30	23,810
	0,0126	

Perfil Protegido - Gesso

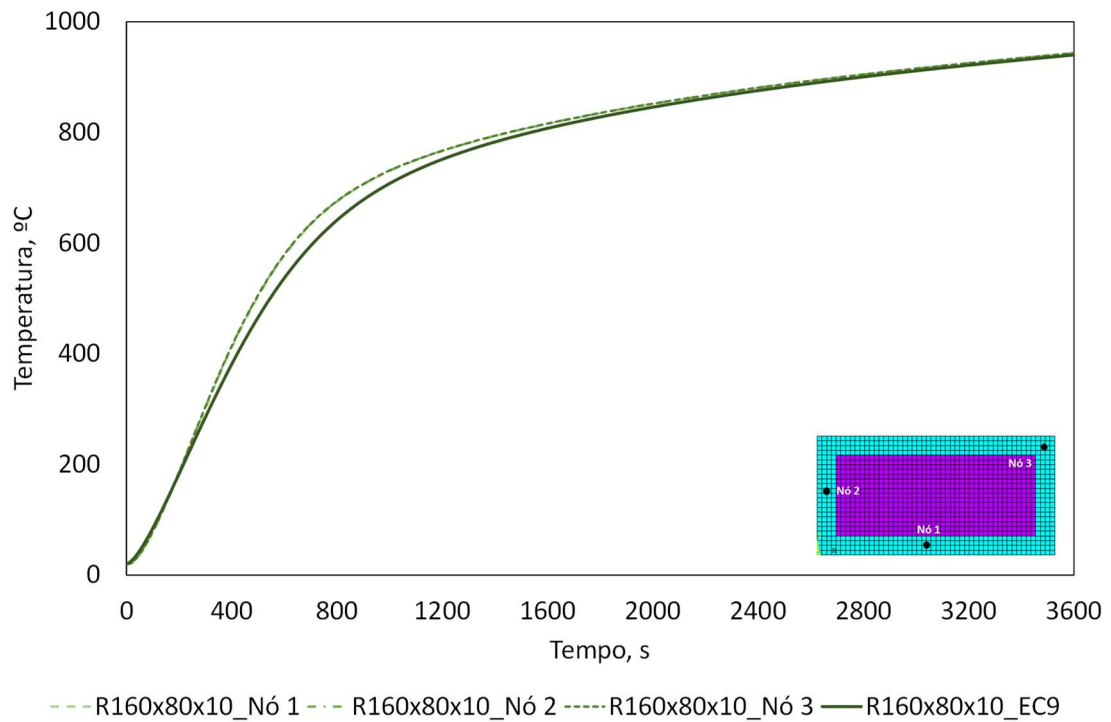


Perfil Protegido – Gesso e Lã de Rocha

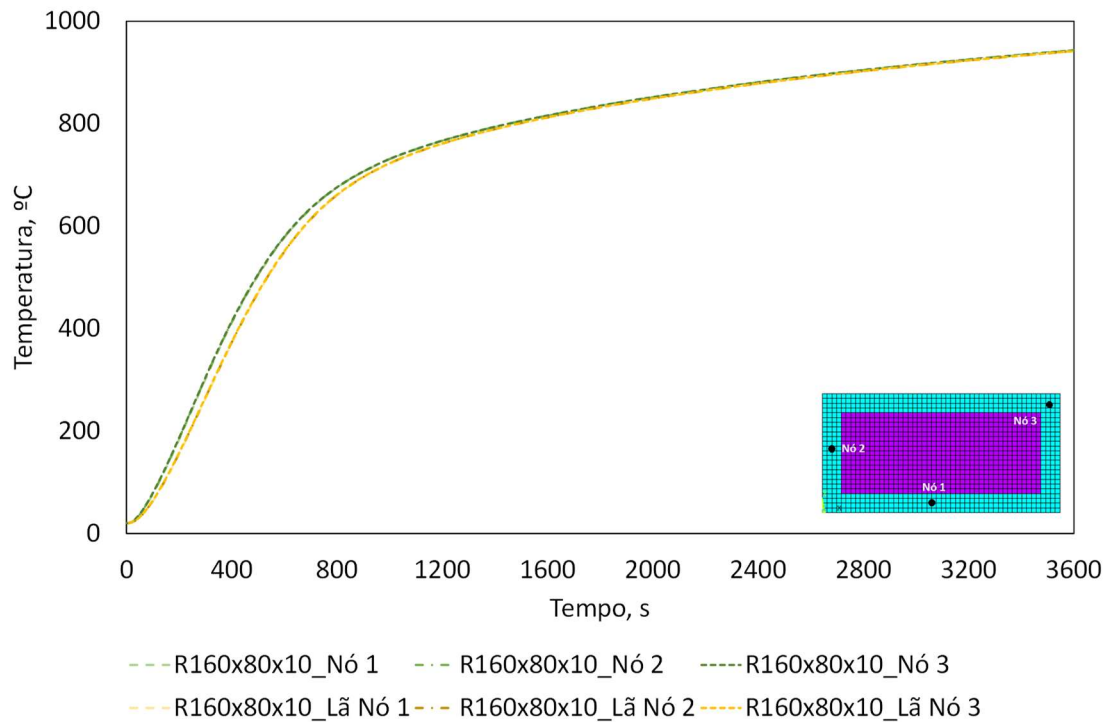


Perfil R 160x80x10

Perímetro [m]	0,480	Área Secção Reta [m ²]	0,0023	Fator de massividade [m ⁻¹]	208,6957
---------------	-------	--	--------	---	----------

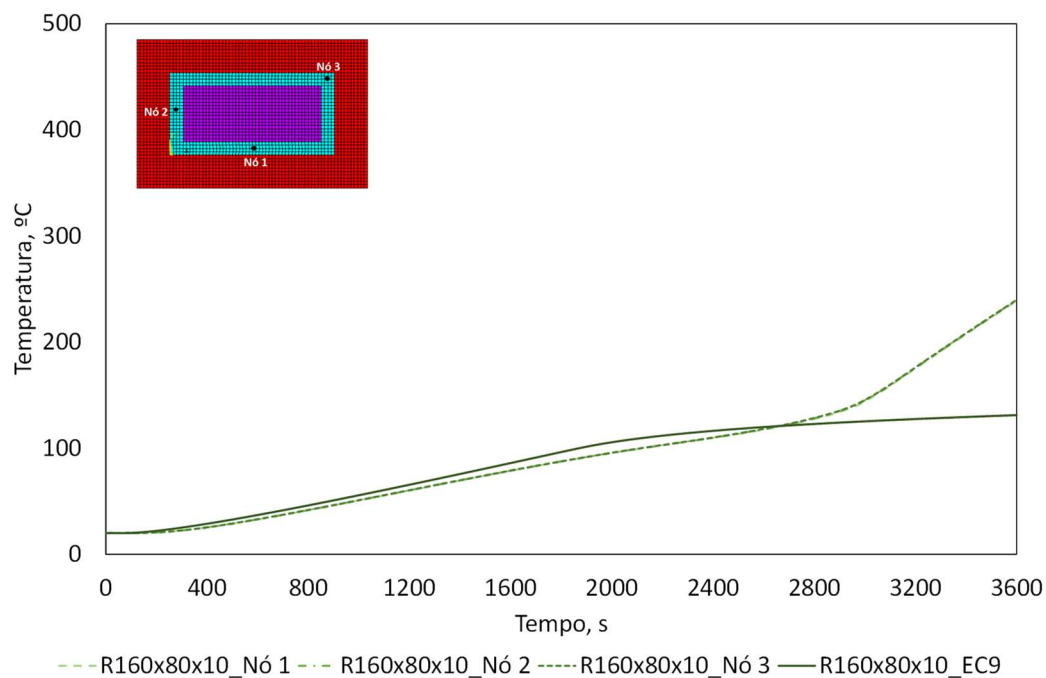
Perfil Não Protegido

Perfil Protegido – Lã de Rocha

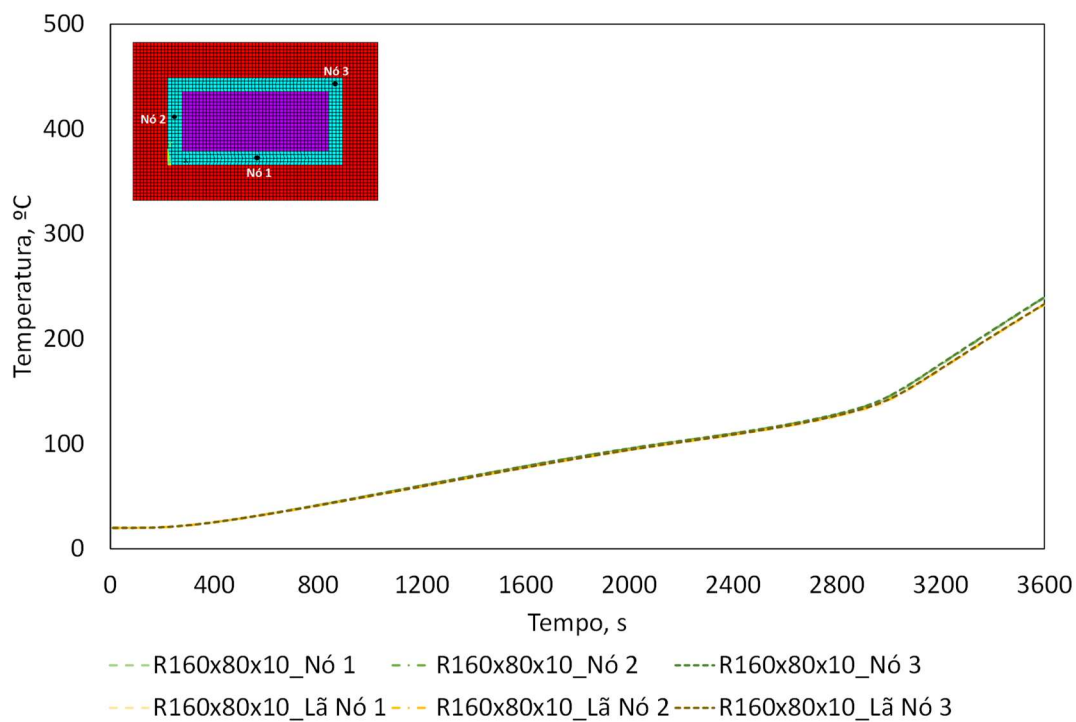


Perímetro Protegido [m]	Área Secção	Fator de Massividade Protegido [m ⁻¹]
2(b+h)	Reta com Proteção [m ²]	20,000
0,48	0,0240	

Perfil Protegido - Gesso



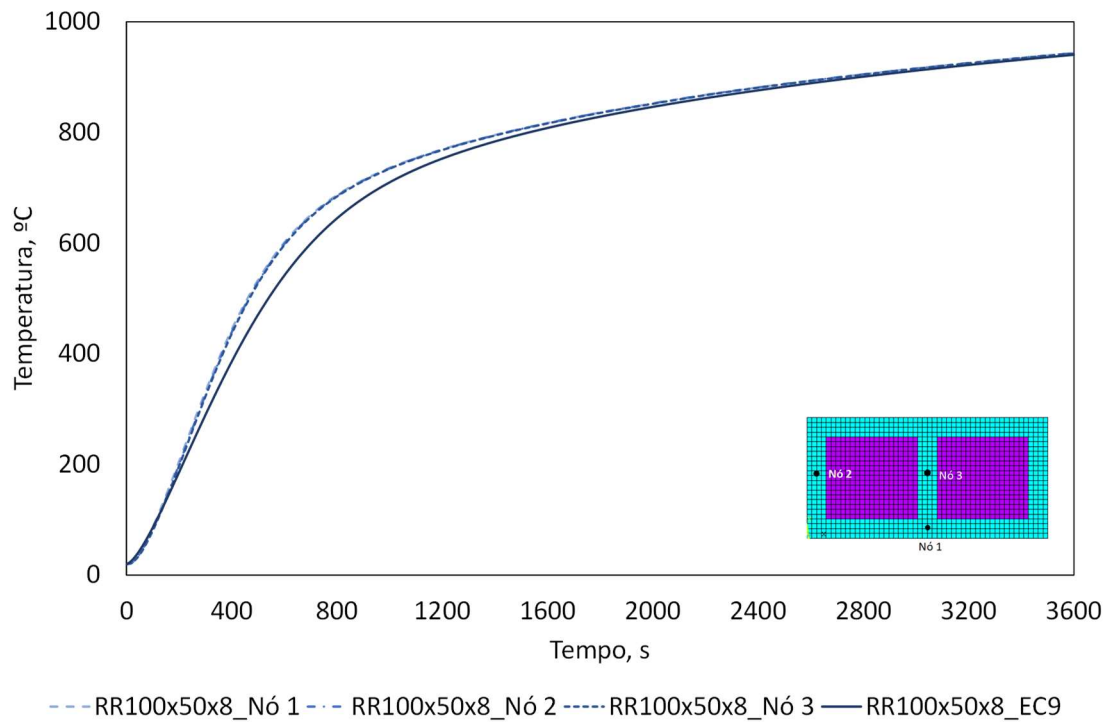
Perfil Protegido – Gesso e Lã de Rocha



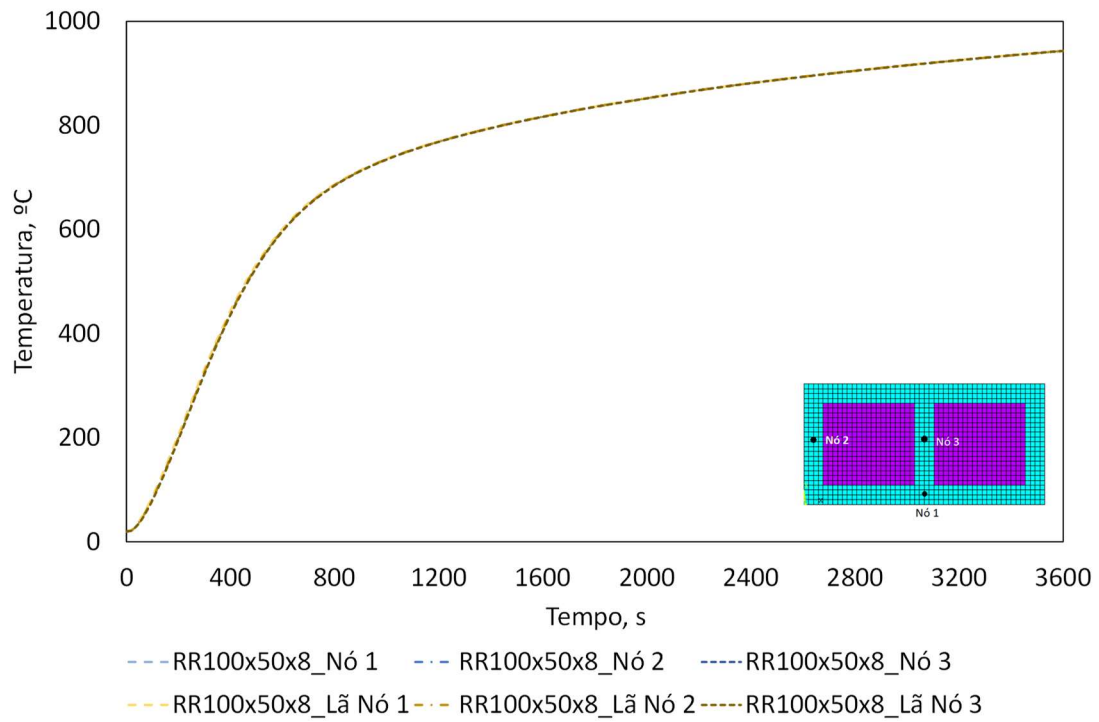
Perfil RR 100x50x8

Perímetro [m]	0,300	Área Secção Reta [m ²]	0,001408	Fator de massividade [m ⁻¹]	213,0682
---------------	-------	--	----------	---	----------

Perfil Não Protegido

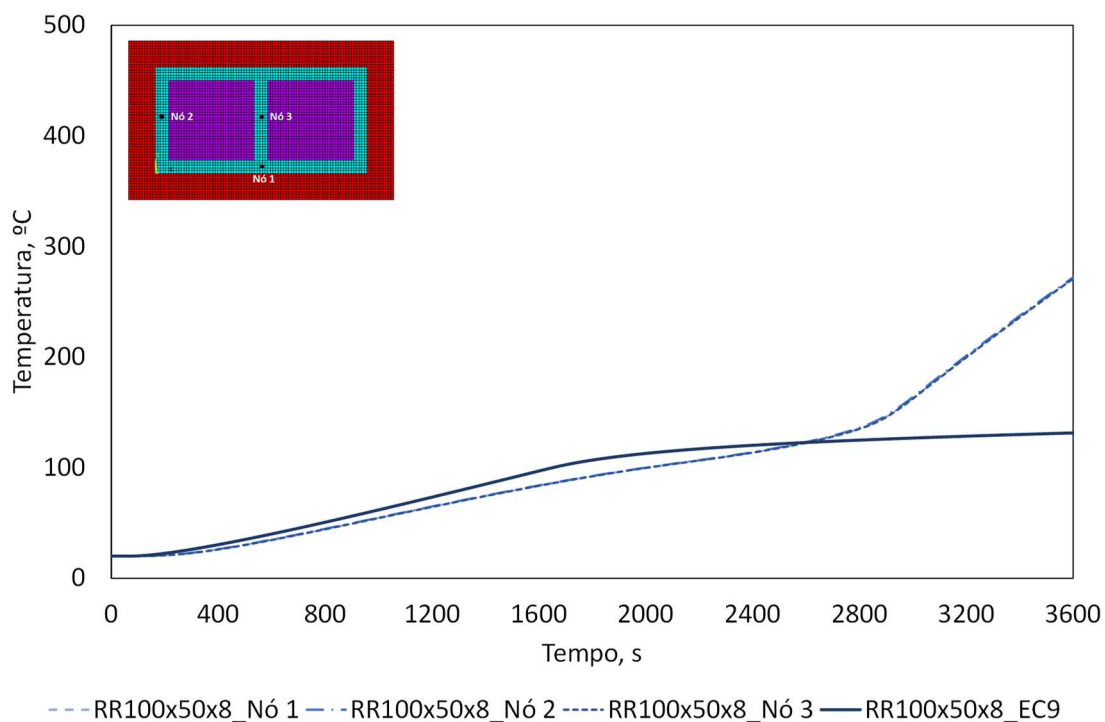


Perfil Protegido – Lã de Rocha

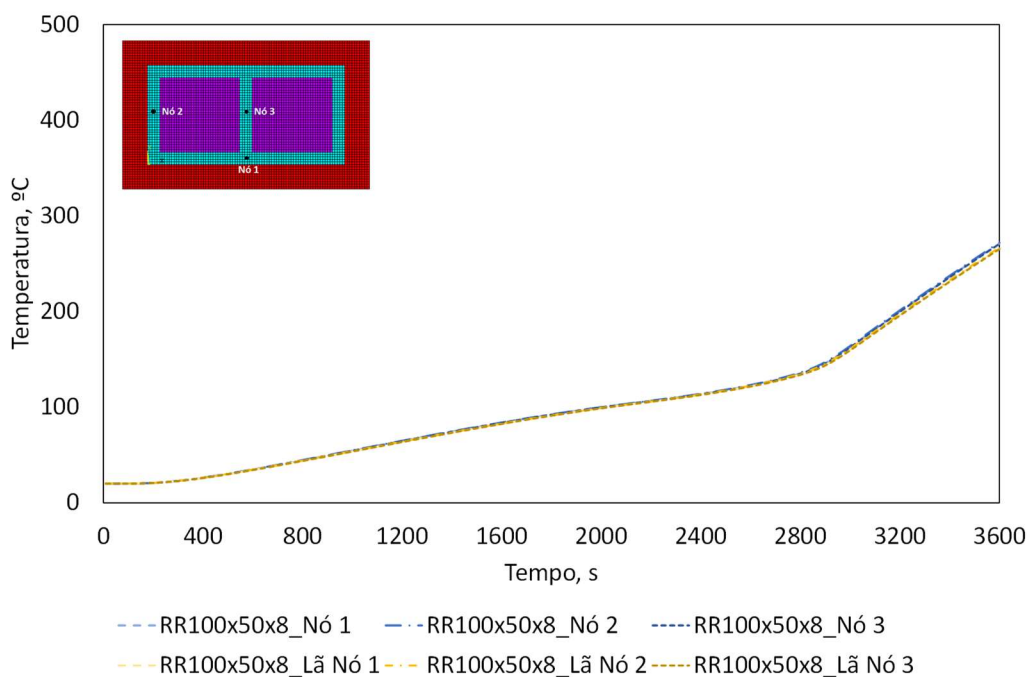


Perímetro Protegido [m]	Área Secção Reta com Proteção [m ²]	Fator de Massividade Protegido [m ⁻¹]
$2(b+h)$	0,30	23,810
	0,0126	

Perfil Protegido - Gesso



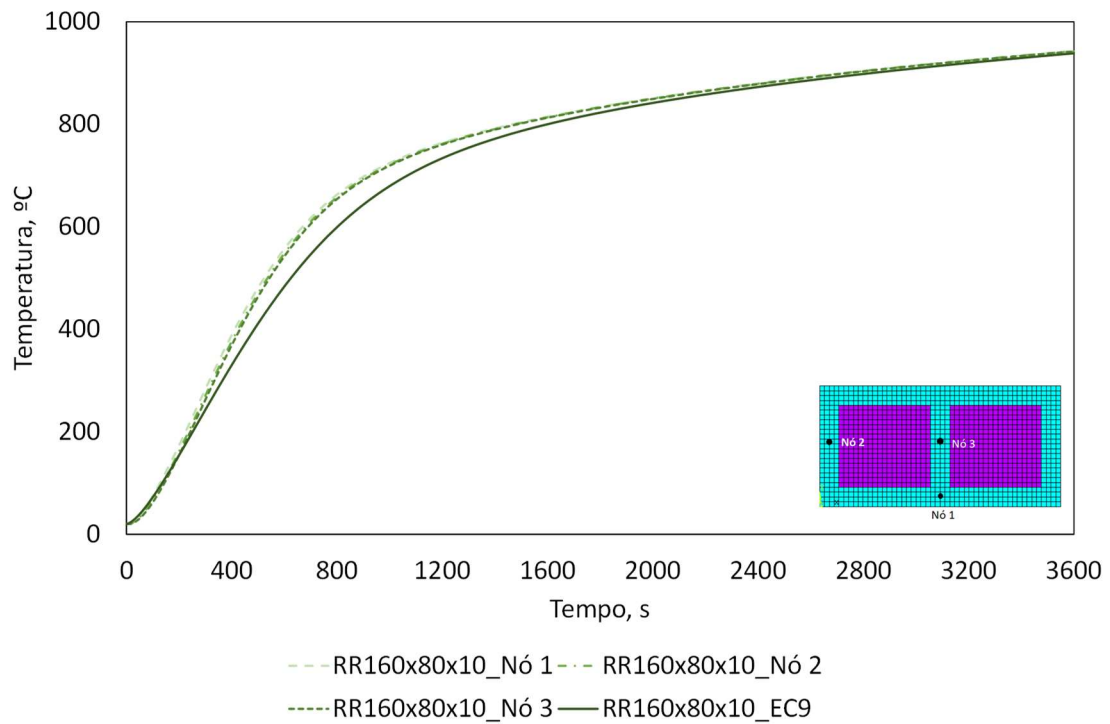
Perfil Protegido – Gesso e Lã de Rocha



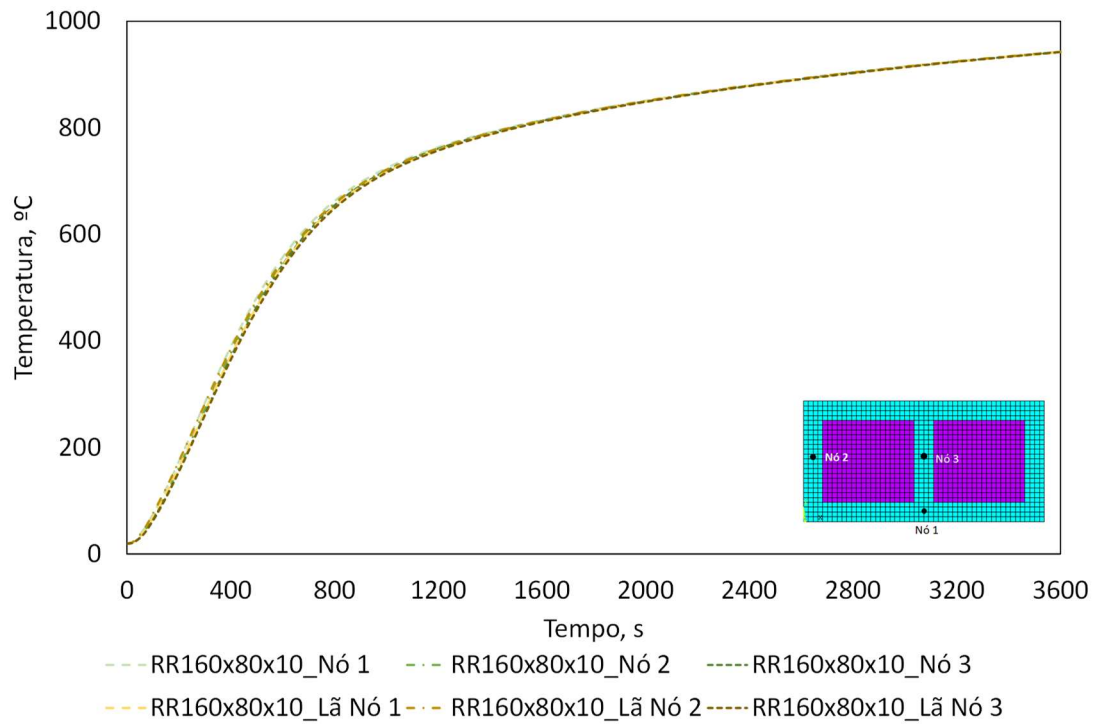
Perfil RR 160x80x10

Perímetro [m]	0,4800	Área Secção Reta [m ²]	0,0029	Fator de massividade [m ⁻¹]	165,5172
---------------	--------	--	--------	---	----------

Perfil Não Protegido

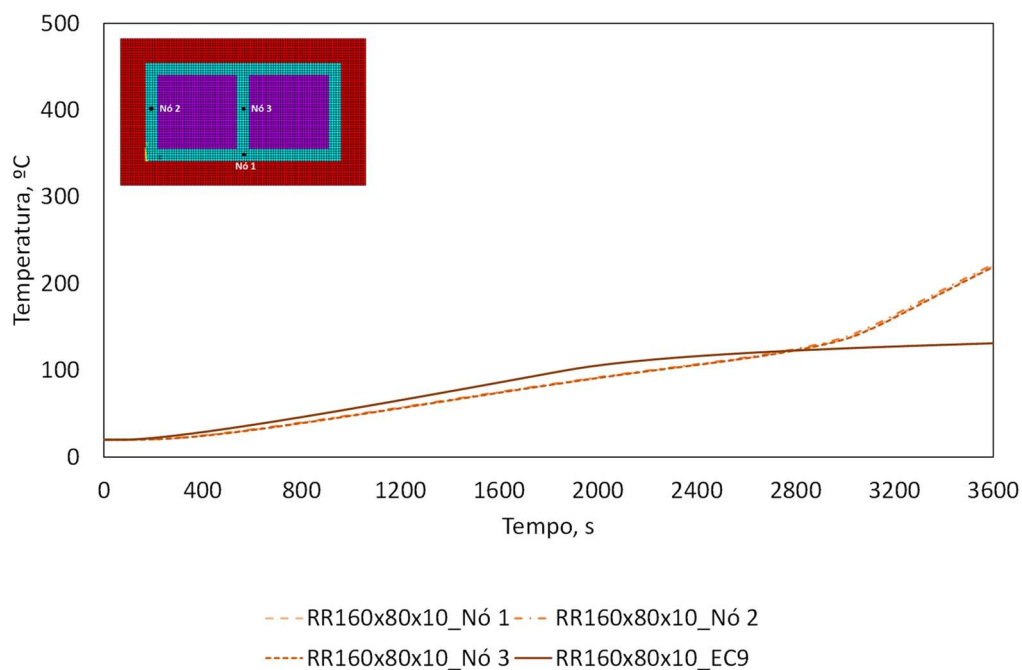


Perfil Protegido – Lã de Rocha

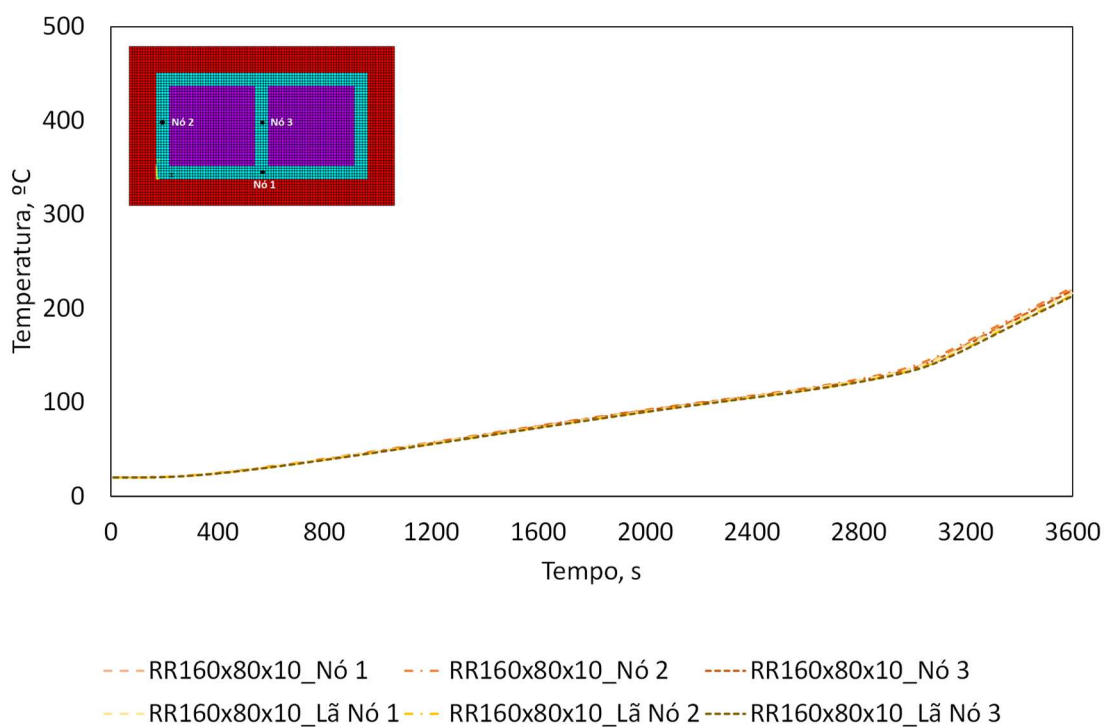


Perímetro Protegido [m]	Área Secção Reta com Proteção [m ²]	Fator de Massividade Protegido [m ⁻¹]
2(b+h)	0,48	20,000
	0,0240	

Perfil Protegido - Gesso



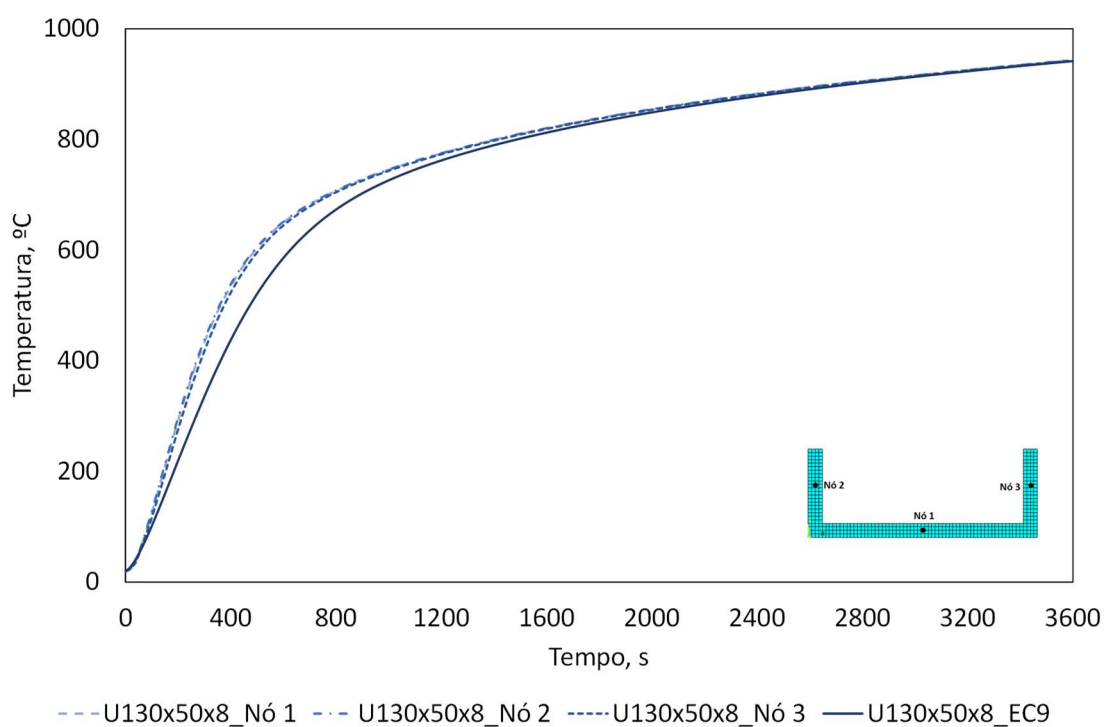
Perfil Protegido – Gesso e Lã de Rocha



Perfil U 130x50x8

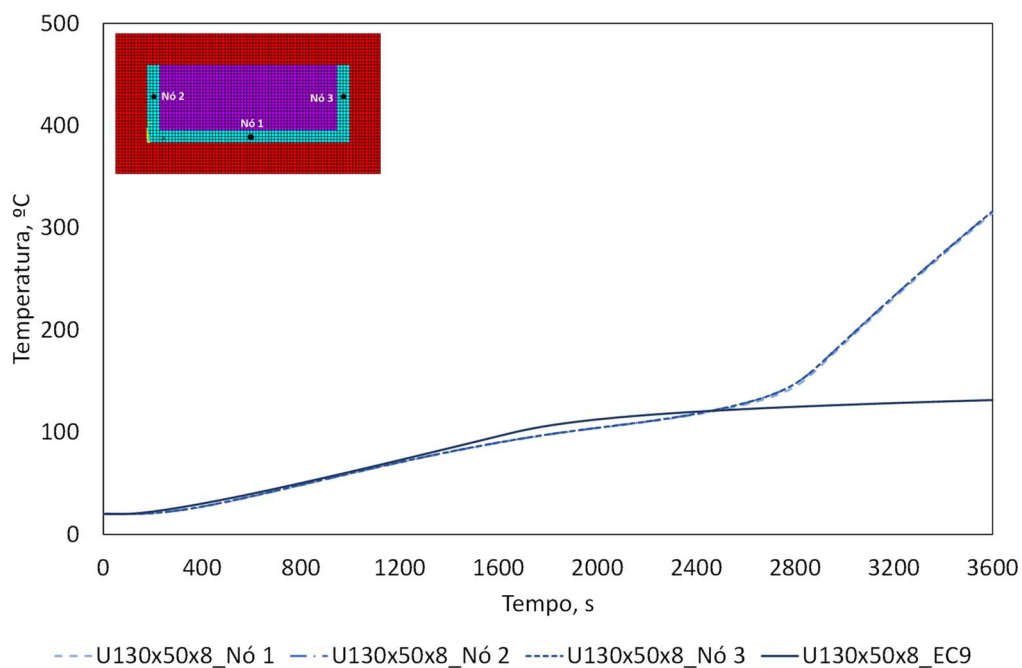
Perímetro [m]	0,460	Área Secção Reta [m ²]	0,001712	Fator de massividade [m ⁻¹]	268,6916
---------------	-------	------------------------------------	----------	---	----------

Perfil Não Protegido

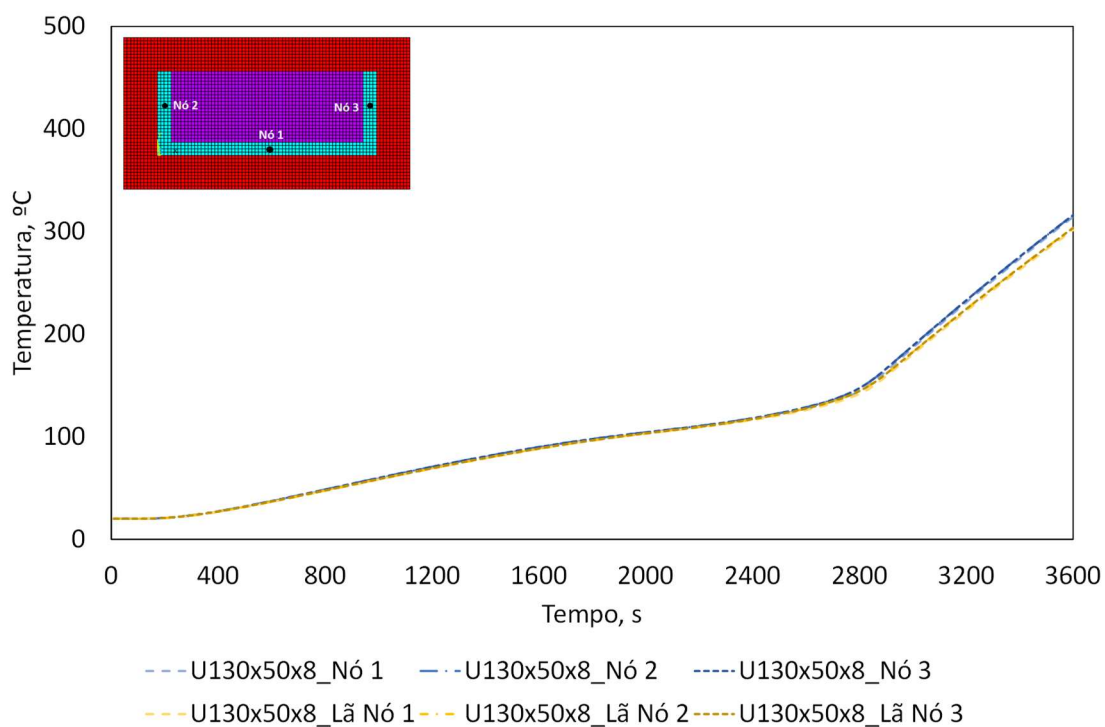


Perímetro Protegido [m]	0,36	Área Secção Reta com Proteção [m ²]	0,0153	Fator de Massividade Protegido [m ⁻¹]	23,5294
$2(b+h)$					

Perfil Protegido - Gesso



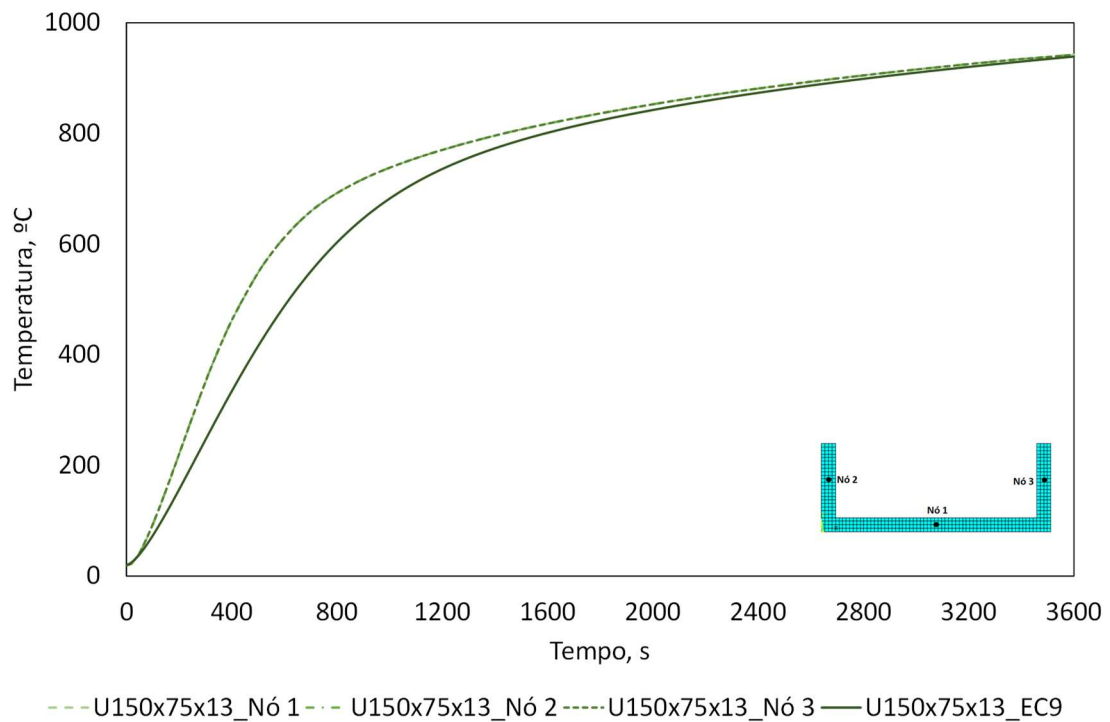
Perfil Protegido – Gesso e Lã de Rocha



Perfil U 150x75x13

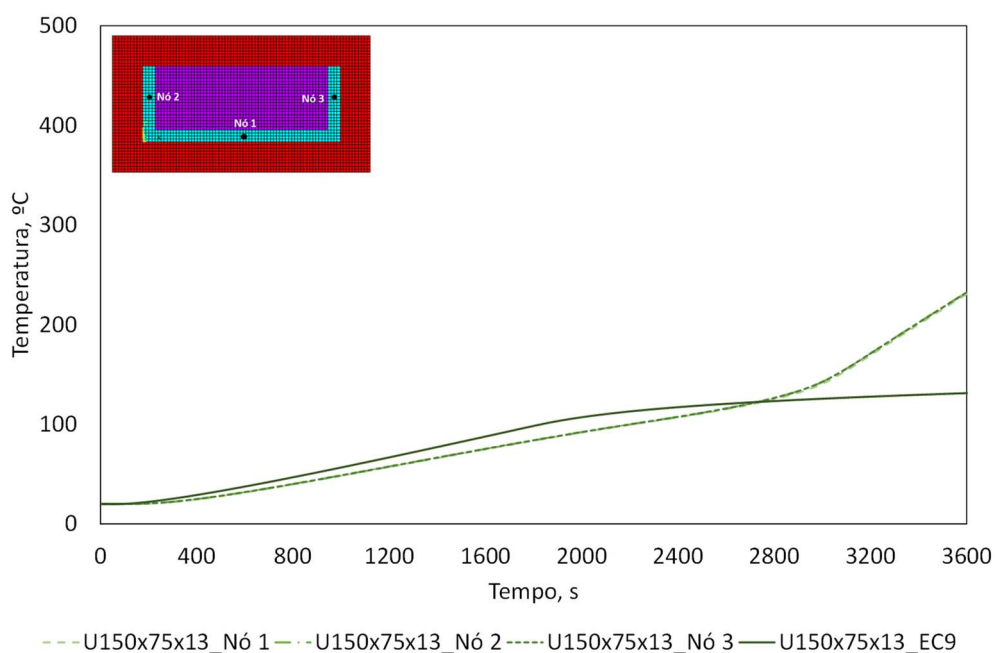
Perímetro [m]	0,600	Área Secção Reta [m ²]	0,003562	Fator de massividade [m ⁻¹]	168,4447
---------------	-------	------------------------------------	----------	---	----------

Perfil Não Protegido

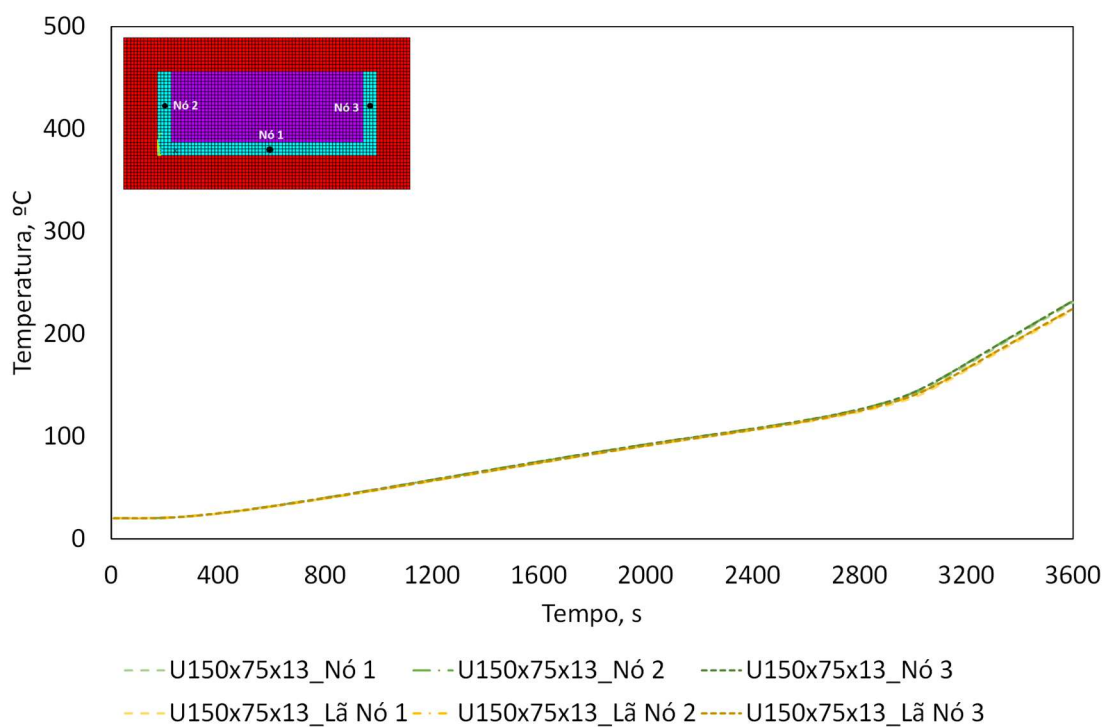


Perímetro Protegido [m]	0,45	Área Secção Reta com Proteção [m ²]	0,02185	Fator de Massividade Protegido [m ⁻¹]	20,5950
$2(b+h)$					

Perfil Protegido - Gesso



Perfil Protegido – Gesso e Lã de Rocha



8.2 Anexo 2

O presente anexo inclui a evolução de temperatura representada na secção transversal reta dos perfis em alumínio não protegidos e protegidos.

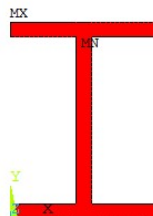
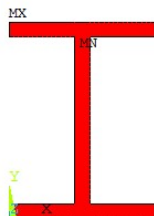
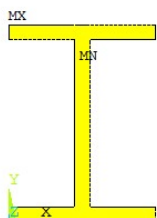
Perfil I 80x60x6

900 segundos

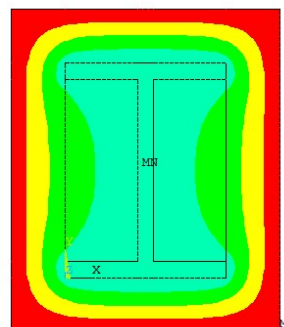
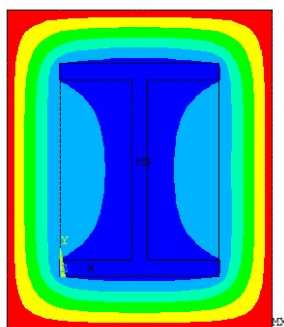
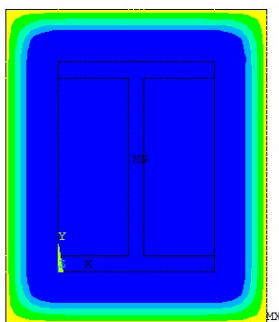
2700 segundos

3600 segundos

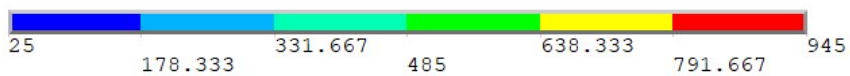
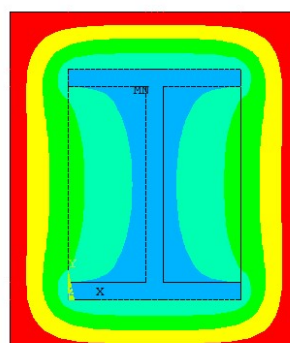
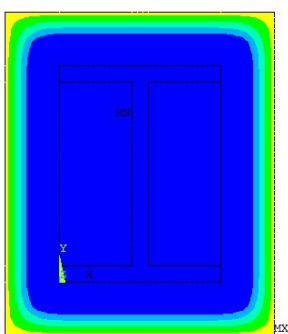
Perfil Não Protegido



Perfil Protegido – Gesso



Perfil Protegido – Gesso e Lã de Rocha



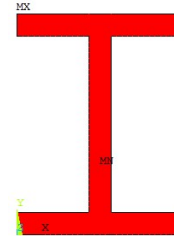
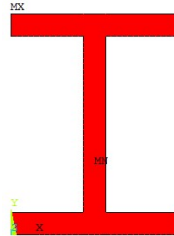
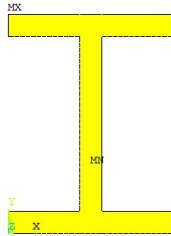
Perfil I 80x60x8

900 segundos

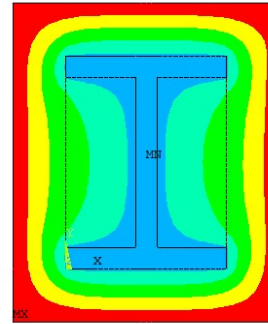
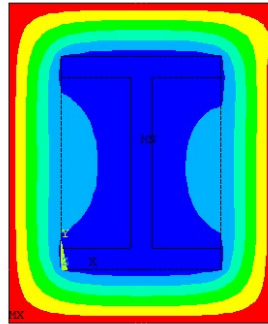
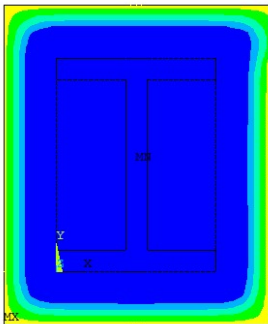
2700 segundos

3600 segundos

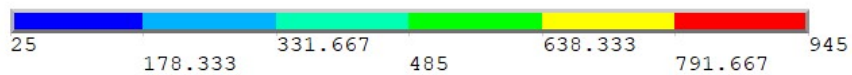
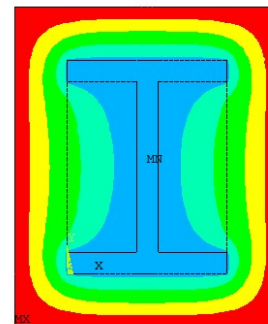
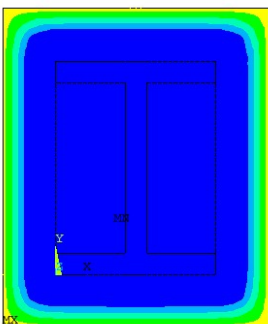
Perfil Não Protegido



Perfil Protegido – Gesso



Perfil Protegido – Gesso e Lã de Rocha



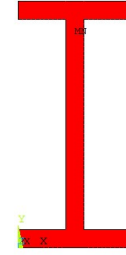
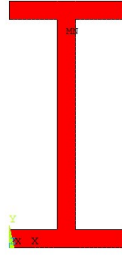
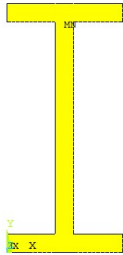
Perfil I 108x50x8

900 segundos

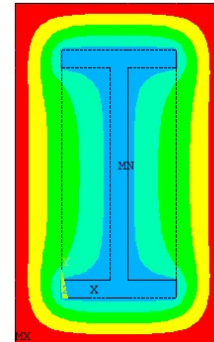
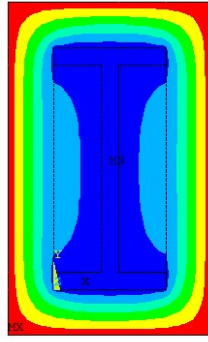
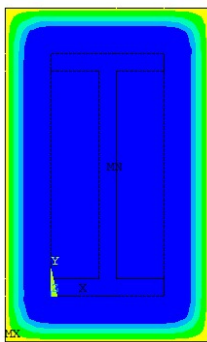
2700 segundos

3600 segundos

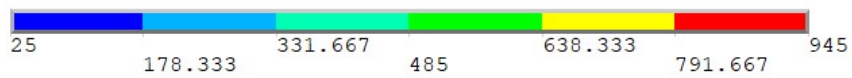
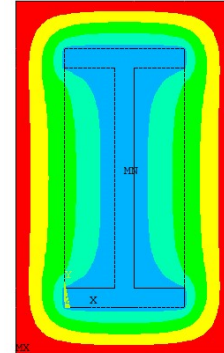
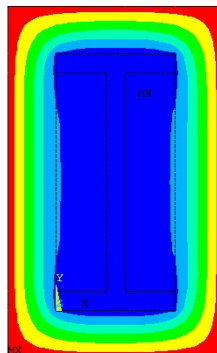
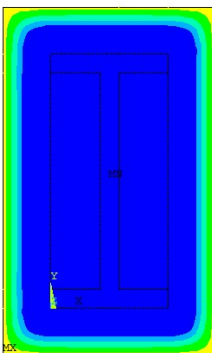
Perfil Não Protegido



Perfil Protegido – Gesso



Perfil Protegido – Gesso e Lã de Rocha



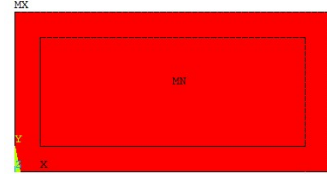
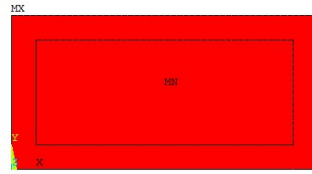
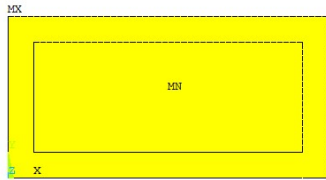
Perfil R 100x50x8

900 segundos

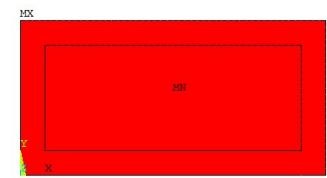
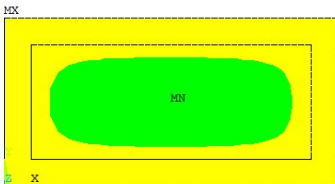
2700 segundos

3600 segundos

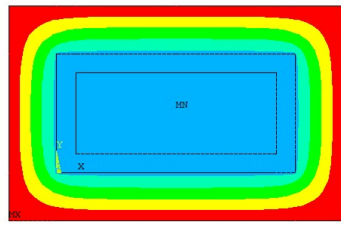
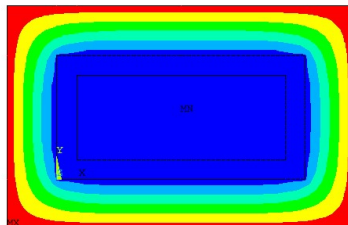
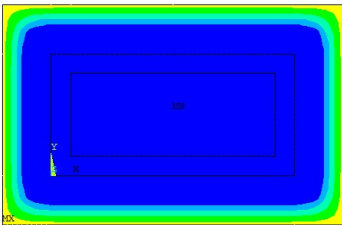
Perfil Não Protegido



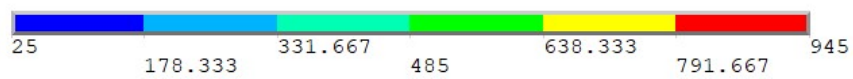
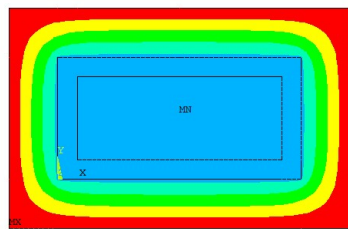
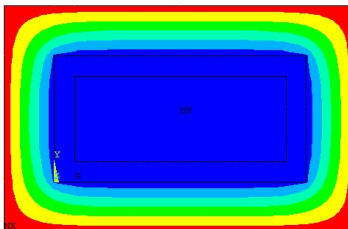
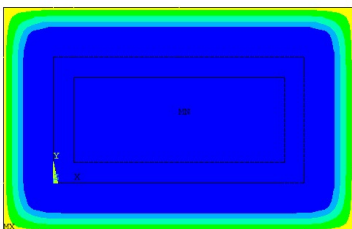
Perfil Protegido – Lã de Rocha



Perfil Protegido – Gesso



Perfil Protegido – Gesso e Lã de Rocha



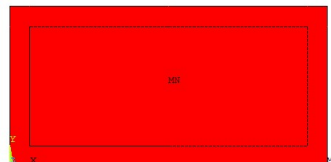
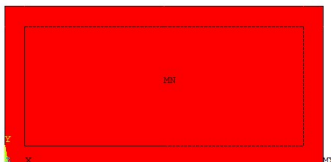
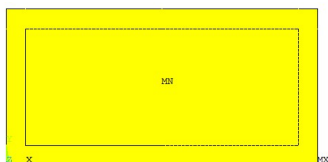
Perfil R 160x80x10

900 segundos

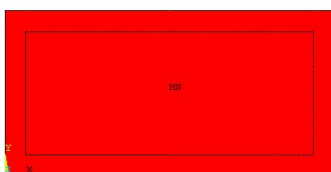
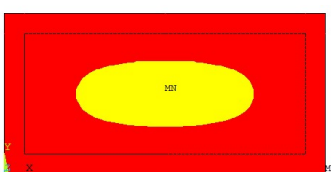
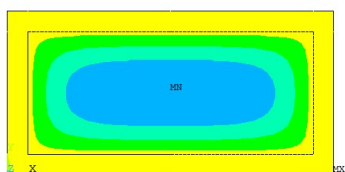
2700 segundos

3600 segundos

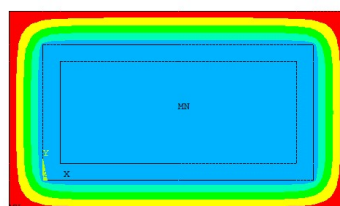
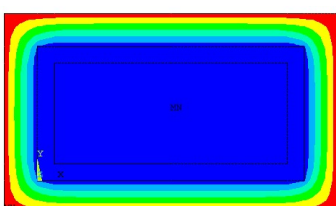
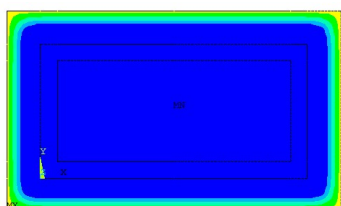
Perfil Não Protegido



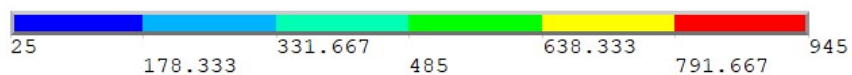
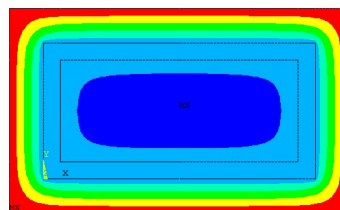
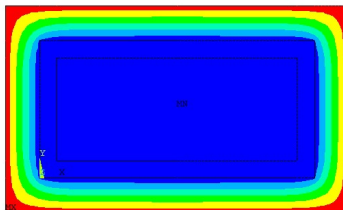
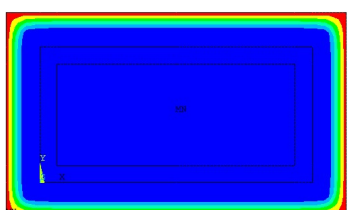
Perfil Protegido – Lã de Rocha



Perfil Protegido – Gesso



Perfil Protegido – Gesso e Lã de Rocha



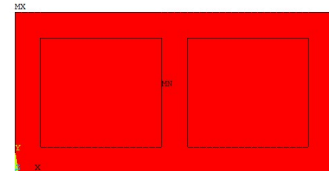
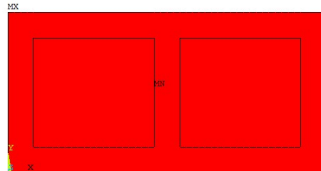
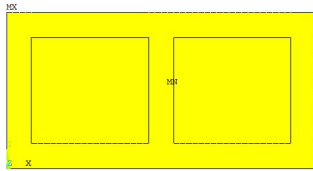
Perfil RR 100x50x8

900 segundos

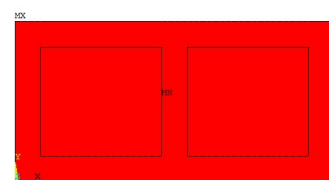
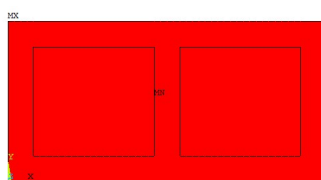
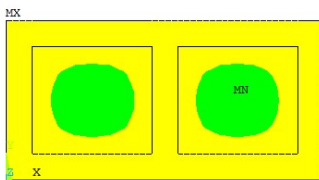
2700 segundos

3600 segundos

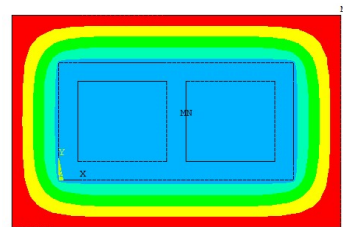
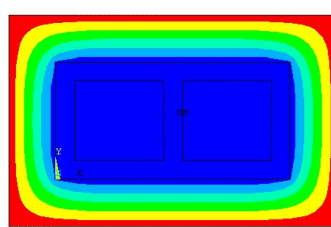
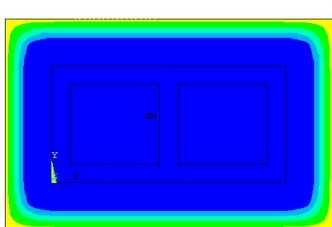
Perfil Não Protegido



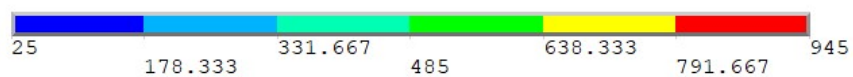
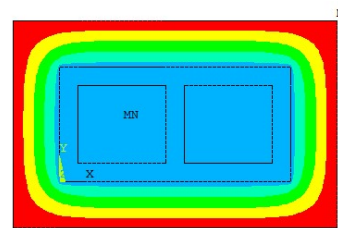
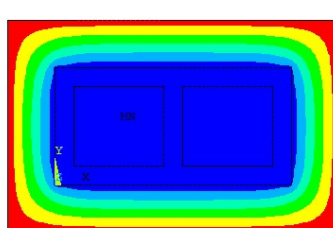
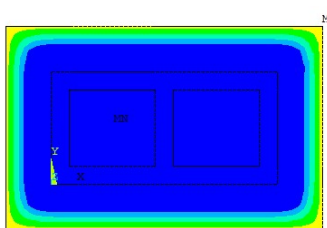
Perfil Protegido – Lã de Rocha



Perfil Protegido – Gesso



Perfil Protegido – Gesso e Lã de Rocha



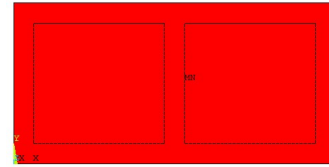
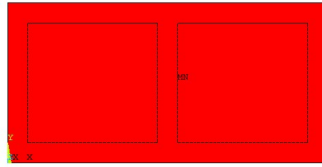
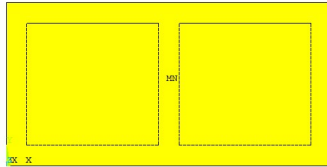
Perfil RR 160x80x10

900 segundos

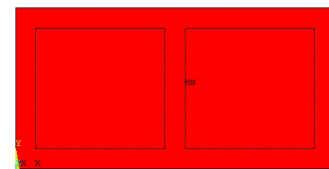
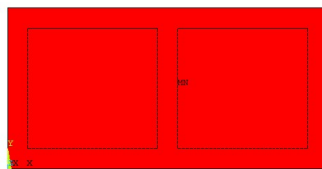
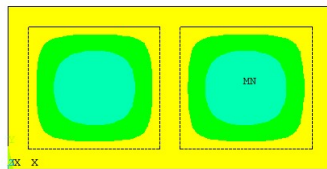
2700 segundos

3600 segundos

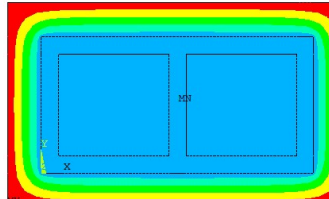
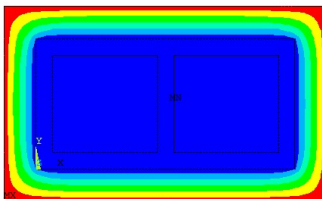
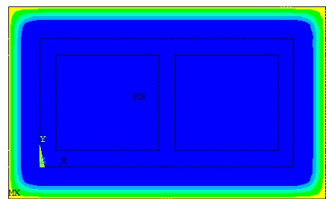
Perfil Não Protegido



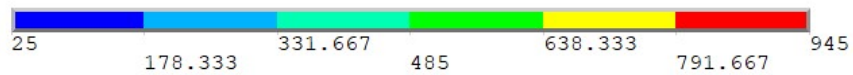
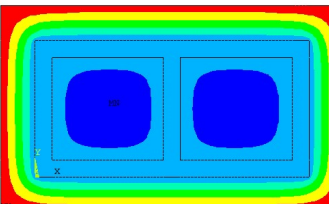
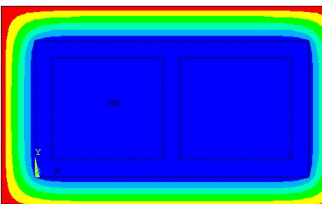
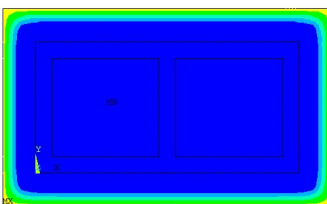
Perfil Protegido – Lã de Rocha



Perfil Protegido – Gesso



Perfil Protegido – Gesso e Lã de Rocha



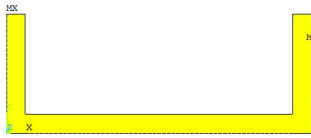
Perfil U 130x50x8

900 segundos

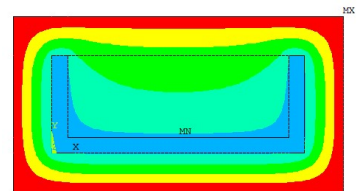
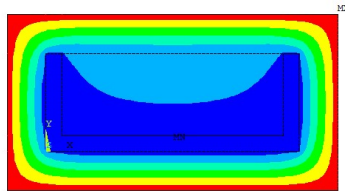
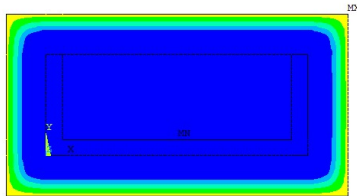
2700 segundos

3600 segundos

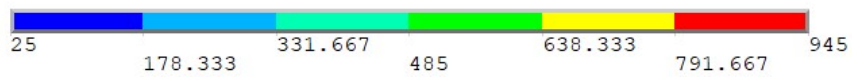
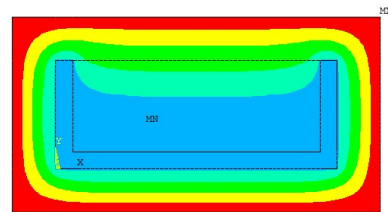
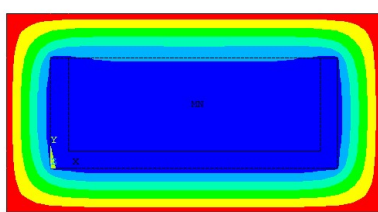
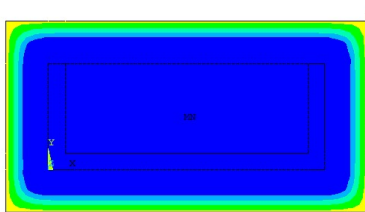
Perfil Não Protegido



Perfil Protegido – Gesso



Perfil Protegido – Gesso e Lã de Rocha



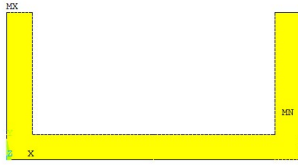
Perfil U 150x75x13

900 segundos

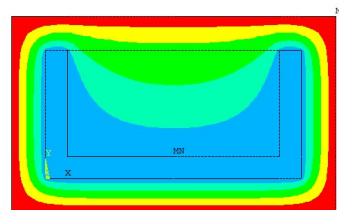
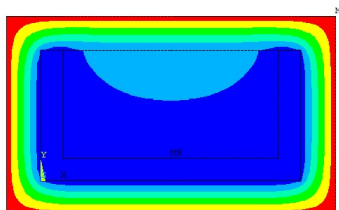
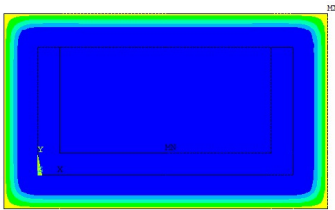
2700 segundos

3600 segundos

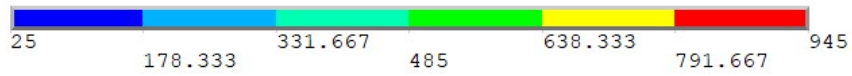
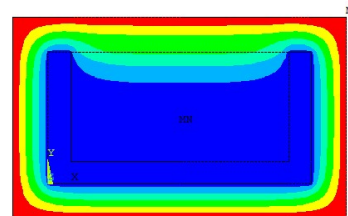
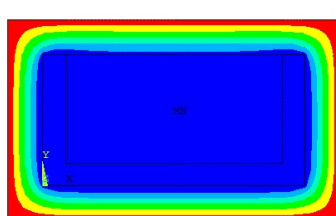
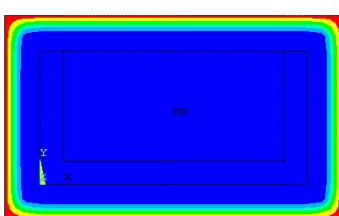
Perfil Não Protegido



Perfil Protegido – Gesso



Perfil Protegido – Gesso e Lã de Rocha



8.3 Anexo 3

O presente anexo inclui os códigos em linguagem APDL para a curva ISO 834.

```
*DIM,ISO834,TABLE,61,1,1,,,
  *SET,ISO834(1,0,1),0
  *SET,ISO834(1,1,1),20
  *SET,ISO834(2,0,1),60
  *SET,ISO834(2,1,1),349.2
  *SET,ISO834(3,0,1),120
  *SET,ISO834(3,1,1),444.5
  *SET,ISO834(4,0,1),180
  *SET,ISO834(4,1,1),502.3
  *SET,ISO834(5,0,1),240
  *SET,ISO834(5,1,1),543.9
  *SET,ISO834(6,0,1),300
  *SET,ISO834(6,1,1),576.4
  *SET,ISO834(7,0,1),360
  *SET,ISO834(7,1,1),603.1
  ...
  *SET,ISO834(57,0,1),3360
  *SET,ISO834(57,1,1),935.0
  *SET,ISO834(58,0,1),3420
  *SET,ISO834(58,1,1),937.7
  *SET,ISO834(59,0,1),3480
  *SET,ISO834(59,1,1),940.3
  *SET,ISO834(60,0,1),3540
  *SET,ISO834(60,1,1),942.8
  *SET,ISO834(61,0,1),3600
  *SET,ISO834(61,1,1),945.3
```

8.4 Anexo 4

O presente anexo inclui os códigos em linguagem APDL para as propriedades dos materiais utilizados.

Alumínio

MPTEMP

MPTEMP, 1, 0.000000E+00,

MPDATA,DENS, 1, 1, 0.270000E-05,

MPTEMP

MPTEMP, 1, 0.000000E+00, 0.100000E+03, 0.150000E+03, 0.200000E+03, 0.300000E+03

MPTEMP, 6, 0.500000E+03,

MPDATA,KXX, 1, 1, 0.190000E+00, 0.197000E+00, 0.200500E+00, 0.204000E+00,
0.211000E+00

MPDATA,KXX, 1, 6, 0.225000E+00,

MPTEMP

MPTEMP, 1, 0.000000E+00, 0.200000E+02, 0.100000E+03, 0.120000E+03, 0.150000E+03

MPTEMP, 6, 0.180000E+03, 0.200000E+03, 0.250000E+03, 0.300000E+03, 0.350000E+03

MPTEMP, 11, 0.400000E+03, 0.450000E+03, 0.500000E+03,

MPDATA,C, 1, 1, 0.903000E+03, 0.911200E+03, 0.944000E+03, 0.952200E+03,
0.964500E+03

MPDATA,C, 1, 6, 0.976800E+03, 0.985000E+03, 0.100550E+04, 0.102600E+04,
0.104650E+04

MPDATA,C, 1, 11, 0.106700E+04, 0.108750E+04, 0.110800E+04,

MPTEMP

MPTEMP, 1, 0.000000E+00,

MPDATA,EMIS, 1, 1, 0.300000E+00,

MPTEMP

Ar

MPDATA,DENS, 2, 1, 0.1204000E-08, 0.1164000E-08, 0.1059000E-08, 0.9458000E-09,
0.7460000E-09

MPDATA,DENS, 2, 6, 0.6158000E-09, 0.4565000E-09, 0.2772000E-09, 0.1990000E-09,

MPTEMP

MPTEMP, 1, 0.0000000E+00, 0.3000000E+02, 0.6000000E+02, 0.1000000E+03, 0.2000000E+03

MPTEMP, 6, 0.3000000E+03, 0.5000000E+03, 0.1000000E+04, 0.1500000E+04,

MPDATA,KXX, 2, 1, 0.2439000E-04, 0.2600000E-04, 0.2800000E-04, 0.3100000E-04, 0.3800000E-
04

MPDATA,KXX, 2, 6, 0.4400000E-04, 0.5600000E-04, 0.7900000E-04, 0.9600000E-04,

MPTEMP

MPTEMP, 1, 0.0000000E+00, 0.3000000E+02, 0.6000000E+02, 0.1000000E+03, 0.2000000E+03

MPTEMP, 6, 0.3000000E+03, 0.5000000E+03, 0.1000000E+04, 0.1500000E+04,

MPDATA,C, 2, 1, 0.1007000E+04, 0.1007000E+04, 0.1007000E+04, 0.1009000E+04,
0.1023000E+04

MPDATA,C, 2, 6, 0.1045000E+04, 0.1093000E+04, 0.1184000E+04, 0.1234000E+04,

MPTEMP

Lã de Rocha

MPTEMP, 1, 0.0000000E+00,

MPDATA,DENS, 2, 1, 0.9000000E-07,

MPTEMP

MPTEMP, 1, 0.0000000E+00,

MPDATA,KXX, 2, 1, 0.3500000E-04,

MPTEMP

MPTEMP, 1, 0.0000000E+00,

MPDATA,C, 2, 1, 0.1030000E+04,

MPTEMP

MPTEMP, 1, 0.0000000E+00,

MPDATA,EMIS, 2, 1, 0.9000000E+00,

Gesso

MPDATA,DENS, 3, 1, 0.8890000E-06, 0.8890000E-06, 0.7378700E-06, 0.7378700E-06,
0.7009800E-06

MPDATA,DENS, 3, 6, 0.7009800E-06,

MPTEMP

MPTEMP, 1, 0.0000000E+00, 0.9500000E+02, 0.1550000E+03, 0.2000000E+03, 0.4000000E+03

MPTEMP, 6, 0.6000000E+03, 0.8000000E+03, 0.1200000E+04,

MPDATA,KXX, 3, 1, 0.1900000E-03, 0.1900000E-03, 0.1000000E-03, 0.1030000E-03, 0.1130000E-
03

MPDATA,KXX, 3, 6, 0.1270000E-03, 0.1450000E-03, 0.1650000E-03,

MPTEMP

MPTEMP, 1, 0.2000000E+02, 0.1000000E+03, 0.1350000E+03, 0.1700000E+03, 0.6500000E+03

MPTEMP, 6, 0.6750000E+03, 0.7000000E+03, 0.1200000E+04,

MPDATA,C, 3, 1, 0.9500000E+03, 0.9500000E+03, 0.2500000E+05, 0.9500000E+03,
0.9500000E+03

MPDATA,C, 3, 6, 0.1000000E+05, 0.9500000E+03, 0.9500000E+03,

MPTEMP

MPTEMP, 1, 0.0000000E+00,

MPDATA,EMIS, 3, 1, 0.9000000E+00,
