



FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

Mestrado em Engenharia Mecânica | Fluidos e Energia

Estudo de uma metodologia de seleção de blocos padrão em tratamentos de têmpera

Ana Isabel Quintal Fernandes Araújo de Figueiredo

Dissertação de Mestrado

Orientadores na FEUP: Professor Paulo José da Silva Martins Coelho

Professor José Duarte Ribeiro Marafona

Orientadores na MetalSolvus: Engenheiro António Paulo Cerqueira Duarte

Orientadores na Ramada Aços: Engenheiro Paulo Canhola

2022-09-26, Porto

Abstract

The main objective of the quenching heat treatment is the improvement of the mechanical properties of a steel; these types of processes involve large amounts of energy, so it is in the interest of the partner companies Ramada Aços S.A and MetalSolvus to develop products in the most profitable way without decreasing its quality. Based on this assumption, throughout this dissertation, it is proposed the adoption of a methodology for the choice of standard blocks dimensioned in such a way that the temperature evolution of their core is analogous to the core of the most massive part of a load to be treated. The standard blocks are useful since, if correctly dimensioned, they portray, with acceptable error, the evolution of the temperature of the most massive part of a load with time, thus avoiding that the part be drilled to be fitted with a thermocouple.

In the initial part of the work, a literature review was carried out concerning the important heat transfer methods in the hardening treatment (the transient conduction of heat), so that it was possible to obtain analytical results concerning the evolution of the temperature with time of simple solids. Then, a numerical model was found and validated with the results of the analytical solution; this model was optimised, through mesh refinement and maximum spatial variation of temperature, in order to make the simulations as reliable as possible, without the total numerical processing time being too high.

Subsequently, the equation proposed by Francisco Machado in his dissertation project was tested for the simulation of real and fictitious AISI H11 steel parts and their respective standard AISI H11 and AISI 304 steel blocks, reaching the conclusion that the equation idealised in Francisco Machado's dissertation had a good performance for the cases analysed, presenting acceptable temporal and temperature deviations between the parts and their corresponding blocks. Finally, it was suggested an expedite method for the selection of standard blocks, considering the critical part of a load to treat, which is based on the existence of a fixed stock of standard blocks in AISI 304 steel, characterized by its characteristic length.

Finally, it was experimentally studied which is the influence of the position of the standard block in the load on its heating. Through the analysis of the experimental results it was concluded that when the block is placed in a central position of the load it presents a slower heating than if it was placed in its periphery, due to the radiation shielding effect that the surrounding parts have on the block in a central position. It was concluded that it is possible to use the same standard block with small dimensions, provided that it is placed in the central part of the load.

Resumo

O objetivo principal do tratamento térmico de têmpera é a melhoria das propriedades mecânicas de um aço; estes tipos de processos envolvem grandes quantidades de energia, pelo que é do interesse das empresas parceiras Ramada Aços S.A e MetalSolvus desenvolver produtos da maneira mais rentável possível sem que a sua qualidade seja diminuída. Tendo por base este pressuposto, ao longo da presente dissertação, propõe-se a adoção de uma metodologia para a escolha de blocos padrão dimensionados, de forma que a evolução da temperatura do seu núcleo seja análoga à da peça mais massiva de uma carga a tratar. Os blocos padrão são úteis na medida em que, se corretamente dimensionados, retratam, com erro aceitável, a evolução da temperatura da peça mais massiva de uma carga com o tempo, evitando, assim, que a peça seja furada para ser equipada com um termopar.

Na parte inicial do trabalho foi realizada uma revisão da literatura relativa aos métodos de transferência de calor importantes no tratamento de têmpera (a condução transiente de calor), para que fosse possível obter resultados analíticos relativos à evolução da temperatura com o tempo de sólidos simples. Seguidamente, encontrou-se um modelo numérico que foi validado com os resultados da solução analítica; este modelo foi otimizado, através do refinamento da malha e da variação espacial máxima de temperatura, de forma a tornar as simulações o mais fiáveis possível, sem que o tempo total de processamento numérico fosse demasiado elevado.

Posteriormente, testou-se a equação proposta por Francisco Machado no seu projeto de dissertação, para a simulação de peças reais e fictícias em aço AISI H11 e respetivos blocos padrão em aço AISI H11 e aço AISI 304, chegando-se à conclusão que a equação idealizada na dissertação de Francisco Machado teve um bom desempenho para os casos analisados, apresentando desvios temporais e de temperatura, entre as peças e seus blocos correspondentes, aceitáveis. Finalmente, sugeriu-se um método expedito para a seleção de blocos padrão, tendo em conta a peça crítica de uma carga a tratar, que se baseia na existência de um stock fixo de blocos padrão em aço AISI 304, caracterizados pelo seu comprimento característico.

Por último, estudou-se experimentalmente qual a influência da posição do bloco padrão na carga no seu aquecimento. Através da análise dos resultados experimentais conclui-se que quando o bloco é colocado numa posição central da carga apresenta um aquecimento mais lento do que se fosse colocado na sua periferia, devido ao efeito de escudo à radiação que as peças circundantes têm sobre o bloco numa posição central. Desta forma concluiu-se que é possível utilizar-se sempre o mesmo bloco padrão, de dimensões reduzidas, desde que este seja colocado na parte central da carga.

Agradecimentos

Quero agradecer ao Professor Paulo José Coelho pela constante disponibilidade para me ajudar ao longo de todo o trabalho. O seu constante pensamento crítico relativamente aos problemas que surgiam ao longo da realização do trabalho, foi crucial para que os objetivos principais desta dissertação fossem atingidos.

De igual forma, quero agradecer também ao Professor José Duarte Marafona, um elemento crucial para o sucesso do presente trabalho, por toda a ajuda no *software Abaqus*, fundamental no presente trabalho de dissertação.

Gostaria de agradecer também ao Engenheiro António Paulo Cerqueira Duarte e ao Engenheiro Paulo Canhola pela disponibilidade e pela oportunidade de explorar este tema de dissertação.

Finalmente agradeço a todos os meus amigos e familiares que me acompanharam ao longo desta última etapa do meu percurso académico.

Conteúdo

Abstract	iii
Resumo	iv
Agradecimentos	v
Nomenclatura	xv
1 Introdução	1
1.1 Ramada Aços S.A	1
1.2 Enquadramento do trabalho	2
1.3 Fornos utilizados na Ramada Aços S.A	5
1.4 Caracterização do processo de têmpera	7
1.4.1 Fase de aquecimento	7
1.4.2 Estágio à temperatura de têmpera	9
1.4.3 Fase de arrefecimento	9
1.5 Estado de arte – Revisão da literatura	10
1.5.1 Trabalhos de dissertação anteriores	11
1.5.1.1 Otimização de blocos padrão para monitorização e controlo do processo de tratamento térmico em vácuo	12
1.5.1.2 Estudo sobre blocos padrão usados para monitorização e controlo do processo de tratamentos térmicos em vácuo do aço H11	12
1.6 Metodologias para obtenção dos comprimentos característicos dos blocos padrão utilizados em teses anteriores	13
1.7 Objetivos, ferramentas de análise utilizadas e estrutura da dissertação	14
1.7.1 Ferramentas de análise utilizadas	15
1.7.2 Estrutura da dissertação	15
2 Modelo numérico e sua validação, utilizando uma solução analítica	17
2.1 Condução transiente de calor	19

2.1.1	Método do sistema global	21
2.1.2	Análise de temperatura transiente com variações espaciais não despre- záveis - Solução multidimensional	22
2.2	Análise dos resultados obtidos relativos ao modelo analítico	26
2.2.1	Propriedades do material em questão e condições ambientais consideradas	26
2.2.2	Resultados obtidos através da solução analítica	27
2.3	Análise do modelo numérico, sua validação e otimização	30
2.3.1	Definição dos valores de entrada e do sistema a tratar	31
2.3.2	Definição das malhas criadas para simulação	33
2.3.3	Influência da variação espacial máxima de temperatura e do refina- mento da malha no erro existente	33
2.3.4	Análise do modelo numérico tendo em conta a variação das proprieda- des térmicas com a temperatura	38
2.3.5	Parâmetros de simulação selecionados: resumo	41
3	Simulação de peças e blocos padrão em aço AISI H11	43
3.1	Temperatura das paredes do forno e a sua respetiva emissividade	44
3.2	Temperatura da atmosfera de azoto	45
3.3	Transferência de calor por convecção no interior do forno	47
3.4	Método de dimensionamento dos blocos padrão	47
3.5	Simulações de peças típicas em aço H11 e respetivos blocos padrão em aço AISI H11	49
3.5.1	Resultados das simulações	52
3.5.2	Análise dos resultados obtidos	54
4	Simulações de peças típicas em aço AISI H11 e respetivos blocos padrão em aço AISI 304	58
4.1	Escolha do material para os blocos padrão	58
4.2	Método de dimensionamento dos blocos padrão	60
4.3	Simulação de blocos padrão em aço AISI 304	61
4.3.1	Resultados das simulações	61
4.3.2	Análise de resultados obtidos através das simulações	64
5	Metodologia proposta para a seleção de blocos padrão	67
5.1	Criação de um conjunto de blocos padrão tendo em conta o seu comprimento característico	67

5.1.1	Conjunto de blocos padrão de geometria cilíndrica	68
5.1.2	Conjunto de blocos padrão de geometria cúbica	71
5.2	Metodologia para a seleção de blocos padrão presentes no conjunto previamente definido	72
5.2.1	Teste da metodologia proposta para uma peça hipotética em aço AISI H11	73
6	Efeito da localização do bloco padrão no seu aquecimento - Ensaaios experimentais	75
6.1	Ensaaios experimentais	75
6.1.1	Primeiro ensaio experimental	75
6.1.2	Segundo ensaio experimental	78
7	Conclusões e trabalhos futuros	83
7.1	Trabalhos futuros	85
	Bibliografia	87
A	Processo detalhado dos passos realizados no <i>software Abaqus</i> para proceder à simulação do modelo	88
A.1	Criação do sólido	88
A.2	Definição do material do sólido	89
A.3	Seleção do tipo de problema, apuramento do tempo de simulação e escolha da máxima variação espacial de temperatura por passo no tempo	89
A.4	Definição das condições de fronteira e condições iniciais.	92
A.5	Seleção do tipo de elementos finitos a utilizar e criação da malha.	92
B	Propriedades do aço AISI H11	94
C	Propriedades do aço AISI 304	98
D	Parâmetros utilizados nas simulações referentes ao capítulo 3 e 4	100
E	Gráficos das simulações referentes aos capítulos 3 e 4	102

Lista de Figuras

1.1	Carga de aço sujeita a tratamentos térmicos de têmpera, com destaque do bloco padrão e da peça crítica.	3
1.2	Peças críticas da carga em questão em que (a) representa a peça mais massiva da carga e (b) um cilindro volumoso.	4
1.3	Esquema ilustrativo do forno utilizado para o tratamento das peças em aço. .	6
1.4	Esquema ilustrativo do forno utilizado para o tratamento das peças em aço. .	6
1.5	Esquema ilustrativo do tratamento térmico de têmpera com um estágio intermediário.	8
2.1	Esquema do sólido utilizado para avaliar a qualidade das soluções numéricas, posição do sistema de eixos e dos pontos estudados.	18
2.2	Efeito do número de Biot na distribuição transiente de temperaturas numa parede plana arrefecida simetricamente por convecção [11].	20
2.3	Esquema de uma placa plana com convecção em ambas as faces, simetria em $x = 0$ e temperatura inicial uniforme, T_i [11].	23
2.4	Exemplo de um sólido bidimensional obtido através da interseção/sobreposição de duas paredes planas de espessura a e b [12].	25
2.5	Curva de temperatura para os pontos 1 (vértice) e 2 (centro) da barra previamente apresentada, ao longo do tempo, obtidas analiticamente.	30
2.6	Ilustração das três malhas modeladas para a barra em questão: malha 1 (a), malha 2 (b) e malha 3 (c)	34
2.7	Evolução da temperatura do ponto 1 (vértice) através da metodologia analítica e numérica, relativamente à simulação 6, e o erro entre as duas soluções. . . .	35
2.8	Evolução da temperatura do ponto 2 (núcleo) através da metodologia analítica e numérica, relativamente à simulação 6, e o erro entre as duas soluções. . . .	36
2.9	Evolução da temperatura do ponto 1 através da metodologia analítica e numérica, relativamente à simulação 4, e o erro entre as duas soluções.	38
2.10	Evolução da temperatura do ponto 1 com o tempo na simulação 6 e simulação 4 e respetivo erro.	40
2.11	Evolução da temperatura do ponto 2 com o tempo na simulação 6 e simulação 4 e respetivo erro.	41

2.12	Evolução da temperatura do ponto 1 e 2 com o tempo na simulação 4 com propriedades térmicas constantes e propriedades térmicas dependentes do tempo.	42
3.1	Evolução da temperatura da parede do forno com o tempo para os três ensaios mencionados.	45
3.2	Evolução da temperatura da parede do forno e do azoto e evolução representativa da pressão no interior do forno com o tempo.	46
3.3	Peças típicas de aço em H11 simuladas no <i>software Abaqus</i> .	49
3.4	Peças de geometria fornecida pela MetalSolvus em aço AISI H11 simuladas no <i>software Abaqus</i> .	50
3.5	Resultados obtidos para as simulações da peça 1R e respetivos blocos padrão cúbicos e cilíndricos.	53
3.6	Resultados obtidos para as simulações da peça 2R e respetivos blocos padrão cúbicos e cilíndricos.	53
3.7	Resultados obtidos para as simulações da peça 3R e respetivos blocos padrão cúbicos e cilíndricos.	53
3.8	Resultados obtidos para as simulações da peça 4R e respetivos blocos padrão cúbicos e cilíndricos.	54
3.9	Resultados obtidos para as simulações da peça 5R e respetivos blocos padrão cúbicos e cilíndricos.	54
3.10	Erro absoluto e relativo entre a temperatura da peça 5R e o seu bloco padrão cilíndrico, onde ambos os erros tendem para valores nulos no final do tratamento térmico.	56
4.1	Resultados obtidos para as simulações da peça 1R em aço AISI H11 e respetivos blocos padrão aço AISI 304.	62
4.2	Resultados obtidos para as simulações da peça 2R em aço AISI H11 e respetivos blocos padrão aço AISI 304.	62
4.3	Resultados obtidos para as simulações da peça 3R em aço AISI H11 e respetivos blocos padrão aço AISI 304.	63
4.4	Resultados obtidos para as simulações da peça 4R em aço AISI H11 e respetivos blocos padrão aço AISI 304.	63
4.5	Resultados obtidos para as simulações da peça 5R em aço AISI H11 e respetivos blocos padrão aço AISI 304.	64
5.1	Evolução temporal da temperatura do centro dos onze blocos padrão cilíndricos do conjunto.	70
5.2	Evolução temporal da temperatura do centro dos onze blocos padrão cúbicos do conjunto.	72

5.3	Metodologia de seleção de blocos padrão proposta.	72
5.4	Evolução temporal da temperatura do centro da peça 3R e respetivos blocos padrão.	74
6.1	Esquema representativo da posição dos blocos para o ensaio experimental. . .	76
6.2	Posição do bloco cúbico na carga.	76
6.3	Posição do bloco cilíndrico na carga.	77
6.4	Resultados experimentais para a evolução da temperatura dos blocos e da parede para uma carga de 200kg.	78
6.5	Posição do bloco cúbico na carga.	79
6.6	Posição do bloco cilíndrico na carga.	79
6.7	Resultados experimentais para a evolução da temperatura dos blocos e da parede para uma carga de 440kg.	80
6.8	Posição do bloco cilíndrico de pequenas dimensões (2) e do disco de grandes dimensões (1) na carga [16].	81
6.9	Resultados experimentais para a evolução da temperatura dos dois sólidos com o tempo [16].	82
A.1	Criação da base do paralelepípedo (a) e seguidamente a realização de uma extrusão para a criação do sólido (b).	88
A.2	Definição do material a utilizar.	89
A.3	Seleção do tipo de problema.	90
A.4	Seleção do tipo de problema de cariz transiente e do tempo de simulação adequado.	90
A.5	Apuramento do tempo de simulação e escolha da máxima variação espacial de temperatura por passo no tempo. Com uma máxima variação de $10^{\circ}C$ (a) ou $5^{\circ}C$ (b).	91
A.6	Definição das condições de fronteira (a) e condições iniciais (b) do problema em questão.	92
A.7	Seleção do tipo de elementos finitos a utilizar.	93
A.8	Exemplo da utilização da opção <i>Double Bias</i> numa das arestas do sólido para a criação de uma das malhas a utilizar.	93
D.1	<i>Steps</i> utilizados para a simulação do aquecimento dos blocos e peças utilizando como referência o ensaio 1.	100
E.1	Evolução da temperatura com o tempo do centro da peça 1 e dos respetivos blocos padrão cilíndrico e cúbico em aço AISI H11.	102

E.2	Evolução da temperatura com o tempo do centro da peça 2 e dos respectivos blocos padrão cilíndrico e cúbico em aço AISI H11.	103
E.3	Evolução da temperatura com o tempo do centro da peça 3 e dos respectivos blocos padrão cilíndrico e cúbico em aço AISI H11.	103
E.4	Evolução da temperatura com o tempo do centro da peça 4 e dos respectivos blocos padrão cilíndrico e cúbico em aço AISI H11.	103
E.5	Evolução da temperatura com o tempo do centro da peça 5 e dos respectivos blocos padrão cilíndrico e cúbico em aço AISI H11.	104
E.6	Evolução da temperatura com o tempo do centro da peça 6 e dos respectivos blocos padrão cilíndrico e cúbico em aço AISI H11.	104
E.7	Evolução da temperatura com o tempo do centro da peça 1 e dos respectivos blocos padrão cilíndrico e cúbico em aço AISI 304.	104
E.8	Evolução da temperatura com o tempo do centro da peça 2 e dos respectivos blocos padrão cilíndrico e cúbico em aço AISI 304.	105
E.9	Evolução da temperatura com o tempo do centro da peça 3 e dos respectivos blocos padrão cilíndrico e cúbico em aço AISI 304.	105
E.10	Evolução da temperatura com o tempo do centro da peça 4 e dos respectivos blocos padrão cilíndrico e cúbico em aço AISI 304.	105
E.11	Evolução da temperatura com o tempo do centro da peça 5 e dos respectivos blocos padrão cilíndrico e cúbico em aço AISI 304.	105
E.12	Evolução da temperatura com o tempo do centro da peça 6 e dos respectivos blocos padrão cilíndrico e cúbico em aço AISI 304.	106

Lista de Tabelas

2.1	Dimensões do bloco de teste utilizado para validação do modelo numérico . . .	18
2.2	Propriedades térmicas do material	26
2.3	Condições ambientais adotadas	27
2.4	Números de Biot para as diversas direções do sólido	28
2.5	Valores do erro para 25 e 50 raízes [14]	29
2.6	Definição das diferentes malhas utilizadas e do número de elementos existentes	33
2.7	Simulações realizadas relativamente às diferente combinações efetuadas entre malhas e variações máximas de temperatura	34
2.8	Variação dos quatro fatores previamente mencionados para as várias simulações	37
2.9	Variação das propriedades térmicas do material com a temperatura	39
2.10	Quadro resumo do capítulo 2, apresentando-se os parâmetros iniciais do pro- blema e os parâmetros selecionados para a simulação	42
3.1	Quadro resumo dos patamares de temperatura no processo de têmpera para os três ensaios realizados pela Ramada Aços S.A	44
3.2	Quadro resumo das principais dimensões das peças apresentadas na figura 3.3	50
3.3	Quadro resumo das dimensões dos blocos padrão a utilizar	51
3.4	Erros entre a temperatura do centro da peça e dos bloco padrão	55
3.5	Quadro resumo dos erros entre a peça e os blocos padrão	56
4.1	Variação das propriedades térmicas do material com a temperatura	59
4.2	Variação das propriedades térmicas do material com a temperatura	60
4.3	Quadro resumo das dimensões dos blocos padrão a utilizar	61
4.4	Erros entre a temperatura do centro da peça e dos bloco padrão	65
4.5	Quadro resumo dos erros entre a peça e os blocos padrão	66
5.1	Quadro resumo das dimensões a adotar para o conjunto de blocos padrão cilíndricos	70
5.2	Quadro resumo das dimensões a adotar para o conjunto de blocos padrão cúbicos	71
5.3	Quadro resumo dos erros entre a peça e os blocos padrão	73

B.1	Composição típica média de um aço AISI H11 segundo o catálogo da F. Ramada [1]	94
B.2	Propriedades térmicas e físicas do aço AISI H11 retirados da base de dados do programa CES Edupack™	95
B.3	Variação da condutividade térmica, k , do aço AISI H11 com a temperatura, tendo em conta diferentes fichas técnicas	95
B.4	Variação do calor específico, c_p , do aço AISI H11 com a temperatura, tendo em conta diferentes fichas técnicas	96
B.5	Variação da massa volúmica, ρ , do aço AISI H11 com a temperatura, tendo em conta diferentes fichas técnicas	96
B.6	Evolução da emissividade com a temperatura para o aço AISI H13 [14]	97
C.1	Composição típica média de um aço AISI 304 segundo o catálogo da F. Ramada [1]	98
C.2	Propriedades térmicas e físicas do aço AISI 304 retirados da base de dados do programa CES Edupack™	99
C.3	Evolução da emissividade com a temperatura para o aço AISI 304 baço [10] . .	99

Nomenclatura

Variáveis latinas

Símbolo	Definição	Unidade
A_s	Área superficial do sólido	$[m^2]$
a_{cubo}	Aresta do bloco padrão cúbico	$[mm]$
Bi	Número adimensional de Biot	$[-]$
C_n	Coefficiente de natureza geométrica de índice n	$[-]$
c_p	Calor específico	$[JKg^{-1}K^{-1}]$
e	Erro relativo da solução numérica face à solução analítica	$[-]$
e_{10s}	Erro relativo inicial	$[-]$
$\bar{e}_{10s-100s}$	Erro relativo médio entre os 10 e 100 segundos	$[-]$
$\bar{e}_{100s-200s}$	Erro relativo médio entre os 100 e 200 segundos	$[-]$
e_{simul}	Erro relativo entre diferentes simulações	$[-]$
$E^{aço}$	Módulo de <i>Young</i>	$[GPa]$
Fo	Número adimensional de Fourier	$[-]$
h	Coefficiente de convecção do fluido	$[Wm^{-2}K^{-1}]$
$h_{cilindro}$	Altura do bloco padrão cilíndrico	$[mm]$
h_{global}	Coefficiente de transferência de calor	$[Wm^{-2}K^{-1}]$
k	Condutibilidade térmica	$[Wm^{-1}K^{-1}]$
k	Condutibilidade térmica	$[Wm^{-1}K^{-1}]$
L_c	Comprimento característico	$[mm]$
$L_{c,bloco}$	Comprimento característico do bloco	$[mm]$
$L_{c,peça}$	Comprimento característico da peça	$[mm]$
$N_{elementos}$	Número de elementos da malha	$[-]$
$\dot{q}$	Fluxo de calor gerado no interior do sólido	$[Wm^{-3}]$
R_n	Majorante do erro de truncatura de séries	$[-]$
T	Temperatura	$[^{\circ}C]$
$T_{analítica}$	Temperatura obtida analiticamente	$[^{\circ}C]$
T_{azoto}	Temperatura do gás no interior do forno	$[^{\circ}C]$
T_f	Temperatura da parede do forno	$[^{\circ}C]$
T_i	Temperatura inicial	$[^{\circ}C]$
T_{∞}	Temperatura da envolvente	$[^{\circ}C]$

T_{final}	Temperatura da parede do forno no último estágio de têmpera	[°C]
t	Tempo	[s]
t^*	Tempo adimensional	[-]
$t_{total-CPU}$	Tempo total de processamento numérico	[s]
V	Volume	[m ³]
x	Coordenada espacial	[-]
x^*	Coordenada espacial adimensional	[-]
y	Coordenada espacial	[-]
z	Coordenada espacial	[-]

Variáveis gregas

α	Difusividade térmica	[m ² s ⁻¹]
α_{bloco}	Difusividade térmica do bloco padrão	[m ² s ⁻¹]
$\alpha_{peça}$	Difusividade térmica da peça	[m ² s ⁻¹]
$\Delta T_{espacial-máx}$	Máxima variação espacial de temperatura	[°C]
Δt_i	Incremento inicial de tempo	[s]
ε	Emissividade	[-]
ε_{bloco}	Emissividade do bloco padrão	[-]
ε_{forno}	Emissividade das paredes do forno	[-]
$\varepsilon_{peça}$	Emissividade da peça	[-]
$\varepsilon_{peça}$	Emissividade térmica da peça	[-]
ν	Coefficiente de Poisson	[-]
τ	Constante de tempo	[s]
ρ	Massa volumica	[Kgm ⁻³]
ζ_n	Valores próprios ou raízes positivas da solução analítica de índice n	[-]
θ^*	Temperatura adimensional	[-]
$\phi_{cilindro}$	Diâmetro do bloco padrão cilíndrico	[mm]
ϕ_{esfera}	Diâmetro do bloco padrão esférico hipotético	[mm]
ϕ_{forno}	Diâmetro do forno	[mm]

Introdução

O presente trabalho surge no âmbito da realização de uma dissertação para a conclusão do Mestrado em Engenharia Mecânica no ramo de Fluidos de Energia. O tema proposto incide no estudo de uma metodologia de seleção de blocos padrão em tratamentos de têmpera, sendo esta dissertação realizada na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto em parceria com a empresa proponentes Ramada Aços S.A e MetalSolvus

Os tratamentos térmicos caracterizam-se por um conjunto de processos, de aquecimento e de arrefecimento, que visam melhorar as propriedades mecânicas das peças metálicas. O princípio básico dos tratamentos térmicos baseia-se na reorganização estrutural interna dos átomos do material. Tendo em conta o contexto deste trabalho, o principal pré-requisito para o estudo, projeto e validação de blocos padrão utilizados em tratamentos de têmpera é o conhecimento aprofundado dos fenómenos de transferência de calor intrínsecos neste tipo de tratamentos térmicos. Deste modo, o capítulo introdutório tem por objetivo não só congregar informação relativa a todos os intervenientes e temáticas pertinentes, mas também averiguar qual o progresso relativo ao assunto em investigação.

Por conseguinte, o capítulo de introdução inicia-se com uma breve apresentação das empresas parceiras, dos processos, equipamentos utilizados e enquadramento do trabalho em questão, seguindo-se uma análise dos trabalhos de dissertação realizados previamente, bem como um estudo da literatura respeitante ao estado de arte desta temática. Finalmente, o primeiro capítulo finda com uma descrição dos objetivos, ferramentas de análise utilizadas e estrutura do presente trabalho.

1.1 Ramada Aços S.A

Como mencionado anteriormente, o presente trabalho foi realizado em parceria com a empresa Ramada Aços S.A que se encontra sediada em Ovar sendo que possui, também, diversos escritórios distribuídos por várias cidades portuguesas, tal como Braga e Lisboa. A atividade desta empresa, fundada há mais de 80 anos, centra-se na produção e tratamento de aços e suas ligas. A Ramada Aços S.A aposta principalmente na qualidade dos produtos por si desenvolvidos da maneira mais rentável possível. A empresa produz uma variada gama de aços e ligas especiais em blocos, barras, tubos, varões e bobines divididos por classes

que ditam a sua utilização habitual. As principais áreas de aplicação dos aços produzidos pela empresa são a metalomecânica, moldes e ferramentas. Para além do campo de ação referido anteriormente a empresa possui também uma seção destinada a metais não ferrosos particularmente as ligas de alumínio, cobre e latão.

É também importante mencionar que a produção das diversas ferramentas e componentes em aço carece, na maior parte das vezes, da realização de tratamentos térmicos no material. Desta forma, a empresa encontra-se provida de vários equipamentos tal como os fornos de atmosfera controlada, que permitem a realização dos inúmeros tratamentos térmicos necessários para a preparação dos materiais.

O seu volume de negócios chega ao valor de 120 milhões de euros anuais, detendo a maior capacidade instalada em Portugal relativamente a tratamentos térmicos. A sua atividade desenvolve-se em cinco principais áreas, particularmente: Aço Especiais (comercial), Aço Laminado a Frio, Aço Estirado a Frio, Realização de tratamentos térmicos e Ferramentas para fabrico de aglomerado e reciclagem de plásticos [1].

1.2 Enquadramento do trabalho

Como referido anteriormente, a empresa Ramada Aços S.A aposta no desenvolvimentos de produtos de qualidade da maneira mais rentável possível. Os tratamentos térmicos em aço implicam o aquecimento das peças a altas temperaturas com o auxílio de fornos industriais. Na medida em que, estes tipos de procedimentos acarretam altos valores de energia, um elevado investimento inicial no equipamento e ainda um custo operacional, é compreensível que a realização de uma elevada quantidade de peças que necessitam de tratamentos térmicos seja dispendiosa. Desta forma, é do interesse da empresa que estes procedimentos decorram tendo o menor consumo de energia possível, poupando financeiramente, mas, mesmo assim, garantindo que exista um equilíbrio qualidade-preço nos produtos por si fornecidos. A exequibilidade económica destes processos encontra-se subordinada a um persistente controlo e monitorização dos tratamentos térmicos realizados nas peças.

O tratamento térmico de têmpera é caracterizado por uma etapa de aquecimento, com vários patamares intermédios de temperatura, seguida de um estágio a temperatura constante de têmpera, finalizando-se com um arrefecimento. Com o intuito de um fino processo de monitorização do processo, é vital o conhecimento da temperatura do núcleo das peças a tratar. Sendo que não é exequível, em grande parte dos casos, a realização de furos para a inserção de termopares com o intuito da medição da temperatura no interior das peças a tratar, realiza-se uma estimativa do comportamento térmico das peças, empregando blocos padrão, normalmente no mesmo aço das peças a tratar ou, eventualmente, em aço inoxidável. O núcleo destes blocos é convenientemente monitorizado com um termopar, colocado nos furos dos mesmos, para que a sua temperatura seja corretamente medida e avaliada. É um ponto imprescindível, que o comportamento térmico das peças a tratar seja análogo ao dos

blocos padrão construídos para controlo dessas mesmas peças, na medida em que, é com a avaliação da evolução térmica destes blocos que as condições de aquecimento do forno são ajustadas. Por conseguinte, os blocos padrão são um ponto essencial na realização de um otimizado e rentável tratamento térmico.

Como é possível observar na figura 1.1, a empresa trata, atualmente, várias tipologias de aço em peças de diversas formas e dimensões numa determinada carga. Ao realizar uma análise individual de cada peça é notório que, considerando o mesmo calor fornecido pelos fornos industriais, as peças de maiores dimensões evoluem mais lentamente termicamente que as de dimensões mais reduzidas. A peça que caracteriza uma maior distância dos seus vértices e superfície ao seu núcleo, ou seja, a peça mais volumosa, denomina-se de peça crítica e terá, por norma, um processo de aquecimento mais lento, como dito anteriormente. Deste modo, tanto a peça crítica como o bloco padrão a tratar encontram-se em destaque na figura 1.1.

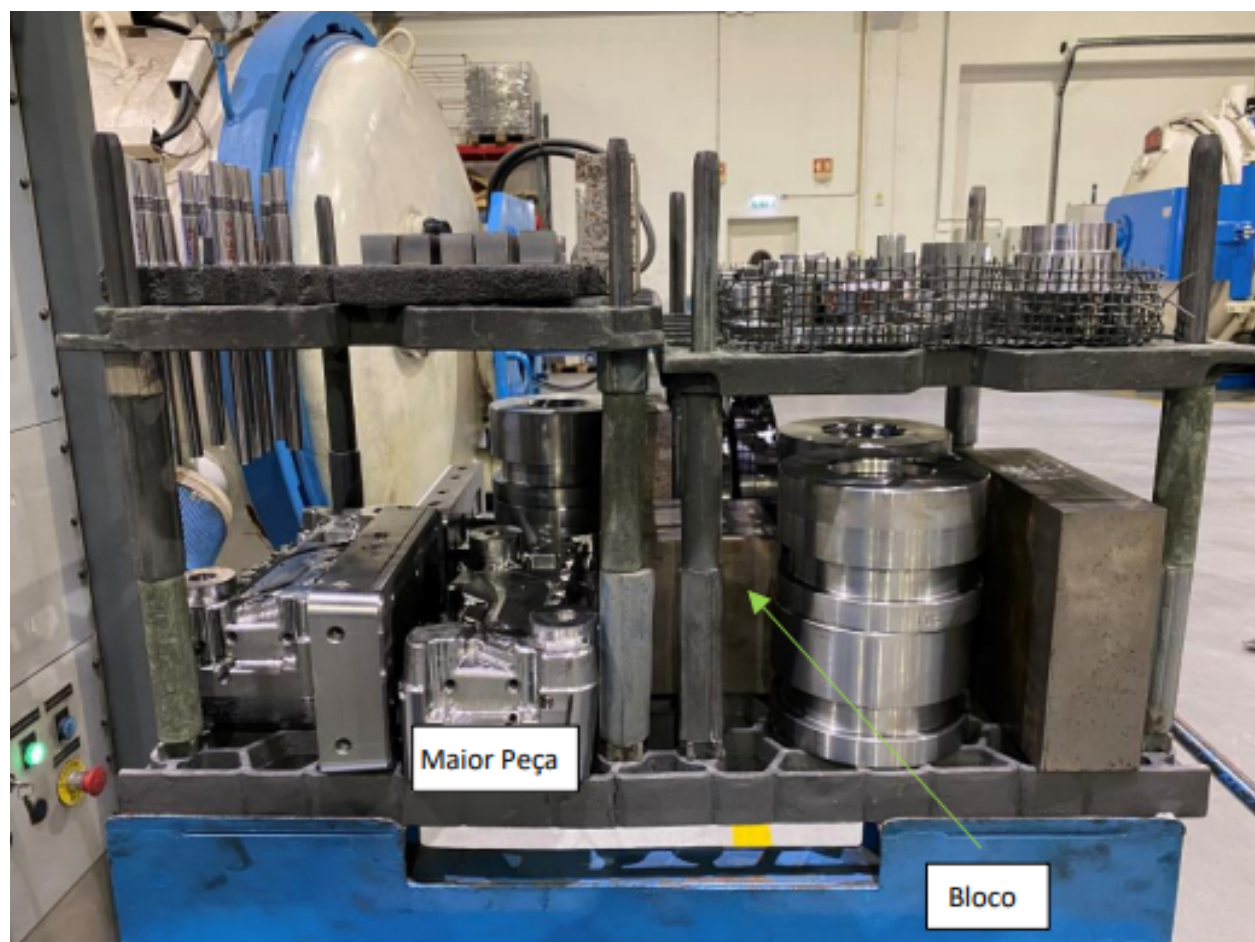


Figura 1.1: Carga de aço sujeita a tratamentos térmicos de têmpera, com destaque do bloco padrão e da peça crítica.

Desta forma, uma metodologia de dimensionamento dos blocos padrão consiste na análise do comportamento térmico da peça crítica tendo em conta uma certa carga, assegurando que o bloco padrão correspondente afere rigorosamente a evolução térmica da peça crítica em questão. Esta análise para dimensionamento dos blocos padrão depreende que a evolução de temperatura mais demorada se verifica, inevitavelmente, na peça crítica introduzida na carga pressuposta. Assim, os blocos padrão são dimensionados, e posteriormente selecionados tendo em consideração as propriedades físicas e mecânicas das diferentes tipologias de aço, e das dimensões e geometrias, variáveis, das peças mais maciças e volumosas da carga em questão.

De referir ainda que, na figura 1.2, se encontram com maior destaque a maior peça da carga (figura 1.2 a) e também uma peça cilíndrica bastante volumosa (figura 1.2 b)

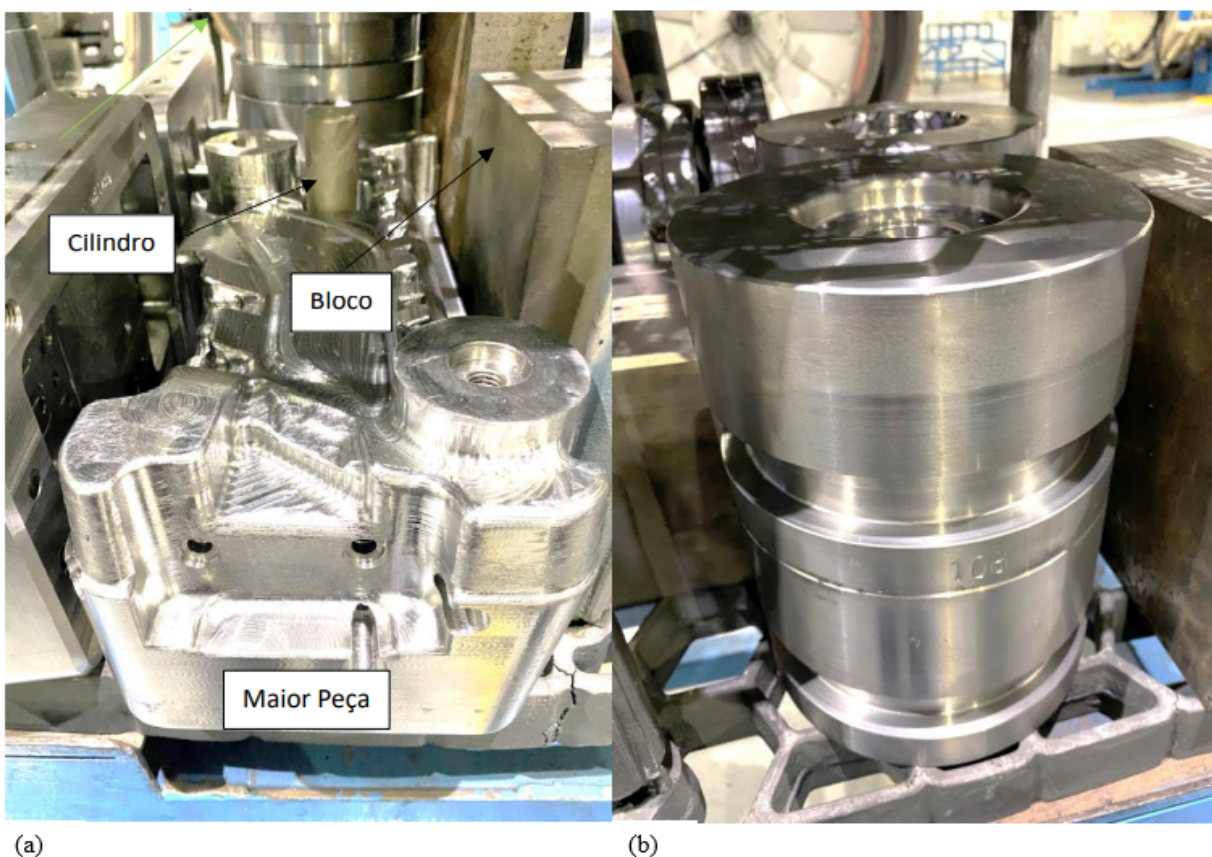


Figura 1.2: Peças críticas da carga em questão em que (a) representa a peça mais massiva da carga e (b) um cilindro volumoso.

É importante acrescentar, também, que esta metodologia subestima efeitos exteriores adicionais que, habitualmente, têm preponderância na evolução térmica das peças tais como a possível variação da disposição das peças, no forno industrial, que pode provocar heterogeneidades no escoamento do fluido nas diferentes cargas e a radiação incidente nas diversas

peças de uma carga. De referir, também, que a massa total das peças inseridas no forno e o seu comportamento como um todo, usualmente é um fator de elevada importância no que concerne à resposta térmica individual das peças, que também não é tomado em consideração nesta análise e ainda não foi estudado em detalhe.

Como mencionado anteriormente, é impraticável a determinação da temperatura do núcleo das peças ao longo do tratamentos térmicos devido à impossibilidade da realização de furos nas peças a avaliar. Como solução para este problema surgem os blocos padrão que procuram traduzir o aquecimento da peça crítica da carga. Empregando estes blocos, torna-se possível a avaliação, a cada instante, da temperatura do núcleo e a comparação com a temperatura do forno. Com o intuito de controlar o processo, é essencial o conhecimento das seguintes temperaturas ao longo do tempo:

- Temperatura do núcleo do bloco padrão - que se admite ser, também, a da peça mais massiva da carga;
- Temperatura da parede do forno - que pode ser ajustada em tempo real consoante a temperatura do bloco padrão;
- Temperatura do gás presente no interior do forno - que é dependente da temperatura da parede do forno.

1.3 Fornos utilizados na Ramada Aços S.A

Os tratamentos térmicos de têmpera executados na empresa Ramada Aços S.A para a obtenção dos resultados experimentais, necessários para realização do presente trabalho, foram efetuados num forno, de modelo B.M.I. Fours do tipo B84T3, de forma cilíndrica com $\phi_{forno} = 1500$ mm , no qual o aquecimento das peças é feito através de um conjunto de resistências elétricas de grafite dispostas ao longo da sua geratriz. O esquema estrutural do forno e os seus principais constituintes encontram-se representados na figura 1.3, sendo que na figura 1.4 pode ser observada uma imagem real do forno industrial presente na Ramada Aços S.A.

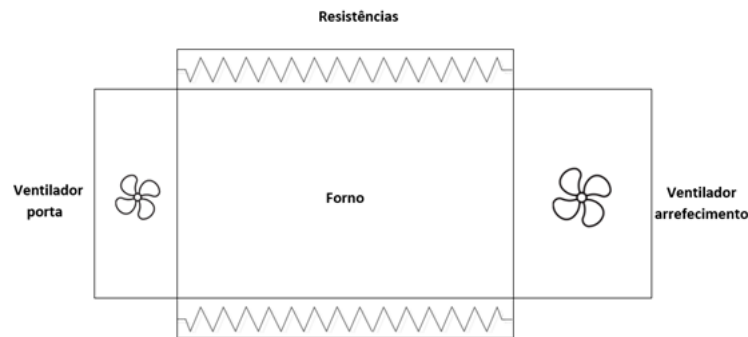


Figura 1.3: Esquema ilustrativo do forno utilizado para o tratamento das peças em aço.

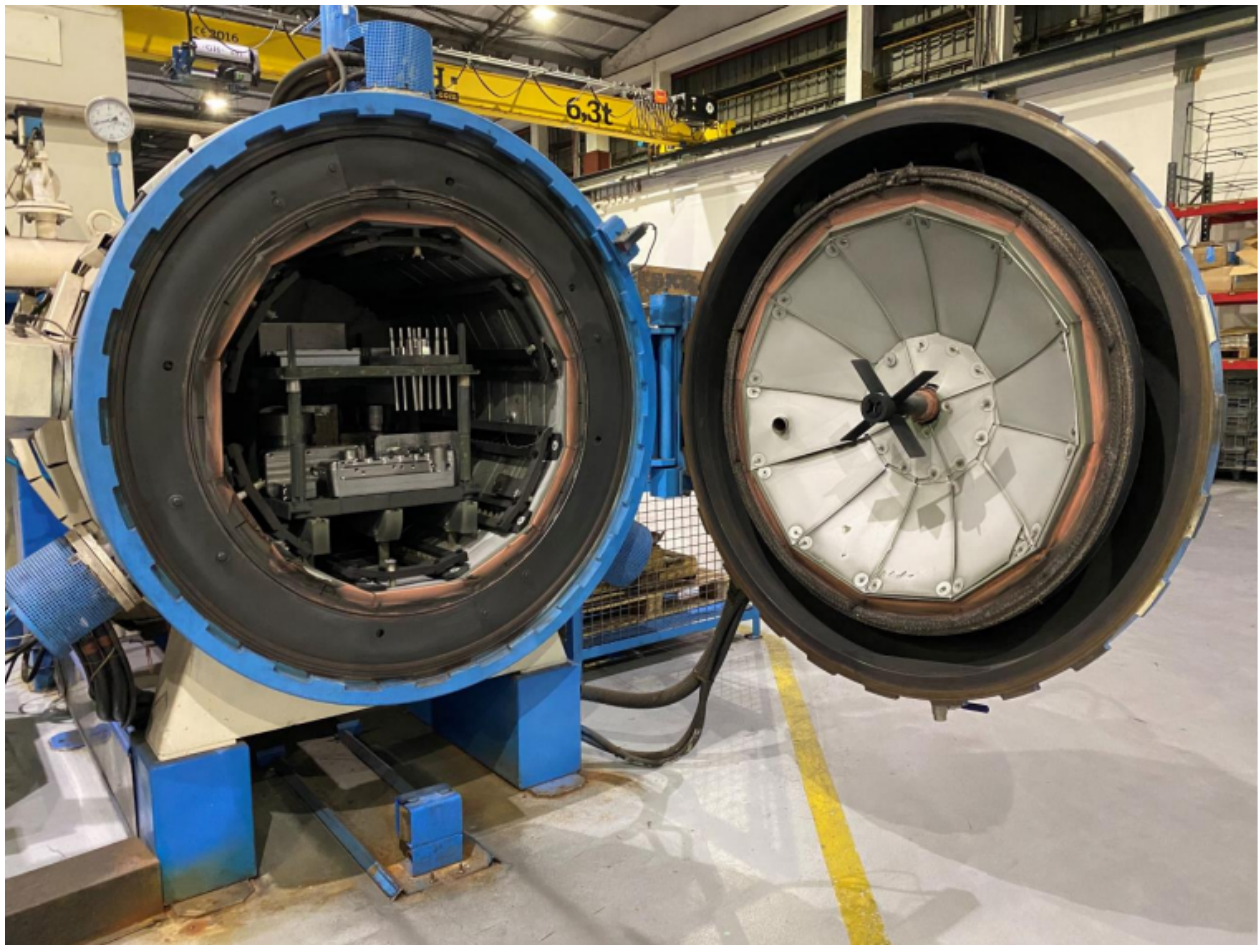


Figura 1.4: Esquema ilustrativo do forno utilizado para o tratamento das peças em aço.

A transferência de calor é tanto mais eficiente quanto maior for a pressão interna do forno, isto porque há um aumento do coeficiente de transferência de calor do gás com o aumento da pressão do forno. A pressão do forno deve manter-se por volta dos 6 bar, já que

à medida que se dá um aumento da pressão acima deste valor o aumento do coeficiente de transferência de calor é cada vez menos significativo, o que faz com que não seja justificável a nível económico elevar a pressão acima dos 6 bar [2].

1.4 Caracterização do processo de têmpera

Como referido anteriormente, a Ramada Aços S.A e a MetalSolvus realizam tratamentos térmicos como o recozimento, o revenido e a têmpera em grande quantidade das peças por si fornecidas, ou em serviços a clientes externos. Neste capítulo é descrita, não só uma base teórica relativamente ao tratamento térmico de têmpera, mas também aspetos relevantes deste processo específicos das empresas em questão.

Um tratamento térmico define-se como um processo térmico de um ou vários ciclos de aquecimento e arrefecimento a que se submetem os aços, no estado sólido, com intuito de alterar a sua estrutura atómica para que as suas características mecânicas sejam melhoradas sem que, contudo, a sua alteração química seja modificada. Especificamente, o tratamento térmico de têmpera é constituído por três fases: o aquecimento seguido pelo estágio à temperatura de têmpera e finalmente o arrefecimento. Deste modo, com o aquecimento o principal objetivo é a completa austenitização, ou seja, a obtenção de uma estrutura austenítica, da totalidade da massa do aço para que com um arrefecimento apropriado, seja possível transverter, total ou parcialmente a austenite em martensite. Realizando um tratamento térmico de têmpera, aproveita-se a dureza e alto limite de elasticidade das estruturas martensíticas. Contudo, estas estruturas providenciam aos aços pouca ductilidade e tenacidade, sendo, por isso, a têmpera, normalmente, seguida de um tratamento térmico de revenido, que tem como objetivo principal o amaciamento do aço com uma melhoria notória da sua tenacidade e ductilidade [3].

Na Figura 1.5 encontra-se uma representação esquemática de um ciclo de têmpera com um estágio intermédio de aquecimento.

Assim, as três etapas do tratamento térmico de têmpera detêm certos requisitos e particularidades que devem receber o devido cuidado para a obtenção dos resultados pretendidos, o que é abordado nas seguintes secções.

1.4.1 Fase de aquecimento

No estágio de aquecimento das peças em aço, tem sempre de ter-se em consideração a sua condutibilidade térmica, que é tanto menor quanto maior for a riqueza do aço em elementos de liga. A condutibilidade térmica é uma propriedade térmica do material de elevada importância na medida em que, uma baixa condutibilidade térmica pode levar à presença de gradientes de temperatura na peça que proporcionam a formação de tensões internas na mesma. Deste modo, quanto menor for a condutibilidade térmica do aço mais lentamente as

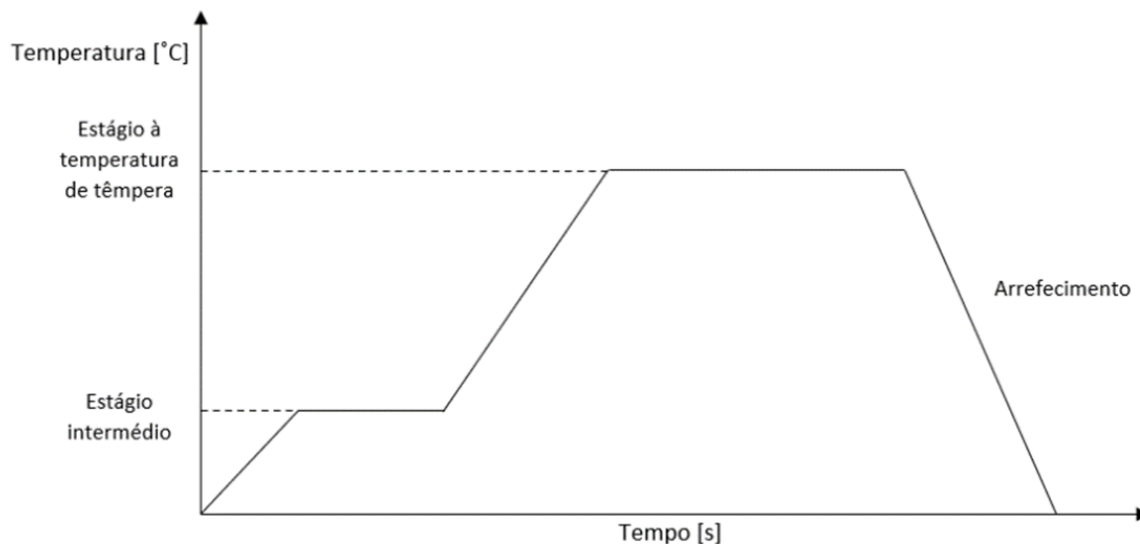


Figura 1.5: Esquema ilustrativo do tratamento térmico de têmpera com um estágio intermédio.

peças devem ser aquecidas para evitar a formação de tensões, que podem levar a distorções, e em caso extremos, à fratura. Desta forma, para a realização de tratamentos térmicos de têmpera em peças que apresentam temperaturas de têmpera superiores a 900°C , utiliza-se a técnica de aquecimento em degraus procedendo-se a um pré-aquecimento no qual as peças em aço são mantidas a uma temperatura intermédia, com o intuito de homogeneização da temperatura de todo o material, antes de serem submetidas à temperatura de têmpera. O número de degraus a utilizar no aquecimento depende, assim, da temperatura de têmpera dos aços sendo maior o número de degraus nos aços que apresentam maior temperatura de têmpera. Efetivamente, a utilização da técnica de pré-aquecimento nas peças a temperar, assegura um aquecimento uniforme das mesmas, todavia é também necessário ter em conta outro fator. Para garantir um aquecimento uniforme, é também necessário que a carga a temperar ocupe apenas $1/3$ do volume do forno industrial [3].

Outra condição a ter em conta no processo de aquecimento é a definição da temperatura de têmpera mais apropriada, que deve permitir ao aço a obtenção da sua dureza própria, continuando o material a apresentar o grão mais fino possível. É importante também acrescentar que a complexidade geométrica das peças influencia na seleção da temperatura de têmpera, sendo que as peças mais complexas ou que apresentem baixa espessura devem ser elevadas a uma temperatura inferior às peças de geometria mais simples ou com maior espessura [3].

1.4.2 Estágio à temperatura de têmpera

O estágio à temperatura de têmpera tem como objetivo a consecução de uma estrutura totalmente austenítica com carbonetos dissolvidos de forma total ou parcial, para que a operação de têmpera (arrefecimento), propriamente dita, seja possível. O tempo de estágio à temperatura de têmpera é subordinado a vários aspetos tais como a composição química dos aços, as dimensões das peças e as técnicas de aquecimento utilizadas na elevação da temperatura das peças até à temperatura de têmpera. Desta forma, o tempo de estágio a utilizar deve ser suficiente para que toda a peça consiga desenvolver uma estrutura homogênea austenítica não devendo, contudo, ser exagerado uma vez que isto pode causar um aumento excessivo do tamanho de grão, provocando nas peças a perda de tenacidade necessária [3].

1.4.3 Fase de arrefecimento

Após as fases anteriormente descritas, realiza-se o estágio mais crítico de todo o processo de têmpera, onde as peças são arrefecidas a determinada velocidade para que a austenite se transforme em martensite, uma estrutura notável pela sua elevada dureza. A transformação da austenite em martensite presume que o tempo de arrefecimento seja suficientemente baixo para evitar a transformação da austenite em perlite e bainite dando, este tempo, origem a uma velocidade que se denomina velocidade crítica de têmpera. Os meios de arrefecimento mais utilizados são a água, o óleo, o banho de sais e o ar; em casos especiais são empregues soluções, vapores e gases como meios de arrefecimento [3].

Os gases inertes mais utilizados, aquando do arrefecimento no processo de têmpera, são o argon, hélio, azoto e hidrogénio, sendo que este último é o que apresenta maior coeficiente de transferência de calor. A utilização do hidrogénio em fornos de vácuo coloca uma entrave à sua utilização para a realização de tratamentos térmicos, na medida em que este gás é altamente explosivo, já o hélio é extremamente dispendioso e o argon apresenta velocidades de arrefecimento muito baixas o que leva à impossibilidade do material atingir a dureza pretendida. Desta forma, o azoto é o gás inerte mais utilizado em fornos de vácuo, apresentando uma velocidade de arrefecimento considerável, aliada a um baixo preço, sendo este o meio de arrefecimento adotado nas empresas parceiras [2].

Utilizando um meio que contenha o gás inerte azoto, para arrefecimento da peça a temperar, a velocidade de arrefecimento é superior à conseguida com o ar, obtendo-se um material de dureza elevada e com menor propensão à criação de tensões térmicas o que leva a menores distorções, ou seja, à criação de peças com maior rigor dimensional. De referir, também, que não só os impactos ecológicos são diminuídos, mas também, os custos de produção são minorados na medida em que a peça não fica sujeita a uma lavagem posterior ao tratamento térmico, uma vez que não se alojam impurezas na sua superfície e o gás inerte utilizado no arrefecimento das peças é reutilizado após arrefecido. A utilização do azoto apresenta também desvantagens, na medida em que apresenta um arrefecimento mais lento face ao óleo ou à água, a utilização deste meio de arrefecimento limita as geometrias,

materiais e tamanhos das peças a tratar sendo que a sua substituição por gases como o hélio ou hidrogénio poderia ser possível, mas tornaria o processo mais dispendioso e menos seguro [2].

Durante a fase de arrefecimento, tal como anteriormente descrito para o estágio de aquecimento, é importante ter em atenção a presença de tensões térmicas devido à contração, típica do processo de arrefecimento, que podem levar à fratura das partes mais delicadas das peças. Desta forma, visando eliminar este efeito e também o possível surgimento de constituintes indesejados, que podem perturbar as propriedades mecânicas da peça temperada, deve ser escolhida com afinco não só a velocidade de arrefecimento, mas também o meio de arrefecimento. Em certos casos, pode ser empregue a têmpera interrompida que consiste num arrefecimento primitivo num meio como a água seguido de um arrefecimento num meio menos energético que o primeiro, como o ar ou o óleo. [3] .

1.5 Estado de arte – Revisão da literatura

A fase de arrefecimento, sendo a fase de maior importância do tratamento térmico de têmpera, é amplamente estudada por várias empresas e investigadores a fim de que esta tecnologia, esteja constantemente a ser afinada, tendo em conta os diferentes fatores da qual depende. Esta evolução constante é crucial para produtores de materiais para construção e ferramentas, como a Ramada Aços S.A e a MetalSolvus.

É conhecido que para se obter um arrefecimento uniforme das peças a temperar é necessária uma combinação cuidada de três fatores elementares:

- Geometria do forno;
- Geometria das peças;
- Disposição da carga no interior do forno.

Primeiramente, o projeto do forno deve garantir uma uniformidade na distribuição do calor em torno da carga. A projeção de um forno reflete a consideração de um grande número de fatores como custo, peso e geometria. Em segundo lugar, como maioria dos corpos, a sujeitar a tratamentos de têmpera, são não aerodinâmicos (peças rombudas), a ocorrência de separações do escoamento resulta numa variação local das propriedades relativas à transferência de calor. Já relativamente à disposição da carga no interior do forno, os autores afirmam que esta é de elevada importância na medida em que as peças centrais estão sujeitas a transferências de calor mais homogêneas do que as peças situadas na periferia, tornando-as menos interessantes mecanicamente [4].

Relativamente ao coeficiente de convecção global de transferência de calor, constataram-se variações de até 125% entre peças idênticas uniformemente colocadas no forno. Na prática isto não acontece na medida em que as cargas possuem peças com geometrias variáveis e a sua disposição não é uniforme entre tratamentos sendo, por isso, expectável uma variação do

coeficiente de convecção global superior a 125%. Esta ocorrência fornece ao trabalho experimental uma elevada relevância perante a avaliação da variabilidade de valores experimentais dos coeficientes de transferência de calor, que posteriormente poderão ser utilizados noutras ferramentas, tal como as soluções analíticas e numéricas [4].

Analizou-se também a relação entre a existência de tensões residuais no aço, o meio de arrefecimento adotado, e a massa das peças a tratar termicamente. Através de diversos trabalhos de pesquisa realizados [5], concluiu-se que as peças mais massivas apresentam maiores tensões residuais que as peças menos massivas e que as peças arrefecidas através de meios mais enérgicos, ou seja, que provocam velocidades de arrefecimento mais elevadas, apresentam maiores tensões térmicas do que as arrefecidas mais lentamente.

Mais recentemente, [6] estudou-se numericamente o processo de arrefecimento típico do tratamento térmico de têmpera. Deste modo, os autores deram uso ao método dos elementos finitos, tendo em conta a transformação da austenite em martensite, para avaliar o aparecimento de deformações em peças de aço pouco ligado após o arrefecimento.

No que toca ao estudo do aquecimento das peças, dada a menor dificuldade desta fase do tratamento térmico, não existe muita informação disponível na literatura. Considera-se que a qualidade da têmpera é bastante afetada pela atmosfera presente no interior do forno. Na medida em que a atmosfera possui características oxidantes, existe uma propensão da sua reação com o carbono e o ferro presentes nas peças, sendo que a reação da atmosfera com o carbono apresenta um problema, já que provoca a descarbonização da peça, o que provoca uma dureza superficial inferior à esperada. A solução para este problema passa pela utilização de atmosferas controladas no interior do forno. Na prática, o aquecimento é feito em duas fases: Primeiramente até uma temperatura a rondar os 860°C onde os mecanismos de transferência de calor são simultaneamente convecção, através de uma atmosfera controlada de gás inerte, e radiação. E depois, para temperaturas superiores, entre os 860°C e os 1315°C, o gás é removido da câmara, por advertência dos fabricantes de fornos, dando-se o aquecimento apenas por radiação [7].

Já noutro estudo [8] procurou-se, a dependência entre os mecanismos de transformação morfológica dos materiais e da velocidade de aquecimento sendo que foram obtidos resultados satisfatórios no que consta à existência de uma relação entre este parâmetro e a diferença de temperatura em que ocorre a transformação austenítica. Deste modo, o autor concluiu não só que se dá um aumento na diferença entre as temperaturas de transformação de fase quando a velocidade de aquecimento aumenta, mas também que esta diferença de temperaturas é influenciada pela microestrutura inicial do aço a temperar.

1.5.1 Trabalhos de dissertação anteriores

A presente dissertação realiza-se na sequência de trabalhos anteriormente executados por alunos da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, no âmbito da unidade curricular de Dissertação da opção Fluidos e Energia, do Mestrado em Engenharia Mecânica.

À semelhança do presente trabalho, os anteriores realizaram-se também através de uma colaboração com a empresa Ramada Aços S.A, servindo, deste modo, como ponto de partida e referência para a realização do presente trabalho de dissertação. Alguns dos trabalhos pertinentes para o tema em estudo são referidos nos seguintes capítulos.

1.5.1.1 Otimização de blocos padrão para monitorização e controlo do processo de tratamento térmico em vácuo

O trabalho desenvolvido por Pedro Pereira, [9] incidiu no dimensionamento de blocos padrão a utilizar em tratamentos térmicos em vácuo de peças de aço AISI D2, tendo sido realizadas as seguintes tarefas:

- Estudo dos parâmetros de simulação ajustáveis do modelo numérico, comparando os resultados obtidos por este, com os de um modelo analítico, com o intuito da realização de uma avaliação da capacidade do modelo na realização de análises de natureza transiente;
- Utilização do modelo numérico desenvolvido num conjunto de peças críticas de AISI D2 que compõe as cargas a temperar;
- Dimensionamento, de forma iterativa, dos blocos padrão em aço inox AISI 304, procurando que o seu núcleo apresentasse uma evolução térmica idêntica ao das referidas peças;
- Avaliação da influência da posição de uma certa peça na carga no seu aquecimento, constatando-se que as peças que se encontram numa posição central na carga apresentam um aquecimento mais lento que as restantes. Conclui-se, então, que o bloco padrão deve ser colocado na posição central do forno, exposto às piores condições de aquecimento.

1.5.1.2 Estudo sobre blocos padrão usados para monitorização e controlo do processo de tratamentos térmicos em vácuo do aço H11

O trabalho executado por Francisco Castro [10], é uma continuação do trabalho mencionado anteriormente e incidiu na análise do comportamento térmico dos blocos padrão utilizados para a monitorização e controlo de tratamentos térmicos em vácuo do aço H11, tendo sido realizadas as seguintes tarefas:

- Estudo dos parâmetros de simulação ajustáveis do modelo numérico, comparando os resultados obtidos por este, com os de um modelo analítico, com o intuito da realização de uma avaliação da capacidade do modelo na realização de análises de natureza transiente;
- Realização de um modelo numérico, validado por comparação de resultados com os da solução analítica, de forma a simular o comportamento térmico das peças;

- Otimização do modelo numérico com o intuito de tornar a simulação mais fiável;
- Estudo das propriedades térmicas dos aços e da sua variação com a temperatura do forno;
- Simulação de peças típicas em aço H11 chegando, através de um processo iterativo, às dimensões do bloco padrão em aços AISI 304 que melhor representam a evolução temporal de temperatura do núcleo das peças;
- Análise dos resultados obtidos, obtendo-se a relação geométrica entre as dimensões características das peças sujeitas ao tratamento térmico e dos respetivos blocos padrão;
- Realização de ensaios na empresa aferindo a temperatura do núcleo de uma determinada peça a tratar e do respetivo bloco padrão.

1.6 Metodologias para obtenção dos comprimentos característicos dos blocos padrão utilizados em teses anteriores

Nas teses anteriores com temas relacionados à obtenção de expressões que caracterizassem os comprimentos característicos dos blocos padrão para as peças mais massivas de uma carga, concluiu-se que o comportamento térmico do bloco padrão é dependente de diferentes variáveis do processo, tais como:

- A forma das peças críticas;
- A localização das peças mais massivas na carga a tratar;
- A localização dos blocos padrão, na carga a tratar.

Com o intuito de determinar as dimensões do bloco padrão, utilizou-se a correlação analítica concluída por Francisco Machado na sua dissertação [10]. Francisco Machado, através de várias simulações, chegou a quatro equações que permitem o cálculo do comprimento característico, L_c , (este parâmetro é explicado em detalhe na secção 2.1) do bloco padrão em questão, tendo em conta o seu material e a sua superfície, baça ou brilhante, para uma determinada peça a tratar em aço AISI H11. Desta forma, as quatro equações obtidas apresentam-se de seguida:

1. **Peça em aço AISI H11 e bloco em aço AISI 304 com superfície brilhante (emissividade de 0,16):**

$$L_{c,bloco} = 0,7028 \cdot L_{peça} \quad (1.1)$$

2. **Peça em aço AISI H11 e bloco em aço AISI 304 com superfície baça (emissividade de 0,23):**

$$L_{c,bloco} = 0,8240 \cdot L_{peça} \quad (1.2)$$

3. **Peça em aço AISI H11 e bloco em aço AISI 310 com superfície brilhante (emissividade de 0,16):**

$$L_{c,bloco} = 0,6511 \cdot L_{peça} \quad (1.3)$$

4. **Peça em aço AISI H11 e bloco em aço AISI 310 com superfície baça (emissividade de 0,23):**

$$L_{c,bloco} = 0,7633 \cdot L_{peça} \quad (1.4)$$

A seguinte equação (1.5) sugerida por Francisco Machado [10], é de carácter geral na medida em que relaciona os comprimentos característicos da peça e do respetivo bloco padrão construídos com um qualquer aço de qualquer difusividade térmica, α , e qualquer emissividade, ε ,

$$L_{c,bloco} = L_{c,peça} \cdot \left(\frac{\varepsilon_{bloco}}{\varepsilon_{peça}} \right)^{0,4384} \cdot \sqrt{\frac{\alpha_{bloco}}{\alpha_{peça}}} \quad (1.5)$$

Em que α , apresentado na equação (1.6), representa a difusividade térmica, uma propriedade cujas unidades são m^2s^{-1} , que serve para medir a capacidade de um material conduzir energia térmica comparativamente à sua capacidade de a armazenar. De acrescentar que, esta propriedade revela o quão rápida é a propagação de calor de um dado corpo. Deste modo, um material que apresente uma alta difusividade térmica responde mais rapidamente a mudanças de ambiente térmico, enquanto que materiais com uma difusividade térmica mais baixa levam mais tempo a atingir uma nova condição de equilíbrio [11].

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad (1.6)$$

1.7 Objetivos, ferramentas de análise utilizadas e estrutura da dissertação

O presente trabalho tem como objetivo principal o estudo de uma metodologia prática de seleção dos blocos padrão a utilizar em tratamentos térmicos de têmpera na fase de aquecimento de peças a tratar. Tal metodologia de dimensionamento precisará de garantir a adequação dos blocos às formas das peças críticas de cada carga, reproduzindo o melhor possível, ou por excesso, o comportamento térmico homólogo das referidas peças.

Como referido anteriormente, as peças críticas são as que apresentam maior dificuldade aquando do aquecimento no tratamento térmico de têmpera, sendo por isso determinado que ao longo deste trabalho as peças a analisar são as mais massivas e de maiores dimensões, tendo-se como objetivo final a determinação das dimensões e a construção de blocos padrão que representem fielmente o comportamento térmico das peças, avaliando-se numericamente

o desempenho dos blocos. De acrescentar que tem-se, também, como objetivo a elaboração de um critério onde, para cada peça crítica, se selecionem, de forma expedita, as dimensões do bloco padrão correspondente, entre os vários em stock, de modo a que seja em termos práticos mais fácil a seleção do bloco padrão que melhor traduz o comportamento de uma dada peça crítica.

1.7.1 Ferramentas de análise utilizadas

O processo de aquecimento típico do tratamento térmico de têmpera é um processo de transferência de calor dependente do tempo, como mencionado anteriormente. Durante esse aquecimento, a temperatura em cada ponto do bloco padrão estará sujeito a um aumento, até que seja alcançada uma distribuição de temperaturas uniforme em todo o bloco. Assim, tendo em conta os gradientes de temperatura, é possível dar uso a soluções analíticas, para calcular a temperatura no interior do bloco tendo em conta a posição e o tempo. Utilizando um ficheiro *Excel* foram obtidas soluções analíticas para as geometrias simples ensaiadas para os blocos padrão tais como cilindros, cubos e paralelepípedos. Sendo que, no ficheiro *Excel* apenas é necessário inserir as dimensões da geometria a analisar, o coeficiente de convecção, as propriedades térmicas relevantes do material e selecionar o ponto a analisar. Uma vez concluído este procedimento e utilizando uma macro do *Excel*, são adquiridas as temperaturas ao longo do tempo no ponto de análise. As soluções analíticas vão permitir a validação dos métodos numéricos que posteriormente também serão utilizados para simular o aquecimento em situações mais próximas das reais. O estudo numérico irá ser efetuado com o auxílio do *software AbaqusTM*. Os dados sobre os coeficientes de convecção, obtidos experimentalmente em trabalhos anteriores, poderão ser usados posteriormente nas simulações numéricas.

Já no que consta à consulta de propriedades relativas aos materiais em estudo, utilizou-se o *software CES EduPack*.

Na medida em que foi necessária a realização de várias iterações para o calculo de erros, foi utilizado o *software Matlab* para esse propósito.

1.7.2 Estrutura da dissertação

A presente dissertação apresenta-se dividida em 7 capítulos:

No **capítulo 2**, primeiramente, procedeu-se a um estudo analítico dos fenómenos de transferência de calor em regime transiente, no aquecimento de corpos tridimensionais. Numa segunda fase, através da utilização do *software Abaqus*, alcançou-se uma solução numérica. Finalmente, os resultados da solução analítica e da solução numérica foram comparados, com o intuito de ajustar os parâmetros de simulação e malhas, para que a qualidade dos resultados numéricos fosse garantida. De acrescentar que, na fase final do capítulo 2 foram listadas e analisadas alterações introduzidas no modelo numérico como por exemplo a variação das propriedades do material (densidade, calor específico e condutividade) com a temperatura.

No **capítulo 3**, com o propósito de tornar a simulação do aquecimento o mais análoga possível à realidade, são apresentadas, inicialmente, as condições reais de funcionamento do forno utilizado nos tratamentos de têmpera. Após isto, através da utilização de expressões deduzidas em dissertações anteriores, simulam-se 11 peças em aço AISI H11 e seus respectivos blocos padrão no mesmo material da peça. Após os resultados das simulações serem obtidos, realiza-se uma análise exaustiva relativa aos erros entre a temperatura do bloco padrão e da peça.

No **capítulo 4**, à semelhança do capítulo 3, através da utilização de expressões deduzidas em dissertações anteriores, simulam-se 11 peças em aço AISI H11 e seus respectivos blocos padrão em aço AISI 304. Após os resultados das simulações serem obtidos, realiza-se uma análise exaustiva relativa aos erros entre a temperatura do bloco padrão e da peça. Finalmente, compilando os resultados do capítulo 3 e 4, valida-se a expressão deduzida em trabalhos anteriores.

No **capítulo 5**,

No **capítulo 6**,

No **capítulo 7**, as conclusões retiradas ao longo da dissertação são enumeradas e são propostos trabalhos futuros, que possam enriquecer o trabalho feito na presente dissertação.

Modelo numérico e sua validação, utilizando uma solução analítica

Devido à grande flexibilidade e baixo custo dos modelos numéricos, estes são uma ferramenta essencial de trabalho no ramo da engenharia, representando a realidade satisfatoriamente, com uma baixa margem de erro. Deste modo, os sistemas físicos são normalmente representados através de modelos numéricos que vêm a substituir, com frequência, as abordagens experimentais.

Sempre que possível, os modelos numéricos podem ser validados através da utilização de resultados experimentais ou, em casos específicos, recorrendo a soluções analíticas. No presente capítulo é exposto um sistema de validação do modelo numérico utilizado, através da simulação do aquecimento por convecção de um sólido de geometria paralelepipedica de aço de norma AISI H11, para o qual é também possível obter uma solução analítica.

Para que uma boa margem de confiança dos resultados numéricos fosse atingida, realizou-se um aumento da exigência do sistema a estudar comparativamente ao caso real. Deste modo, utilizou-se um valor de coeficiente de convecção superior ao coeficiente global de transferência de calor esperado na fase de aquecimento e uma temperatura de estágio superior à empregue na prática, num aquecimento sem estágios intermédios.

É importante ter em conta que a evolução térmica do paralelepípedo varia não só espacial, mas também temporalmente pelo que na parte inicial deste capítulo é realizada uma resumida síntese bibliográfica de alguns conceitos relacionados ao regime transiente, imprescindíveis para a realização deste trabalho. A aplicação do modelo numérico, como antes mencionado, tem como base o *software AbaqusTM*. Seguidamente, alcançaram-se soluções numéricas com vários graus de refinamento de malha e diferentes valores máximos de temperatura por passo no tempo. Finalmente, realizou-se uma análise detalhada das diferentes soluções numéricas obtidas, comparando-as com a solução analítica, de forma a validar o melhor modelo numérico.

Na seleção da geometria do corpo a simular procurou-se uma peça para a qual fosse possível obter uma solução analítica e cujas dimensões não estivessem muito longe das peças que tipicamente são sujeitas a tratamentos térmicos de têmpera, caracteristicamente paralelepípedos. Assim, foram determinadas as dimensões x , y e z apresentadas na tabela 2.1

Tabela 2.1: Dimensões do bloco de teste utilizado para validação do modelo numérico

Dimensão	Bloco de teste
x	150 mm
y	150 mm
z	300 mm

Na figura 2.1 apresenta-se uma representação esquemática do sólido usado na obtenção da solução analítica com vista à avaliação da qualidade das soluções numéricas; é também representada a posição do sistema de eixos, estando este colocado no centro do paralelepípedo. Ainda na mesma figura, encontram-se representados também os pontos estudados, sendo o ponto 1 um vértice do paralelepípedo e o ponto 2 o centro da barra. Estes pontos revelam os comportamentos extremos referentes à transferência de calor delimitando superior e inferiormente a variação de temperatura nas restantes partes da barra.

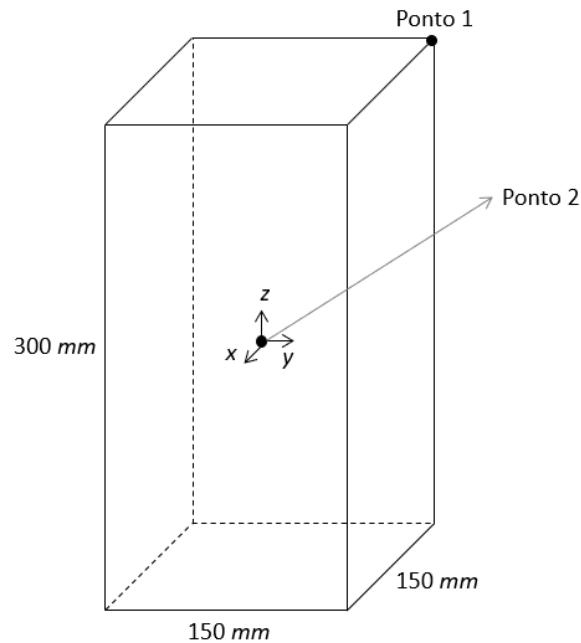


Figura 2.1: Esquema do sólido utilizado para avaliar a qualidade das soluções numéricas, posição do sistema do eixos e dos pontos estudados.

2.1 Condução transiente de calor

Como mencionado anteriormente, os tratamentos térmicos são um procedimento de transferência de calor que varia no tempo, sendo por isso de elevada relevância a realização de uma breve análise da condução transiente. A condução transiente traduz-se num problema de transferência de calor que surge devido à modificação das condições de fronteira de um sistema, como a variação de fluxo de calor ou das temperaturas na fronteira. Deste modo, a transferência de calor torna-se um fenómeno de adaptação temporária do sistema a uma alteração das suas condições de fronteira, não só dependente do espaço, mas também do tempo, existindo uma troca de calor no qual as propriedades do sistema são alteradas no sentido do equilíbrio térmico em toda a distribuição espacial [11].

A dependência entre a temperatura e a distribuição espacial é um fator determinante na escolha do método a adotar para a obtenção de soluções para o problema. Assim é possível considerar duas abordagens:

- A temperatura é apenas função do tempo, desprezando-se a variação de temperatura espacial no interior do corpo (análise por sistema global);
- Os gradientes de temperatura no interior do sólido não são desprezáveis.

Assim, a escolha entre as duas hipóteses baseia-se na utilização de uma grandeza adimensional, Número de Biot (Bi), cuja expressão se encontra na seguinte equação. Este parâmetro adimensional representa o cociente entre as resistências de condução e convecção [11].

$$Bi = \frac{h_{global} L_c}{k} \quad (2.1)$$

Na equação apresentada anteriormente, h_{global} é o coeficiente global de transferência de calor, L_c traduz o comprimento característico da dimensão a estudar, cuja expressão é encontrada na equação (2.2), que revela o quociente entre o volume do sólido, V , e a área superficial do sólido em contacto com o fluido, A_s , finalmente k representa a condutibilidade térmica do material que constitui o corpo.

$$L_c = \frac{V}{A_s} \quad (2.2)$$

A seleção da abordagem a utilizar para a análise do sistema rege-se pelo seguinte critério:

- $Bi < 0,1$ - A temperatura é apenas função do tempo, desprezando-se os gradientes de temperatura internos do sólido, sendo a análise por sistema global válida;
- $Bi > 0,1$ - A temperatura varia temporal e espacialmente, tornando-se necessário a adoção de uma metodologia que tenha em conta a dependência da temperatura destes dois fatores.

A figura 2.2 ilustra o critério anteriormente explicitado, isto é, quanto menor o número de Biot mais uniforme é a temperatura em todo o corpo, podendo, por isso, adotar-se a simplificação da existência de uma única temperatura em todo o corpo (análise por sistema global).

A abordagem do fenómeno de transferência de calor por sistema global, traduz-se numa análise simplista e de fácil aplicação tendo, por isso, elevada relevância no ramo da transferência de calor. Uma vez que é um método simplificativo da realidade, é de cariz obrigatório a realização de um teste à sua aplicabilidade e validade através do critério anteriormente descrito.

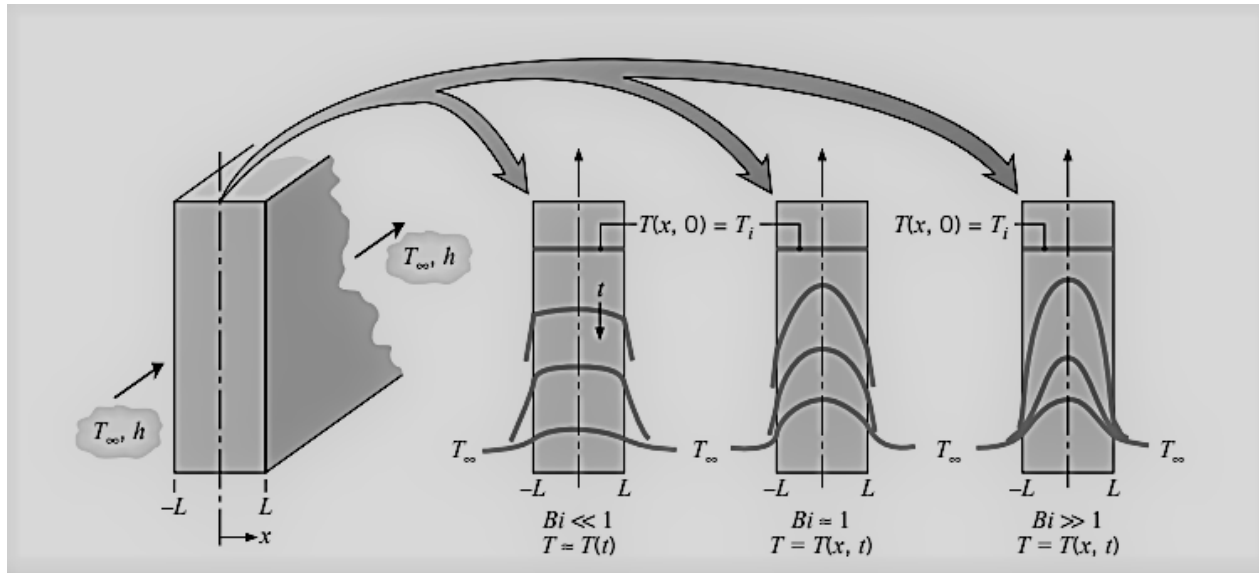


Figura 2.2: Efeito do número de Biot na distribuição transiente de temperaturas numa parede plana arrefecida simetricamente por convecção [11].

Quando a abordagem do sistema global não pode ser adotada, remete para uma análise simultaneamente temporal e espacial que exige, naturalmente, grande complexidade de cálculo. Contudo, existem na literatura soluções analíticas exatas para geometrias simples como cubos, paralelepípedos, esferas ou cilindros, no caso do coeficiente de convecção, h se manter constante. Dada a impossibilidade da utilização do método do sistema global, a descrição da temperatura é feita de forma adimensional, θ^* , sendo esta função de três parâmetros adimensionais, como refletido na seguinte expressão:

$$\theta^* = f(x^*, Fo, Bi) \quad (2.3)$$

Em que x^* traduz a coordenada espacial adimensional do ponto da peça em análise e Fo representa o número de Fourier (equação (2.5)), que surge da adimensionalização da equação diferencial da conservação de energia, relacionando a taxa de condução e a acumulação de energia térmica num dado sólido.

A seguinte equação define como θ^* pode ser calculado:

$$\theta^* \equiv \frac{\theta}{\theta_i} = \frac{T - T_\infty}{T_i - T_\infty} \quad (2.4)$$

$$Fo = \frac{kt}{\rho c_p L_c^2} \quad (2.5)$$

Onde, a variável ρ traduz a massa volúmica do corpo, c_p o seu calor específico e t representa o tempo característico [11].

2.1.1 Método do sistema global

A adoção do método do sistema global para a análise da evolução temporal da temperatura de um dado corpo sujeito a condução transiente de calor presume que a resistência térmica à condução no interior deste é muito inferior à exterior ($Bi < 0,1$), assumindo, assim, que a temperatura do sólido é uniforme em todos os seus pontos durante todo o processo [11].

Realizando um simples balanço energético do sólido e tendo em conta que não existe qualquer forma de geração de energia, é possível obter uma relação entre a energia, sob a forma de calor, que o corpo troca com o ambiente e a variação da sua energia interna. Esta relação materializa-se na seguinte equação:

$$-h_{global}A_s(T - T_\infty) = \rho V c_p \frac{dT}{dt} \quad (2.6)$$

Onde T se refere à temperatura do sólido dependente do tempo, t , e T_∞ à temperatura ambiente que rodeia o corpo. Recorrendo à integração da expressão anterior (equação (2.6)) é possível obter uma relação relativa à variação temporal da temperatura, representada na equação (2.7).

$$\theta^* = \frac{T - T_\infty}{T_i - T_\infty} = e^{-\frac{h_{global}A_s}{\rho V c_p}t} \quad (2.7)$$

Onde T_i se refere à temperatura inicial do sólido e t ao tempo correspondente ao instante onde é efetuado o cálculo. A partir da expressão anterior é, então, possível obter a temperatura, T , do corpo, num determinado instante, desde que se valide a hipótese de sistema global. Tendo em conta o expoente da equação (2.7), é possível simplificá-lo da seguinte forma, apresentada na seguinte identidade da equação:

$$-\frac{h_{global}A_s}{\rho V c_p}t = -\frac{h_{global}}{\rho L_c c_p}t = -\frac{h_{global}L_c}{k} \frac{kt}{\rho c_p L_c^2} = -Bi \cdot Fo \quad (2.8)$$

Assim a equação (2.7) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\theta^* = \frac{T - T_\infty}{T_i - T_\infty} = e^{-\frac{h_{global} A_s}{\rho V c_p} t} = e^{-Bi \cdot Fo} \quad (2.9)$$

De acrescentar que a constante de tempo, τ , é dada pela seguinte expressão:

$$\tau = \frac{\rho c_p V}{h_{global} A_s} \quad (2.10)$$

A constante de tempo é uma medida da capacidade do sistema térmico se adaptar a uma alteração térmica exterior. Valores elevados deste parâmetro correspondem a corpos que apresentam uma capacidade de reação mais lenta relativa a variações de temperatura [11].

2.1.2 Análise de temperatura transiente com variações espaciais não desprezáveis - Solução multidimensional

Como visto anteriormente, quando a resistência interna do sólido à condução apresenta valores superiores à resistência térmica na sua camada limite, o Número de Biot apresenta valores superiores a 0,1 indicando, assim, a impossibilidade de utilização da metodologia do sistema global descrita no sub-capítulo anterior. Nestes casos, a temperatura depende não só do tempo, mas também do espaço e não pode realizar-se a suposição da existência de apenas uma temperatura uniforme em todo o corpo sendo então, para se resolver o problema, necessário encontrar-se a solução analítica multidimensional, que fornece o conhecimento da temperatura do corpo em qualquer ponto do espaço em qualquer instante de tempo [11].

Através da aplicação da equação da conservação de energia, assumindo apenas a presença de condução de calor no interior do corpo, equação (2.11), é possível obter as soluções analíticas para a distribuição de temperaturas ao longo do tempo no sistema de coordenadas cartesianas necessárias para a resolução do problema.

$$\frac{\partial}{\partial x} k \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} k \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} k \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.11)$$

Onde $\dot{q}$ traduz a geração de calor no interior do sólido. Tendo em conta uma superfície plana onde a condução ocorre na perpendicular a um plano infinitamente longo na direção y e z , podendo por isso ser considerada unidimensional, com a existência de convecção no seu exterior, sem geração de calor e com condutibilidade térmica constante, como apresentado na figura 2.3, a equação (2.11) pode ser simplificada para a seguinte equação:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{\rho c_p}{k} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.12)$$

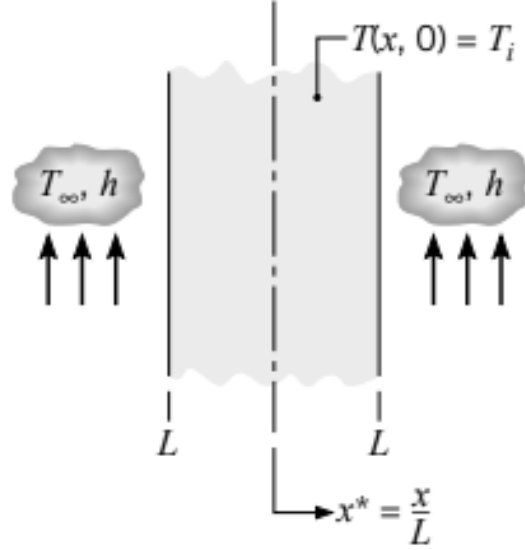


Figura 2.3: Esquema de uma placa plana com convecção em ambas as faces, simetria em $x = 0$ e temperatura inicial uniforme, T_i [11].

Na medida em que a equação (2.12) é de cariz diferencial e de 2^a ordem, necessita de duas condições de fronteira e uma condição inicial para ser totalmente resolvida. Deste modo as condições são definidas como:

- **Condição inicial** - Temperatura inicial do corpo em estudo no instante inicial, $t = 0$:

$$T(x, 0) = T_i \quad (2.13)$$

- **Condições de fronteira**

1. Condição de simetria no plano central da placa:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = 0 \quad (2.14)$$

2. Convecção no exterior das faces da placa:

$$-k \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=L} = h \cdot (T(L, t) - T_\infty) \quad (2.15)$$

Com o intuito da eliminação da dependência de variáveis dimensionais, dependentes do problema em questão, recorre-se à adimensionalização dos parâmetros presentes na equação (2.12). Assim surge a seguinte equação:

$$\frac{\partial^2 \theta^*}{\partial x^{*2}} = \frac{\partial \theta^*}{\partial t^*} = \frac{\partial \theta^*}{\partial Fo} \quad (2.16)$$

Na qual, $\theta^* = (T - T_\infty) \cdot (T_i - T_\infty)^{-1}$ representa a temperatura adimensional, como antes mencionado, $x^* = x \cdot L^{-1}$ traduz a dimensão, x , adimensionalizada e finalmente $t^* = Fo = kt/\rho c_p L_c^2$ representa o tempo adimensional.

Deste modo, as condições anteriormente adaptadas podem ser alteradas da seguinte forma:

- **Condição inicial**

$$\theta^*(x^*, 0) = 0 \quad (2.17)$$

- **Condições de fronteira**

1.

$$\frac{\partial \theta^*}{\partial x^*} \Big|_{x^*=0} = 0 \quad (2.18)$$

2.

$$-k \frac{\partial \theta^*}{\partial x^*} \Big|_{x^*=1} = -Bi \cdot \theta^*(1, t^*) \quad (2.19)$$

Retomando a equação (2.16), a sua integração leva à obtenção de uma solução exata para o problema anteriormente descrito. Esta solução, para a temperatura adimensional, é dada pela equação (2.20).

$$\theta^* = \sum_{n=1}^{\infty} C_n e^{-\zeta_n^2 Fo} \cdot \cos(\zeta_n x^*) \quad (2.20)$$

Onde ζ_n representam os valores próprios ou raízes positivas que provêm da seguinte equação. Estes valores encontram-se normalmente tabelados, mas no caso presente serão calculados com recurso à folha de *Excel* previamente mencionada.

$$\zeta_n \tan(\zeta_n) = Bi \quad (2.21)$$

Já o coeficiente C_n é dado pela seguinte expressão (2.22):

$$C_n = \frac{4 \sin(\zeta_n)}{2\zeta_n + \sin(2\zeta_n)} \quad (2.22)$$

Adotando a metodologia da sobreposição das diferentes soluções analíticas monodimensionais (equação (2.20)), é possível a obtenção de uma solução analítica para sistemas bi ou tridimensionais. A barra longa em estudo pode ser representada, em termos de sobreposição, como a interseção entre duas placas planas tal como apresentado na figura 2.4. Deste modo, para a barra em estudo, a solução analítica é obtida através do produto de três soluções unidirecionais [11] [12].

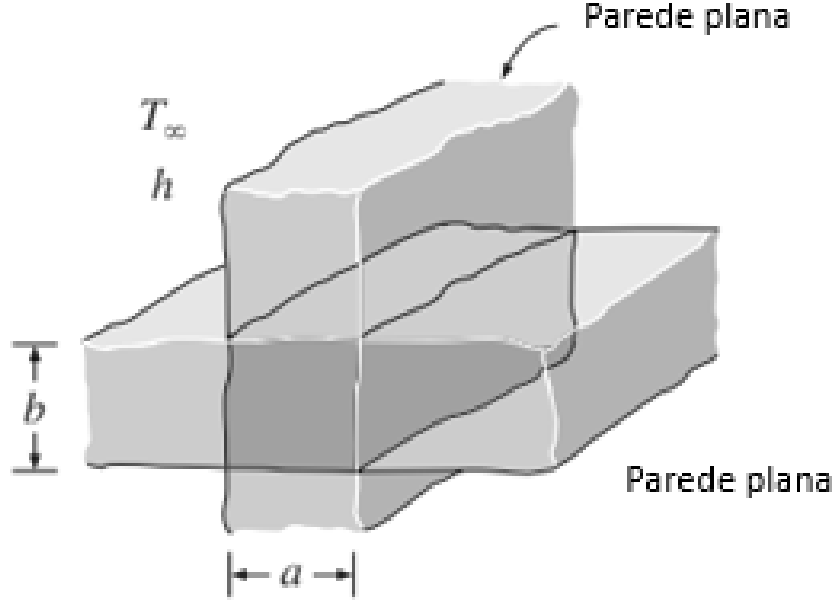


Figura 2.4: Exemplo de um sólido bidimensional obtido através da interseção/sobreposição de duas paredes planas de espessura a e b [12].

No entanto, é importante ter em conta que esta abordagem apenas é válida se o corpo não possuir qualquer tipo de geração de calor ($\dot{q} = 0$) e se todas as superfícies do corpo apresentarem troca de calor com o exterior por convecção com um mesmo fluido de coeficiente de transferência de calor por convecção, h , cuja temperatura é constante e de valor T_{∞} . É importante também mencionar que as propriedades do material não variam com a temperatura [12].

Com o intuito de saber como evolui a temperatura temporalmente e espacialmente dado o corpo em estudo, é possível para um paralelepípedo (barra) escrever a solução analítica na forma apresentada na equação (2.23). Deste modo, esta equação representa a sobreposição das soluções monodimensionais, que é obtida através do produto das soluções analíticas nas paredes de dimensões xx , yy e dimensão semi-infinita zz

$$\theta_{paralelepipedo}^*(x, y, z, t) = \theta_{parede}^*(x, t) \cdot \theta_{parede}^*(y, t) \cdot \theta_{parede}^*(z, t) \quad (2.23)$$

Na equação previamente mencionada, $\theta_{paralelepipedo}^*(x, y, z, t)$ traduz a temperatura adimensional do ponto de coordenadas (x, y, z) , pertencente ao paralelepípedo, no instante de tempo, t [12].

2.2 Análise dos resultados obtidos relativos ao modelo analítico

Após a realização de um estudo relativo às soluções analíticas obtidas devido à transferência de calor por condução transiente num sólido, é necessário obter estas soluções para que a validação do modelo numérico desenvolvido seja exequível.

Para que seja possível realizar uma comparação fundamentada entre os dois métodos, é de extrema importância garantir que quer as propriedades térmicas do material, como o calor específico (c_p), a massa volúmica do material, ρ , e a condutividade térmica do material (k), quer as propriedades da envolvente, como a temperatura inicial (T_i), a temperatura da envolvente (T_∞) e o coeficiente de transferência de calor global (h_{global}), são as mesmas.

2.2.1 Propriedades do material em questão e condições ambientais consideradas

A solução analítica multidimensional para a barra paralelepipedica representada na figura 2.1, foi calculada tendo em conta que todas condições exigidas para a aplicação da metodologia da sobreposição das diferentes soluções analíticas monodimensionais são respeitadas. Particularmente, a inexistência da geração de calor por parte do corpo, a existência de uma temperatura inicial e envolvente imutável e a presença de uma troca de calor por convecção uniforme a partir de todas as faces do sólido. Desta forma, na tabela 2.2 apresentam-se as propriedades térmicas do material considerado, para que seja possível o cálculo da solução analítica do presente problema. As propriedades do material aço de norma AISI H11 apresentadas na tabela, foram adquiridas através do software *CES EduPackTM*.

Tabela 2.2: Propriedades térmicas do material

Propriedades do material	Valor
c_p	477 J/KgK
k	42,25 W/mK
ρ	7755 kg/m ³

Já no que concerne aos valores de entrada e condições ambientais, como mencionado anteriormente, com o intuito de obter uma boa margem de confiança do modelo, realizou-se um aumento da exigência do sistema a estudar comparativamente ao caso real. Desta forma o valor do coeficiente de transferência de calor (h_{global}) foi majorado. A tabela 2.3 apresenta os valores de entrada relativos às condições da envolvente para que o cálculo da solução analítica seja possível.

Tabela 2.3: Condições ambientais adotadas

Propriedades ambientais	Valor
T_i	20°C
T_∞	1100°C
h_{global}	150 W/m ² K

Relativamente ao valor do coeficiente de transferência de calor total adotado, $h_{global} = 150W/m^2K$, sabe-se que o valor do coeficiente de convecção é aproximadamente igual a $10W/m^2$, enquanto que o coeficiente relacionado à transferência de calor por radiação apresenta um valor máximo de $65W/m^2$. Desta forma e com o intuito de obter uma boa margem de confiança do modelo, o valor adotado para o coeficiente global de transferência de calor foi dado pelo dobro da soma dos coeficientes relacionados à convecção e à radiação, tal como demonstrado na equação (2.24) [13].

Assim, em alternativa ao coeficiente de transferência de calor $h = 350W/m^2$, utilizado pelos colegas Pedro Pereira e Francisco Castro em trabalhos anteriores, este coeficiente de valor mais baixo continua a traduzir corretamente o fenómeno real, proporcionando uma malha mais eficiente e ligeira [9] [10].

$$h_{global} = 2 \times (10 + 65) = 150W/m^2 \quad (2.24)$$

2.2.2 Resultados obtidos através da solução analítica

Como previamente explicitado neste capítulo, um parâmetro fundamental para a seleção da metodologia a adotar aquando do cálculo da solução analítica para o sólido em questão, é o cálculo do número de Biot (Bi). Deste modo, as seguintes equações apresentam o cálculo desta grandeza adimensional nas diferentes direções x , y e z do sólido:

$$Bi_x = \frac{hL_c^x}{k} = \frac{150 \cdot 0,075}{42,25} = 0,266 \quad (2.25)$$

$$Bi_y = \frac{hL_c^y}{k} = \frac{150 \cdot 0,075}{42,25} = 0,266 \quad (2.26)$$

$$Bi_z = \frac{hL_c^z}{k} = \frac{150 \cdot 0,150}{42,25} = 0,533 \quad (2.27)$$

Desta forma, é possível concluir que os números de Biot calculados são superiores, em todas as direções, ao valor de referência 0,1 o que permite constatar que as variações

espaciais da temperatura do sólido são consideráveis, existindo, por isso, um gradiente de temperatura não desprezável no interior da barra. Por conseguinte, o cálculo da solução analítica é realizado adotando a metodologia da sobreposição das soluções monodimensionais, que é obtida através do produto das soluções analíticas nas paredes de dimensões xx , yy e zz . A tabela 2.4 resume os números de Biot calculados para as diferentes direções.

Tabela 2.4: Números de Biot para as diversas direções do sólido

Direção	Número de Biot
xx	0,266
yy	0,266
zz	0,533

A evolução térmica de uma barra em qualquer ponto e em qualquer instante do tempo é representada pela equação (2.23), tendo em conta que este sólido é sujeito a uma convecção uniforme em todas as suas faces. No entanto, esta equação representa o produto de um número infinito de termos pertencentes a uma série. Desta forma, é inevitável a existência de um erro de discretização, emergente da utilização de um número finito de termos da série para a obtenção da solução analítica pretendida.

Qualquer situação pode ser aproximada satisfatoriamente utilizando mais de 25 raízes, sabendo-se que o erro de discretização tende a diminuir com o aumento do número de raízes utilizadas. No entanto, o número de raízes utilizadas neste estudo foi de 50 na medida em que nos instantes iniciais, que são considerados os instantes críticos da análise, há uma diferença notória entre os valores adimensionais de temperatura quando são utilizadas 25 ou 50 raízes positivas; deste modo a utilização de cinquenta termos do somatório garante minoração do erro cometido. A tabela 2.5 apresenta os valores do erro de truncatura para 25 e 50 raízes (dado pela equação (2.28), sendo n o número de raízes da série) e a diferença entre a temperatura adimensional, θ^* , no vértice do sólido para um paralelepípedo de dimensões $800 \times 400 \times 600mm$, estes valores foram obtidos por Pedro Maia, na sua dissertação [14]. Através da tabela, conclui-se que o majorante do erro reduz o seu valor rapidamente na situação de utilização de 25 ou 50 raízes, confirmou-se também que o instante crítico é o inicial.

$$R_n = \frac{|\theta_{n+1}^* - \theta_n^*|}{\theta_{n+1}^*} \quad (2.28)$$

Tabela 2.5: Valores do erro para 25 e 50 raízes [14]

Tempo [s]	R_{25} [%]	R_{50} [%]	$\theta_{50}^* - \theta_{25}^*$
10	0,3649	0,0905	0,0414
20	0,0096	0,0000	0,0002
30	0,0005	0,0000	0,0000
40	0,0000	0,0000	0,0000
...	...	...	...
10000	0,0000	0,0000	0,0000

Assim, através do *Excel* previamente mencionado, foram calculados os valores necessários aos pontos extremos 1 e 2 representados na figura 2.1 para a obtenção das curvas representativas variação da temperatura ao longo do tempo. Na seguinte figura 2.5 encontra-se representada a variação temporal da temperatura, quer do vértice (ponto 1), quer do núcleo (ponto 2) da barra, em função do tempo.

Através da análise da figura 2.5, depreende-se também que, de facto, o sólido apresenta gradientes de temperatura não desprezáveis no interior da barra, o que reforça que foi previamente mencionado relativamente ao número adimensional de Biot, que sendo superior a 0,1 impede a utilização da metodologia simplista do sistema global. Assim, a barra apresenta variações espaciais da temperatura consideráveis, tanto que entre o núcleo e o vértice existe uma diferença máxima de temperaturas, no instante 180s, de aproximadamente 343°C

Deste modo, tendo em conta a figura 2.5 foi constatado o seguinte para cada um dos pontos:

- **Ponto 1 - Vértice:** É o local da barra onde se constata, nos instantes iniciais, um aquecimento mais rápido. Assim, este ponto atinge rapidamente a temperatura do fluido envolvente aproximadamente aos 6030s após o início do ensaio devido a um aquecimento rápido e constante.
- **Ponto 2 - Núcleo:** Uma vez que se trata do ponto central da barra, o núcleo é a zona onde o aquecimento demora mais tempo a fazer-se sentir, devido à grande quantidade de material circundante ainda a ser aquecida. Deste modo, o aquecimento deste ponto apenas começa a ser notório por volta dos 100s, após isto dá-se um aquecimento constante até à temperatura do fluido exterior, atingido-a aproximadamente 7840s após o início do ensaio.

Em jeito de conclusão, analisando de maneira geral a figura 2.5, é possível deduzir que os instantes iniciais são, de facto, os instantes mais críticos da análise, e onde é mais notória a diferença de temperatura entre os dois pontos em análise. Já no que remete ao final do ensaio e ao alcance da temperatura envolvente pelos dois pontos, a diferença entre estes não é tão notória, já que tanto o vértice como o núcleo atingem os 1100 °C aproximadamente na mesma altura.

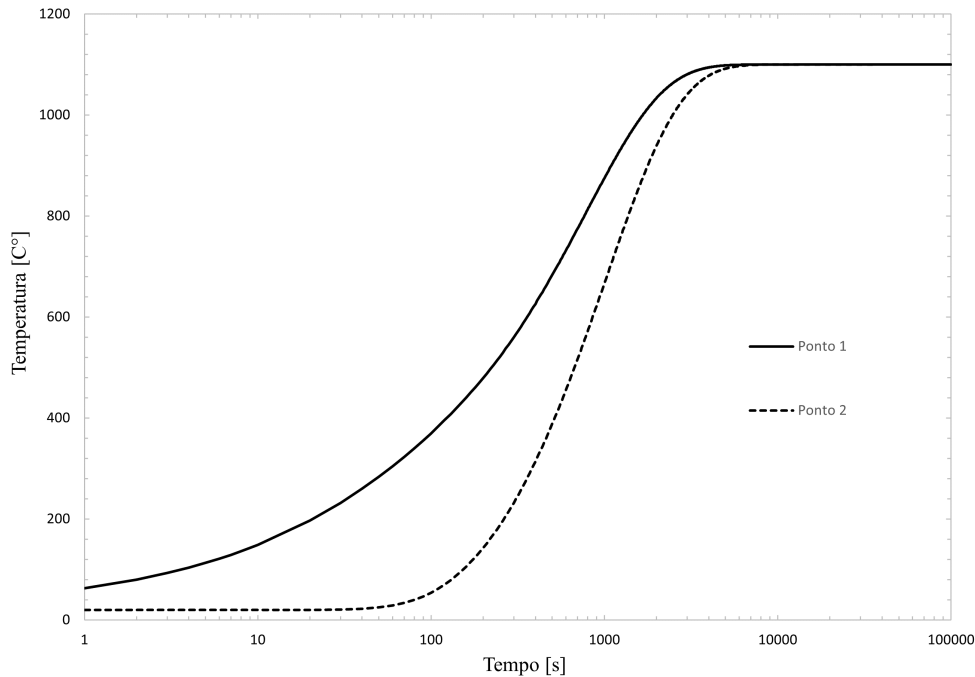


Figura 2.5: Curva de temperatura para os pontos 1 (vértice) e 2 (centro) da barra previamente apresentada, ao longo do tempo, obtidas analiticamente.

2.3 Análise do modelo numérico, sua validação e otimização

Relativamente à análise numérica realizada no presente trabalho, utiliza-se o método dos elementos finitos, isto é, uma metodologia para a determinação de soluções aproximadas de problemas relativos a sistemas físicos complexos, descritos por equações diferenciais que contêm um conjunto de limitações adicionais, as condições de fronteira. Deste modo, esta metodologia permite a discretização do sólido em questão, isto é, a divisão do domínio em segmentos menores, os elementos finitos, para que a integração das equações diferenciais, que traduzem o comportamento térmico do sistema, seja possível e se obtenha uma solução do problema através do cálculo em cada um dos elementos finitos representados por pontos discretos denominados de nós, que se interligam entre si através das condições de fronteira, formando uma malha.

Com este propósito, foi utilizado o *software* *AbaqusTM* visto que através deste é possível simular problemas de transferência de calor, neste caso na análise e estudo de otimização de tratamentos térmicos e blocos padrão em si utilizados. Através do *AbaqusTM* foi simulado o

aquecimento do sólido, apresentado previamente na figura 2.1, com o intuito de através das soluções por si geradas, definir e validar os parâmetros de simulação relevantes para análises posteriores tais como:

- Número de elementos presentes na malha;
- Variação espacial da temperatura máxima por passo no tempo;
- Incremento de tempo inicial.

Por conseguinte, após a definição e validação destes parâmetros, com o intuito de minimizar o erro entre as soluções numéricas e a solução analítica, pretender-se-á a otimização destas variáveis. Assim, após os parâmetros de simulação serem afinados e otimizados, é possível a sua utilização nas futuras análises e simulações da presente dissertação.

Na medida em que o *software* a utilizar é o *AbaqusTM* e o problema a solucionar é no âmbito da transferência de calor, é possível recorrer a três abordagens que diferem no seu grau de complexidade, particularmente:

- **Análise térmica desacoplada:** Uma análise térmica desacoplada é adotada quando os campos de temperaturas são calculados independentemente dos campos de tensão e deformação do corpo em estudo;
- **Análise térmica acoplada sequencial:** Este tipo de análise é utilizada quando o campo de tensão e deformação de um corpo depende do campo de temperatura, mas o campo de temperatura pode ser calculado sem o conhecimento do campo de tensão e deformação;
- **Análise térmica completamente acoplada:** Esta abordagem consiste na resolução simultânea de equações mecânicas e de equilíbrio térmico. Assim, existe uma dependência entre o campo de tensões, deformações e temperatura, o que leva à necessidade da obtenção de uma solução para os dois problemas simultaneamente.

Na medida em que o principal objetivo do presente capítulo é a comparação dos resultados da evolução térmica do corpo obtidos através de um método numérico com os previamente obtidos através do método analítico, não existe qualquer mais valia em utilizar uma análise mais complexa que tenha em conta os campos de tensões e deformações do sólido, pelo que foi adotada uma análise térmica desacoplada.

2.3.1 Definição dos valores de entrada e do sistema a tratar

Sendo que a análise de um sistema sujeito a transferência de calor desacoplada é adotada no presente trabalho, esta metodologia permite modelar e resolver numericamente variados problemas térmicos com diferentes níveis de complexidade como, por exemplo, sistemas que possuem geração interna de calor ou até mesmo condições de fronteira variáveis. No contexto da presente dissertação, como apresentado anteriormente na secção 2.2, o sistema a tratar é modelado tendo em conta os seguintes requisitos:

- O corpo não possui qualquer tipo de geração de calor ($\dot{q} = 0$);
- Todas as superfícies do corpo apresentam troca de calor com o exterior por convecção com um mesmo fluido de coeficiente de transferência de calor por convecção, h , cuja temperatura inicial é constante e de valor T_∞ ;
- O coeficiente de transferência de calor por convecção, h , é igual em todas as faces e constante durante toda a simulação;
- As propriedades do material não variam com a temperatura.

É de extrema importância estes requisitos estarem especificados no modelo numérico na medida em que, no cálculo analítico, estes pressupostos foram tidos em conta, pelo que para que seja possível a realização de uma comparação rigorosa dos resultados das duas metodologias, os requisitos têm de ser iguais.

Posto isto, com o intuito de proceder à simulação de um modelo de malha no *software AbaqusTM* realizaram-se os seguintes passos, que aqui se encontram sintetizados, mas que se podem encontrar com detalhe no Apêndice A.

1. **Criação do sólido:** Criação de um paralelepípedo maciço e homogêneo de com as de acordo com as dimensões apresentadas na tabela 2.1.;
2. **Definição do material do sólido:** Foram definidas as propriedades do material a usar, o aço AISI H11, a partir dos dados representados na tabela 2.2;
3. **Seleção do tipo de problema, apuramento do tempo de simulação e escolha da máxima variação espacial de temperatura por passo no tempo:**
 - (a) Foi selecionada a opção de um problema do tipo de transferência de calor em regime transiente;
 - (b) A duração de simulação adotada foi de 7000s, tempo onde a temperatura quer no núcleo quer no vértice já se encontra estabilizada nos 1100°C e a derivada é aproximadamente nula;
 - (c) O incremento inicial de tempo adotado para as simulações foi de 0,1s, com um incremento mínimo de 0,001s e um máximo de 5s, com a opção de incrementação temporal automática aplicada;
 - (d) Relativamente à escolha da máxima variação espacial de temperatura por passo no tempo, foram escolhidas duas temperaturas, 5°C e 10°C com o intuito da realização de uma comparação relativamente ao erro entre os resultados obtidos através da utilização das distintas temperaturas. Este estudo encontra-se presente na secção 2.3.3.
4. **Definição das condições de fronteira e condições iniciais:**
 - (a) As condições de fronteira do problema foram definidas de acordo com a tabela 2.3, apresentada anteriormente;

- (b) A temperatura inicial de 20°C foi definida pelo utilizador e introduzida como um campo predefinido.

5. Seleção do tipo de elementos finitos a utilizar e criação da malha:

- (a) O tipo de elementos finitos a utilizar foram elementos hexaédricos com a opção de convecção selecionada criando, deste modo, elementos cujo código é *DCC3D8*;
- (b) Foram modeladas várias malhas para que pudesse ser escolhida a malha que realizasse menor esforço computacional mas que mantivesse, também, um erro baixo e aceitável relativamente aos resultados analíticos. Deste modo criaram-se três malhas estruturadas para que existisse uma maior concentração de elementos nos vértices e arestas do sólido, que são locais críticos para a análise em questão.

2.3.2 Definição das malhas criadas para simulação

As malhas foram refinadas através do aumento do número de elementos por direção relativamente à malha inicial, através do comando *Sizing Control* inserido nas *Local Seeds*, como apresentado na seguinte tabela 2.6.

Tabela 2.6: Definição das diferentes malhas utilizadas e do número de elementos existentes

Designação	x	y	z	Número de elementos
Malha 1	16	16	30	7680
Malha 2	30	30	60	54000
Malha 3	36	36	70	90720

O objetivo principal, relativamente ao número de elementos, foi a obtenção de um número par de elementos em cada uma das malhas para que fosse possível a obtenção de um nó central na malha da barra para que este pudesse ser analisado com mais detalhe (ponto 2 referido na figura 2.1).

Na figura 2.6 apresentam-se as três malhas referidas anteriormente. Através da análise destas imagens é possível compreender que, devido à utilização de de uma malha estruturada, à medida que o número de elementos aumenta maior é o refinamento da malha especialmente nos vértices e arestas do paralelepípedo.

Foram modeladas três malhas diferentes com o objetivo de avaliar a influência do refinamento da malha no erro cometido

2.3.3 Influência da variação espacial máxima de temperatura e do refinamento da malha no erro existente

Através da alteração do refinamento da malha e da variação máxima da temperatura, $\Delta T_{\text{espacial-max}}$, a qualidade dos resultados pode ser alterada. Assim, neste secção pretende-se

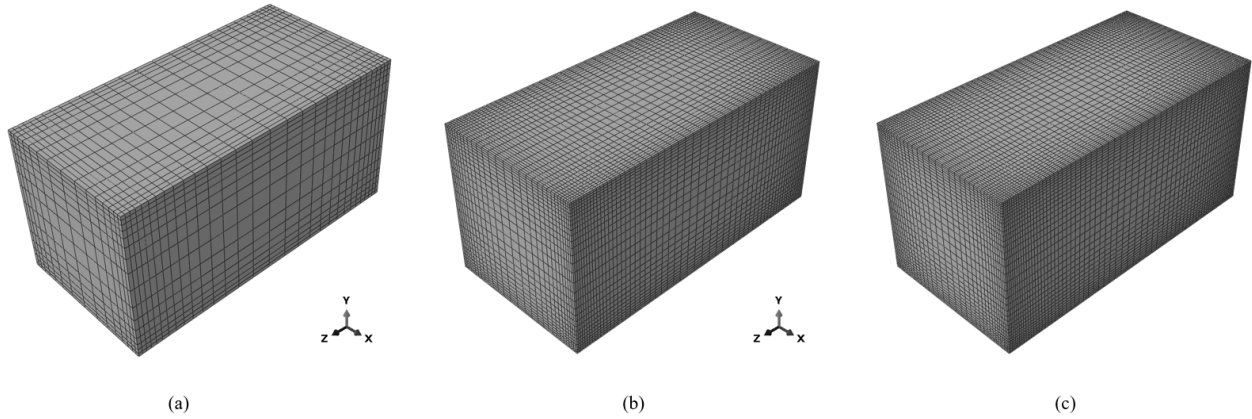


Figura 2.6: Ilustração das três malhas modeladas para a barra em questão: malha 1 (a), malha 2 (b) e malha 3 (c)

estudar quais são os parâmetros a ser otimizados que levam à obtenção de um erro mínimo. É previsível que uma malha mais fina, com um menor valor de variação espacial máxima de temperatura, conduza a resultados com menor margem de erro. Contudo, é necessário encontrar um equilíbrio entre uma malha e variação espacial máxima de temperatura adequadas que remeta a um menor esforço computacional mas que mantenha, também, um erro baixo e aceitável relativamente aos resultados analíticos.

Para tal, as três malhas modeladas foram testadas para dois valores de variação espacial máxima de temperatura executando-se, assim, um total de 6 simulações apresentadas na seguinte tabela. 2.7.

Tabela 2.7: Simulações realizadas relativamente às diferentes combinações efetuadas entre malhas e variações máximas de temperatura

$\Delta T_{\text{espacial-max}}$	Malha 1	Malha 2	Malha 3
10°C	Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
5°C	Simulação 4	Simulação 5	Simulação 6

Com o intuito de compreender em que período de tempo se encontra o maior valor de erro, a simulação 6, a mais exigente, foi realizada para um tempo de simulação de 7000s e foi avaliado o erro entre a solução analítica previamente apresentada e a solução numérica dada pela simulação 6.

O erro, e , existente entre as duas metodologias, foi calculado utilizando a equação (2.29), para que fosse possível comparar a temperatura da solução analítica, $T_{\text{analítica}}$, com a temperatura obtida numericamente, $T_{\text{numérica}}$, no mesmo instante de tempo.

$$e = \frac{|T_{analítica} - T_{numérica}|}{T_{analítica}} \times 100[\%] \quad (2.29)$$

Os seguinte gráficos apresentados nas figuras 2.7 e 2.8 demonstram não só a evolução da temperatura do vértice e do núcleo respetivamente (Ponto 1 e 2 na figura 2.1) ao longo do tempo, tendo em conta os parâmetros da simulação 6, mas também o erro entre a solução numérica e a analítica.

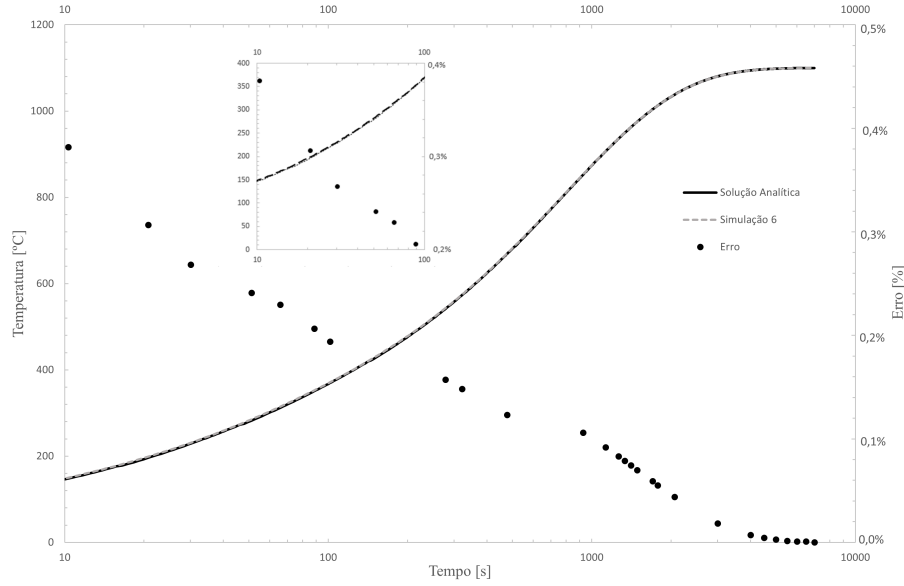


Figura 2.7: Evolução da temperatura do ponto 1 (vértice) através da metodologia analítica e numérica, relativamente à simulação 6, e o erro entre as duas soluções.

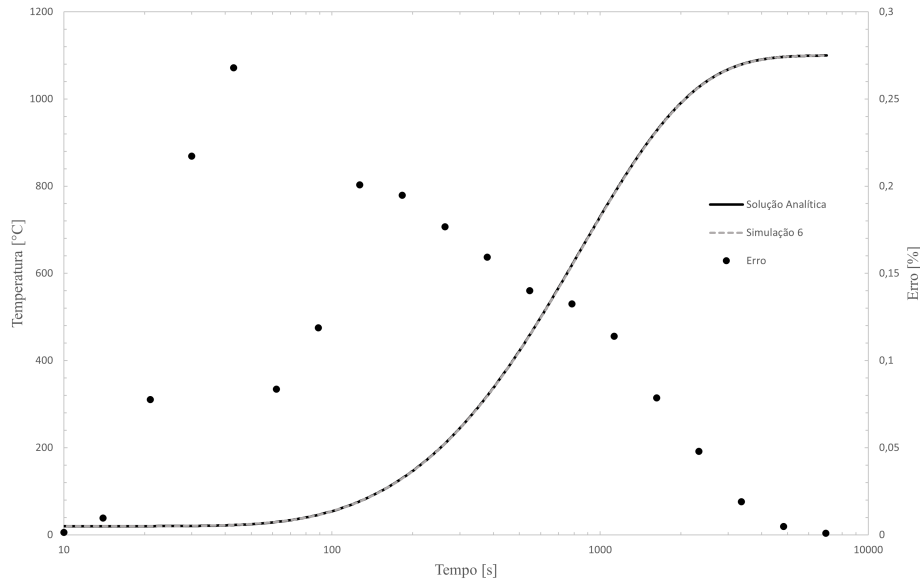


Figura 2.8: Evolução da temperatura do ponto 2 (núcleo) através da metodologia analítica e numérica, relativamente à simulação 6, e o erro entre as duas soluções.

Analisando os dois gráficos, é possível, inicialmente, concluir que, contrariamente ao que acontece com a evolução do erro entre a solução numérica e analítica do vértice que é decrescente ao longo do tempo, a do núcleo é crescente até atingir um máximo de aproximadamente 0,28% aos 41 segundos. Após este valor máximo, o erro relativo diminui até aos 80 segundos, onde apresenta um mínimo relativo de cerca de 0,06%, seguidamente torna-se novamente crescente até aos 130 segundos, onde apresenta um máximo relativo de 0,2% e a partir deste instante o erro relativo é continuamente decrescente até apresentar valores de aproximadamente zero. Com isto, dada a instabilidade do gráfico 2.8 e devido ao seu erro máximo absoluto relativo (0,28%) apresentar um valor inferior ao apresentado pelo gráfico representante da evolução térmica do vértice (0,39% no instante inicial, como apresentado na figura 2.7) dá-se uma análise mais extensa relativamente ao erro relativo do vértice, representado na figura 2.7, para retirar conclusões.

Com a análise do gráfico 2.7, observando a evolução do erro, é possível concluir que o valor de erro obtido para o instante $t=10s$ pode ser considerado como majorante do erro para os instantes posteriores.

Deste modo, os quatro fatores determinantes para a escolha da malha e da variação espacial máxima de temperatura, a considerar ao longo do trabalho são, os valores de tempo total de processamento dos 7000s (*Total CPU time*), $T_{total-CPU}$, o erro inicial, e_{10s} , o erro médio entre os instantes $t = 10s$ e $t = 100s$, $\bar{e}_{10s-100s}$ e o erro médio entre os instantes $t = 100s$ e $t = 200s$, $\bar{e}_{100s-200s}$, tudo isto tendo em conta o ponto 1 da figura 2.1 (vértice).

Assim, foram realizadas as seis simulações previamente apresentadas e analisados estes quatro fatores, cujos resultados estão expressos na seguinte tabela 2.8

Tabela 2.8: Variação dos quatro fatores previamente mencionados para as várias simulações

Simulação & Parâmetro	$T_{total-CPU}$	e_{10s}	$\bar{e}_{10s-100s}$	$\bar{e}_{100s-200s}$
Simulação 1	10m 25s	1,52%	1,1%	0,59%
Simulação 2	1h 9m 33s	0,61%	0,48%	0,33%
Simulação 3	1h 53m 7s	0,48%	0,41%	0,31%
Simulação 4	11m 33s	1,46%	1,0%	0,47%
Simulação 5	1h 32m 28s	0,51%	0,38%	0,21%
Simulação 6	2h 9m 24s	0,39%	0,29%	0,18%

Analisando a tabela previamente apresentada, é possível constatar uma dependência do erro médio com o nível de refinamento da malha. Deste modo, em termos médios entre a malha 1 e a malha 2 há uma diminuição do erro médio entre $t = 10s$ e $t = 100s$, de aproximadamente 64% e uma diminuição do erro médio entre $t = 100s$ e $t = 200s$, que ronda os 49% aliado a um indesejável aumento do tempo total de processamento de 86%. Já entre a malha 2 e 3 as diferenças relativas ao erro médio não são tão notórias, entre $t = 10s$ e $t = 100s$ há uma diminuição de erro médio de aproximadamente 18,5% e uma diminuição do erro médio entre $t = 100s$ e $t = 200s$ que ronda os 10% com um aumento de aproximadamente 37,5% no $T_{total-CPU}$.

No que toca à utilização de uma variação espacial máxima de temperatura de $10^{\circ}C$ ou $5^{\circ}C$ há, também, uma variação considerável do erro médio tendo em conta a escolha de uma destas temperaturas máximas. Desta forma, aliado a um aumento do tempo total de processamento de cerca de 15,46%, o que não é tão significativo relativamente aos valores analisados anteriormente para os diferentes refinamentos das malhas, dá-se uma diminuição do erro médio entre $t = 10s$ e $t = 100s$ de aproximadamente 19,3% e uma diminuição do erro médio entre $t = 100s$ e $t = 200s$ que ronda os 33%.

Concluindo, e tendo em consideração todos os valores presentes na tabela 2.8 a malha 1 e a variação espacial máxima de temperatura de $5^{\circ}C$ (simulação 4) foi a configuração selecionada para a realização das simulações. Deste modo, em simulações posteriores as malhas apresentam a mesma concentração de elementos por unidade de volume que a malha 1. na medida em que exige um menor esforço computacional mas mantém um erro baixo e aceitável relativamente aos resultados analíticos, sempre inferior a 1.0% para tempos de simulação superiores a 100s. A seguinte figura apresenta a evolução da simulação 4 e o erro entre a solução analítica e numérica.

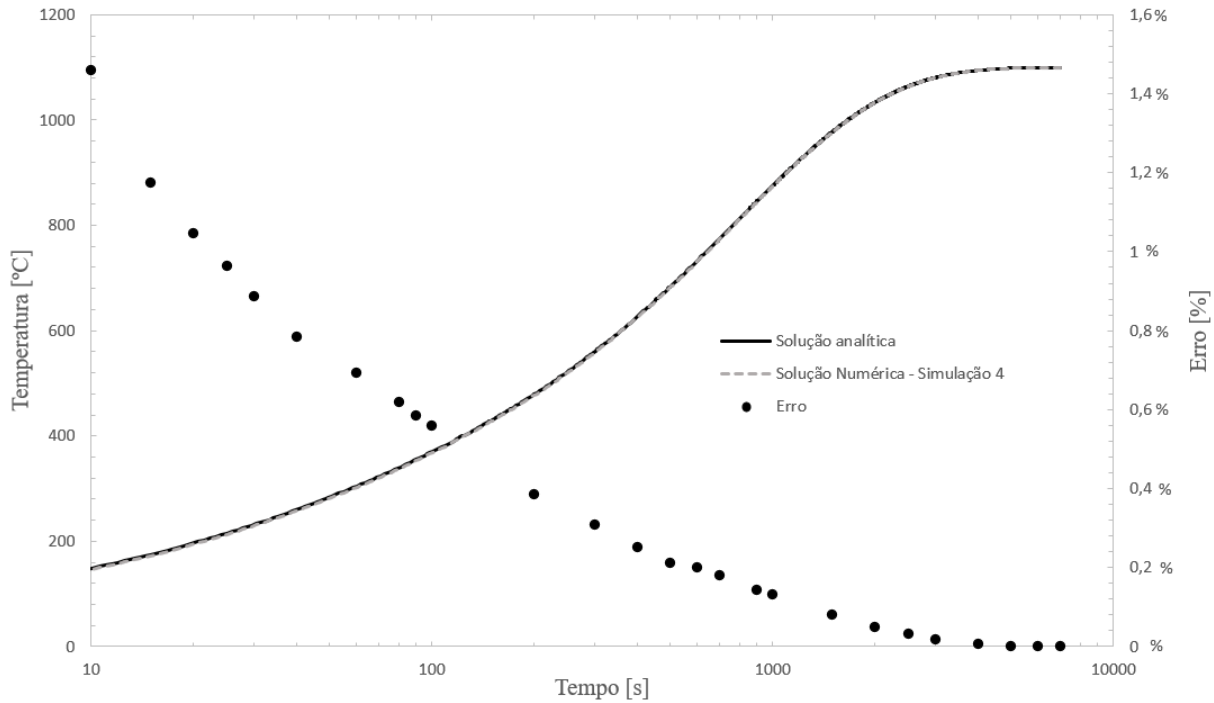


Figura 2.9: Evolução da temperatura do ponto 1 através da metodologia analítica e numérica, relativamente à simulação 4, e o erro entre as duas soluções.

2.3.4 Análise do modelo numérico tendo em conta a variação das propriedades térmicas com a temperatura

Com o intuito de confirmar que a escolha da malha 1, com a variação espacial máxima de temperatura de 5°C, foi adequada, realizou-se um estudo adicional para verificar se há um aumento significativo do erro quando as propriedades térmicas do material variam com a temperatura.

Deste modo, encontram-se no Anexo B as propriedades e características do aço AISI H11. As equações deduzidas no referido anexo, (B.1), (B.2) e (B.3) são válidas entre os 20 e os 700°C. No entanto, na medida em que no caso em estudo a temperatura varia dos 20 aos 1100°C admite-se que as propriedades obtidas para os 700°C se mantêm constantes até ao final do ensaio, esta simplificação é feita também em trabalhos anteriores e afeta de igual modo as simulações dos blocos e da peça.

É também importante mencionar que, o *software AbaqusTM* não aceita as equações que traduzem a variação das propriedades térmicas do material com a temperatura, pelo que foi realizada uma tabela onde se encontram os valores das propriedades necessárias para cada temperatura, como pode ser observado na seguinte tabela:

Tabela 2.9: Variação das propriedades térmicas do material com a temperatura

Temperatura [°C]	Condutividade Térmica [W/mK]	Calor Específico [J/KgK]	Massa volúmica [Kg/m ³]
20,00	25,29	460,0	7799
50,00	26,03	460,8	7794
100,0	27,09	463,6	7782
150,0	27,96	468,5	7770
200,0	28,67	475,3	7756
250,0	29,25	484,2	7740
300,0	29,73	495,0	7723
350,0	30,14	507,9	7705
400,0	30,51	522,7	7684,70
450,0	30,87	539,6	7663
500,0	31,25	558,4	7640
550,0	31,68	579,3	7616
600,0	32,19	602,1	7590
650,0	32,81	627,0	7562
700,0	33,57	653,8	7533
...	...	...	...
1100	33,57	653,8	7533

Deste modo, foram realizadas, novamente, as simulações 6 e 4 com o intuito de entender se a variação das propriedades térmicas com a temperatura leva, de facto, a um aumento notável no erro. Foi escolhida a simulação 6 na medida em que esta apresenta uma malha mais refinada e uma variação espacial máxima de temperatura de 5°C sendo, por isso, mais exigente.

Assim, nas figuras 2.10 e 2.11 apresenta-se a evolução da temperatura com o tempo do ponto 1 e 2, respetivamente, da barra apresentada na figura 2.1, quer através da simulação 4, quer através da simulação 6, tendo em conta que as propriedades térmicas variam com a temperatura. Adicionalmente, apresenta-se também a evolução do erro entre as duas simulações, ao longo do tempo. A equação algébrica utilizada para o cálculo do erro relativo apresenta-se na seguinte expressão:

$$e_{simul} = \frac{|T_{simulação\ 6} - T_{simulação\ 4}|}{T_{simulação\ 6}} \times 100[\%] \quad (2.30)$$

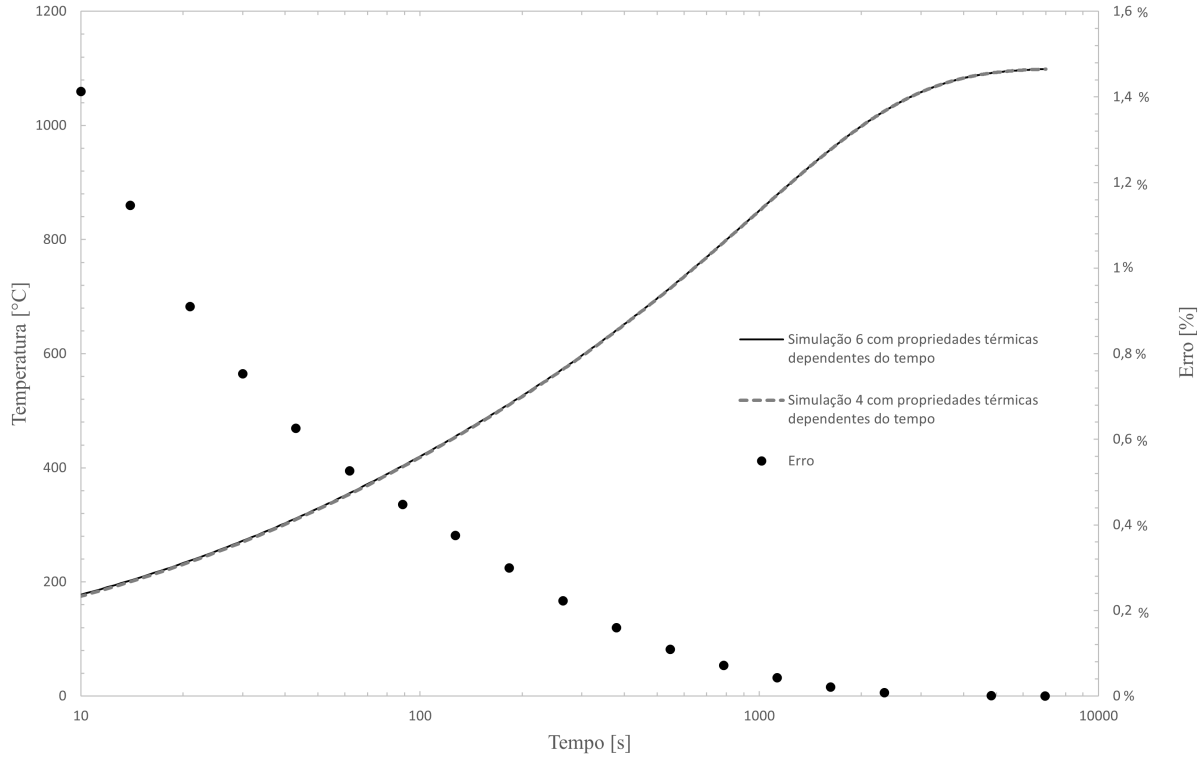


Figura 2.10: Evolução da temperatura do ponto 1 com o tempo na simulação 6 e simulação 4 e respectivo erro.

Através da análise do gráfico apresentado na figura 2.10 é possível concluir que há uma diminuição do erro relativo entre as duas simulações ao longo do tempo sendo que o erro máximo se dá no instante inicial da simulação tendo um valor de 1,4 %, após 100 segundos o erro relativo apresenta valores já inferiores a 0,5% e no final da simulação, isto é passados 7000 segundos de aquecimento, o erro é praticamente nulo.

Já relativamente ao gráfico 2.11, as conclusões não são as mesmas que as retiradas para o gráfico referente ao vértice. Analisando o erro relativo entre a simulação 4 e 6 no núcleo, é possível concluir que este aumenta até um valor máximo de aproximadamente 1,96%, 62 segundos após o início das simulações sendo que, após este instante, o erro decresce continuamente até um valor aproximadamente nulo e após 100 segundos de simulação o erro relativo apresenta valores já inferiores a 0,9%.

Desta forma, é possível concluir que a utilização da malha 1 com uma variação espacial máxima de temperatura de 5°C (simulação 4) é válida na medida em que o erro entre esta e a malha 3 com uma variação espacial máxima de temperatura de 5°C (simulação 6) não é significativo, aliado ao esforço computacional, que para a simulação 6 se revelou bastante superior

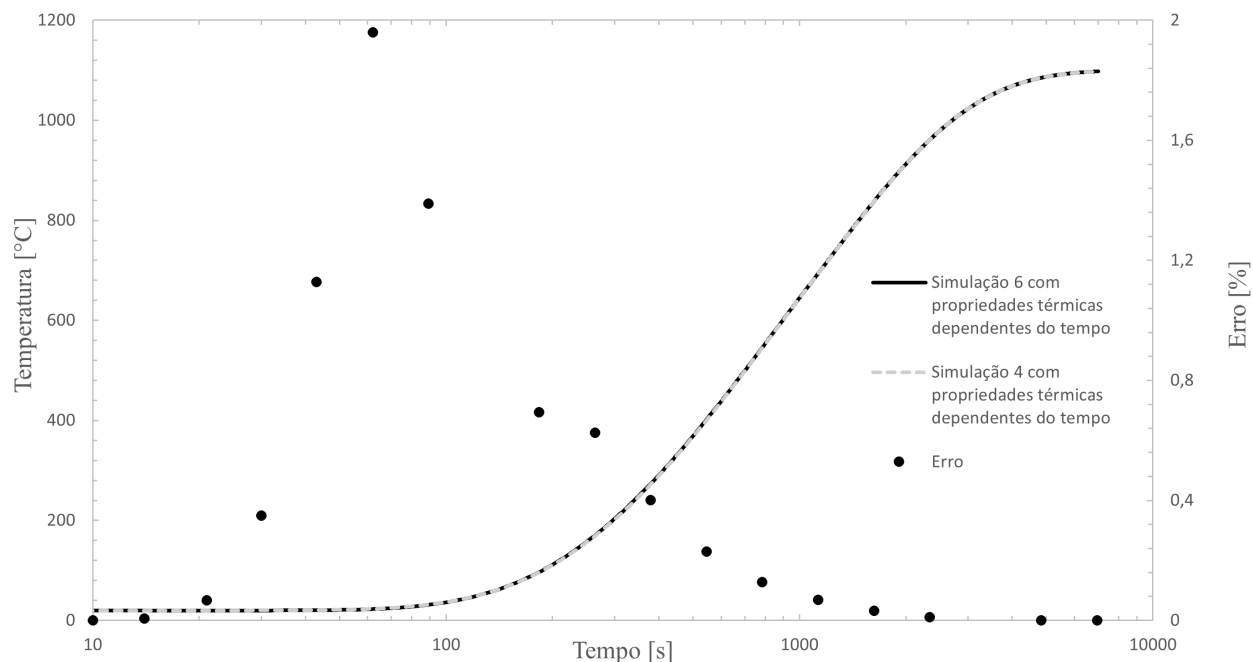


Figura 2.11: Evolução da temperatura do ponto 2 com o tempo na simulação 6 e simulação 4 e respectivo erro.

ao da simulação 4, apresentando valores de tempo total de processamento dos 7000s (*Total CPU time*) de 5 horas 23 minutos e 49 segundos e 15 minutos e 57 segundos, respetivamente.

2.3.5 Parâmetros de simulação selecionados: resumo

Ao longo deste capítulo estudaram-se soluções numéricas para um problema de transferência de calor de modo transiente numa barra em aço AISI H11, sendo que estas soluções numéricas foram convenientemente comparadas com uma solução analítica, também obtida neste capítulo. Adicionalmente, foram realizados estudos relativos à influência do refinamento da malha, da máxima variação espacial da temperatura e da variação das propriedades térmicas com a temperatura, tendo sido selecionada a simulação cuja combinação de parâmetros remeteu a um erro favorável aliado a um menor esforço computacional. Na tabela 2.10 apresentam-se não só os dados de entrada para o problema em questão mas também os parâmetros da simulação selecionada para as análises posteriores.

Para futuras simulações, não irá ser utilizada propriamente a malha 1, mas sim a mesma concentração de elementos por unidade de volume. Desta forma a seguinte equação remete

Tabela 2.10: Quadro resumo do capítulo 2, apresentando-se os parâmetros iniciais do problema e os parâmetros seleccionados para a simulação

Problema			Solução	
T_i	20	[°C]	Malha	Nº1
T_∞	1100	[°C]	$\Delta T_{\text{espacial-max}}$	5 [°C]
h	150	[W/m²K]	Δt_i	0,1 [s]
Material	Aço AISI H11			

para esse valor, a utilizar em análises posteriores:

$$\text{Elementos por unidade de volume} = \frac{N_{\text{elementos}}}{V_{\text{barra}}} = \frac{7680}{0,15 \times 0,15 \times 0,30} \approx 170667 \text{ elementos}/m^3 \quad (2.31)$$

Finalmente, a figura 2.12 resume as soluções numéricas obtidas para simulações com propriedades térmicas constantes e dependentes da temperatura, para a evolução da temperatura dos pontos 1 e 2 da figura 2.1 com o tempo para a solução escolhida (malha 1 com máxima variação espacial de temperatura por passo no tempo de 5°C).

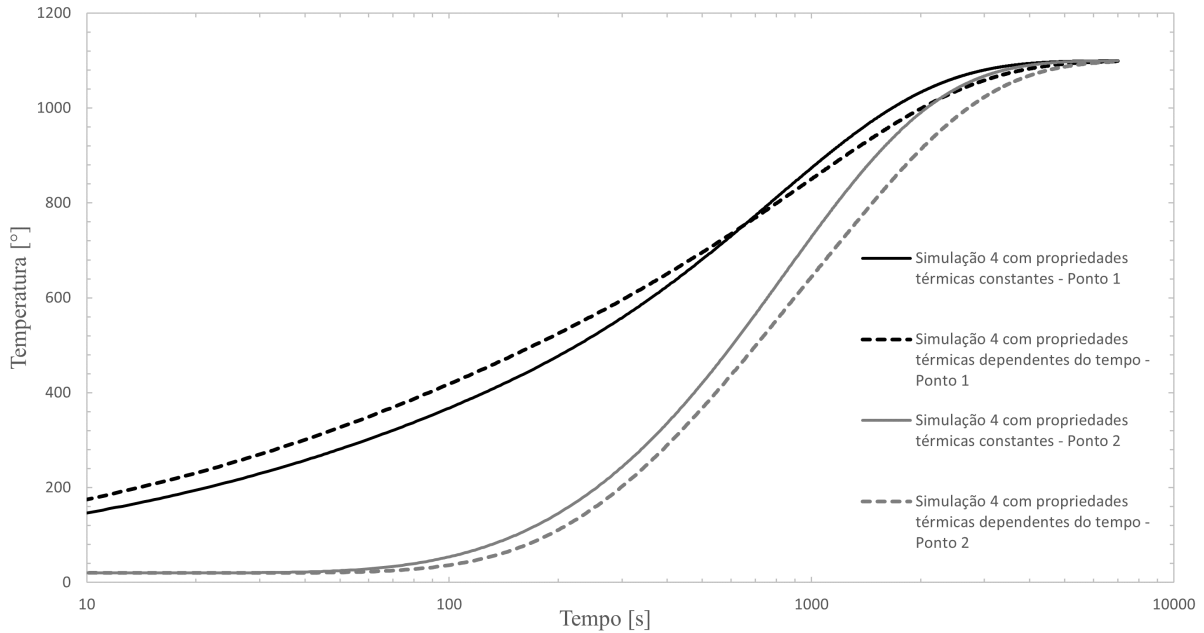


Figura 2.12: Evolução da temperatura do ponto 1 e 2 com o tempo na simulação 4 com propriedades térmicas constantes e propriedades térmicas dependentes do tempo.

Simulação de peças e blocos padrão em aço AISI H11

Na medida em que a solução numérica foi validada através de dados obtidos por meio de uma solução analítica, no presente capítulo procede-se à simulação da fase de aquecimento do tratamento térmico de têmpera de peças típicas em aço AISI H11, cujas características se apresentam no anexo B, bem como à simulação do comportamento dos correspondentes blocos padrão de igual material ao da peça a simular.

De modo sumário, o objetivo deste capítulo baseia-se em testar a equação proposta por Francisco Machado (equação (1.5)) no seu trabalho de dissertação [10], para dimensionar o bloco padrão correspondente a uma dada peça, através do *software AbaqusTM*. Posteriormente à realização das simulações, são apresentados os resultados das mesmas, bem como os erros entre a temperatura do centro da peça e do centro do bloco padrão.

Até este ponto da presente dissertação, apenas foram considerados fenômenos de transferência de calor através de convecção forçada. Não obstante, como mencionado no capítulo 1, no aquecimento utiliza-se a técnica de aquecimento em degraus através de um conjunto de resistências elétricas de grafite dispostas ao longo da geratriz do forno, o que cria outro fenômeno de transferência de calor igualmente importante, a transferência de calor por radiação, que é considerada ao longo deste capítulo.

Todavia, com o objetivo de obter resultados relativos às simulações da fase de aquecimento dos tratamentos térmicos de têmpera, o mais fidedignos possíveis, é necessário o conhecimento das condições reais no decorrer da fase de aquecimento do tratamento térmico no interior do forno e as suas variações com o tempo. Deste modo, utilizando os dados disponibilizados pela Ramada Aços S.A e MetalSolvus, tornou-se possível descrever de forma detalhada a variação típica das condições no interior do forno na fase de aquecimento do tratamento térmico de têmpera.

3.1 Temperatura das paredes do forno e a sua respetiva emissividade

De acordo com os três ensaios realizados na empresa Ramadas Aços, o aquecimento pode ser realizado através de 4 patamares com degraus de temperatura constante a 650°C, 750°C, 840°C e 1020°C (ensaios 1 e 2) ou em 5 patamares com degraus de temperatura constante a 650°C, 750°C, 840°C, 900°C e 1060°C (ensaio 3); isto encontra-se representado na tabela 3.1. Ainda nesta tabela, encontram-se também os tempos médios da duração do patamar e a taxa de aquecimento média até chegar à temperatura do patamar em questão, tendo em conta a temperatura da parede do forno.

Tabela 3.1: Quadro resumo dos patamares de temperatura no processo de têmpera para os três ensaios realizados pela Ramada Aços S.A

	Temperatura do patamar [°C]	Duração do patamar	Taxa de aquecimento [°C/min]
Ensaio 1	650	1h 54m	15,2
	750	1h 9m 30s	15,4
	840	1h 6m 30s	11,2
	1020	2h 54m	5,00
Ensaio 2	650	1h 27m 30s	14,3
	750	1h 9m 30s	15,4
	840	1h 6m 30s	9,50
	1020	2h 52m 30s	4,70
Ensaio 3	650	1h 14m 36s	17,0
	750	59m 15s	19,4
	840	47m 45s	14,4
	900	28m 57s	12,1
	1060	1h 38m 21s	6,00

A figura 3.1 representa graficamente o que está apresentado na tabela 3.1, isto é, a variação da temperatura da parede do forno com o tempo.

A partir da análise da tabela e do gráfico, é possível concluir que o ensaio um e dois são muito semelhantes, variando apenas, significativamente, no tempo em que o forno se mantém no patamar de 650°C, como é possível observar na figura.

Já relativamente ao terceiro ensaio, a discrepância é maior, na medida em que apresenta cinco patamares e não quatro, como os ensaios anteriores. No entanto as taxas de aquecimento entre este ensaio e os anteriores são semelhantes até aos 840°C.

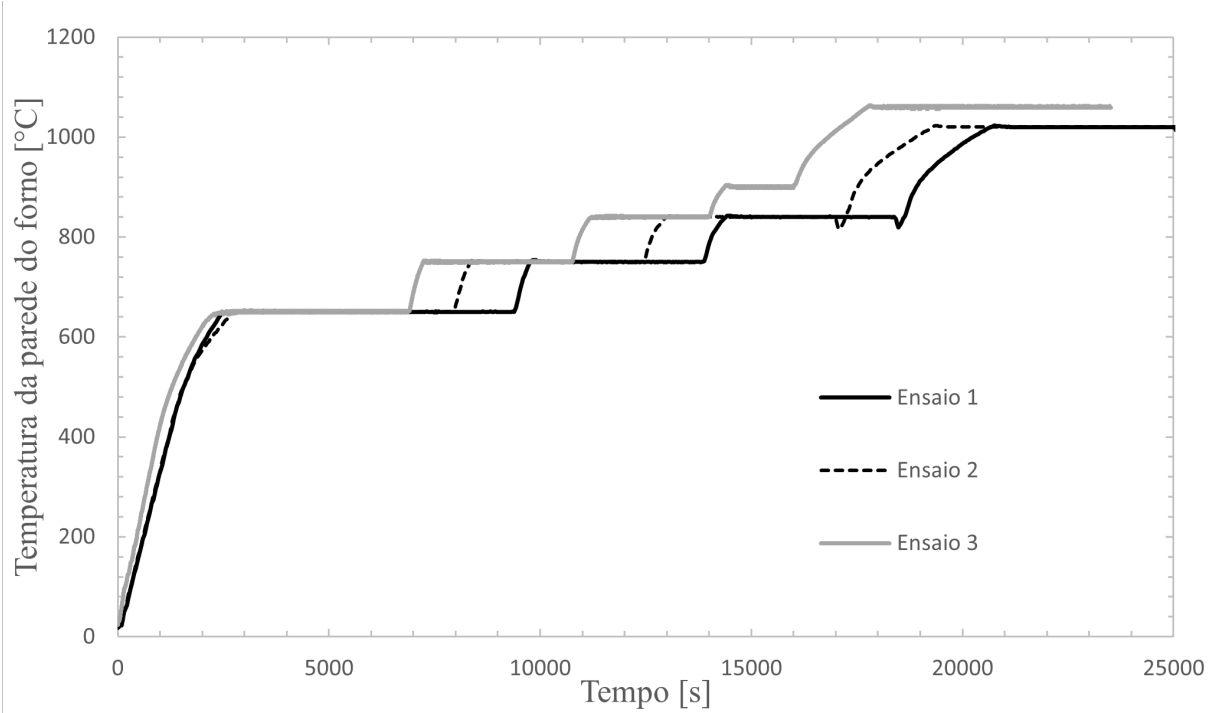


Figura 3.1: Evolução da temperatura da parede do forno com o tempo para os três ensaios mencionados.

Já no que se refere à emissividade das paredes do forno, ε_{forno} , foi considerado o valor constante igual a 0,8, como o utilizado em teses anteriores [14]. Para as simulações presentes no presente e o seguinte, foi adotada uma evolução da temperatura da parede semelhante à apresentada pelo ensaio 1.

3.2 Temperatura da atmosfera de azoto

Como referido anteriormente, o forno apresenta no seu interior uma atmosfera de azoto, sendo este o gás inerte mais utilizado em fornos de vácuo, apresentando uma velocidade de arrefecimento considerável aliada a um baixo preço. Deste modo, à medida que as paredes do forno aquecem, a atmosfera de azoto vai igualmente aquecendo, devido à troca de calor com as paredes por convecção. De acrescentar que, de igual forma, a atmosfera de azoto transfere, por convecção, calor às peças presentes no interior do forno, de modo a que o processo de aquecimento das mesmas seja possível.

A diferença de temperaturas entre as paredes do forno, T_F , e o gás inerte, T_{Azoto} , foi estudada anteriormente [15], desenvolvendo-se a seguinte equação, que relaciona as duas

variáveis em °C, num dado instante de tempo:

$$T_F - T_{Azoto} = 1,10611780 \times 10^{-4} T_F^2 - 2,59688290 \times 10^{-2} T_F + 13,4805553 \quad (3.1)$$

Assim, utilizando as temperaturas do ensaio 1, obtém-se o seguinte gráfico apresentado na figura 3.2, onde é visível a evolução temporal das duas temperaturas T_F e T_{Azoto} ; para além disso, na figura é também possível observar a evolução exemplificativa da pressão no interior do forno ao longo do tempo.

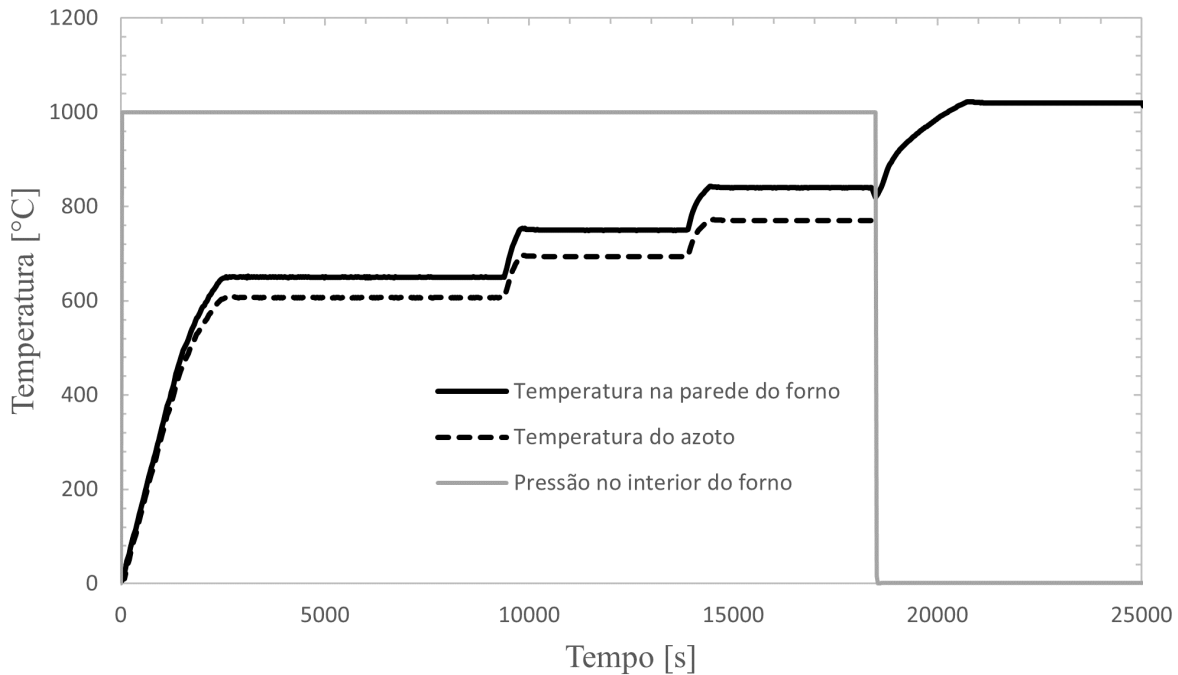


Figura 3.2: Evolução da temperatura da parede do forno e do azoto e evolução representativa da pressão no interior do forno com o tempo.

Analisando a figura 3.2, relativamente à evolução temporal da pressão, é possível concluir que esta se mantém constante até aproximadamente o segundo 18480. Por outras palavras, a pressão no interior do forno permanece constante desde o início da fase de aquecimento do processo de têmpera até passarem 5 horas e 8 minutos, quando a temperatura da parede do forno atinge o último patamar de aquecimento; neste instante, o azoto é retirado do forno através de um sistema de vácuo, sendo que a partir deste momento, a radiação é o único processo relativo à transferência de calor no interior do forno.

3.3 Transferência de calor por convecção no interior do forno

Com o intuito de obter resultados o mais fidedignos possíveis, relativamente ao comportamento térmico dos corpos presentes no forno, sabe-se que, para além da radiação, o aquecimento das peças também se dá devido à transferência de calor através de convecção, devido ao gás presente no interior do forno. Deste modo, torna-se fundamental o conhecimento de um coeficiente de transferência de calor por convecção que seja fiel às condições reais durante a fase de aquecimento do tratamento térmico. No entanto, o coeficiente de convecção não é constante em todas as partes da peça nem em todas as partes do forno, dada a existência de ventiladores nas portas que se encontram em funcionamento até cerca dos 850°C, tornando, por isso, o coeficiente de convecção superior nesta zona. Assim, as zonas mais distantes da porta apresentam, naturalmente, um coeficiente de convecção inferior.

Desta forma, acedendo a estudos passados, [15] realizados sobre tratamentos térmicos em condições idênticas, utilizou-se um coeficiente de convecção médio que ronda os $10,1 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$.

3.4 Método de dimensionamento dos blocos padrão

Com o intuito da determinação das dimensões do bloco padrão utilizou-se a correlação geométrica sugerida por Francisco Machado, [10] apresentada previamente no capítulo 1 (equação(1.5)).

A equação (1.5) é de carácter mais geral, uma vez que envolve as difusibilidades térmicas e emissividades dos diferentes materiais da peça e do bloco. Esta equação foi desenvolvida no trabalho de dissertação de Francisco Machado tendo em conta peças em aço AISI H11 e blocos padrão em aço AISI 304; e peças em AISI D2 com blocos correspondentes em aço AISI 304, mas continua, em princípio, válida para materiais diversos.

Na medida em que, no presente capítulo, o material do bloco padrão a utilizar é igual ao da peça em estudo, a equação (1.5) pode simplificar-se na seguinte equação (3.2), na medida em que as difusibilidades térmicas e as emissividades se igualam.

$$L_{c,bloco} = L_{c,peça} \quad (3.2)$$

Para além da determinação do comprimento característico do bloco padrão, através da equação (3.2) é também necessário definir a sua geometria. Deste modo, foram selecionadas duas geometrias simples para o bloco padrão: a geometria cúbica e a geometria cilíndrica.

- Cubo - A geometria cúbica só tem um comprimento a ter em conta, a aresta, a_{cubo} .

1. **Volume** - O volume do cubo é dado pela seguinte expressão:

$$V_{bloco \text{ cúbico}} = a_{cubo}^3 \quad (3.3)$$

2. **Área Superficial** - A área superficial do cubo é dada pela seguinte expressão:

$$A_{s, \text{bloco cúbico}} = 6a_{cubo}^2 \quad (3.4)$$

3. **Comprimento característico** - Conhecendo-se o volume e a área superficial do cubo e tendo em conta a definição dada pela equação (2.2), é possível obter o comprimento característico, apresentado na seguinte expressão:

$$L_{c, \text{bloco cúbico}} = \frac{V_{\text{bloco cúbico}}}{A_{s, \text{bloco cúbico}}} \equiv \frac{a_{cubo}}{6} \quad (3.5)$$

- Cilindro - A geometria cilíndrica tem dois comprimento a ter em conta, o diâmetro, $\phi_{cilindro}$, e a altura, $h_{cilindro}$.

1. **Volume** - O volume do cilindro é dado pela seguinte expressão:

$$V_{\text{bloco cilíndrico}} = \pi \frac{\phi_{cilindro}^2}{4} h_{cilindro} \quad (3.6)$$

2. **Área Superficial** - A área superficial do cilindro é dada pela seguinte expressão:

$$A_{s, \text{bloco cilíndrico}} = 2\pi \frac{\phi_{cilindro}^2}{4} + h_{cilindro} \pi \phi_{cilindro} \quad (3.7)$$

3. **Comprimento característico** - Conhecendo-se o volume e a área superficial do cilindro e tendo em conta a definição dada pela equação (2.2), é possível obter o comprimento característico, apresentado na seguinte expressão:

$$L_{c, \text{bloco cilíndrico}} = \frac{V_{\text{bloco cilíndrico}}}{A_{s, \text{bloco cilíndrico}}} \equiv \frac{\phi_{cilindro} h_{cilindro}}{2\phi_{cilindro} + 4h_{cilindro}} \quad (3.8)$$

Considerando, por termos de simplificação, que o diâmetro e a altura do cilindro são iguais a equação (3.8) resume-se a:

$$L_{c, \text{bloco cilíndrico}} = \frac{\phi_{cilindro}}{6} \quad (3.9)$$

Deste modo, os dois tipos de blocos padrão, com diferentes geometrias, são simulados e as diferenças entre eles, na caracterização da evolução térmica das peças, são também analisadas.

3.5 Simulações de peças típicas em aço H11 e respectivos blocos padrão em aço AISI H11

Na medida em que já são conhecidas todas as variáveis do forno que interferem no processo de transferência de calor, procedeu-se a realização de simulações de aquecimento de peças fictícias típicas (figura 3.3) e peças reais cuja geometria foi fornecida pela empresa parceira MetalSolvus (figura 3.4).

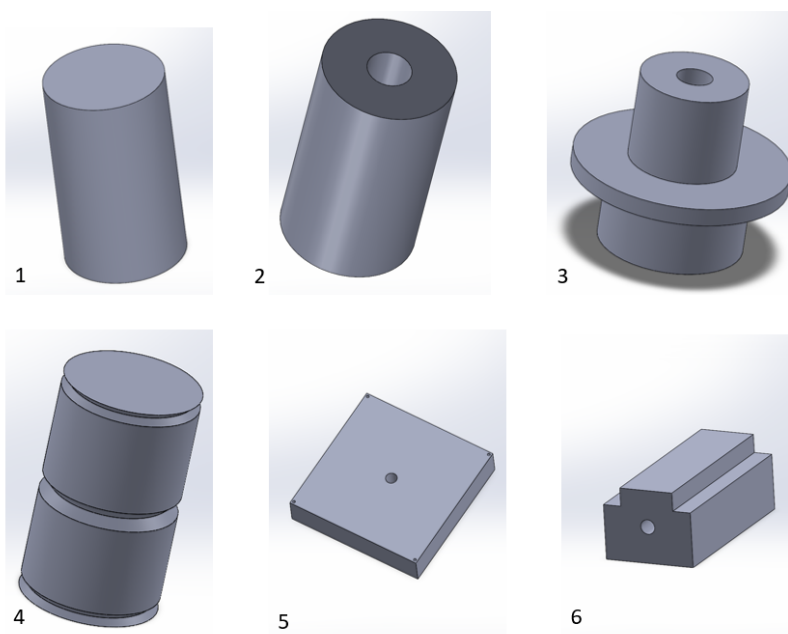


Figura 3.3: Peças típicas de aço em H11 simuladas no *software* Abaqus.

Desta forma, na tabela 3.2, apresentam-se as principais dimensões das peças presentes nas figuras 3.3 e 3.4. As peças cujo número é seguido de um R referem-se às peças de geometria definida pela empresa. O número de elementos para as malhas das peças apresentadas, foi escolhido com o objetivo preservar a densidade média de elementos por unidade de volume (m^3) definida pela equação (2.31) no capítulo 2. A mesma densidade também será utilizada para o estudo da evolução térmica dos blocos padrão. É importante ter em conta que o número de elementos foi sempre ajustado para um número par, para que a existência de um nó central fosse garantida.

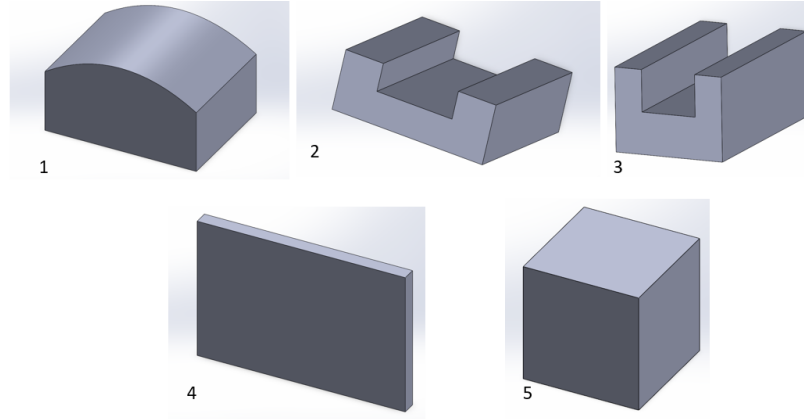


Figura 3.4: Peças de geometria fornecida pela MetalSolvus em aço AISI H11 simuladas no *software Abaqus*.

Tabela 3.2: Quadro resumo das principais dimensões das peças apresentadas na figura 3.3

Nº da peça	Volume [m^3]	Área de transferência [m^2]	L_c [mm]	Nº de elementos
1	0,0353	0,613	57,60	6024
2	0,0314	0,754	41,60	5358
3	0,0530	1,290	41,10	9044
4	0,0346	0,644	53,70	5904
5	0,0248	0,722	34,30	4232
6	0,0219	0,600	36,50	3738
1R	0,0305	0,127	24,08	520
2R	0,0023	0,147	15,64	392
3R	0,0079	0,323	22,99	1344
4R	0,0012	0,140	8,570	204
5R	0,0080	0,240	33,33	1366

Através da equação (3.2) foi possível calcular os comprimentos característicos dos blocos padrão a simular para cada peça em questão. Desta forma, definiram-se através das equações (3.5) e (3.9), as dimensões dos blocos padrão cúbicos e cilíndricos correspondentes a cada peça. É importante referir também que, para os blocos padrão de geometria cilíndrica se considerou que a altura, $h_{cilindro}$, seria de igual dimensão ao diâmetro, $\phi_{cilindro}$. A tabela, 3.3, resume as dimensões dos blocos padrão das duas geometrias a simular, para cada uma das peças apresentadas nas figuras 3.3 e 3.4.

Tabela 3.3: Quadro resumo das dimensões dos blocos padrão a utilizar

Nº Peça	$L_{c,bloco}$ [mm]	$\phi_{cilindro} = a_{cubo}$ [mm]
1	57,6	346
2	41,6	250
3	41,1	247
4	53,7	322
5	34,3	206
6	36,5	219
1R	24,1	144
2R	15,6	94
3R	23,0	138
4R	8,57	51
5R	33,3	200

O processo de aquecimento das peças dentro do forno tem em consideração não só as trocas de calor por convecção com o gás presente no forno, mas também as trocas de calor através de radiação pelas paredes do forno e da peça. Sabe-se que a emissividade do aço H11 é fortemente dependente da temperatura assumindo-se, por isso, valores de emissividade por cada patamar de temperatura, como apresentado na tabela B.6 [14].

Utilizando-se as dimensões expostas nas tabelas 3.3 e 3.2, simulou-se o aquecimento de cada peça e seus respectivos blocos, de forma a obter-se a curva de aquecimento dos mesmos. Após a realização das simulações, foi feita uma análise relativamente aos erros, calculando-se para cada instante os erros relativos e os erros absolutos entre a temperatura do centro da peça e a temperatura do centro do bloco padrão respectivo, aplicando-se as seguintes expressões:

$$Erro\ relativo = \frac{|T_{peça} - T_{bloco}|}{T_{peça}} \cdot 100 [\%] \quad (3.10)$$

$$Erro\ absoluto = |T_{peça} - T_{bloco}| [C^{\circ}] \quad (3.11)$$

Com o intuito de realizar uma análise relativa aos erros foram tidos em conta cinco erros:

1. Erro máximo relativo de temperatura entre o centro da peça e o centro do bloco padrão correspondente (equação (3.12));

$$Erro\ relativo\ máximo = \max \frac{|T_{peça} - T_{bloco}|}{T_{peça}} [\%] \quad (3.12)$$

2. Erro máximo absoluto de temperatura entre o centro da peça e o centro do bloco padrão correspondente (equação (3.13));

$$Erro\ absoluto\ máximo = \max |T_{peça} - T_{bloco}| [C^{\circ}] \quad (3.13)$$

3. Erro médio relativo de temperatura entre o centro da peça e o centro do bloco padrão correspondente (equação (3.14));

$$Erro\ relativo\ médio = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|T_{peça,i} - T_{bloco,i}|}{T_{peça,i}} [\%] \quad (3.14)$$

4. Erro relativo do tempo necessário para atingir 99% do valor final de temperatura de têmpera, entre a peça e o bloco (equação (3.15));

$$Erro\ relativo|_{T=0,99T_{final}} = 100 \cdot \frac{t_{bloco|T=0,99T_{final}} - t_{peça|T=0,99T_{final}}}{t_{estágio}} [\%] \quad (3.15)$$

5. Erro absoluto do tempo necessário para atingir 99% do valor final de temperatura de têmpera, entre a peça e o bloco (equação (3.16)).

$$Erro\ absoluto|_{T=0,99T_{final}} = t_{bloco|T=0,99T_{final}} - t_{peça|T=0,99T_{final}} [min] \quad (3.16)$$

Na medida em que os instantes de tempo de medição da temperatura da peça e dos blocos padrão não são os mesmos, utilizou-se o *software Matlab* para que o cálculo dos erros fosse possível. Deste modo, os dados das simulações foram interpolados com o intuito de obter as temperaturas da peça e dos blocos nos mesmos instantes de tempo e, com isto, calcular o erro entre as temperaturas do bloco padrão e da peça em estudo.

No anexo D, apresenta-se resumidamente o processo realizado no *software AbaqusTM* para a realização das simulações numéricas.

3.5.1 Resultados das simulações

As seguintes figuras de 3.5 a 3.9, apresentam na forma de gráfico a evolução da temperatura com o tempo do centro das 5 peças presentes na figura 3.4 e do centro dos seus respectivos blocos padrão cilíndricos e cúbicos. A representação da evolução térmica das peças apresentadas na figura 3.3 apresenta-se no anexo E.

3.5. Simulações de peças típicas em aço H11 e respectivos blocos padrão em aço AISI H11

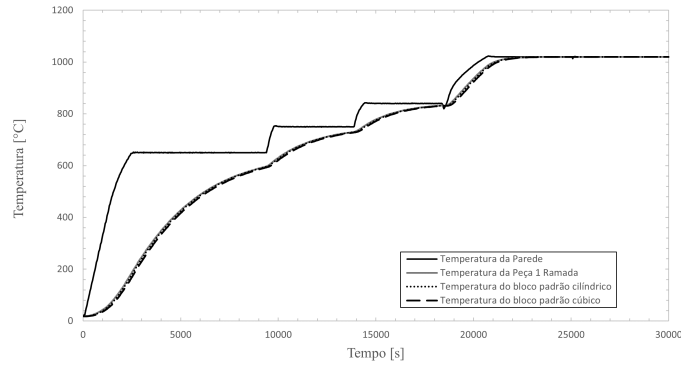


Figura 3.5: Resultados obtidos para as simulações da peça 1R e respectivos blocos padrão cúbicos e cilíndricos.

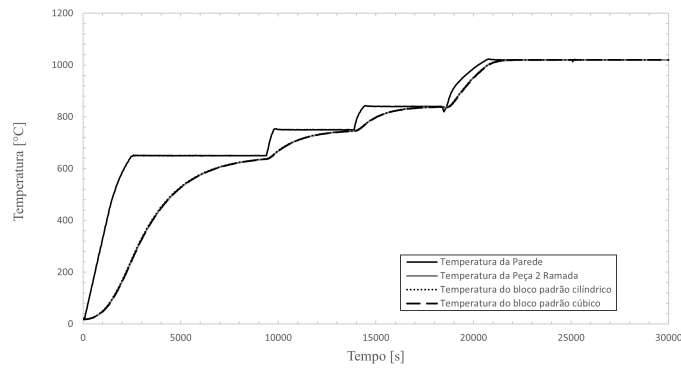


Figura 3.6: Resultados obtidos para as simulações da peça 2R e respectivos blocos padrão cúbicos e cilíndricos.

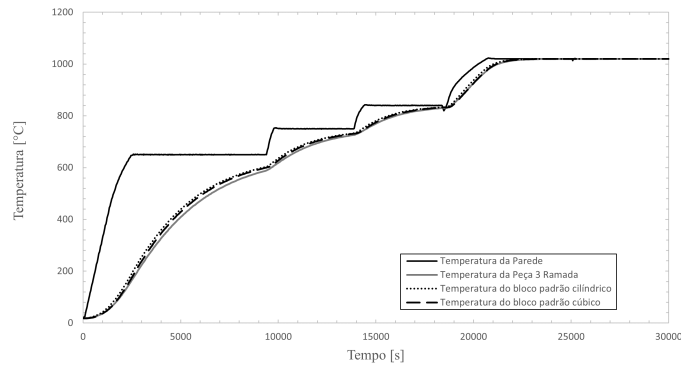


Figura 3.7: Resultados obtidos para as simulações da peça 3R e respectivos blocos padrão cúbicos e cilíndricos.

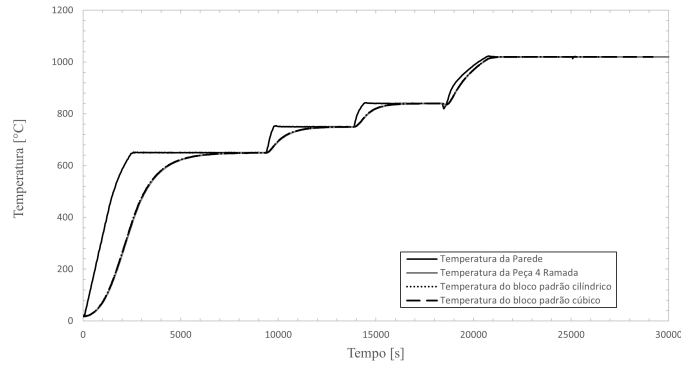


Figura 3.8: Resultados obtidos para as simulações da peça 4R e respectivos blocos padrão cúbicos e cilíndricos.

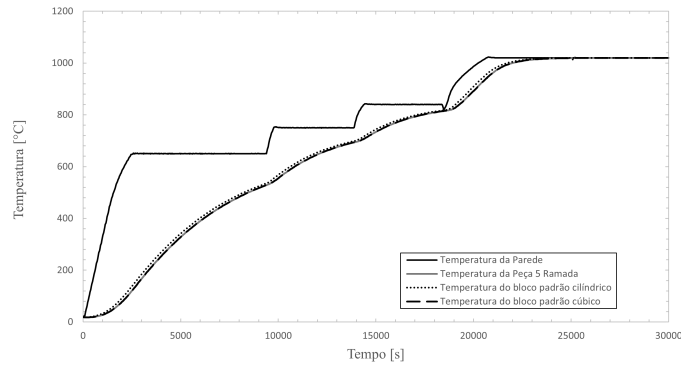


Figura 3.9: Resultados obtidos para as simulações da peça 5R e respectivos blocos padrão cúbicos e cilíndricos.

3.5.2 Análise dos resultados obtidos

Comparando as evoluções da temperatura do centro dos blocos padrão cúbicos e cilíndricos, às peças correspondentes apresentadas nas figuras anteriores 3.5 a 3.9 e nas figuras presentes no anexo E, E.1 a E.6, verifica-se que não há grandes diferenças. Assim, é possível concluir que ambas as geometrias cilíndrica e cúbica adotadas apresentam uma evolução térmica análoga à peça que representam.

Na tabela 3.4 apresentam-se os cinco erros previamente mencionados nas equações (3.12) a (3.16). Os últimos dois erros presentes nesta tabela são bastante importantes na medida em que o principal objetivo da utilização de blocos padrão é o conhecimento do instante em que estes atingem a temperatura final de têmpera, que deverá ser semelhante ao da peça; assim, o conhecimento dos valores destes dois erros, leva à avaliação do desempenho dos blocos padrão. Ainda que nesta tabela estejam presentes alguns valores altos de erro, é importante mencionar que durante a etapa final, à temperatura de têmpera, o erro tende para zero indicando que no final do tratamento térmico as peças e os seus respectivos blocos padrão

3.5. Simulações de peças típicas em aço H11 e respectivos blocos padrão em aço AISI H11

atingem a temperatura final de têmpera quase simultaneamente. A figura 3.10, apresentada a título de exemplo, demonstra o que foi previamente enunciado relativamente à peça 5R e ao seu bloco padrão cilíndrico.

Tabela 3.4: Erros entre a temperatura do centro da peça e dos bloco padrão

Nº da peça e geometria do bloco	Eq. (3.14) [%]	Eq. (3.12) [%]	Eq. (3.13) [°C]	Eq. (3.16) [min]	Eq. (3.15) [%]
1 - Cilindro	2,29	5,18	4,10	+0,89	+0,57
1 - Cubo	4,20	19,9	19,5	+5,63	+3,26
2 - Cilindro	1,27	11,2	14,2	+5,42	+3,49
2 - Cubo	2,58	18,3	23,0	+9,20	+5,91
3 - Cilindro	1,95	8,23	12,1	-6,62	-4,26
3 - Cubo	0,80	2,71	6,25	-3,03	-1,95
4 - Cilindro	1,06	4,96	7,20	-1,68	-1,08
4 - Cubo	7,78	42,6	58,5	+16,9	+10,9
5 - Cilindro	3,57	21,8	27,8	-4,35	-2,80
5 - Cubo	1,45	16,7	17,8	+4,12	+2,65
6 - Cilindro	2,99	22,2	23,2	+6,20	+4,00
6 - Cubo	4,21	29,2	31,9	+9,45	+6,08
1R - Cilindro	0,83	8,04	8,08	+1,00	+0,64
1R - Cubo	1,97	16,7	18,5	+3,15	+2,00
2R - Cilindro	0,32	2,75	5,14	-0,45	-0,03
2R - Cubo	0,17	3,22	3,44	+0,31	+0,20
3R - Cilindro	3,23	18,8	32,3	-4,90	-3,20
3R - Cubo	1,55	6,78	20,3	-2,00	-1,30
4R - Cilindro	0,36	4,41	7,96	-0,20	-0,10
4R - Cubo	0,27	3,42	6,16	-0,10	-0,05
5R - Cilindro	2,80	22,4	18,0	-4,80	-3,10
5R - Cubo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Através da tabela 3.4 constrói-se a seguinte tabela 3.5 onde se conclui que a média dos valores dos erros máximo absoluto, máximo relativo e médio relativo é menor para os blocos padrão cilíndricos que os cúbicos. Relativamente aos erros relativo e absoluto do tempo necessário para se atingir 99% da temperatura final ($0,99 \cdot T_{final}$), os dos blocos padrão cilíndricos apresentam a média mais reduzida; no entanto, os valores da média destes erros, para blocos padrão cilíndricos, são negativos enquanto que, estes valores são positivos para os blocos padrão cúbicos. Isto exprime que os blocos padrão cilíndricos, embora apresentem mais fielmente a evolução da temperatura da peça, atingem 99% da temperatura final de têmpera em média 0,862 minutos antes da peça, o que pode ser prejudicial.

Tabela 3.5: Quadro resumo dos erros entre a peça e os blocos padrão

	Eq. (3.14) [%]	Eq. (3.12) [%]	Eq. (3.13) [°C]	Eq. (3.16) [min]	Eq. (3.15) [%]
Cubos	2,27	14,5	18,7	+3,97	+2,51
Cilindros	1,88	11,8	14,6	-0,862	-0,534

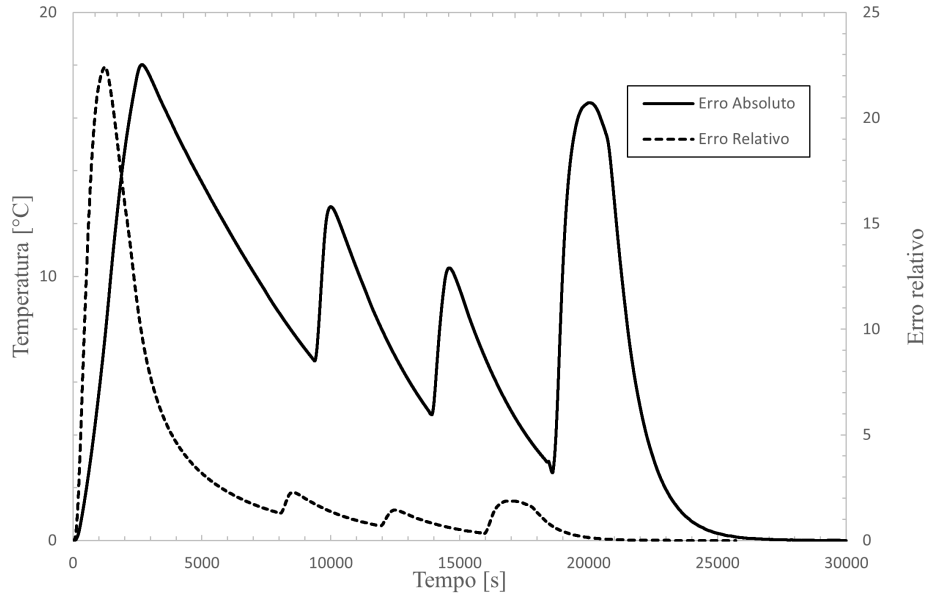


Figura 3.10: Erro absoluto e relativo entre a temperatura da peça 5R e o seu bloco padrão cilíndrico, onde ambos os erros tendem para valores nulos no final do tratamento térmico.

É importante mencionar também que a adoção de blocos padrão cúbicos implica a utilização de mais material do que se fosse adotado um bloco padrão cilíndrico, tal como apresentado na equação (3.17). Um maior volume implica não só desperdício de material, mas também uma maior necessidade de maquinagem da peça e um maior dispêndio de energia no aquecimento do bloco padrão. Por esta razão, é possível concluir que os blocos padrão cilíndricos são menos dispendiosos na medida em que utilizam menos material e necessitam de uma menor quantidade de energia para ser aquecidos.

$$\frac{a_{cubo}^3}{\pi \cdot \frac{\phi_{cilindro}^2}{4} \cdot h_{cilindro}} = \frac{4 \cdot \phi_{cilindro}^3}{\pi \cdot \phi_{cilindro}^3} = 1,273 \quad (3.17)$$

Ainda adotando a abordagem relativa à poupança de material e energia, se fosse possível, a geometria mais rentável para a construção de blocos padrão seria a esférica uma vez que é a que utiliza menos volume, cerca de metade do volume utilizado por um bloco padrão

3.5. Simulações de peças típicas em aço H11 e respectivos blocos padrão em aço AISI H11

cúbico, como é possível concluir pela expressão (3.18).

$$\frac{a_{cubo}^3}{\pi \cdot \frac{\phi_{esfera}^3}{8 \cdot 3} \cdot 4} = \frac{6 \cdot \phi_{esfera}^3}{\pi \cdot \phi_{esfera}^3} = 1,91 \quad (3.18)$$

Em síntese, através da análise do conteúdo deste capítulo conclui-se que a equação (1.5) idealizada por Francisco Machado [10], teve um bom desempenho para o caso analisado, apresentando desvios temporais e de temperatura entre as peças e seus blocos correspondentes aceitáveis. De acrescentar que, embora ainda não tenha sido analisada por parte das empresas parceiras, a geometria esférica pode revelar-se benéfica para a construção de blocos padrão. As superfícies esféricas apresentam uma maior dificuldade a nível de maquinagem mas, com a aparecimento da maquinagem através de *CNC* (Controle Numérico Computorizado), este problema pode ser facilmente resolvido.

Simulações de peças típicas em aço AISI H11 e respectivos blocos padrão em aço AISI 304

Utilizando as simulações de peças típicas em aço H11 realizadas no capítulo prévio, no presente capítulo procede-se à simulação da fase de aquecimento dos seus respectivos blocos padrão, através do *software AbaqusTM*. A principal diferença, entre o presente capítulo e o anterior, reside no material escolhido para os blocos padrão, que no capítulo anterior foi igual ao da peça em estudo e, no presente capítulo, é o aço AISI 304, cujas características se encontram no anexo C.

Resumidamente, o objetivo deste capítulo baseia-se em testar a equação genérica (1.5) proposta por Francisco Machado [10], no seu trabalho de dissertação, através do *software*, para cada uma das peças a estudar, reais ou fictícias.

Relativamente às condições reais do interior do forno durante a fase de aquecimento, assume-se que são as mesmas apresentadas no capítulo 3, nas secções 3.1, 3.2 e 3.3.

4.1 Escolha do material para os blocos padrão

Como já foi mencionado anteriormente, o bloco padrão tem como principal objetivo a representação da peça crítica de uma carga. Com o intuito de ter menores dimensões que a peça que representa, deve ser construído por um material com baixa condutibilidade térmica. Deste modo, o material escolhido para a constituição dos blocos padrão é o aço inoxidável AISI 304, cujas características se apresentam no anexo C. As equações apresentadas no referido anexo, (C.1), (C.2) e (C.3) são válidas entre os 20°C e 1360°C. Como referido previamente, o *software AbaqusTM* não aceita equações para a variação das propriedades do material com a temperatura, pelo que foi realizada a seguinte tabela 4.1, onde se encontram os valores das propriedades necessárias para cada temperatura que foram inseridos no programa.

Tabela 4.1: Variação das propriedades térmicas do material com a temperatura

Temperatura [°C]	Condutividade térmica [W/mK]	Calor específico [J/KgK]	Massa volúmica [Kg m ⁻³]
20,00	14,8	502	8023
50,00	15,2	508	8007
100,0	16,0	517	7982
150,0	16,7	527	7957
200,0	17,5	537	7932
250,0	18,2	547	7907
300,0	18,9	557	7882
350,0	19,7	567	7857
400,0	20,4	577	7832
450,0	21,1	587	7807
500,0	21,8	597	7782
550,0	22,5	607	7757
600,0	23,2	617	7732
650,0	23,9	627	7707
700,0	24,7	637	7682
750,0	25,4	647	7657
800,0	26,1	657	7632
850,0	26,7	667	7607
900,0	27,4	676	7582
950,0	28,1	686	7557
1000	28,8	696	7532
1050	29,5	706	7506
1100	30,2	716	7481

Na medida em que são consideradas as trocas de calor por convecção e radiação, é necessário ter em conta o estado do aço para conhecer a sua emissividade, que aumenta com o desgaste das peças. A variação da emissividade do aço AISI 304 com a temperatura tendo em conta o seu nível de desgaste foi alvo de estudo na dissertação de Francisco Machado [10] e encontra-se representada na tabela C.3 por intervalos de temperatura para o aço AISI 304 com acabamento superficial baço. São utilizados estes valores de emissividade por o acabamento baço ser o aspeto mais usual dos blocos padrão, cujas superfícies com o passar do tempo, se vão tornando mais baças, na medida em que são submetidas a sucessivos tratamentos térmicos de têmpera.

4.2 Método de dimensionamento dos blocos padrão

Com o intuito de determinar as dimensões dos blocos padrão utilizou-se a correlação geométrica (1.5) apresentada anteriormente. A tabela 4.2 apresenta os valores de emissividade, ε , e difusividade térmica, α , dos dois materiais, utilizados na equação (1.5). Estas propriedades são retiradas a uma temperatura média de 450°C, para qual a equação está concebida.

Tabela 4.2: Variação das propriedades térmicas do material com a temperatura

	α	ε
Aço AISI H11 - Peça	0,17	4,68
Aço AISI 304 - Bloco	0,23	7,38

Substituindo os valores apresentados na tabela 4.2 na equação (1.5), esta pode simplificar-se na seguinte forma:

$$L_{c,bloco} = 0,9092 \cdot L_{c,peça} \quad (4.1)$$

À semelhança do capítulo 3.4, de dimensionamento de blocos padrão em aço AISI H11, a equação utilizada para a determinação da aresta do bloco padrão cúbico em aço AISI 304 é a (3.5).

Relativamente à determinação do diâmetro e altura para os blocos padrão cilíndricos, o processo é relativamente diferente em virtude da imposição da escolha de diâmetros de acordo com os varões em aço AISI 304 à disposição na empresa. Assim sendo, os diâmetros dos blocos devem ser iguais aos diâmetros dos varões disponíveis e o mais próximo possível dos valores calculados. Posto isto, o processo de dimensionamento de blocos padrão cilíndricos em aço AISI 304 é o seguinte:

1. Utilização da expressão (3.9) para determinação do diâmetro do bloco padrão;
2. Escolha do valor de diâmetro tabelado inferior mais próximo do calculado anteriormente;
3. Utilização da seguinte expressão (4.2), deduzida através da equação (3.8), para o calculo da altura correspondente ao valor do comprimento característico previamente calculado.

$$h_{cilindro} = \frac{2L_{c,bloco}\phi_{cilindro}}{\phi_{cilindro} - 4L_{c,bloco}} \quad (4.2)$$

4.3 Simulação de blocos padrão em aço AISI 304

As peças a simular são as mesmas do capítulo anterior representadas nas figuras 3.3 e 3.4, cujas dimensões se apresentam na tabela 3.2.

Através da metodologia anteriormente apresentada, definiram-se as dimensões dos blocos padrão cúbicos e cilíndricos correspondentes a cada peça. A tabela apresentada de seguida resume as dimensões dos blocos padrão das duas geometrias a simular, para cada uma das peças.

Tabela 4.3: Quadro resumo das dimensões dos blocos padrão a utilizar

Nº Peça	$L_{c,bloco}$ [mm]	a_{cubo} [mm]	$\phi_{cilindro}$ [mm]	$h_{cilindro}$ [mm]
1	52,40	314,4	260	540,6
2	37,80	226,8	230	220,6
3	37,40	224,4	225	223,2
4	48,80	292,8	350	220,7
5	31,20	187,2	200	166,0
6	33,20	199,2	200	197,6
1R	21,89	131,3	140	116,9
2R	14,22	85,32	90,0	77,10
3R	20,90	125,4	130	117,1
4R	7,789	46,74	50,0	41,35
5R	30,30	181,8	180	185,8

Seguidamente à realização das simulações, procede-se a uma análise de erros, calculando-se, para cada instante, os erros relativos e absolutos, aplicando as equações previamente apresentadas (3.10) e (3.11). Novamente, devido aos diferentes instantes de tempo das simulações, recorre-se ao *software Matlab* para a realização de interpolações que coloquem as simulações em instantes de tempo semelhantes, com o intuito de calcular os erros entre as temperaturas do centro da peça e do bloco. Posteriormente, são calculados os 5 erros previamente explicitados nas equações (3.12) a (3.16).

No anexo D, apresenta-se o processo realizado no *software AbaqusTM* para a realização das simulações das peças e dos blocos.

4.3.1 Resultados das simulações

Na presente secção apresentam-se os resultados obtidos pelas simulações efetuadas; as seguintes figuras 4.1 a 4.5 expõe os resultados obtidos, para a evolução da temperatura no centro das cinco peças presentes na figura 3.4 e respetivos blocos padrão, sob a forma de

gráfico. Os resultados obtidos para as restantes peças da figura 3.3 estão apresentadas no anexo E.

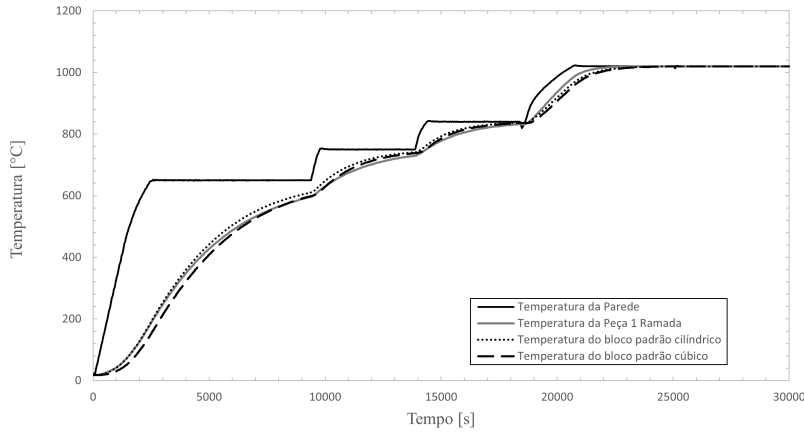


Figura 4.1: Resultados obtidos para as simulações da peça 1R em aço AISI H11 e respectivos blocos padrão aço AISI 304.

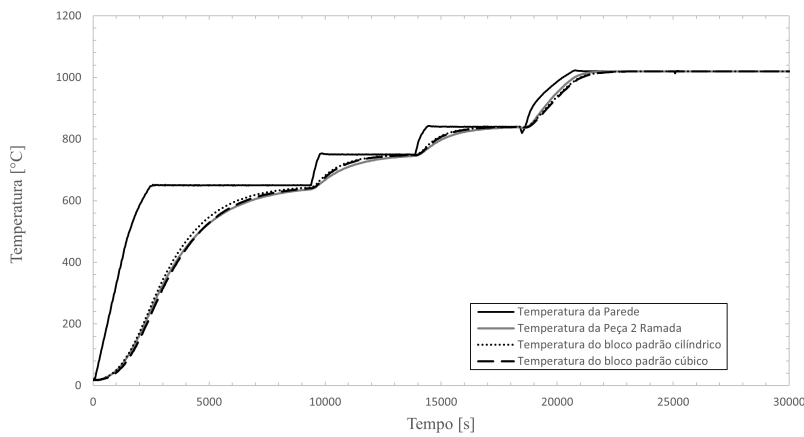


Figura 4.2: Resultados obtidos para as simulações da peça 2R em aço AISI H11 e respectivos blocos padrão aço AISI 304.

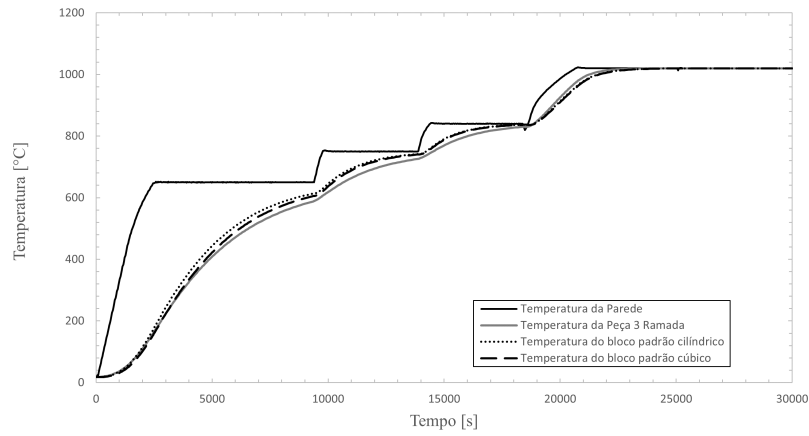


Figura 4.3: Resultados obtidos para as simulações da peça 3R em aço AISI H11 e respectivos blocos padrão aço AISI 304.

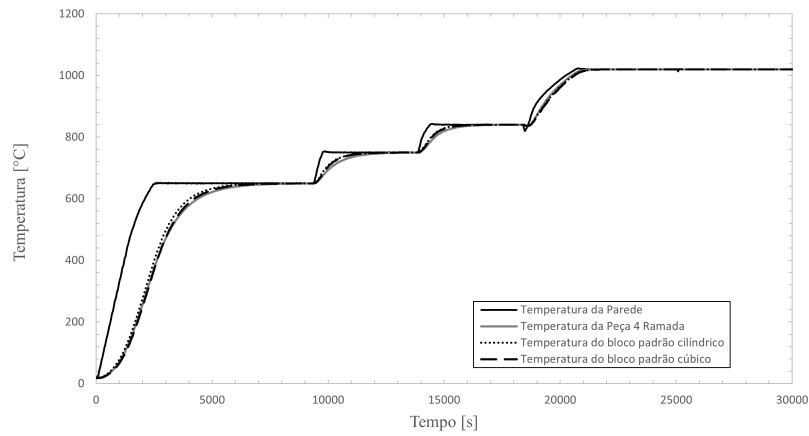


Figura 4.4: Resultados obtidos para as simulações da peça 4R em aço AISI H11 e respectivos blocos padrão aço AISI 304.

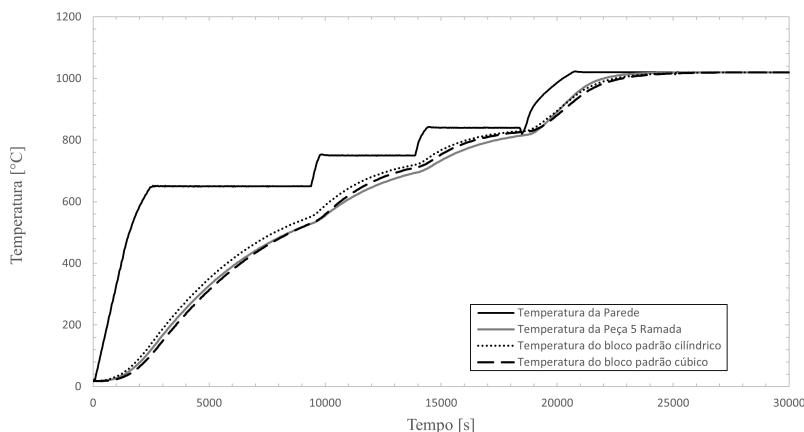


Figura 4.5: Resultados obtidos para as simulações da peça 5R em aço AISI H11 e respectivos blocos padrão aço AISI 304.

4.3.2 Análise de resultados obtidos através das simulações

Analizando com detalhe as figuras 4.1 a 4.5, e as figuras presentes no anexo E, E.7 a E.12, é possível observar que o aquecimento dos blocos padrão é, em grande parte do tempo, mais rápido que os das peças respectivas. Contudo, este comportamento inverte-se no último estágio à temperatura de têmpera, passando o bloco padrão a ter um aquecimento mais lento que a peça. Isto ocorre na medida em que, no último patamar de temperatura, a atmosfera de azoto é retirada do forno pelo que a transferência de calor se dá exclusivamente por radiação e sendo a emissividade do aço AISI 304 menor que a emissividade do aço AISI H11 da peça, (como pode ser observável nas tabelas B.6 e C.3) o aquecimento é mais lento nos blocos. Este comportamento revela-se positivo, em termos de segurança, na medida em que a peça atinge sempre primeiro a temperatura de têmpera.

Na tabela 4.4 apresentam-se os cinco erros previamente mencionados nas equações (3.12) a (3.16). Embora na tabela 4.4 estejam presentes alguns valores elevados de erro, é importante mencionar que durante a etapa final, à temperatura de têmpera, o erro tende para zero indicando, assim, que no final do tratamento térmico, as peças e os seus respectivos blocos padrão atingem a temperatura final de têmpera quase simultaneamente.

Através da tabela 4.4 constrói-se a seguinte tabela 4.5 onde se conclui que a média dos valores dos erros máximo absoluto, máximo relativo e médio relativo, é menor para os blocos padrão cúbicos que os cilíndricos. Relativamente aos erros relativo e absoluto do tempo necessário para se atingir 99% da temperatura final ($0,99 \cdot T_{final}$), os dos blocos padrão cilíndricos apresentam a média mais reduzida; isto exprime que os blocos padrão cúbicos, embora apresentem mais fielmente a evolução da temperatura da peça ao longo de grande parte do tratamento térmico, atingem 99% da temperatura final de têmpera depois dos blocos padrão cilíndricos que por sua vez atingem sempre esta temperatura depois das peças

homólogas. Ao contrário do que acontece com os blocos padrão em aço AISI H11 (tabela 3.5), os em aço AISI 304 atingem sempre 99% da temperatura final de têmpera depois da peça, mesmo com dimensões mais reduzidas. Assim, é possível concluir que a construção de blocos padrão em aço AISI 304 pode ser mais vantajosa na medida em que os blocos apresentam dimensões mais reduzidas e há a garantia que atingem a temperatura final de têmpera antes da peça.

Tabela 4.4: Erros entre a temperatura do centro da peça e dos bloco padrão

Nº da peça e geometria do bloco	Eq. (3.14) [%]	Eq. (3.12) [%]	Eq. (3.13) [°C]	Eq. (3.16) [min]	Eq. (3.15) [%]
1 - Cilindro	11,0	67,4	60,2	+22,2	+14,3
1 - Cubo	7,47	40,2	41,0	+43,4	+27,9
2 - Cilindro	3,40	8,90	34,3	+22,9	+14,7
2 - Cubo	5,17	34,7	38,7	+31,0	+20,0
3 - Cilindro	6,16	25,1	47,8	+11,0	+7,09
3 - Cubo	3,39	21,2	29,0	+18,05	+12,0
4 - Cilindro	7,44	47,6	55,7	+40,0	+25,8
4 - Cubo	10,4	55,5	67,0	+46,0	+29,7
5 - Cilindro	2,97	14,7	29,0	+18,0	+11,2
5 - Cubo	3,88	30,9	34,1	+22,0	+14,2
6 - Cilindro	3,77	29,9	39,8	+25,1	+16,2
6 - Cubo	5,96	42,2	47,4	+28,6	+18,4
1R - Cilindro	1,57	3,41	20,7	+11,7	+7,60
1R - Cubo	3,32	29,1	35,4	+15,2	+9,77
2R - Cilindro	1,44	5,10	20,5	+6,00	+3,86
2R - Cubo	1,45	12,9	17,1	+7,12	+4,50
3R - Cilindro	3,02	9,27	36,4	+8,18	+5,92
3R - Cubo	2,32	14,0	25,0	+9,25	+5,95
4R - Cilindro	1,29	10,3	25,9	+1,65	+1,06
4R - Cubo	0,66	5,95	11,6	+2,20	+1,41
5R - Cilindro	4,31	20,7	35,4	+12,2	+7,85
5R - Cubo	2,79	17,8	20,13	+17,3	+11,1

Tabela 4.5: Quadro resumo dos erros entre a peça e os blocos padrão

	Eq. (3.14) [%]	Eq. (3.12) [%]	Eq. (3.13) [°C]	Eq. (3.16) [min]	Eq. (3.15) [%]
Cilindros	4,25	22,03	36,9	+16,3	+10,5
Cubos	4,23	27,7	33,3	+21,8	+14,7

Resumidamente, conclui-se que:

- A equação formulada por Francisco Machado (1.5), [10] comporta-se bem na situação presente de peça construída em aço AISI H11 e respetivo bloco padrão em aço AISI 304;
- Os blocos padrão em aço inoxidável traduzem de forma mais satisfatória o comportamento do aquecimento no último estágio de têmpera em peças mais massivas do que em peças mais pequenas. Todavia, neste último estágio os blocos em aço AISI 304 reproduzem pior o comportamento da peça real do que os blocos produzidos com o mesmo material da peça homóloga;
- Como é visível nas figuras 4.1 a 4.5, e nas figuras presentes no anexo E, E.7 a E.12, o bloco padrão em aço inoxidável AISI 304 demora, sistematicamente, mais tempo a atingir a temperatura do último patamar de têmpera, T_{final} , do que a peça a tratar. Isto poderá indicar que a diferença de emissividades dos dois aços, AISI H11 e AISI 304 esteja a ter um papel importante nesta diferença, tornando os resultados obtidos menos fiáveis. A utilização de um bloco padrão de geometria esférica no mesmo aço da peça a tratar parece ser, por isso, a solução mais promissora na medida em que conjuga uma maior fiabilidade de resultados com uma menor massa (menor volume).

Uma vez que os blocos padrão em aço inoxidável conferem uma maior margem de segurança, pois apontam para um ligeiro maior tempo de estágio final, no capítulo seguinte será com blocos deste material que se analisa uma metodologia expedita de seleção de blocos padrão.

Metodologia proposta para a seleção de blocos padrão

Na medida em que a equação para a seleção dos comprimentos característicos dos blocos padrão (1.5) foi validada através dos dados obtidos por simulações numéricas nos capítulos 3 e 4, no presente capítulo procede-se à criação de uma metodologia simples e eficaz para a seleção de blocos padrão, tendo em conta uma certa carga que é submetida a tratamentos térmicos de têmpera.

Deste modo, inicialmente, cria-se um conjunto de blocos padrão, em aço AISI 304, caracterizados pelo seu comprimento característico. Este conjunto é realizado tendo em conta os resultados numéricos obtidos através de simulações no *software Abaqus*. Assim, o método de escolha dos comprimentos característicos dos blocos para este conjunto, baseia-se no aumento de tempo em 30 minutos, relativamente ao bloco anterior, para o centro do bloco padrão atingir a temperatura final de têmpera, T_{final} .

Após ser criado o conjunto de blocos padrão caracterizados pelo seu comprimento característico, apresenta-se uma proposta para uma metodologia de escolha dos mesmos. De modo sumário, a metodologia fundamenta-se nos seguintes passos: Em primeiro lugar, calcula-se o comprimento característico da peça mais massiva relativa a uma carga; de seguida, através da expressão (1.5) calcula-se o comprimento característico do bloco padrão correspondente à peça crítica; finalmente, escolhe-se o comprimento característico do bloco imediatamente superior, ao previamente calculado, presente no conjunto de blocos que foi feito inicialmente.

No final do presente capítulo, apresenta-se um teste da metodologia proposta para uma peça em aço AISI H11 com bloco correspondente em aço AISI 304, acompanhada por uma análise relativa aos erros entre as temperaturas do centro do bloco padrão e do centro da peça.

5.1 Criação de um conjunto de blocos padrão tendo em conta o seu comprimento característico

O primeiro passo para o desenvolvimento de uma metodologia para a seleção de blocos padrão passa pela criação de um conjunto de blocos padrão em aço AISI 304, caracterizados

pelo seu comprimento característico $L_{c,bloco}$. A criação de um conjunto único de blocos padrão é vantajosa na medida em que os blocos são construídos apenas uma vez e são mantidos no chão de fábrica da empresa parceira durante um longo período de tempo até se tornarem improfícuos, tendo em conta o seu objetivo. Desta forma, evita-se a constante criação de blocos padrão de uso exclusivo para uma certa peça crítica, tornando à partida a seleção do bloco padrão, e consequentemente o processo de aquecimento, mais precisos, já que o bloco padrão será o que melhor se adapta em cada momento à carga a tratar. Todavia, os resultados do erro entre o tempo necessário para o centro da peça e o centro do bloco padrão atingirem 99% da temperatura final de têmpera, será inevitavelmente, mais elevado, na medida em que o bloco padrão escolhido para a caracterização da evolução da temperatura da peça com o tempo tem sempre um comprimento característico maior que o da peça, no entanto isto não é prejudicial na medida em que se garante sempre que o bloco padrão atinge a temperatura final de têmpera após a peça.

A seleção do domínio de comprimentos característicos deste conjunto baseia-se nos comprimentos característicos dos blocos padrão correspondentes às peças fornecidas pela empresa parceira MetalSolvus, apresentadas na tabela 4.3 (peças 1R a 5R). Desta forma, o conjunto de blocos padrão selecionados apresenta comprimentos característicos entre o $1mm$ e os $40mm$, que são valores um pouco inferior e superior, respetivamente, aos valores mínimos e máximos presentes nesta tabela.

A seleção dos comprimentos característicos dos blocos padrão presentes ao conjunto, fundamenta-se nos seguintes passos:

1. Simulação numérica, através do *software Abaqus*, do primeiro bloco padrão de comprimento característico igual a $1mm$;
2. Registo do instante de tempo em que o centro do bloco atinge a temperatura final de têmpera, $T_{final} = 1020^{\circ}C$;
3. Através de um processo iterativo, encontrar o comprimento característico de um bloco que atinja a temperatura final de têmpera aproximadamente 30 minutos após o bloco anterior;
4. Repetir o processo até se atingir um $L_{c,bloco}$ de aproximadamente $40mm$.

5.1.1 Conjunto de blocos padrão de geometria cilíndrica

Para a criação de blocos padrão de geometria cilíndrica é importante ter em conta que a escolha dos diâmetros é limitada pelos diâmetros dos varões em aço AISI 304 à disposição da empresa. Deste modo, utilizando a equação (3.6), é criado o conjunto de blocos padrão cilíndricos, definidos pelo seu comprimento característico, $L_{c,bloco}$. Na tabela 5.1 apresentam-se as dimensões dos blocos padrão cilíndricos que devem ser criados para o funcionamento

*5.1. Criação de um conjunto de blocos padrão tendo em conta o seu comprimento
característico*

desta metodologia e o tempo necessário para que os mesmos atinjam a temperatura final de têmpera, que em teoria deve ser sempre 30 minutos mais tarde do tempo que o bloco anterior levou para atingir esta temperatura.

Tabela 5.1: Quadro resumo das dimensões a adotar para o conjunto de blocos padrão cilíndricos

Nº do bloco padrão	$L_{c,bloco}$ [mm]	ϕ [mm]	$h_{cilindro}$ [mm]	Tempo para $T = T_{final}$
1	1,00	6,00	6,00	5h 51m
2	5,00	30,0	30,0	6h 13m
3	10,0	60,0	60,0	6h 42m
4	14,2	85,0	85,0	7h 11m
5	18,3	110	110	7h 39m
6	22,2	130	140	8h 9min
7	25,5	150	160	8h 35m
8	29,7	180	175	9h 4m
9	33,3	200	200	9h 34m
10	36,7	220	220	10h 2m
11	39,4	230	250	10h 28m

A figura 5.1 revela, em forma de gráfico, a evolução da temperatura do centro dos onze blocos padrão apresentados na tabela 5.1, com o tempo.

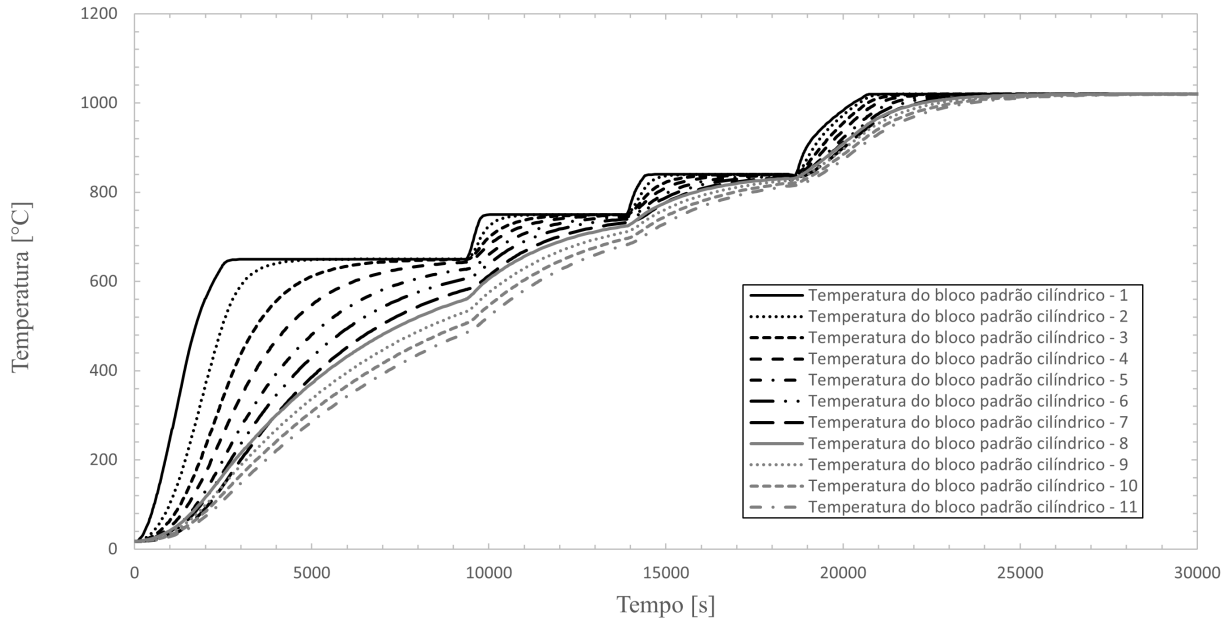


Figura 5.1: Evolução temporal da temperatura do centro dos onze blocos padrão cilíndricos do conjunto.

5.1.2 Conjunto de blocos padrão de geometria cúbica

Para a criação de blocos padrão de geometria cúbica, utilizou-se a equação (3.3), criando-se um conjunto de blocos padrão cúbicos, definidos pelo seu comprimento característico, $L_{c,bloco}$. Na tabela 5.2 apresentam-se as dimensões dos blocos padrão cúbicos do conjunto e o tempo necessário para que os mesmos atinjam a temperatura final de têmpera, que em teoria deve ser sempre 30 minutos mais tarde do tempo que o bloco anterior levou para atingir esta temperatura.

Tabela 5.2: Quadro resumo das dimensões a adotar para o conjunto de blocos padrão cúbicos

Nº do bloco padrão	$L_{c,bloco}$ [mm]	a_{cubo} [mm]	Tempo para $T = T_{final}$
1	1,00	6,00	5h 49m
2	5,00	30,0	6h 14m
3	10,0	60,0	6h 44m
4	14,2	85,0	7h 13m
5	18,3	110	7h 44m
6	22,2	133	8h 13m
7	25,5	153	8h 40m
8	29,7	176	9h 11m
9	33,3	200	9h 46m
10	36,7	220	10h 18m
11	39,4	236	10h 41m

A figura 5.2 revela, em forma de gráfico, a evolução da temperatura do centro dos onze blocos padrão apresentados na tabela 5.2, com o tempo.

Como apresentado anteriormente, a adoção de blocos padrão de geometria cúbica implica um uso de mais 21,4% de volume do que se fosse adotado um bloco padrão cilíndrico, (equação (3.17)) o que leva não só a um maior desperdício de material, mas também a uma maior necessidade de maquinagem. Os resultados apresentados nas duas tabelas anteriores, 5.1 e 5.2, corroboram o que foi enunciado anteriormente: os blocos padrão cúbicos demoram mais tempo do que os cilíndricos a atingir a temperatura do último estágio de têmpera, o que se pode revelar negativo em termos de dispêndio de energia.

Em suma, para adoção da presente metodologia, a empresa parceira deve escolher uma das geometrias e desenvolver os onze blocos padrão indicados, realizando um furo em cada um dos blocos para que a temperatura dos seus núcleos seja convenientemente monitorizada através da utilização de termopares.

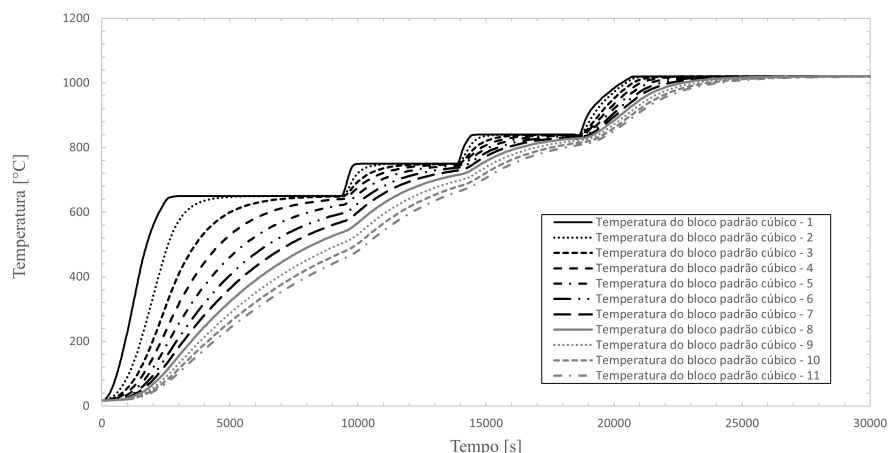


Figura 5.2: Evolução temporal da temperatura do centro dos onze blocos padrão cúbicos do conjunto.

5.2 Metodologia para a seleção de blocos padrão presentes no conjunto previamente definido

Após serem desenvolvidos os onze blocos padrão de comprimento característico bem definido, segue-se a descrição detalhada da metodologia proposta para a sua seleção. O seguinte diagrama apresentado na figura 5.3 resume o processo para a seleção de blocos proposto:

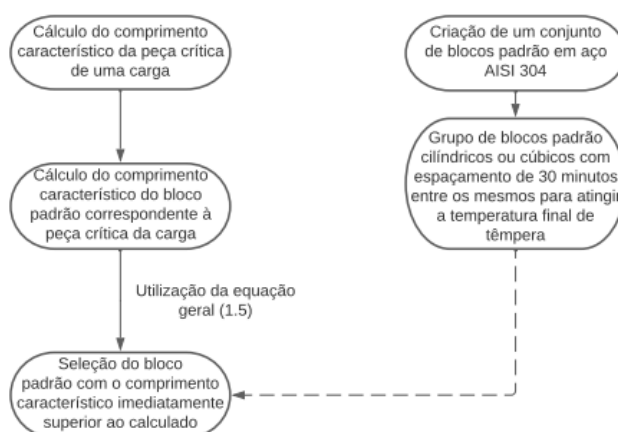


Figura 5.3: Metodologia de seleção de blocos padrão proposta.

Deste modo, o processo de seleção fundamenta-se nas seguintes etapas:

1. Materialização dos onze blocos padrão de geometria cilíndrica ou cúbica;

5.2. Metodologia para a seleção de blocos padrão presentes no conjunto previamente definido

2. Avaliação da carga que irá ser submetida ao tratamento térmico com o intuito de reconhecer qual a peça crítica do conjunto de peças;
3. Cálculo do comprimento característico da peça mais massiva/crítica da carga;
4. Utilização da equação (1.5) para o cálculo do comprimento característico teórico do bloco padrão correspondente à peça crítica da carga;
5. Adoção do bloco padrão do conjunto com o comprimento característico imediatamente superior ao dado pela equação (1.5);
6. Submeter a carga e o bloco padrão ao tratamento térmico de têmpera;
7. Avaliação da evolução térmica do bloco padrão, análoga à peça crítica. Quando o bloco atingir a temperatura do último estágio de têmpera a temperatura constante, T_{final} , a peça crítica, necessariamente, também já a atingiu; Por conseguinte, as restantes peças da carga também já atingiram essa temperatura, dando-se por completo o processo de aquecimento do tratamento térmico de têmpera.

5.2.1 Teste da metodologia proposta para uma peça hipotética em aço AISI H11

Passa-se, agora, ao teste da metodologia proposta para a peça 3R em aço AISI H11, apresentada previamente na imagem 3.4. Assume-se que esta peça seria a peça crítica de uma certa carga, a ser submetida a um tratamento térmico de têmpera. O comprimento característico da peça 3R é de 22,99mm (tabela 3.2). Utilizando a equação (1.5), calcula-se o comprimento característico do bloco padrão correspondente obtendo-se um valor de 20,90mm. Após isto, utilizando a tabela 5.1, para blocos padrão cilíndricos, ou a tabela 5.3, para blocos padrão cúbicos, escolhe-se o bloco padrão com comprimento característico de 22,2mm. A figura 5.4 apresenta a evolução térmica da peça e dos dois blocos padrão, enquanto que na tabela 5.3 se resumem os 5 erros expostos anteriormente.

Tabela 5.3: Quadro resumo dos erros entre a peça e os blocos padrão

	Eq. (3.14) [%]	Eq. (3.12) [%]	Eq. (3.13) [°C]	Eq. (3.16) [min]	Eq. (3.15) [%]
Cubo	2,25	18,1	21,8	+12,1	+7,8
Cilindro	2,22	5,6	25,8	+10,3	+6,63

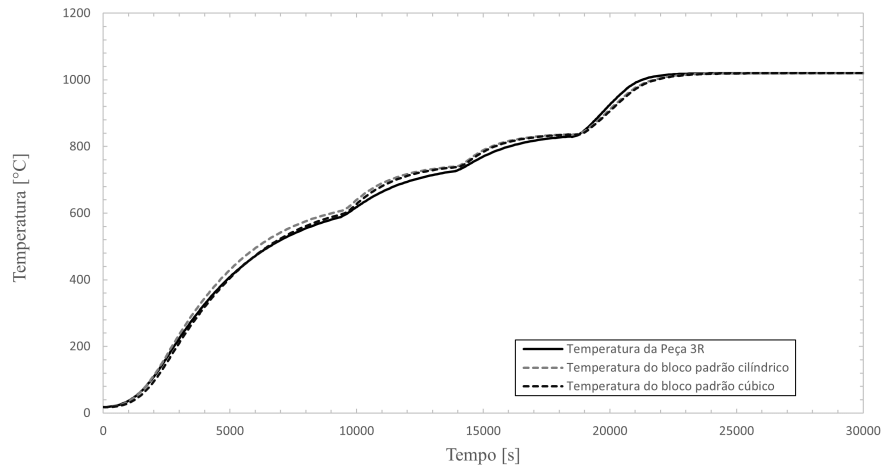


Figura 5.4: Evolução temporal da temperatura do centro da peça 3R e respectivos blocos padrão.

Concluindo, a metodologia proposta parece ser fiável, quer para a adoção de blocos padrão cúbicos, quer para a adoção de blocos padrão cilíndricos, na medida em que leva a erros de temperatura e de tempo aceitáveis entre o bloco padrão e a peça. Todavia, para conferir mais confiança à metodologia proposta, dever-se-á no futuro realizar mais testes com outras peças.

Efeito da localização do bloco padrão no seu aquecimento - Ensaios experimentais

Na medida em que no capítulo prévio foi exposta uma metodologia para a seleção de blocos padrão, tendo conta uma carga que é sujeita a tratamentos térmicos de têmpera, é de elevada relevância compreender qual é a influência do local onde o bloco padrão é colocado no forno na evolução da temperatura do seu núcleo com o tempo, na fase de aquecimento do tratamento térmico de têmpera. Com este objetivo, foram realizados ensaios experimentais, para que os resultados necessários fossem extraídos e analisados com detalhe.

6.1 Ensaios experimentais

6.1.1 Primeiro ensaio experimental

A experiência realizada consistiu na inserção de dois blocos um cúbico e um cilíndrico, materializados na mesma liga de aço, juntamente com a carga a ser tratada termicamente, no interior do forno. O cubo de maior dimensão foi colocado na periferia da carga enquanto o cilindro de pequenas dimensões foi colocado na zona central da carga, sendo envolvido por outras peças. Na figura 6.1 apresenta-se um esquema da posição dos dois blocos na carga, sendo que o bloco cúbico de elevadas dimensões é representado pelo número 1 e o bloco cilíndrico de menores dimensões é representado pelo número 2. É importante mencionar que os centros dos blocos se encontram equipados com termopares para que a evolução da temperatura com o tempo possa ser registada.

Na medida em que as condições relativas à transferência de calor por convecção são, fundamentalmente, semelhantes em todas as peças da carga, as potenciais diferenças espaciais relativas ao processo de aquecimento das peças, devem-se a um comportamento distinto relativamente ao fenómeno de transferência de calor por radiação. É de fácil compreensão que peças que se encontrem na zona central da carga sejam abrigadas do calor fornecido através de radiação pelas paredes do forno. Desta forma, as peças localizadas no centro da carga exibem um aquecimento mais demorado que as restantes peças.

O primeiro ensaio experimental foi realizado numa carga com um valor de massa total igual a 200kg mais o peso da estrutura mais o peso do bloco. A posição dos dois blocos

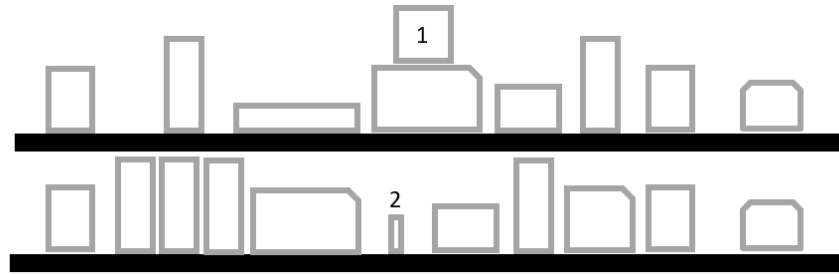


Figura 6.1: Esquema representativo da posição dos blocos para o ensaio experimental.

apresenta-se nas seguintes figuras. Na figura 6.2 é visível a posição do cubo, de maiores dimensões, na periferia da carga. Já a figura 6.3 revela a posição do cilindro de baixas dimensões no interior dos favos; observando a figura é possível visualizar um grande conjunto de peças que rodeiam o cilindro de dimensão reduzida, sendo, por isso, abrigado da radiação direta da parede por estas peças.

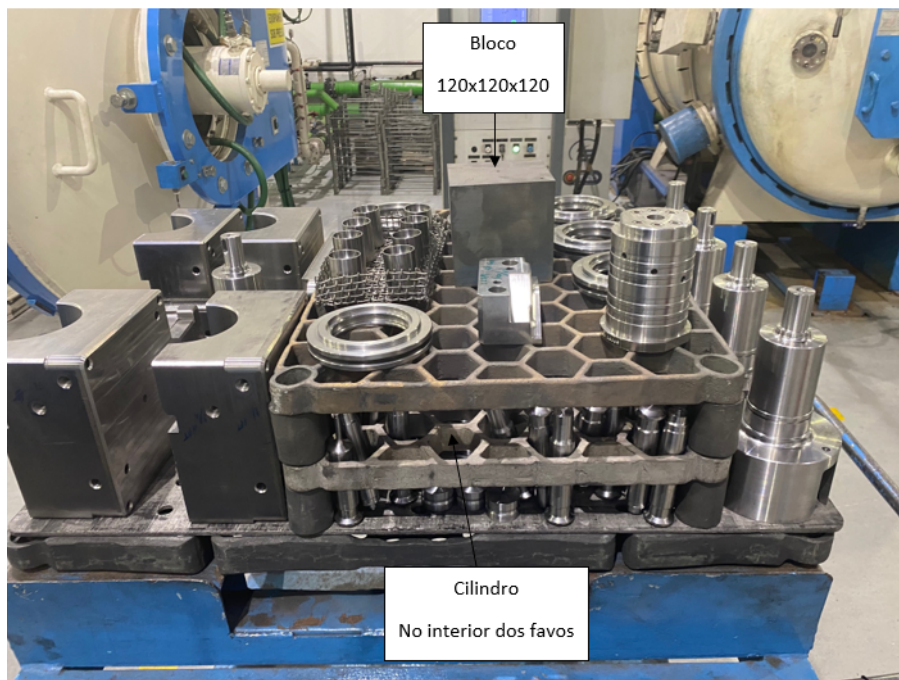


Figura 6.2: Posição do bloco cúbico na carga.

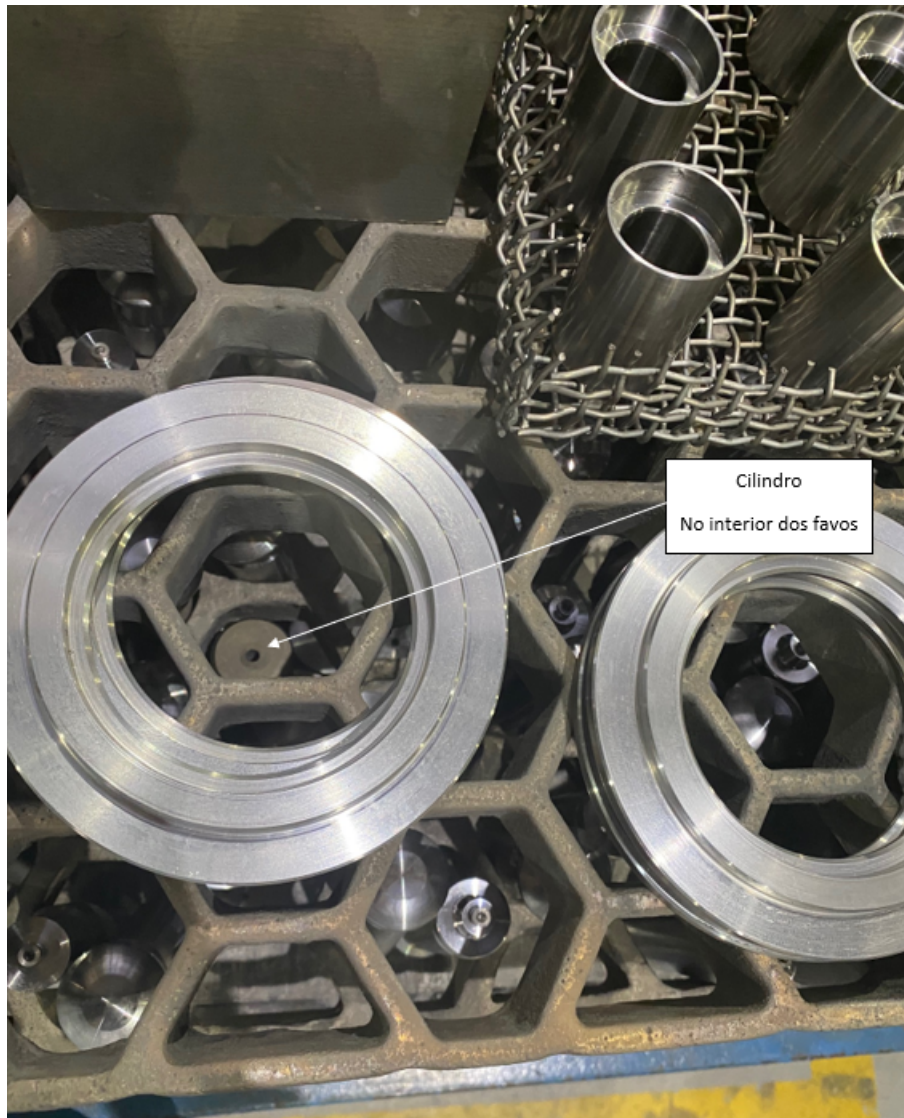


Figura 6.3: Posição do bloco cilíndrico na carga.

A partir do registo simultâneo de 3 em 3 segundos da temperatura da parede e do centro dos dois blocos, foi possível construir a evolução da sua temperatura com o tempo, de forma gráfica, apresentado-se esta evolução na figura 6.4. Analisando os dados experimentais presentes no gráfico, pode concluir-se que o cubo de elevadas dimensões localizado na periferia tem um aquecimento idêntico ao do cilindro de dimensões reduzidas localizado centralmente, o que não seria teoricamente expectável. Todavia, esta diferença de comportamento entre os dois blocos dá-se devido às peças circundantes ao cilindro se comportarem como um escudo radiativo para o mesmo, abrigando-o da radiação direta das paredes do forno. Deste modo, a troca de calor através de radiação com o bloco padrão cilíndrico é menor, pelo que aquece mais lentamente, seguindo de perto o aquecimento médio da carga, mesmo que tenha dimensões

bastante menores que o o bloco cúbico. É também possível notar na existência de cinco patamares de temperatura constante, distintamente aos quatro que têm sido utilizados para simulações numéricas em capítulos anteriores. Desta forma, a evolução da temperatura da parede é a do "Ensaio 3" apresentada na tabela 3.1.

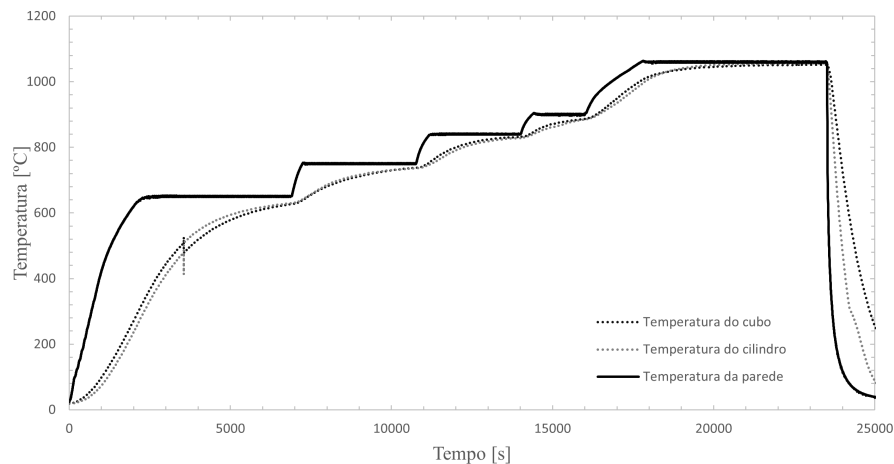


Figura 6.4: Resultados experimentais para a evolução da temperatura dos blocos e da parede para uma carga de 200kg.

6.1.2 Segundo ensaio experimental

Com o intuito de corroborar esta ideia, realizou-se mais um ensaio experimental onde, quer o bloco cilíndrico de reduzidas dimensões, quer o bloco cúbico de elevadas dimensões, são expostos à radiação direta. É importante mencionar que os centros dos blocos se encontram equipados com termopares para que a evolução da temperatura com o tempo possa ser registada.

O segundo ensaio experimental foi realizado numa carga com um valor de massa total igual a 440kg mais o peso da estrutura mais o peso do bloco. A posição dos dois blocos apresenta-se nas seguintes figuras. Na figura 6.5 é visível a posição do cubo, de maiores dimensões. Já a figura 6.6 revela a posição do cilindro, de baixas dimensões, também no centro da carga mas agora mais exposto à radiação direta da parede, que no caso anterior.

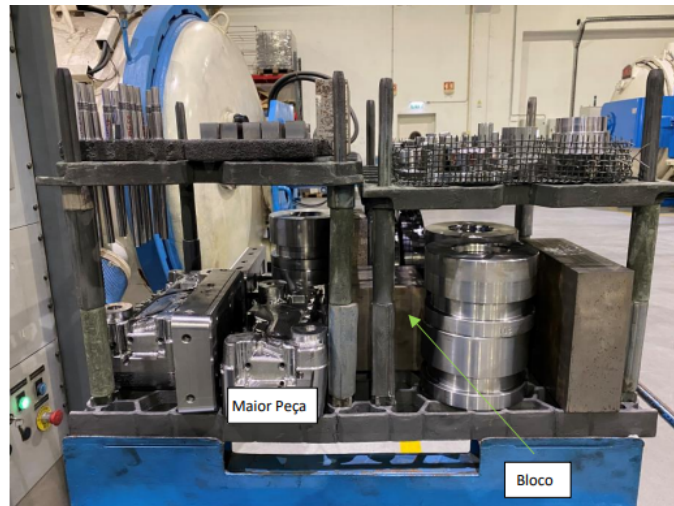


Figura 6.5: Posição do bloco cúbico na carga.

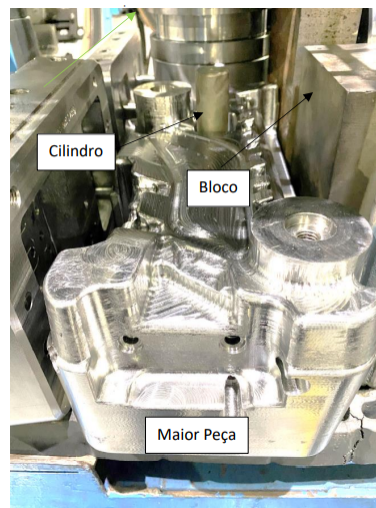


Figura 6.6: Posição do bloco cilíndrico na carga.

Realizou-se novamente um registo da temperatura dos dois corpos e da parede, sendo que os resultados da evolução temporal da temperatura do núcleo dos dois blocos e da parede se apresentam na figura 6.7. Comparando a evolução da temperatura da parede da figura 6.7 e da figura 6.4 constata-se que a evolução térmica da parede durante os processos de têmpera não é independente da carga introduzida no forno. A evolução da temperatura da parede deste ensaio vai de encontro à dos capítulos anteriores, com quatro estágios a temperatura constante; esta evolução apresenta-se como a do “Ensaio 1” na tabela 3.1. É também notório que o ciclo de aquecimento tem uma menor duração quando a massa da carga é mais reduzida.

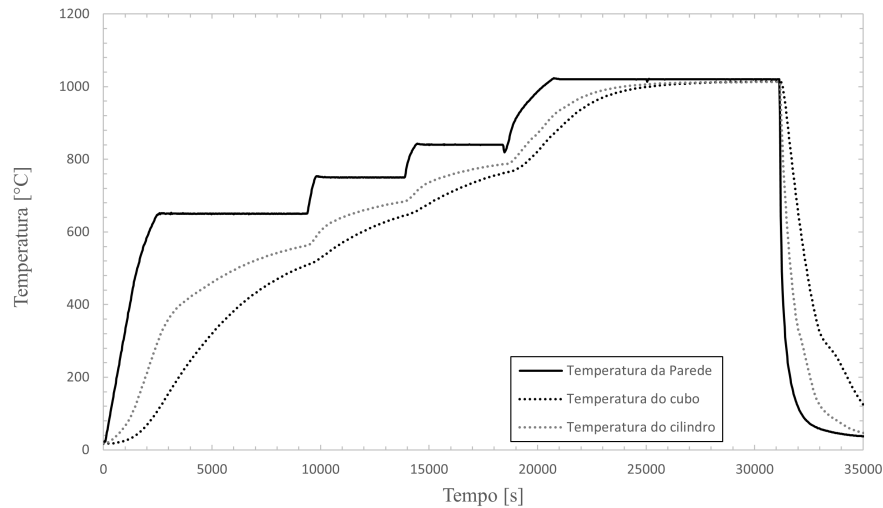


Figura 6.7: Resultados experimentais para a evolução da temperatura dos blocos e da parede para uma carga de 440kg.

Observando a figura 6.7, é possível concluir o mesmo que foi previamente explicitado para o primeiro ensaio experimental. Estando agora o cilindro mais exposto à radiação este já não segue o comportamento médio da carga e acontece o teoricamente expectável, os dois corpos evoluem lentamente mas o corpo mais massivo, o cubo de maiores dimensões, tem uma evolução térmica mais lenta que o corpo de menores dimensões, o cilindro.

Com o intuito de corroborar as conclusões previamente retiradas, apresentam-se os resultados experimentais obtidos por Carlos Amaro [16], na sua dissertação. No trabalho experimental levado a cabo por Carlos Amaro estudou-se a evolução térmica de um cilindro de pequenas dimensões e de uma das peças mais massivas de uma carga a tratar. Neste ensaio experimental o cilindro foi colocado no centro da carga, abrigado de radiação direta. A imagem 6.8 revela a localização do bloco e da peça na carga, ambos equipados com um termopar no seu núcleo.



Figura 6.8: Posição do bloco cilíndrico de pequenas dimensões (2) e do disco de grandes dimensões (1) na carga [16].

Os resultados obtidos por Carlos para a evolução da temperatura dos dois sólidos apresenta-se na figura 6.9, em que T_{pf} representa a temperatura do forno, T_{disco} a temperatura da peça de grandes dimensões e $T_{cilindro}$ a temperatura do cilindro de reduzidas dimensões. Analisando estes resultados, conclui-se que o cilindro de reduzidas dimensões caracteriza com grande rigor a evolução térmica da peça de grandes dimensões. Isto deve-se às peças envolventes do cilindro colocado no centro da carga, que desempenham um papel de escudo radiativo para o bloco. Assim, a menor troca de calor através de radiação proveniente da parede com o cilindro, está na origem deste comportamento.

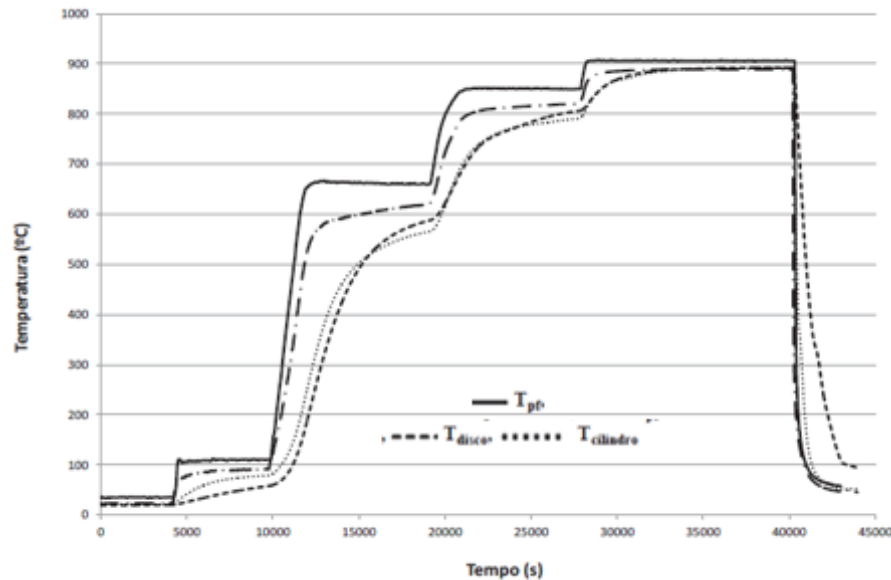


Figura 6.9: Resultados experimentais para a evolução da temperatura dos dois sólidos com o tempo [16].

Desta forma com base nos resultados dos dois ensaios e no trabalho prévio de Carlos Amaro [16], é possível concluir o seguinte:

1. O aquecimento de uma dada peça não é, de todo, independente da sua localização na carga.;
2. Uma peça de reduzidas dimensões, como o cilindro aqui referido, quando colocado na carga de forma a não "ver" diretamente as paredes do forno, traduz o comportamento do aquecimento da carga da mesma forma que o bloco padrão cúbico com uma massa bastante superior, como concluído através do ensaio experimental 1.
3. A utilização do cilindro nas condições acima referidas, parece, pois, ser uma boa opção para funcionar como bloco padrão. Sempre que a carga o permitir "esconder" das paredes do forno. Teria como vantagens; ser sempre o mesmo bloco padrão e o seu menor tamanho permitiria colocar mais carga útil sendo, também, necessária menos energia para o aquecer. Todavia isto pode não ser sempre aplicável na medida em que, por vezes, a carga não permite abrigar o pequeno cilindro da radiação direta das paredes, como quando é apenas sujeita a tratamento térmico uma peça de elevadas dimensões e massa que não permite "esconder" o cilindro.

Conclusões e trabalhos futuros

A realização do presente trabalho de dissertação permitiu concluir-se o seguinte:

- A modelação numérica de uma peça paralelepipedica simples, cuja solução para a transferência de calor transiente e multidimensional foi obtida através de meios analíticos, permitiu a definição dos parâmetros otimizados do modelo numérico a utilizar, ao longo da dissertação. Com o objetivo de obter uma solução de compromisso entre o tempo de processamento, $t_{total-CPU}$ e o erro entre a solução numérica e analítica foram definidos os seguintes parâmetros: malha com uma concentração de 17066 elementos por unidade de volume (m^3), máxima variação espacial de temperatura de $5^{\circ}C$, incremento inicial de tempo igual a 0,1s, incremento mínimo de 0,001s e máximo de 5s. Com o seguimento do trabalho, o incremento máximo foi alterado de 5s para 100s na medida em que reduzia significativamente o tempo de processamento numérico sem que a evolução do erro fosse alterada;
- A equação (1.5) idealizada por Francisco Machado [10], teve um bom desempenho para os caso analisados, relativos a peças em aço AISI H11 e blocos no mesmo material ou blocos em aço AISI 304, apresentando desvios temporais e de temperatura entre as peças e seus blocos correspondentes aceitáveis;
- Os blocos padrão em aço inoxidável traduzem de forma mais satisfatória o comportamento do aquecimento no último estágio de têmpera em peças mais massivas do que em peças mais pequenas. Todavia, neste último estágio os blocos em aço AISI 304 reproduzem pior o comportamento da peça real do que os blocos produzidos com o mesmo material da peça homóloga;
- O bloco padrão em aço inoxidável AISI 304 demora, sistematicamente, mais tempo a atingir a temperatura do último patamar de têmpera, T_{final} , do que a peça a tratar. Isto poderá indicar que a diferença de emissividades dos dois aços, AISI H11 e AISI 304 esteja a ter um papel importante nesta diferença, tornando os resultados obtidos menos fiáveis. A utilização de um bloco padrão de geometria esférica no mesmo aço da peça a tratar parece ser, por isso, a solução mais promissora na medida em que conjuga uma maior fiabilidade de resultados com uma menor massa (menor volume relativamente ao bloco padrão cúbico, cuja redução de volume ronda os 50%). A utilização do aço AISI

310 para a construção de blocos padrão pode ser também benéfica dada a sua baixa difusividade térmica e baixa emissividade; observando a equação 1.5 conclui-se que os blocos padrão neste material apresentariam dimensões mais reduzidas embora, mais uma vez, a diferença de emissividade dos materiais possa acarretar um maior tempo de estágio no último patamar do que o necessário;

- A metodologia proposta para a seleção de blocos padrão, baseou-se no desenvolvimento de um stock fixo de blocos padrão, caracterizados pelo seu comprimento característico, para que através do cálculo do comprimento característico da peça mais massiva de uma carga e da utilização da equação 1.5 se escolhesse o bloco padrão com o comprimento característico imediatamente superior ao dado pela equação prévia, que estivesse presente no stock para analisar a evolução de temperatura da peça mais massiva da carga (análoga a esse bloco) com o tempo;
- A metodologia proposta pareceu ser fiável, quer para a adoção de blocos padrão cúbicos, quer para a adoção de blocos padrão cilíndricos, na medida em que levou à existência de erros de temperatura e de tempo aceitáveis entre o bloco padrão e a peça; sendo que os blocos padrão cilíndricos apresentaram um erro máximo absoluto de 21,8 °C, um erro máximo relativo de 5,6 % e uma necessidade de mais 6,63% do tempo de estágio para atingir 99% da temperatura final de têmpera, relativamente à peça análoga; já os blocos padrão cúbicos apresentaram valores de erro mais elevados, não sendo, por isso, tão vantajosa a sua utilização (tabela 5.3). Todavia, para conferir mais confiança à metodologia proposta, dever-se-á no futuro realizar mais testes com outras peças e provar a sua validade desta metodologia experimentalmente;
- Uma peça de reduzidas dimensões, como o cilindro referido no capítulo 6, quando colocado na carga de forma a não estar termicamente em contacto direto com as paredes do forno, traduz o comportamento do aquecimento da carga da mesma forma que o bloco padrão cúbico, com uma massa bastante superior. Isto acontece na medida em que as peças circundantes a este pequeno bloco padrão cilíndrico funcionam como um escudo à radiação térmica emitida pelas paredes do forno; por consequência, este bloco estando sujeito a uma menor quantidade de calor, aquece mais lentamente, seguindo o comportamento térmico do aquecimento da carga de elevada massa;
- A utilização do cilindro colocado na zona central da carga parece ser uma boa opção para funcionar como bloco padrão. Teria como vantagens a utilização de um mesmo bloco padrão em todos os tratamentos de têmpera e o seu menor tamanho permitiria colocar mais carga útil sendo, também, necessária menos energia para o aquecer.

7.1 Trabalhos futuros

Na continuidade da presente dissertação, seria relevante testar a utilização de um bloco padrão esférico no mesmo aço da peça sujeita a processos de têmpera quer numericamente quer experimentalmente.

Seria também interessante verificar a reprodutibilidade dos resultados numéricos por aplicação desta metodologia de seleção de blocos padrão aos dados experimentais de outras peças sujeitas a tratamentos térmicos de têmpera nas empresas parceiras.

De acrescentar que blocos padrão cilíndricos em aço AISI 310 também se podem mostrar vantajosos dadas as suas pequenas dimensões. Pelo que, como trabalho futuro, é proposta a sua simulação numérica com posterior validação experimental.

Finalmente, deve ter-se em conta o que foi concluído no último capítulo da presente dissertação e explorar-se a temática de blocos padrão com dimensões reduzidas no centro de diversas cargas através de várias simulações numéricas com toda a carga a tratar e respetiva validação experimental.

Bibliografia

- [1] *Ramada Aços S.A*, 2022. <https://www.ramada.pt/pt/> [Acedido em: 12/03/2022].
- [2] George E Totten. *Steel Heat Treatment Handbook-2 Volume Set*. CRC press, 2006.
- [3] Pinto Soares. *Aços Características e tratamentos*. 2009.
- [4] Olivier Macchion, Said Zahrai, and JW Bouwman. Heat transfer from typical loads within gas quenching furnace. *Journal of materials processing technology*, 172(3):356–362, 2006.
- [5] Janez Grum, Slavko Božič, and Martin Zupančič. Influence of quenching process parameters on residual stresses in steel, 2001.
- [6] Seok-Jae Lee and Young-Kook Lee. Finite element simulation of quench distortion in a low-alloy steel incorporating transformation kinetics. *Acta Materialia*, 56(7):1482–1490, 2008.
- [7] I Elkatatny, Y Morsi, AS Blicblau, S Das, and ED Doyle. Numerical analysis and experimental validation of high pressure gas quenching. *International journal of thermal sciences*, 42(4):417–423, 2003.
- [8] FG Caballero, C Capdevila, and C Garcia De Andrès. Influence of pearlite morphology and heating rate on the kinetics of continuously heated austenite formation in a eutectoid steel. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 32(6):1283–1291, 2001.
- [9] Pedro Miguel Ribeiro Coelho Alves Pereira. Otimização de blocos padrão para monitorização e controlo do processo de tratamento térmico em vácuo. 2017.
- [10] Francisco Castro Machado. Estudo sobre blocos padrão usados para monitorização e controlo do processo de tratamentos térmicos em vácuo do aço h11. 2018.
- [11] Frank P Incropera, David P DeWitt, Theodore L Bergman, Adrienne S Lavine, et al. *Fundamentals of heat and mass transfer*, volume 6. Wiley New York, 1996.
- [12] Y Cengel and Transfer Mass Heat. *A practical approach*. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2003.

- [13] Miguel Oliveira, António Duarte, Paulo Coelho, and José Marafona. Heat treatment of aluminum extrusion dies and study of their heating by convection/radiation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 78(1):419–430, 2015.
- [14] Pedro Maia. Estudo da fase de aquecimento em tratamentos térmicos de peças em aço de grandes dimensões. 2013.
- [15] Miguel Martinho Pacheco Oliveira et al. Tratamento térmico de matrizes em aço, estudo do seu aquecimento por convecção/radiação. 2011.
- [16] Carlos Manuel de Sousa Pereira Martins Amaro et al. Tratamento térmico de matrizes em aço, optimização do seu aquecimento por convecção/radiação. 2012.
- [17] *Lucefin*, 2022. https://www.lucefin.com/wp-content/files_mf/1.2343en.pdf [Acedido em: 10/06/2022].
- [18] *Doerrenberg*, 2022. <https://www.doerrenberg.de> [Acedido em: 10/06/2022].
- [19] *Waldunsteel*, 2022. <https://waldunsteel.com/pt> [Acedido em: 10/06/2022].
- [20] *UDDEHOLM VIDAR® SUPERIOR*, 2022. <https://www.uddeholm.com> [Acedido em: 10/06/2022].
- [21] *meusburger*, 2022. <https://www.meusburger.com/PT> [Acedido em: 10/06/2022].
- [22] *Bohler-Uddeholm BÖHLER W400 VMR® H11 Hot Work Tool Steel*, 2022. <https://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=dbedea524d8b43febd2c444aa10da9a1&ckck> [Acedido em: 10/06/2022].

Processo detalhado dos passos realizados no *software Abaqus* para proceder à simulação do modelo

A.1 Criação do sólido

O primeiro passo para a realização da análise numérica, foi a criação do sólido de acordo com as dimensões apresentadas na tabela 2.1. Deste modo, utilizando as ferramentas do *software*, foi criado inicialmente um quadrado correspondente à da base da barra em avaliação como é visto na figura A.1 (a) e, posto isto, foi realizado uma extrusão para criação do sólido A.1 (b).

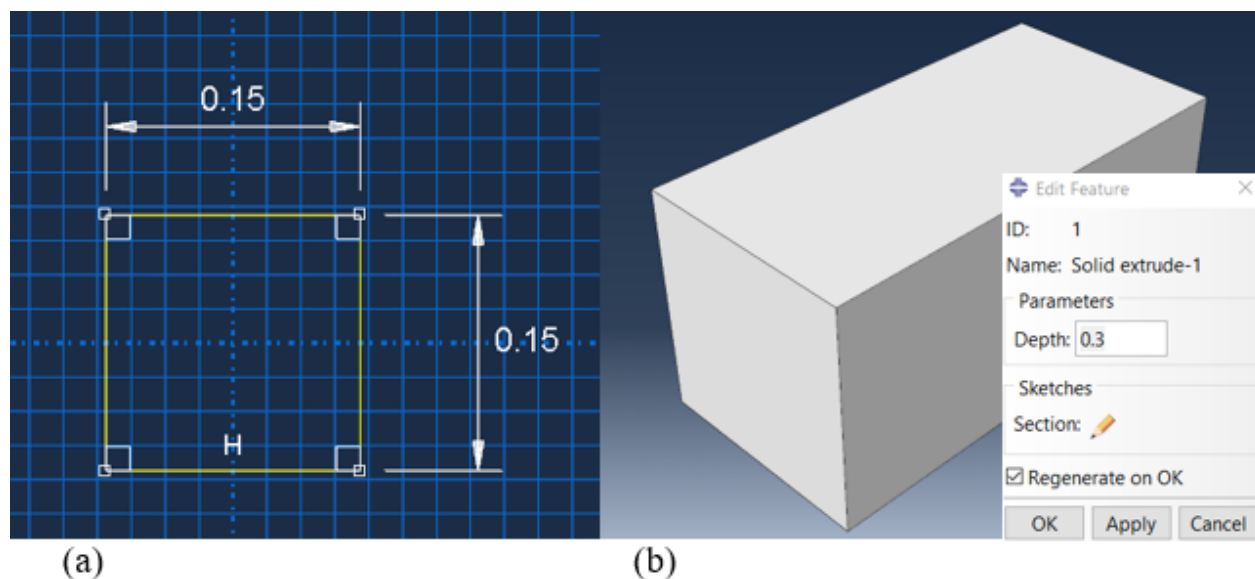


Figura A.1: Criação da base do paralelepípedo (a) e seguidamente a realização de uma extrusão para a criação do sólido (b).

A.2 Definição do material do sólido

Seguidamente, foram definidas as propriedades do material a usar, o aço AISI H11, a partir dos dados representados na tabela 2.2 tal como apresentado na seguinte figura A.2.

Edit Material

Name: AçoH11

Description:

Material Behaviors

- Density**
- Conductivity
- Specific Heat

Data	
Mass Density	
1	7755

Data	
Conductivity	
1	42.25

Data	
Specific Heat	
1	477

Figura A.2: Definição do material a utilizar.

Após isto, utilizando a opção *Sections* foi possível a criação de uma secção, no qual o sólido extrudido estava presente, para que o material criado fosse associado à barra utilizando a opção *Section Assignments*.

A.3 Seleção do tipo de problema, apuramento do tempo de simulação e escolha da máxima variação espacial de temperatura por passo no tempo

Após isto passou-se à seleção do tipo problema, de modo a que fosse possível efetuar uma análise numérica da transferência de calor tal como indicado na seguinte figura A.3, utilizando a opção *Step*.

Apêndice A. Processo detalhado dos passos realizados no software Abaqus para proceder à simulação do modelo

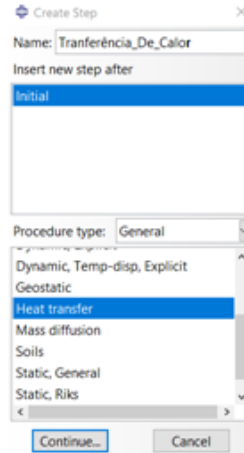


Figura A.3: Seleção do tipo de problema.

Sendo um problema de cariz transiente, esta opção também foi selecionada para que a caracterização total do tipo de problema em questão fosse possível, tal como representado na figura A.4. Relativamente ao tempo utilizado para a duração da simulação, foram adotados os primeiros 7000 segundos, na medida em que a partir desse momento a temperatura já se encontra estabilizada, quer no núcleo, quer no vértice nos 1100°C e a derivada é praticamente nula (figura A.4).

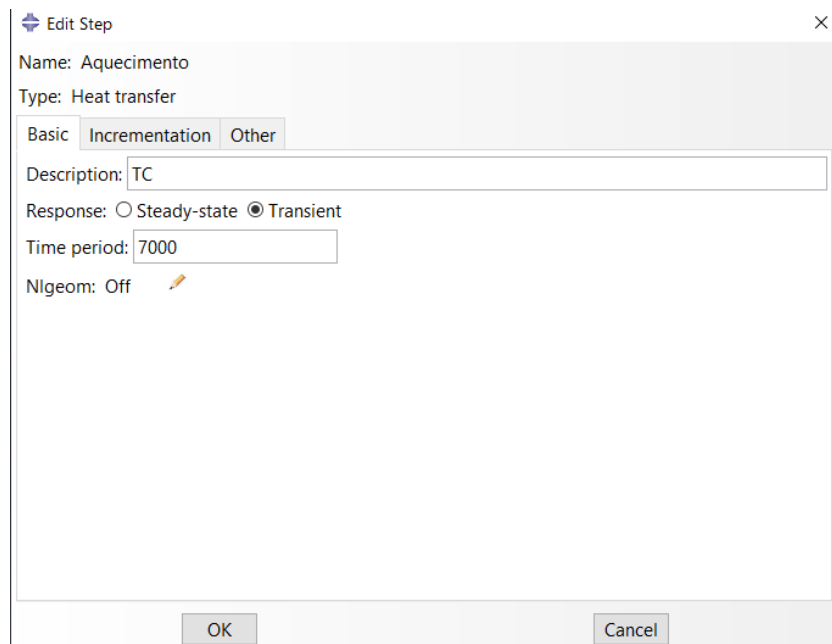


Figura A.4: Seleção do tipo de problema de cariz transiente e do tempo de simulação adequado.

A.3. Seleção do tipo de problema, apuramento do tempo de simulação e escolha da máxima variação espacial de temperatura por passo no tempo

O incremento inicial de tempo adotado para as simulações foi de 0,1s, com um incremento mínimo de 0,001s e um máximo de 5s com a opção de incrementação temporal automática aplicada.

Já relativamente, à escolha da variação máxima de temperatura por passo de tempo, esta opção outorga que a temperatura não varie mais do que um determinado valor predefinido por passo no tempo. Desta forma, quanto menor for o valor da variação máxima de temperatura por passo de tempo mais tempo demora o tempo do cálculo das diferentes na medida em que são necessárias mais iterações para que a solução convirja corretamente. Com isto, foram testadas duas temperaturas para este parâmetro com o intuito da realização de uma comparação relativamente ao erro entre os resultados das duas simulações utilizando inicialmente o valor da variação máxima de temperatura por passo de tempo de 10°C e 5°C tal como representado nas seguinte figura A.5, este estudo encontra-se presente na secção 2.3.3.

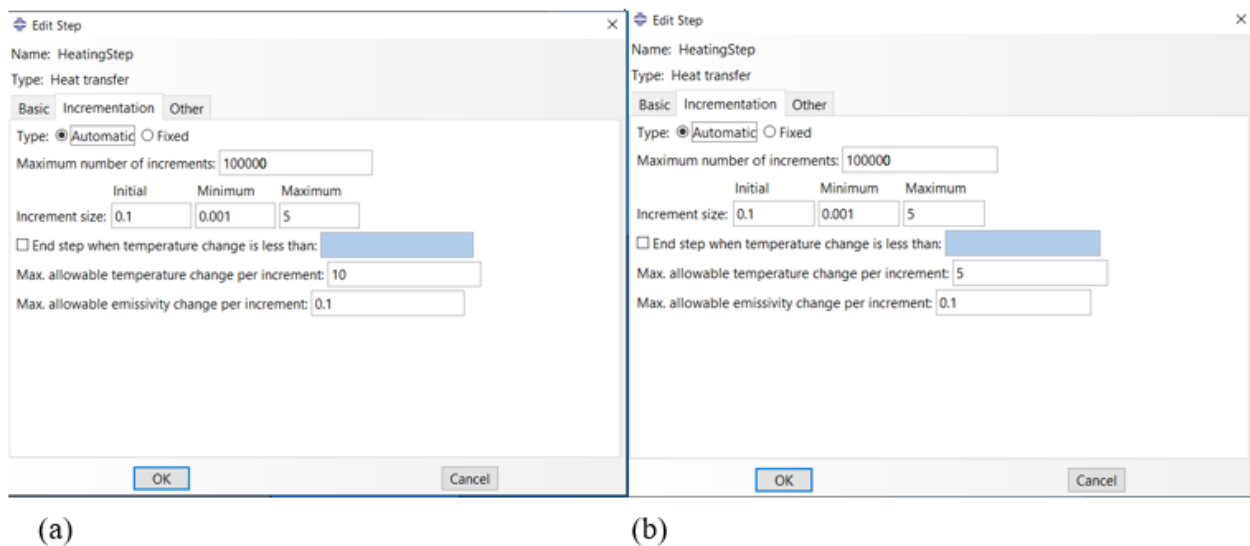


Figura A.5: Apuramento do tempo de simulação e escolha da máxima variação espacial de temperatura por passo no tempo. Com uma máxima variação de 10°C (a) ou 5°C (b).

A.4 Definição das condições de fronteira e condições iniciais.

Relativamente às condições de fronteira do problema, estas foram definidas de acordo com a tabela apresentada anteriormente (2.3).

Em vista disso, utilizando a opção *Interaction* definiu-se o valor da temperatura envolvente, T_{∞} e do coeficiente de transferência de calor, h_{global} , constante em todas as faces do sólido, como representa a figura A.6.

Já relativamente à temperatura inicial esta foi também definida pelo utilizador e introduzida como um campo predefinido através da opção *Predefined Field* no *step* inicial da simulação, tal como representado na figura A.6.

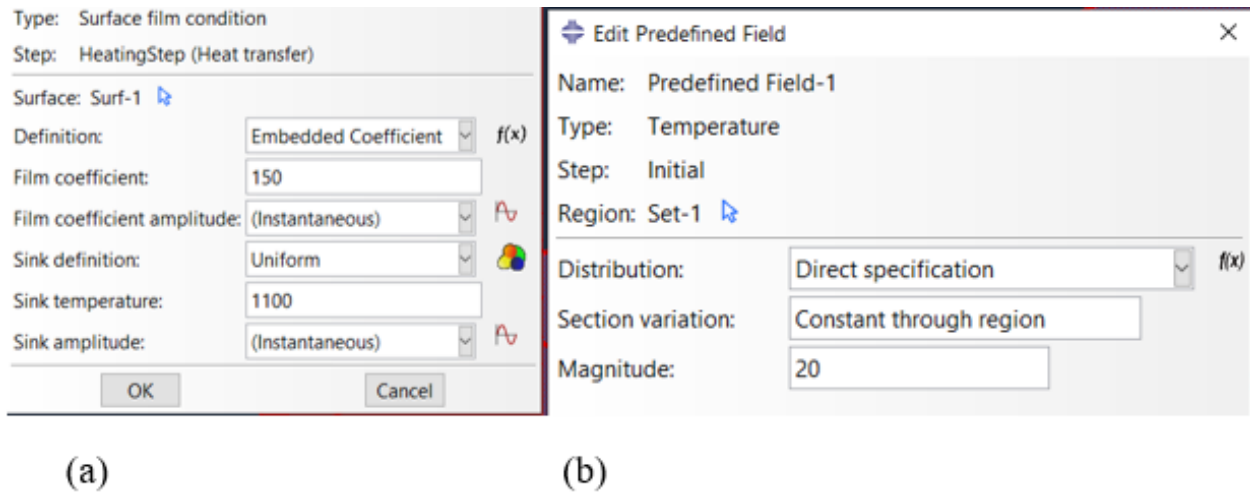


Figura A.6: Definição das condições de fronteira (a) e condições iniciais (b) do problema em questão.

A.5 Seleção do tipo de elementos finitos a utilizar e criação da malha.

Relativamente ao tipo de elementos finitos a utilizar, foram selecionados elementos hexaédricos, sendo que a opção de convecção foi também selecionada criando, deste modo, elementos cujo código é *DCC3D8* segundo o *software AbaqusTM* tal como representado na seguinte figura A.7.

A.5. Seleção do tipo de elementos finitos a utilizar e criação da malha.

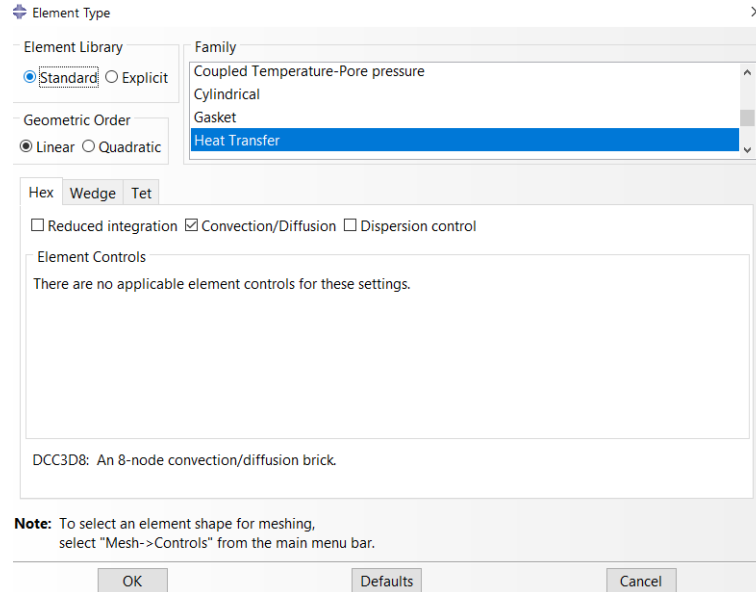


Figura A.7: Seleção do tipo de elementos finitos a utilizar.

Já relativamente à malha, foram várias as malhas utilizadas ao longo do trabalho para que pudesse ser escolhida a malha que realizasse menor esforço computacional mas que mantivesse, também, um erro baixo e aceitável relativamente aos resultados analíticos.

Foi utilizada a opção *Seed Edges* em cada aresta para que, com o auxílio das *Double Bias*, fosse possível obter uma malha com concentração de elementos nos vértices e arestas do sólido, que são locais críticos para a análise em questão. Na seguinte imagem A.8 encontra-se um exemplo do *Seed Edges* de uma das arestas da barra.

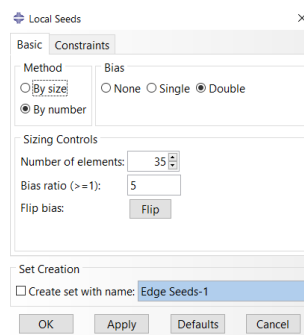


Figura A.8: Exemplo da utilização da opção *Double Bias* numa das arestas do sólido para a criação de uma das malhas a utilizar.

Propriedades do aço AISI H11

O aço conhecido comercialmente por Uddeholm Vidar Superior, segundo a norma americana, AISI H11, EN X37CrMoV5-1, segundo a norma europeia ou DIN X 38 CrMoV5-1 de acordo com a norma alemã, é um aço para trabalho a quente que se caracteriza por:

- Ter um alto nível de resistência ao choque térmico e fadiga térmica;
- Apresentar uma boa resistência a altas temperaturas;
- Ter uma excelente tenacidade e ductilidade em todas as direções;
- Apresentar uma boa estabilidade dimensional quando sujeito a processos de endurecimento (como têmperas).

Este aço para trabalho a quente apresenta variadas aplicações tais como:

- Criação de ferramentas e matrizes para forjamento a quente;
- Criação de moldes e ferramentas para fundição injetada;
- Criação de moldes de termoplásticos [1].

A sua composição típica pode ser encontrada na tabela B.1, já para a obtenção das suas propriedades térmicas e físicas, recorreu-se à base de dados CES Edupack™ obtendo-se valores estimados para estas propriedades, do aço em questão, encontrando-se estas representadas na tabela B.2, onde $E^{aço}$ representa o módulo de *Young* médio e ν o coeficiente de *Poisson* médio aço AISI H11.

Tabela B.1: Composição típica média de um aço AISI H11 segundo o catálogo da F. Ramada [1]

Carbono	Silício	Manganês	Crómio	Molibdénio	Vanádio
0,37%	0,25%	0,30%	5,15%	1,25%	0,45%

Tabela B.2: Propriedades térmicas e físicas do aço AISI H11 retirados da base de dados do programa CES Edupack™

Propriedades		
α	$11,7e^{-6} - 13,2e^{-6}$	$^{\circ}\text{C}^{-1}$
c_p	468 - 486	J/KgK
k	25 - 29,8	W/mK
ρ	7680 - 7830	Kg/m^3
$E^{aço}$	215	GPa
ν	0,29	-

Com base nos dados de várias fichas técnicas do aço H11 de diferentes fabricantes encontradas *online*, foi possível expressar matematicamente a variação das propriedades térmicas, com a temperatura, T, com dados retirados num intervalo de 20°C a 700°C. Deste modo através de várias fichas técnicas foi desenvolvida uma recolha de dados relativa a três importantes propriedades, a condutividade térmica, k , apresentada na tabela B.3 o calor específico, c_p , representado na tabela B.4 e a massa volúmica, ρ apresentada na tabela B.5.

Tabela B.3: Variação da condutividade térmica, k , do aço AISI H11 com a temperatura, tendo em conta diferentes fichas técnicas

Temperatura [°C]	Condutividade Térmica [W/mK]
20 [17]	25,0
20 [18]	25,3
200 [19]	30
200 [20]	30
200 [21]	27
300 [18]	27,6
400 [19]	30
400 [20]	30
500 [17]	28,5
600 [17]	29,3
600 [19]	31
600 [22]	30,5
600 [20]	31
700 [22]	29,6
700 [18]	30,5

Tabela B.4: Variação do calor específico, c_p , do aço AISI H11 com a temperatura, tendo em conta diferentes fichas técnicas

Temperatura [°C]	Calor Específico [J/KgK]
20 [17]	460
20 [22]	460
500 [17]	550
500 [22]	550
600 [17]	590
600 [22]	590

Tabela B.5: Variação da massa volúmica, ρ , do aço AISI H11 com a temperatura, tendo em conta diferentes fichas técnicas

Temperatura [°C]	Massa Volúmica [Kg/m³]
20 [19]	7800
20 [17]	7800
20 [22]	7800
20 [20]	7800
200 [19]	7750
200 [20]	7750
400 [19]	7700
400 [20]	7700
500 [17]	7640
600 [19]	7600
600 [20]	7600

A partir destes dados tornou-se possível o desenvolvimento das seguintes equações algébricas:

- Variação da condutividade térmica, k , com a temperatura:

$$k = 4 \times 10^{-8} \cdot T^3 - 5 \times 10^{-5} \cdot T^2 + 0,028 \cdot T + 24,753 [Wm^{-1}K^{-1}] \quad (B.1)$$

- Variação do calor específico, c_p , com a temperatura:

$$c_p = 0,0004 \cdot T^2 - 0,003 \cdot T + 459,91 [JKg^{-1}K^{-1}] \quad (B.2)$$

-
- Variação da massa volúmica, ρ , com a temperatura:

$$\rho = -0,0003 \cdot T^2 - 0,176 \cdot T + 7803,1 \text{ [kgm}^{-3}\text{]} \quad (\text{B.3})$$

Na medida em que o acabamento superficial do aço AISI H11 é semelhante ao do aço AISI H13, considerou-se que, para o presente trabalho, a emissividade do aço H11 é idêntica à do aço H13 que já foi alvo de estudo. Desta forma, os valores de emissividade são representados por intervalos de temperatura na tabela B.6.

Tabela B.6: Evolução da emissividade com a temperatura para o aço AISI H13 [14]

Temperatura [°C]	ϵ [-]
15 - 650	0,17
650 - 750	0,21
750 - 850	0,22
850 - 1030	0,46

Propriedades do aço AISI 304

O aço AISI 304, segundo a norma americana ou EN X 5 CrNiMo 18 10, segundo a norma europeia ou ainda DIN X 5 CrNiMo 18 10, segundo a norma alemã é um aço inoxidável com elevadas quantidades de níquel e cromo que se caracteriza por:

- Apresentar boa resistência à oxidação até 850°C;
- Apresentar dureza inalterada pelos processos de têmpera;
- Ser facilmente soldável;
- Apresentar boa maquinabilidade.

Este aço inoxidável apresenta variadas aplicações:

- Na indústria química e alimentar;
- Em serralharia;
- Na criação de corrimãos, puxadores, gradeamentos e ferragens [1].

A sua composição típica pode ser encontrada na tabela C.1, já para a obtenção das suas propriedades térmicas e físicas, recorreu-se à base de dados CES Edupack™ obtendo-se valores estimados para estas propriedades, do aço em questão, encontrando-se estas representadas na tabela C.2.

Tabela C.1: Composição típica média de um aço AISI 304 segundo o catálogo da F. Ramada [1]

Carbono	Silício	Manganês	Crómio	Níquel
≤ 0,07%	≤ 1,00%	≤ 2,00%	18,50%	9,25%

Tabela C.2: Propriedades térmicas e físicas do aço AISI 304 retirados da base de dados do programa CES Edupack™

Propriedades		
α	$16e^{-6} - 18e^{-6}$	$^{\circ}\text{C}^{-1}$
c_p	490 - 530	J/KgK
k	14 - 17	W/mK
ρ	7620 - 7780	Kg/m^3
$E^{aço}$	190 - 203	GPa
ν	0,27	-

Com base na tese de dissertação de Francisco Machado, foram retiradas as equações que demonstram a variação das três propriedades térmicas necessárias, para o estudo da evolução térmica do aço AISI 304, com a temperatura, T , em Kelvin [10]. As equações são válidas entre os 293K e 1633K.

- Variação da condutividade térmica, k , com a temperatura:

$$k = -7,0 \times 10^{-7} \cdot T^2 + 15,4 \times 10^{-3} \cdot T + 10,33 [Wm^{-1}K^{-1}] \quad (C.1)$$

- Variação da massa volúmica, ρ , com a temperatura:

$$\rho = 8020 - 50,1 \times 10^{-2} \cdot (T - 298) [kgm^{-3}] \quad (C.2)$$

- Variação do calor específico, c_p , com a temperatura:

$$c_p = -8,0 \times 10^{-7} \cdot T^2 + 0,2 \cdot T + 443 [JKg^{-1}K^{-1}] \quad (C.3)$$

Relativamente à emissividade, também foram retirados os valores obtidos por Francisco Machado num ensaio experimental que realizou em vista à sua dissertação para o aço AISI 304 com aspeto baço [10].

Tabela C.3: Evolução da emissividade com a temperatura para o aço AISI 304 baço [10]

Temperatura [$^{\circ}\text{C}$]	ϵ [-]
15 - 650	0,2
650 - 750	0,27
750 - 850	0,28
850 - 1020	0,30

Parâmetros utilizados nas simulações referentes ao capítulo 3 e 4

Para a realização das simulações do processo de aquecimento do tratamento térmico de têmpera das peças e dos blocos padrão, foram utilizados os intervalos de tempo e taxas de aquecimento referentes ao ensaio 1 presentes na tabela 3.1. Uma vez que neste processo de aquecimento existem quatro patamares de temperatura constante, a simulação foi dividida em oito *steps* de transferência de calor, quatro de aquecimento e quatro de temperatura constante, como apresentado na seguinte figura D.1.

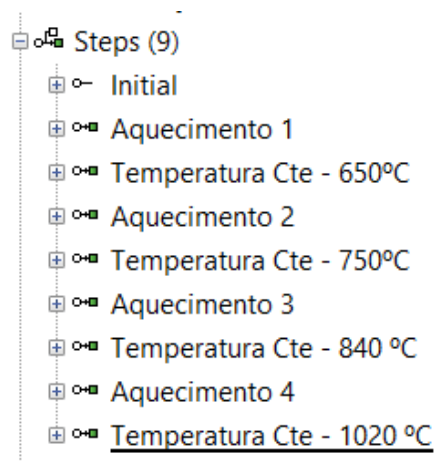


Figura D.1: Steps utilizados para a simulação do aquecimento dos blocos e peças utilizando como referência o ensaio 1.

Assim, os *steps* de aquecimento são definidos pela condição de fronteira do aumento de temperatura com o tempo da parede do forno, já os *steps* onde a temperatura da parede do forno é constante, são definidos com a condição de fronteira de temperatura constante na parede do forno. De acrescentar que, até ao *step* que caracteriza o patamar de temperatura constante a 840°C são utilizadas três interações que caracterizam a transferência de calor que permite o aquecimento das peças e dos blocos padrão:

- *Surface Film Condition* - Esta *interaction* caracteriza a existência de convecção natural

entre o gás azoto e a peça/bloco padrão.

- *Surface Radiation* - Esta *interaction* caracteriza a existência de troca de calor pelas paredes da peça/bloco através de radiação. Foi importante ter em conta a variação da emissividade dos aços com a temperatura pelo que, em cada step o valor da emissividade foi ajustado à temperatura em que o corpo se apresentava no *step* anterior.
- *Surface Radiation* - Esta *interaction* caracteriza a existência de troca de calor pela parede do forno através de radiação.

Na medida em que nos últimos dois *steps* o azoto é removido do forno, as trocas de calor dão-se exclusivamente por radiação ou seja a interação de *Surface Film Condition* é desativada.

Gráficos das simulações referentes aos capítulos 3 e 4

No presente anexo apresenta-se através das figuras E.1 a E.6 a evolução térmica com o tempo das peças 1 a 6, presentes na tabela 3.2 e dos respectivos blocos padrão em aço AISI H11 adquiridos através dos resultados das simulações realizadas no *software Abaqus*. Estas figuras são referentes ao capítulo 3 Nas figuras E.7 a E.12 apresenta-se a evolução da temperatura com o tempo das peças 1 a 6 e respectivos blocos padrão em aço AISI 304. Estas figuras são referentes ao capítulo 4.

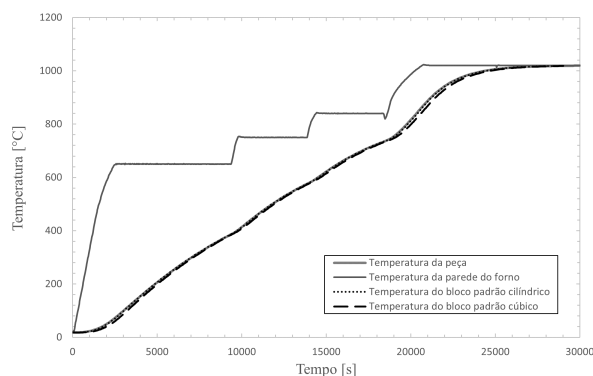


Figura E.1: Evolução da temperatura com o tempo do centro da peça 1 e dos respectivos blocos padrão cilíndrico e cúbico em aço AISI H11.

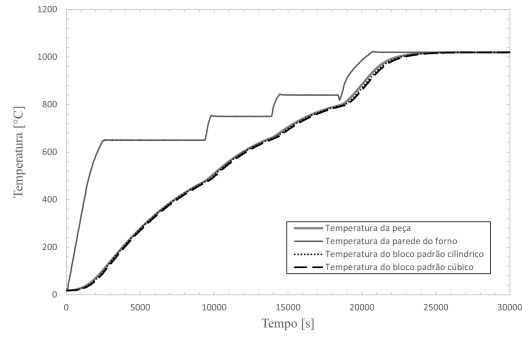


Figura E.2: Evolução da temperatura com o tempo do centro da peça 2 e dos respectivos blocos padrão cilíndrico e cúbico em aço AISI H11.

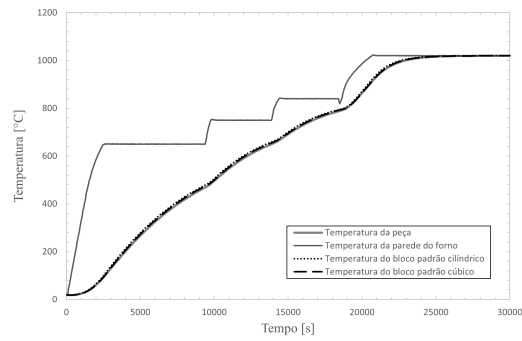


Figura E.3: Evolução da temperatura com o tempo do centro da peça 3 e dos respectivos blocos padrão cilíndrico e cúbico em aço AISI H11.

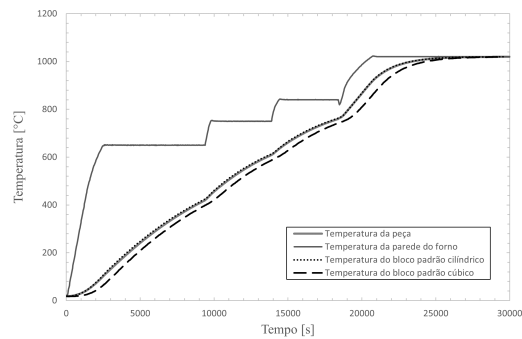


Figura E.4: Evolução da temperatura com o tempo do centro da peça 4 e dos respectivos blocos padrão cilíndrico e cúbico em aço AISI H11.

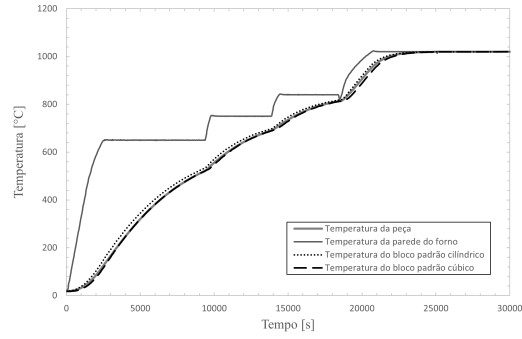


Figura E.5: Evolução da temperatura com o tempo do centro da peça 5 e dos respectivos blocos padrão cilíndrico e cúbico em aço AISI H11.

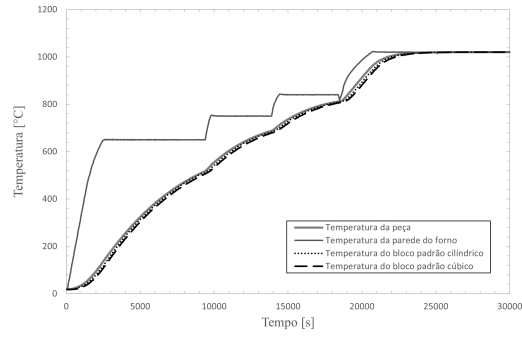


Figura E.6: Evolução da temperatura com o tempo do centro da peça 6 e dos respectivos blocos padrão cilíndrico e cúbico em aço AISI H11.

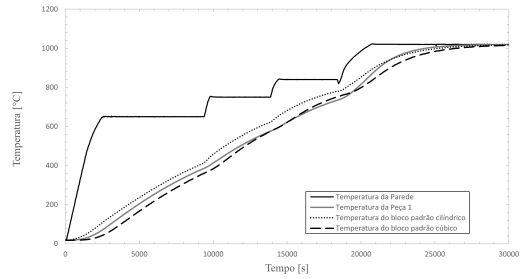


Figura E.7: Evolução da temperatura com o tempo do centro da peça 1 e dos respectivos blocos padrão cilíndrico e cúbico em aço AISI 304.

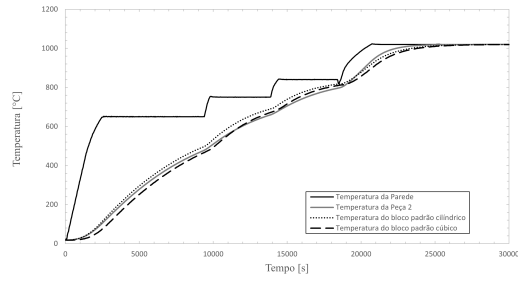


Figura E.8: Evolução da temperatura com o tempo do centro da peça 2 e dos respectivos blocos padrão cilíndrico e cúbico em aço AISI 304.

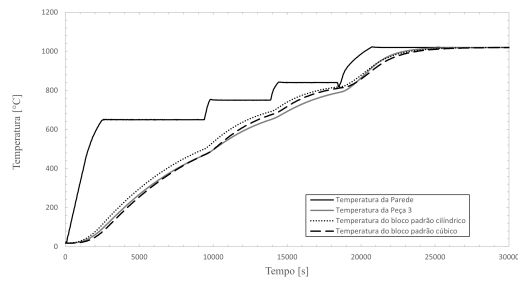


Figura E.9: Evolução da temperatura com o tempo do centro da peça 3 e dos respectivos blocos padrão cilíndrico e cúbico em aço AISI 304.

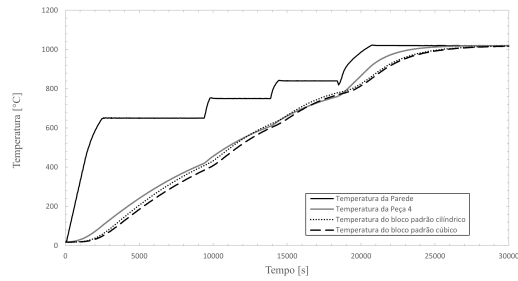


Figura E.10: Evolução da temperatura com o tempo do centro da peça 4 e dos respectivos blocos padrão cilíndrico e cúbico em aço AISI 304.

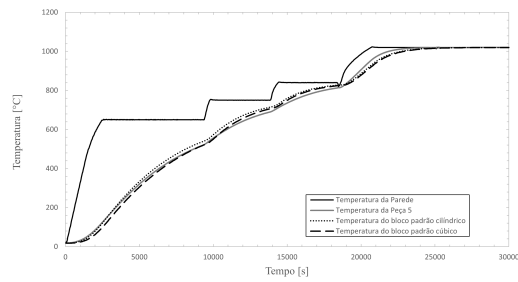


Figura E.11: Evolução da temperatura com o tempo do centro da peça 5 e dos respectivos blocos padrão cilíndrico e cúbico em aço AISI 304.

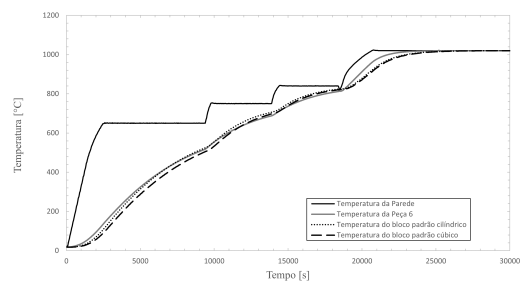


Figura E.12: Evolução da temperatura com o tempo do centro da peça 6 e dos respectivos blocos padrão cilíndrico e cúbico em aço AISI 304.