

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

Francisco Castro Machado

Dissertação do MIEM

Orientador na FEUP: Prof. Paulo José da Silva Martins Coelho

Prof. José Duarte Ribeiro Marafona

Orientador na METALSOLVUS: Eng. António Paulo Cerqueira Duarte

Orientador na Ramada Aços S.A.: Eng. Pedro Cunha Silva



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Setembro de 2018

*“Sem mim, nada podereis fazer”
(Jo 15:5)*

Resumo

Os tratamentos térmicos a que os aços são sujeitos são processos térmicos que envolvem grandes quantidades de energia que visam melhorar as suas propriedades mecânicas. Por este motivo, é de grande interesse para a empresa Ramada Aços S.A. otimizar este processo, para que assim, seja mais competitiva no seu mercado. Para tal, recorre-se ao uso de blocos padrão dimensionados de forma a que tenham o mesmo comportamento térmico das maiores peças de aço a tratar, de forma a controlar rigorosamente o processo. Posto isto, esta dissertação incidiu sobre o estudo de blocos padrão em aços AISI 304, com o intuito de apresentar as dimensões ótimas para o controlo de tratamentos térmicos de peças em aço H11.

Primeiramente, este trabalho focou-se em encontrar um modelo numérico, validado ao comparar os seus resultados com os da respetiva solução analítica, de forma a simular o seu comportamento térmico. O modelo numérico foi otimizado de forma a tornar a simulação mais fiável, por meio de determinados parâmetros. Para esse efeito, também foi feito um estudo com o intuito de encontrar as propriedades térmicas dos aços usados e como estas variam com a temperatura. Posteriormente, procedeu-se à simulação de peças típicas em aço H11, encontrando de forma iterativa as dimensões do bloco padrão em aços AISI 304 que melhor representam a evolução temporal de temperatura do núcleo das peças. Posto isto, feita uma análise dos resultados obtidos, foi possível chegar uma relação geométrica entres as dimensões características das peças a tratar e dos respetivos blocos padrão.

Por último, foi feito um ensaio na referida empresa medindo a temperatura do núcleo da uma determinada peça a tratar e do respetivo bloco padrão, de forma a poder de alguma maneira corroborar o trabalho desenvolvido nesta dissertação.

Standard blocks for control and monitoring of the processes of vacuum heat treatment of H11 steel

Abstract

The heat treatments of which the steels are subjected are thermal processes involving large amounts of energy that improve their mechanical properties. For this reason, it is of great interest for the company Ramada Aços S.A. to optimize this process in order to be more competitive. For this purpose, the use of standard blocks sized so that they have the same thermal behavior of the largest pieces of steel to be treated, so as to rigorously control the process. Therefore, this dissertation focused on the study of standard blocks made of AISI 304, with the aim of presenting the optimum dimensions for the control of thermal treatments of H11 steel parts.

First, this work focused on finding a numerical model, validated when comparing its results with those of its analytical solution, in order to simulate its thermal behavior. The numerical model was optimized in order to make the simulation more reliable, through certain parameters. For this purpose, a study was also made to find the thermal properties of the steels used and how they vary with the temperature. Subsequently, simulation of typical H11 steel parts was performed, iteratively finding the dimensions of the standard block made of AISI 304 that best represent the temporal evolution of the core temperature of the parts. After analyzing the obtained results, it was possible to arrive at a geometric relation between the characteristic dimensions of the pieces to be treated and the respective standard blocks.

Finally, a test was carried out in the mentioned company, measuring the core temperature of a particular piece to be treated and the respective standard block, in order to confirm all work developed in this dissertation.

Agradecimentos

Primeiramente, quero agradecer ao professor Paulo José da Silva Martins Coelho, pela sua sempre disponibilidade, pelo seu acompanhamento de forma crítica e afável ao longo deste semestre que muito me auxiliou a concretizar esta dissertação.

Agradeço, também ao professor José Duarte Ribeiro Marafona pelas suas explicações incansáveis sobre o software Abaqus, que foram fundamentais para a realização deste trabalho.

Não posso esquecer de agradecer a colaboração com a empresa Ramada Aços S.A., a qual sem ela esta dissertação não teria sentido, principalmente ao engenheiro Pedro Cunha Silva e ao engenheiro António Paulo Cerqueira Duarte que foram sempre prestáveis durante toda esta fase.

Por último, mas não menos importante, quero agradecer aos meus pais, Maria Elisa e Adriano, assim como ao meu irmão Daniel e esposa, e aos meus amigos. A todos vós um sincero obrigado.

Índice de Conteúdos

1. Introdução	1
1.1 Enquadramento do tema e motivação	1
1.2 Ramada Aços S.A.....	3
1.3 Objetivos do projeto	4
1.4 O tratamento de têmpera e os equipamentos utilizados	4
1.4.1 Forno	6
1.5 Trabalhos anteriores	8
1.6 Estrutura da dissertação	10
2. Validação da solução numérica	12
2.1 Condução em regime transiente	12
2.1.1 Método do Sistema Global.....	13
2.1.2 Solução multidimensional	15
2.1.3 Condução transiente num tronco de cilindro.....	18
2.2 Análise da solução analítica.....	19
2.3 Análise e validação solução numérica	22
3. Propriedades dos aços usados	28
3.1 Propriedades do aço H11.....	28
3.2 Propriedades do aço AISI 304	31
4. Dimensionamento de blocos padrão em aço AISI 304.....	37
4.1 Processo de aquecimento num tratamento de têmpera.....	37
4.1.1 Temperatura das paredes do forno e a sua emissividade	37
4.1.2 Temperatura da atmosfera de azoto.....	38
4.1.3 Convecção no interior do forno.....	39
4.2 Dimensões iniciais estimadas do bloco padrão em aço AISI 304	40
4.3 Simulações de peças reais típicas em aço H11	42
4.3.1 Resultados das simulações	44
4.3.2 Simulação de peças para otimização dos resultados	45
4.4 Análise dos resultados das simulações.....	46
4.4.1 Correlação geométrica.....	48
4.4.2 Correlação geométrica com o efeito da emissividade	49
5. Ensaio experimental.....	53
5.1 Ensaio e Peça - Bloco padrão.....	53
5.1.1 Dimensões do Bloco Padrão	53
5.1.2 Posição da peça e do bloco padrão no forno.....	56
5.2 Resultados do ensaio.....	57
6. Conclusão e sugestões de trabalhos futuros	59
6.1 Conclusão	59
6.2 Sugestões de trabalhos futuros.....	60
Referências	61
ANEXO A: Dados das propriedades térmicas do aço H11	62
ANEXO B: Gráficos das simulações.....	65

Nomenclatura

Variáveis Latinas

Símbolo	Descrição	Unidade
a	- Altura	[m]
$A_{s,bloco}$	- Área superficial do bloco padrão	[m ²]
A_s	- Área superficial de transferência de calor	[m ²]
A_1A_2	- Produto de áreas	[m ⁴]
Bi	- Número de Biot	[-]
c_p	- Calor específico a pressão constante	[J kg ⁻¹ k ⁻¹]
C_n	- Constante de integração de índice n	[-]
D	- Diâmetro	[m]
$E_{aço}$	- Modulo de Elasticidade	[Pa]
F_o	- Número de Fourier	[-]
F_{12}	- Fator forma	[-]
h	- Coeficiente de convecção	[Wm ⁻² K ⁻¹]
k	- Condutividade térmica	[W m ⁻¹ k ⁻¹]
l	- Comprimento	[m]
L_c	- Comprimento característico	[m]
$L_{c,bloco}$	- Comprimento característico do bloco padrão	[m]
$L_{c,peça}$	-Comprimento característico da peça	[m]
r	- Coordenada radial	[m]
r_o	- Raio	[m]
r^*	- Raio adimensionalizado	[-]
t	- Tempo	[s]
t^*	- Tempo adimensionalizado	[-]
T	- Temperatura	[°C]
$T_{analítica}$	- Temperatura da solução analítica	[°C]
$T_{gás}$	- Temperatura do gás no interior do forno	[°C]
T_i	- Temperatura inicial	[°C]
$T_{numérica}$	- Temperatura de solução numérica	[°C]
T_{par}	- Temperatura das paredes do forno	[°C]
T_{∞}	- Temperatura do fluido	[°C]
V	- Volume	[m ³]
$V_{bloco,cubo}$	- Volume do bloco padrão cúbico	[m ³]

$V_{bloco,cilindro}$	- Volume do bloco padrão cilíndrico	[m ³]
V_{bloco}	- Volume do bloco padrão	[m ³]
x	- Coordenada espacial	[m]
x^*	- Coordenada adimensionalizada	[-]
y	- Coordenada espacial	[m]
z	- Coordenada espacial	[m]

Variáveis Gregas

Símbolo	Descrição	Unidade
α	- Difusividade térmica	[m ² /s]
α_{bloco}	- Difusividade térmica do bloco padrão	[m ² /s]
$\alpha_{peça}$	- Difusividade térmica da peça	[m ² /s]
α_e	- Coeficiente de expansão	[°C ⁻¹]
ε	- Emissividade	[-]
ε_I	- Emissividade fornecida	[-]
ε_{II}	- Emissividade calculada	[-]
θ	- Diferença entre a temperatura inicial e final	[°C]
ξ_n	- Raiz positiva	[-]
ρ	- Massa volúmica	[kg m ⁻³]
τ	- Constante de tempo	[s]
ν	- Coeficiente de Poisson	[-]

Índice de Figuras

Figura 1-1 - Carga típica de aço H11 que irá ser submetida a um tratamento de têmpera.....	2
Figura 1-2 - Blocos padrão usados na empresa <i>Ramada aços S.A.</i>	3
Figura 1-3 - Representação esquemática do processo de têmpera.	5
Figura 1-4 - Representação esquemática do forno B84T.	6
Figura 1-5 - Forno usado na empresa Ramada Aços S.A. com as resistências à volta das paredes do forno e com o ventilador da porta.....	7
Figura 1-6 - Esquema simplificado dos sistemas do forno.....	7
Figura 2-1 - Distribuição espacial de temperatura para diferentes números de Biot.	14
Figura 2-2 - Esquema de uma superfície infinita na direção y e z e simétrica com convecção na fronteira (Incropera, et al., 2013).....	15
Figura 2-3- Representação das funções de Bessel de 1ª espécie de ordem 0 e 1.	18
Figura 2-4 - Condução em regime transiente de um cilindro pelo princípio da sobreposição (Çengel, et al., 2015).	18
Figura 2-5 - Esquema do cilindro e visualização dos pontos usados para a solução analítica e numérica.	21
Figura 2-6 - Evolução da temperatura ao longo do tempo no centro e vértice do cilindro.	21
Figura 2-7 - Malha refinada no sentido radial e no sentido do eixo concêntrico do cilindro...	23
Figura 2-8 - Grau de refinamento dos 4 tipos de malha estudadas.....	24
Figura 2-9 - Evolução da temporal da temperatura da solução analítica e da solução numérica.	26
Figura 2-10 - Evolução temporal da temperatura da solução analítica e da solução numérica, no vértice do cilindro.	27
Figura 2-11 - Evolução temporal da temperatura da solução numérica, no vértice do cilindro.	27
Figura 3-1 - Ensaio de medição da emissividade do disco em aço AISI 304.	33
Figura 4-1 - Evolução temporal de temperatura das paredes do forno e do gás para um processo de têmpera de aços H11.....	39
Figura 4-2 - Peças típicas de aço em H11 simuladas no <i>Abaqus</i>	42
Figura 4-3 - Evolução temporal de temperatura da Peça 1 e do respetivo bloco padrão.	44
Figura 4-4 - Evolução temporal de temperatura da Peça 2 e do respetivo bloco padrão.	45
Figura 4-5 - Correlação geométrica bloco-peça com o comprimento característico.....	48
Figura 4-6 - Correlação geométrica bloco-peça com o comprimento característico e a razão difusividade.	49
Figura 4-7 - Correlação geométrica bloco-peça com o efeito da emissividade de 0,23 do aço AISI 304.	50
Figura 4-8 - Correlação geométrica bloco-peça final.....	51
Figura 5-1 - Localização da peça de forma cúbica e respetivo bloco padrão cilíndrico na carga com termopares colocados nos seus núcleos.....	56

Figura 5-2 - Evolução temporal de temperatura da peça cúbica e o respetivo bloco padrão obtidos no ensaio.57

Figura 5-3 - Evolução temporal do erro relativo e absolutos do ensaio na fase de aquecimento.57

Índice de Tabelas

Tabela 2-1 - Propriedades térmicas do material e da envolvente usadas para a determinação da solução analítica	20
Tabela 2-2 - Malhas usadas para obtenção da solução numérica e sua designação	24
Tabela 2-3 - Resultados obtidos no estudo das malhas até os primeiros 100 s de aquecimento	25
Tabela 3-1 - Propriedades físicas e mecânicas do aço H13 à temperatura ambiente retirada da dissertação do Pedro Maia (2013)	29
Tabela 3-2 - Composição química do aço H13 e do aço H11	29
Tabela 3-3 - Propriedades térmicas do aço H11 a diferentes temperaturas.....	30
Tabela 3-4 - Valores da emissividade por degraus de temperatura para o aço H13.....	30
Tabela 3-5 - Composição química do aço AISI 304 (Catálogo Aços, 2016)	31
Tabela 3-6 - Propriedades térmicas do aço AISI 304.....	31
Tabela 3-7 - Propriedades térmicas do aço AISI 304 a diferentes temperaturas.....	32
Tabela 3-8 - Emissividade da superfície reluzente determinada experimentalmente e pela equação (3.5)	34
Tabela 3-9 - Emissividade da superfície baça determinada experimentalmente e pela equação (3.5)	35
Tabela 3-10 - Valores da emissividade por degraus de temperatura para o aço AISI 304 com superfície baça	36
Tabela 4-1 - Patamares de temperatura no processo de têmpera.....	38
Tabela 4-2 - Temperatura das paredes do forno e do gás no seu interior.....	39
Tabela 4-3 - Características das peças típicas em aço H11 simuladas	43
Tabela 4-4 - Características das peças de geometria simples em aço H11 simuladas.....	46
Tabela 4-5 - Resultados dos blocos padrão para peças em aço H11 e os respetivos erros.....	47
Tabela 5-1 - Dimensões do bloco padrão para o ensaio experimental de emissividade 0,23 ..	53
Tabela 5-2 - Diferença do comprimento característico usando diferentes aços para o bloco padrão	54
Tabela 5-3 - Diferenças das dimensões entre blocos padrão AISI 304 e AISI 310 para superfícies brilhantes e baças	54
Tabela 5-4 - Diferença das dimensões usando diferentes aços para o bloco padrão.....	55
Tabela 5-5 - Erros obtidos no ensaio experimental	58

1. Introdução

Este presente trabalho surge no âmbito da dissertação a realizar para conclusão do curso de Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica em opção de Energia Térmica, cujo o tema de estudo proposto é a otimização do tamanho de blocos de aço, doravante denominados de blocos padrão, que traduzam de forma fiável o aquecimento do núcleo de peças típicas em aço H11. O trabalho foi realizado na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto em parceria com a empresa proponente, Ramada Aços S.A..

Nas seguintes secções serão apresentadas um enquadramento do tema e os objetivos do trabalho, uma descrição da empresa Ramada Aços, assim como a apresentação de dissertações precedentes, aprofundamentos dos conhecimentos relacionados com o tema proposto com base na literatura e, por último, a estrutura da presente dissertação.

1.1 Enquadramento do tema e motivação

Os tratamentos térmicos são processos que exigem o aquecimento de peças de aço a altas temperaturas em fornos industriais. Estes procedimentos acarretam altos custos de energia, e consequentemente, altos custos financeiros, para além do elevado investimento inicial. Posto isto, é do superior interesse da empresa *Ramada Aços S.A.* garantir que os tratamentos térmicos decorrem tendo o menor consumo de energia possível (poupança) de forma a prestar a mesma ou melhor qualidade de serviço. Assim, torna-se impreterível o controlo e monitorização dos tratamentos térmicos.

Para proceder ao controlo e monitorização do processo é necessário conhecer determinadas temperaturas, nomeadamente a temperatura do núcleo da peça crítica. A peça crítica é a peça da carga que tem maior volumetria, ou seja, maior distância da sua superfície ao seu núcleo e que, por isso, terá o aquecimento mais lento. Na Figura 1-1, que mostra uma carga típica de um tratamento de têmpera com peças do aço H11, pode-se constatar de forma evidente que, neste caso, a peça crítica da carga a temperar é a maior peça de forma cilíndrica assinalada com a letra “A”.

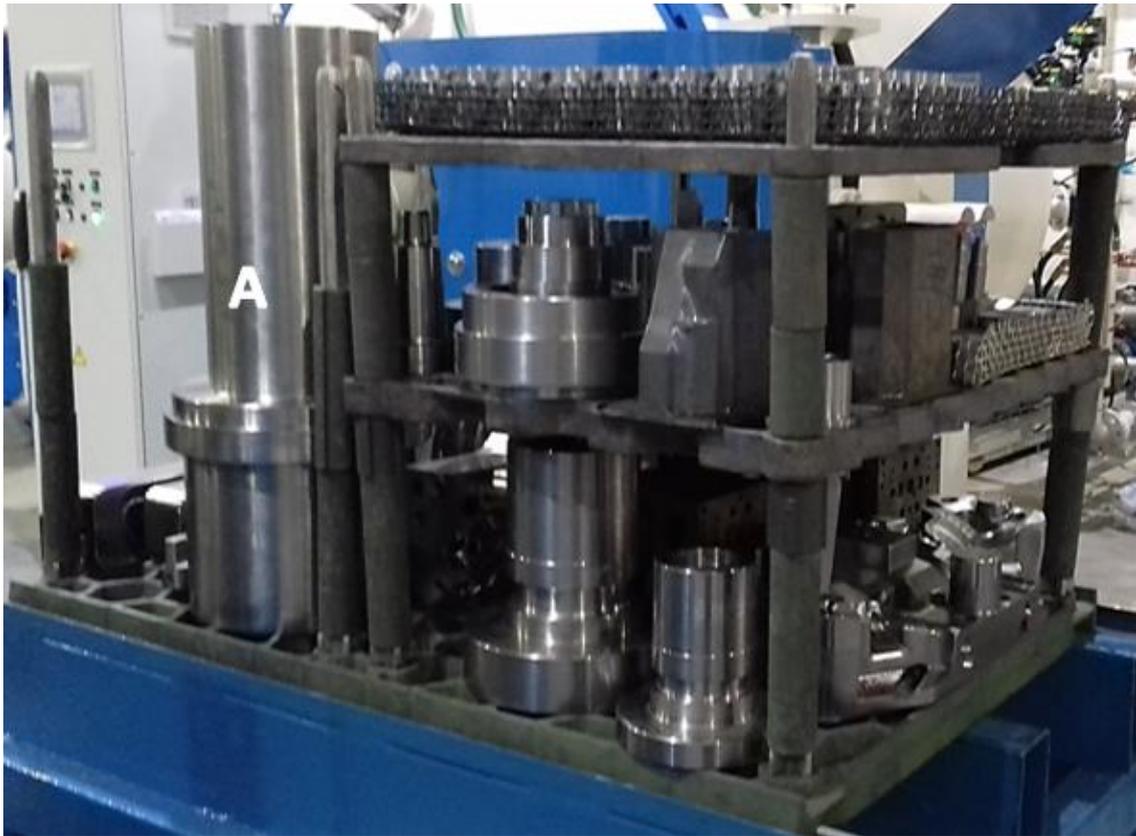


Figura 1-1 - Carga típica de aço H11 que irá ser submetida a um tratamento de têmpera.

Contudo, para determinar a temperatura do núcleo da peça, ter-se-ia de furá-la até ao seu centro para introduzir o termopar, algo que não é exequível. Para contornar esse problema, recorre-se ao uso de blocos padrão que já possuem um ou mais furos até ao seu núcleo. Os blocos padrão, normalmente em aço AISI 304, descrevem com uma aproximação aceitável o aquecimento das peças mais maciças que serão tratadas termicamente. Estes são dimensionados tendo em conta as propriedades físicas dos diferentes tipos de aço e as diferentes geometrias e dimensões das peças mais maciças da carga. Na figura 1-2 encontram-se vários blocos padrão onde se pode observar com clareza o(s) furo(s) em questão.



Figura 1-2 - Blocos padrão usados na empresa *Ramada aços S.A.*.

Portanto, é de extrema importância o estudo de otimização de blocos padrão de forma a que estes traduzam da maneira mais realista possível o aquecimento das peças que serão termicamente tratadas, garantindo a melhor qualidade possível ao mais baixo custo.

1.2 Ramada Aços S.A.

A empresa Ramada Aços, foi fundada em 1935 por Francisco Ramada, e tinha como área de negócio a fita de serra para madeira. Contudo, quatro anos depois, desenvolveu o negócio entrando na indústria do aço. Com 80 anos de existência, a Ramada Aços encontra-se sediada na cidade de Ovar, mas dispõe de uma rede comercial com logística instalada em vários pontos do país, nomeadamente na região do Norte, Centro e Lisboa. É um distribuidor com 90 qualidades de aços, abrangendo os aços especiais, aços estirados e laminados, aços para ferramentas e de construção, aços para trabalho a quente e a frio, entre outros. Para além disso, a empresa presta vários serviços, tais como, maquinaria, estiragem e laminagem, tratamentos térmicos, comercialização de ferramentas de corte e ferramentas industriais e ainda possui um vasto sistema de armazenamento. (Ramada Aços, 2018)

De acordo com o último Relatório e Contas, as receitas do Grupo F. Ramadas foi de cerca de 140 milhões de euros, apresentando um crescimento nos últimos anos. Recentemente, a empresa investiu em novos equipamentos para aumentar a sua capacidade produtiva e melhorar o nível de serviço. Relativamente aos tratamentos térmicos, foram instalados dois novos fornos que permitem tratar peças até 4 toneladas. A maior parte dos aços comercializados destinam-se

à construção de máquinas e seus componentes e à produção de ferramentas (cunhos, cortantes e moldes). (Relatório e Contas 2016, 2017)

1.3 Objetivos do projeto

O objetivo deste trabalho é, pois, a otimização das dimensões de blocos padrão em aço inox AISI 304 de forma que estes traduzam de forma mais fiável o aquecimento do núcleo das peças mais maciças em aço AISI H11 da respetiva carga e que, por isso mesmo, necessitarão de mais tempo para aquecer ao serem submetidas a um tratamento térmico. A obtenção de uma correlação, que permita obter de forma expedita as dimensões do bloco padrão para umas dadas dimensões da peça a tratar, à semelhança do que foi realizado num trabalho anterior, Pedro Pereira (2017), é também um dos objetivos do presente trabalho.

De forma a que o aquecimento seja o mais próximo possível do real, teve que se ter em consideração as variações das propriedades físicas com a temperatura dos aços envolvidos. Com este trabalho é de esperar que a empresa consiga ter um melhor controlo no processo de têmpera, o que acarreta poupanças energéticas e, por conseguinte, poupanças económicas e uma melhor qualidade do tratamento.

1.4 O tratamento de têmpera e os equipamentos utilizados

Os tratamentos térmicos são processos térmicos a que se submetem os aços com o objetivo de se modificar a sua estrutura para melhorar as suas propriedades mecânicas sem alterar a sua composição química. (Soares, 2009, p. 32) Os tratamentos térmicos podem ser subdivididos por outros três processos: o recozido, a têmpera e o revenido.

Mediante o exposto, pode-se designar a têmpera como um tratamento térmico em que se procede a uma austenitização do aço (obtenção de uma estrutura austenítica) seguida de arrefecimento rápido de forma a transformar total ou parcialmente a austenite em martensite. Na Figura 1-3 está representado esquematicamente um ciclo de têmpera. Deste modo, tira-se proveito da dureza e alto limite de elasticidade das estruturas martensíticas. Contudo, os aços martensíticos são pouco dúcteis e tenazes, não podendo ser utilizados no estado temperado. É por essa razão que a têmpera é sempre seguida de um outro tratamento térmico, o revenido, que visa amaciar o aço, melhorando a sua ductilidade e a tenacidade onde também se pode proceder ao ajustamento final da dureza da peça em aço. (Loureiro, 1978, p. 1)

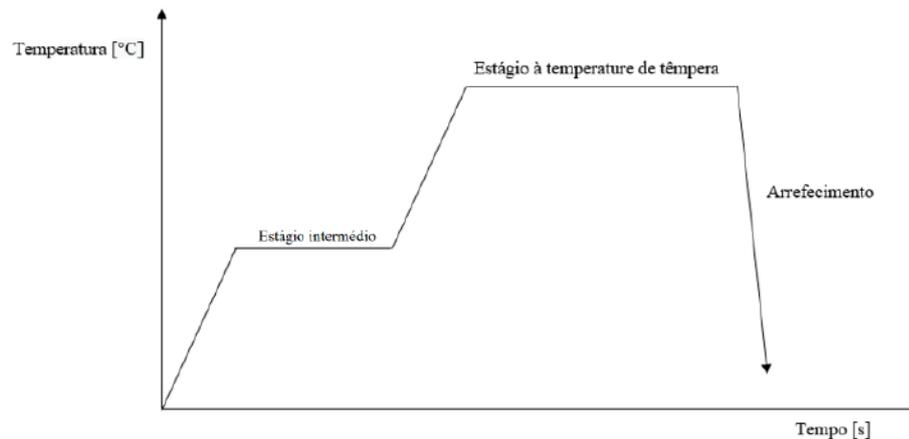


Figura 1-3 - Representação esquemática do processo de têmpera.

Posto isto, a têmpera é constituída por três fases: o aquecimento, o estágio à temperatura de têmpera e o arrefecimento.

No aquecimento, a parte exterior da peça em aço aquece mais rapidamente do que o interior, o que leva a que se instalem tensões internas que podem levar à fissuração ou distorção da mesma. Assim, de forma a evitar altos gradientes de temperatura na peça, o aquecimento pode ser feito em diversos degraus, estágios intermédios, permitindo uma homogeneização da temperatura. Uma das propriedades que se deve ter em conta no aquecimento é a condutibilidade térmica do material, pois, por exemplo, os aços de média e alta liga têm menor condutibilidade e, por isso, mais suscetíveis de fissuração. Para além disso, é importante ter em conta o grau de complexidade da geometria da peça, onde facilmente se instalam fortes tensões triaxiais que levam à fissuração. (Loureiro, 1978, pp. 12-13)

Após o aquecimento, inicia-se um estágio à temperatura de têmpera que tem como objetivo proceder a uma austenitização em toda a peça para que depois se possa dar início ao arrefecimento. Para tal acontecer, é necessário definir um tempo de estágio que depende da composição química do aço, dimensão da peça, e a temperatura de têmpera. É de destacar que altas temperaturas de têmpera ou tempos de estágio prolongados dão origem à formação de grãos demasiadamente grandes, o que é prejudicial para as propriedades mecânicas do aço. (Soares, 2009, pp. 37-38)

Por último, o arrefecimento, para obter uma estrutura martensítica, é a fase mais crítica de todo este tratamento térmico. A transformação da austenite em martensite pressupõe que a velocidade de arrefecimento seja suficientemente rápida para evitar a transformação em perlite e bainite, velocidade essa que se designa por velocidade crítica de têmpera. (Loureiro, 1978, p. 21) Contudo, tal como no aquecimento, o arrefecimento origina tensões térmicas devido à contração que as peças sofrem. Assim, é necessário conciliar a velocidade de arrefecimento e a

instalação de tensões térmicas. O arrefecimento pode-se dar em vários meios, tais como água, óleo, banho de sais, jato de ar seco, soluções, vapores e gases. (Soares, 2009, pp. 38-39) No caso da *Ramada Aços S.A.*, o meio de arrefecimento usado é gás azoto.

1.4.1 Forno

O tratamento térmico de peças de aço H11 na empresa *Ramada Aços S.A.* são realizados em fornos do modelo da B.M.I Fours, do tipo B84T. Com o propósito de evitar a oxidação superficial das peças em aço, ar do interior do forno é substituído por uma atmosfera protetora (sem oxigénio). Neste caso, em particular, a atmosfera do forno é constituída por gás azoto.

Para controlar a atmosfera interior do forno, este tem um sistema de vácuo e um outro sistema de circulação de gás azoto. Estes sistemas são dimensionados dependendo de vários fatores, principalmente do volume do reservatório onde é armazenado o azoto e a pressão que se pretende atingir no forno. (Edenhofer & Bouwman, 1997, p. 490)

Os elementos do forno que vão proceder ao aquecimento são resistências elétricas de grafite, como se pode observar na Figura 1-4 e na Figura 1-5, onde se mostram o esquema do forno e o forno usado para o processo de têmpera, respetivamente. Estas resistências estão dispostas à volta das paredes circulares do forno. As resistências de grafite podem ser usadas até temperaturas acima dos 2000°C e têm a vantagem de a sua emissividade não ser alterada. (Edenhofer & Bouwman, 1997, p. 492) O aquecimento também é auxiliado por um ventilador localizado na porta do forno.

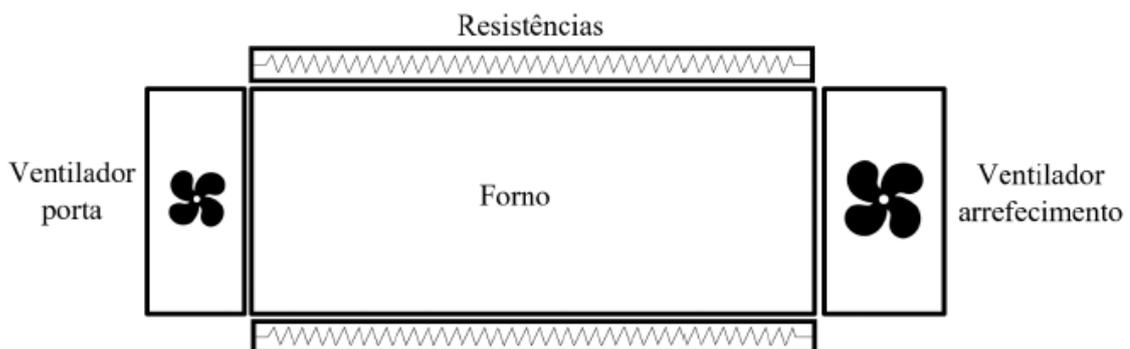


Figura 1-4 - Representação esquemática do forno B84T.



Figura 1-5 - Forno usado na empresa Ramada Aços S.A. com as resistências à volta das paredes do forno e com o ventilador da porta.

Estes fornos têm um sistema diferente para o aquecimento e para o arrefecimento. O aquecimento é feito através das resistências elétricas de grafite e o gás é forçado a circular pelo ventilador da porta. Distintamente, o arrefecimento é feito com o recurso a um permutador de calor que irá resfriar o azoto e este, por sua vez, irá absorver o calor da carga a temperar. O circuito do gás azoto pode ser visualizado na Figura 1-6.

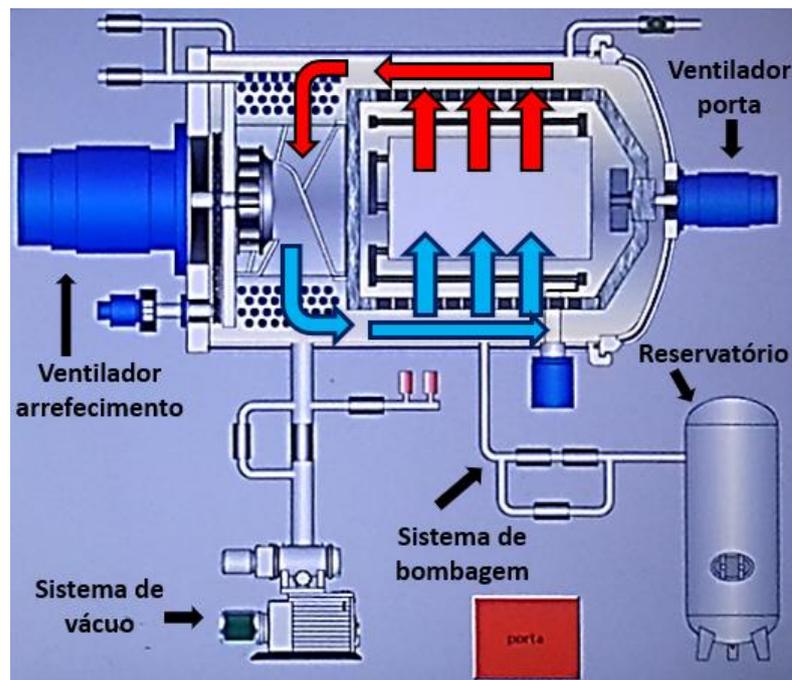


Figura 1-6 - Esquema simplificado dos sistemas do forno.

A transferência de calor é tanto mais rápida quanto maior for a pressão interna do forno, isto porque, há uma relação de proporcionalidade direta entre o coeficiente de convecção e a pressão do forno. A pressão do forno deve-se situar entre os 5 e 6 bar, uma vez que é dentro desta gama que se encontra o ponto económico óptimo. Tal acontece porque à medida que se vai aumentando a pressão, o incremento do coeficiente de convecção é cada vez menor, o que faz com que não

seja justificável economicamente elevar a pressão acima dos 6 bar (Edenhofer & Bouwman, 1997, pp. 506-507).

Para monitorizar o processo de têmpera é necessário conhecer 3 dados de temperaturas em tempo real, sendo elas:

- Temperatura programada do ciclo de têmpera;
- Temperatura do forno;
- Temperatura do núcleo do bloco padrão.

Como já foi referido anteriormente, nos tratamentos térmicos é praticamente impossível determinar a temperatura do núcleo da peça, pois isso implicaria furar a peça até ao seu centro. Para solucionar o problema, utilizam-se blocos padrão para que possam traduzir o aquecimento da peça crítica. Assim, pode-se saber a cada instante de tempo qual é a temperatura no seu núcleo e comparar com a temperatura do forno, podendo concluir-se se a temperatura tem uma distribuição espacial uniforme em toda a peça.

1.5 Trabalhos anteriores

A presente dissertação surge na continuidade de outras, realizadas por alunos da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto no âmbito da opção de Energia Térmica do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica. Essas dissertações, também realizadas em parceria com a empresa *Ramada Aços S.A.*, e serviram como base de referência e permitiram o aprofundamento do tema deste trabalho. As dissertações mais relevantes para o presente trabalho são:

- ***Otimização de blocos padrão para monitorização e controlo do processo de tratamento térmico em vácuo*** – Trabalho realizado pelo Pedro Pereira (2017). Este trabalho, semelhante ao atual, teve como objetivo o dimensionamento dos blocos padrão a utilizar em tratamentos térmicos em vácuo de peças de aço AISI D2. A dissertação começou por um estudo aos parâmetros de simulação ajustáveis do modelo numérico, comparando os resultados obtidos com os de um modelo analítico, permitindo validar as soluções da simulação. Posteriormente, simulou-se um conjunto de peças representativas das maiores peças em aço AISI D2 que compõe as cargas a tratar termicamente. Depois, de forma iterativa, determinou-se as dimensões dos blocos padrão em aço inox AISI 304, procurando que o seu núcleo apresentasse uma evolução térmica idêntica ao das referidas peças. Também foi feito um estudo da influência da posição de uma dada peça na carga, tendo-se constatado que as peças que apresentam uma posição central na carga revelam um aquecimento mais lento que as restantes, consequência do efeito de “escudo” à radiação que as outras peças têm sobre elas.

Assim, o bloco padrão deverá ser colocado sempre numa posição central da carga. Para além disso, concluiu-se que existe uma relação de proporcionalidade entre o comprimento característico de peças e blocos com igual comportamento térmico do seu núcleo, sendo assim, possível encontrar de forma expedita as dimensões do bloco padrão mais adequado.

- ***Estudo da fase de aquecimento em tratamentos térmicos de peças em aço de grandes dimensões*** – Trabalho realizado pelo Pedro Maia (2013). Este trabalho teve como objetivo otimizar o processo de tratamento de têmpera de peças de grandes dimensões e peças com geometria complexa. Para isso foi feita uma análise de comparação entre os resultados analíticos e numéricos para obter informação sobre a capacidade do modelo numérico em simular peças de grandes dimensões e, depois, definiu-se e construiu-se a malha da peça simplificada de forma a representar a peça real tratada na empresa. De seguida, alterou os coeficientes de convecção de forma a que os valores obtidos experimentalmente e os valores obtidos na simulação coincidissem o mais possível. A obtenção de um modelo otimizado permitiu analisar outros pontos críticos da peça, assim como o estado de tensão de origem térmica inerente ao aquecimento desta. Após isso, foram feitas várias simulações com diferentes curvas de temperatura do forno, com o intuito de obter uma fase de aquecimento mais célere, sem com isso causar dano à peça, e se possível reduzindo o nível de tensões atual. Por último, compararam-se os valores experimentais medidos durante um tratamento térmico com os valores obtidos pela simulação numérica otimizada.
- ***Análise térmica e mecânica da têmpera em vácuo de peças de aço de médias dimensões*** - Trabalho realizado pelo Sérgio Moreira (2014). Este trabalho teve como objetivo estudar o processo de tratamento térmico de têmpera numa peça de aço de média dimensão de forma melhorar a produtividade da empresa, tendo-se conseguido reduzir em duas horas o tempo de tratamento. Também se efetuou um estudo para se perceber a influência da disparidade de valores nas propriedades do aço no campo de temperaturas e tensões, visto que havia distintos valores de propriedades na literatura para o material em questão. Os valores da emissividade do aço, até próximo dos 350 °C, foram obtidos experimentalmente. Para além disso, fez também uma análise do estado de tensão provocado pelos gradientes de temperaturas na peça ao longo do tempo.
- ***Tratamento térmico de matrizes em aço, estudo do seu aquecimento por convecção/radiação*** - Trabalho realizado por Miguel Martinho Pacheco Oliveira (2011). Semelhante aos outros trabalhos, esta dissertação foi desenvolvida em parceria

com a empresa *Ramada Aços*. A dissertação começou pelo estudo da variação espacial de temperatura de um corpo cilíndrico a partir da solução analítica, de forma a validar uma a solução numérica. Este trabalho teve como objetivo a otimização da fase aquecimento dessas peças no processo de têmpera. Para tal, teve que conhecer a temperatura do gás no interior do forno, recorrendo a um termopar com um escudo radiativo, assim como o coeficiente de convecção, usado também na presente dissertação. Por fim, chegou a conclusão que os fatores que mais influenciam o tempo de aquecimento são a pressão do gás e, principalmente, a evolução temporal da temperatura das paredes do forno.

1.6 Estrutura da dissertação

A estrutura da dissertação encontra-se organizada da seguinte maneira:

No capítulo 2, serão apresentadas as equações que descrevem o processo de transferência de calor por condução em regime transiente num corpo de três dimensões e as suas respetivas soluções analíticas. Estas soluções irão servir de referência para avaliar, ainda neste capítulo, a qualidade das soluções obtidas pela simulação efetuada no software *Abaqus* e encontrar malhas e parâmetros ajustáveis do referido Software que permitam realizar as simulações numéricas da forma mais eficiente possível, i.e, otimizar a relação qualidade de resultados/ tempo de simulação. A informação assim obtida será posteriormente utilizada nas simulações subsequentes do aquecimento de diversas peças.

Posteriormente, no capítulo 3, encontram-se presentes as propriedades físicas e térmicas dos aços usados. O aço usado para o estudo de peças a temperar é o aço H11, enquanto que o aço usado para os blocos padrão é o aço AISI 304. As propriedades foram apresentadas sob a forma de expressão matemática em função da temperatura, e também, em tabelas usadas no software *Abaqus*.

No capítulo 4, apresentam-se as condições reais de funcionamento do forno de modo a tornar a simulação de aquecimento o mais próximo da realidade. De seguida, simularam-se 18 peças em aço H11 e os respetivos blocos padrão, apresentando os resultados obtidos. Através dos resultados obtidos, apresentou-se uma correlação entre dimensões características de peças e blocos padrão que permite selecionar o bloco padrão para uma dada peça a tratar, tendo em conta o efeito da emissividade do bloco padrão e da peça. Fez-se também referência ao aço AISI 310, com uma difusividade mais baixa que a do aço AISI 304, de forma a poder-se verificar as diferenças que surgiriam usando diferentes blocos padrão.

Por último, no capítulo 5 é apresentado os resultados obtidos de um ensaio experimental efetuado na empresa Ramada Aços S.A, bem como, um estudo dos erros obtidos ao usar a correlação geométrica encontrada para o caso estudado.

2. Validação da solução numérica

O presente capítulo tem como objetivo apresentar as soluções analíticas que irão servir de referência para avaliar a qualidade das soluções numéricas obtidas pela simulação efetuada no software *Abaqus*. Primeiramente, será apresentada uma breve introdução teórica, descrevendo as equações que permitiram chegar à solução analítica que servirá como referência com a qual serão comparadas as soluções numéricas. De seguida, obtiveram-se várias soluções numéricas com diferentes graus de refinamento de malha e distintos valores máximos de temperatura por passo no tempo. Por fim, fez-se uma análise das várias soluções numéricas encontradas comparando-as com a solução analítica de forma a validar o melhor modelo numérico.

2.1 Condução em regime transiente

A condução transiente é um problema de transferência de calor que surge quando as condições de fronteira do sistema são alteradas. É o caso em que transferência de calor é função, não somente do espaço, mas também do tempo e só termina quando se atinge um equilíbrio na distribuição espacial de temperatura (Incropera et al., 2013 p. 280). Os tratamentos térmicos são um exemplo de um processo de transferência de calor que varia no tempo, por isso, é importante fazer um estudo da condução transiente.

Tendo em conta as propriedades térmicas, pode-se inicializar o estudo da condução transiente nos blocos padrão tendo em atenção duas considerações. Primeiramente, pode-se assumir o caso mais simples em que a temperatura do bloco padrão praticamente não se altera espacialmente, ou seja, apresenta sempre uma temperatura uniforme em todo o seu corpo, variando única e exclusivamente com o tempo. Este tipo de abordagem ao problema designa-se por método do sistema global. A outra alternativa, mais complexa, consiste em considerar que a temperatura do bloco padrão é função do espaço e do tempo, suposição essa que irá fornecer a solução real do problema. Portanto, este tipo de abordagem conduzirá à solução analítica exata ou aproximada, no caso de se pretender uma solução simplificada.

No entanto, antes de explanar melhor as duas abordagens ao problema, serão definidos os seguintes números adimensionais:

Número de Biot, representa o quociente entre a resistência térmica de condução do corpo em estudo e a resistência térmica de convecção no fluido onde o mesmo se encontra. (Incropera et al., 2013 p. 284)

$$Bi = \frac{hL_c}{k} \quad (2.1a)$$

onde L_c o comprimento característico do corpo que se está a estudar e é dado pela razão entre o volume da peça, V , e a área em contacto com o fluido, A_s , de acordo com a seguinte expressão,

$$L_c = \frac{V}{A_s} \quad (2.1b)$$

Número de Fourier, é um número que representa a razão entre a taxa de condução de calor e a taxa de armazenamento de energia térmica (Incropera et al., 2013 p. 285).

$$Fo = \frac{\alpha t}{L_c^2} \quad (2.1c)$$

Onde α é a difusividade térmica.

2.1.1 Método do Sistema Global

Como já foi anteriormente mencionado, a solução que se obtém por este método de análise pelo sistema global, é uma solução em que a temperatura é apenas função do tempo, desprezando a sua distribuição espacial no corpo em estudo. A distribuição espacial de temperatura pode ser desprezada, ou seja, considerar uma temperatura uniforme em todo o seu corpo, desde que a sua resistência térmica de condução seja consideravelmente inferior à resistência térmica de convecção no meio onde o corpo está inserido. O número de Biot permite dizer o quão inferior deve ser a resistência térmica de condução relativamente à de convecção que, por este método, deve ser inferior a 0,1. Pela Figura 2-1 pode-se observar que quanto menor o número de Biot mais uniforme é a temperatura em todo o corpo e, por isso, mais próximo da solução admitida.

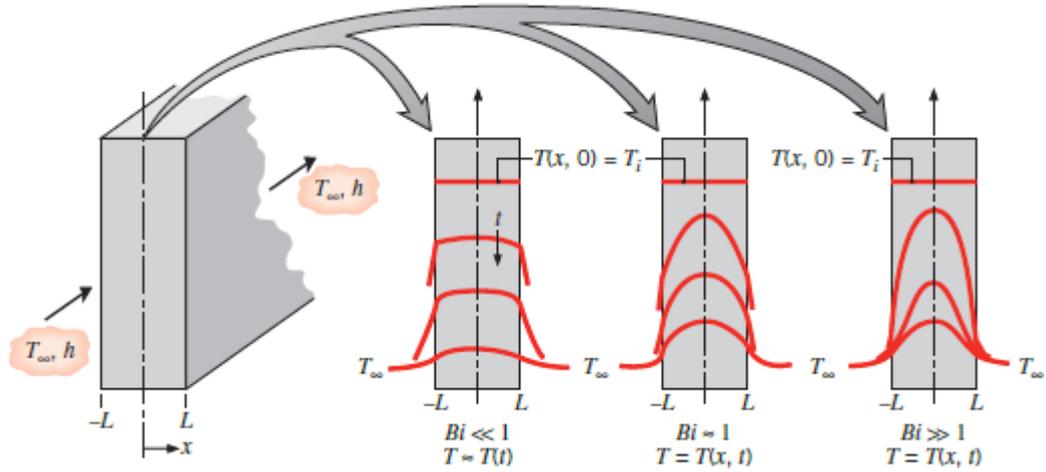


Figura 2-1 - Distribuição espacial de temperatura para diferentes números de Biot.

Posto isto, supondo que um determinado corpo está imerso num fluido mais quente, a equação de balanço energético é

$$-hA_s(T - T_\infty) = \rho V c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.2)$$

Fazendo $\theta = T - T_\infty$, então tem-se que:

$$\frac{\rho V c_p}{hA_s} \frac{\partial \theta}{\partial t} = -\theta \quad (2.3)$$

Integrando ambos os membros da equação, obtém-se a solução:

$$\frac{\theta}{\theta_i} = \frac{T(t) - T_\infty}{T_i - T_\infty} = \exp \left[- \left(\frac{hA_s}{\rho V c_p} \right) t \right] \quad (2.4)$$

Onde T é a temperatura do corpo imerso que varia ao longo do tempo, t , que inicialmente se encontrava a uma temperatura inicial T_i num fluido de temperatura T_∞ . Assim, tem-se a solução da temperatura apenas em função do tempo. Pode-se, ainda, escrever a constante de tempo, τ , deste sistema térmico, sendo ela o inverso da fração que multiplica pelo tempo no expoente,

$$\tau = \frac{\rho V c_p}{hA_s} = \frac{\rho L_c c_p}{h} \quad (2.5)$$

Dados os números adimensionais previamente definidos, o expoente da solução pode-se ser reescrito da seguinte forma:

$$\frac{hA_s t}{\rho V c_p} = \frac{ht}{\rho c_p L_c} = \frac{hL_c}{k} \frac{k}{\rho c_p} \frac{t}{L_c^2} = \frac{hL_c}{k} \frac{at}{L_c^2} = Bi \cdot Fo \quad (2.6)$$

Por fim, a solução pode ser apresentada pela seguinte maneira:

$$\frac{\theta}{\theta_i} = \frac{T(t) - T_\infty}{T_i - T_\infty} = \exp[-Bi \cdot Fo] \quad (2.7)$$

2.1.2 Solução multidimensional

A solução analítica multidimensional é usada quando se pretende conhecer o processo de transferência de calor de forma exata e quando o número de Biot é superior a 0,1. Portanto, esta solução analítica permite saber a temperatura do corpo em estudo em qualquer ponto do espaço e em qualquer instante de tempo.

Segundo o Incropera et al. (2013 p. 85), a equação que traduz o processo de condução de calor num corpo em ao longo do tempo no sistema de coordenadas cartesianas é

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.8)$$

Onde \dot{q} é a geração de calor do sólido.

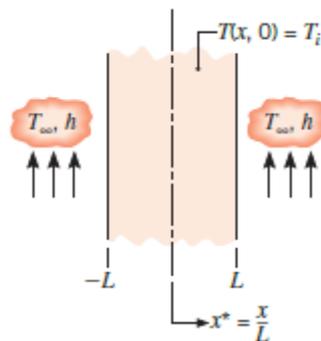


Figura 2-2 - Esquema de uma superfície infinita na direção y e z e simétrica com convecção na fronteira (Incropera, et al., 2013).

Com o objetivo de simplificar a equação deste sistema térmico, pode-se admitir que as trocas de calor se dão num plano infinitamente longo na direção y e z, conforme está apresentado na Figura 2-2, que a condutibilidade térmica é constante e que não há geração de calor. Desta forma, a equação simplificada reduz-se a

$$k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.9)$$

A equação pode ainda ser reescrita fazendo aparecer a difusividade térmica, α :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.10)$$

Para a resolução de um problema como o da Figura 2-2, é necessário definir:

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

$$T(x, 0) = T_i \quad (2.10a)$$

- **Condições de Fronteira:** a equação (2.10b) para uma superfície que é simétrica e a equação (2.10c) para uma superfície com convecção.

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = 0 \quad (2.10b)$$

$$-k \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=L} = h \cdot [T(L, t) - T_\infty] \quad (2.10c)$$

Este problema será então resolvido, mas antes demais, será vantajoso adimensionalizar a equação (2.9), o que origina os seguintes parâmetros:

$$\theta^* = \frac{\theta}{\theta_i} = \frac{T - T_\infty}{T_i - T_\infty} \quad (2.11a)$$

$$x^* = \frac{x}{L} \quad (2.11b)$$

$$t^* \equiv \frac{\alpha t}{L^2} \equiv Fo \quad (2.11c)$$

$$Bi = \frac{hL_c}{k} \quad (2.11d)$$

Tomando a equação (2.10) a seguinte forma:

$$\frac{\partial^2 \theta^*}{\partial x^{*2}} = \frac{\partial \theta^*}{\partial Fo} \quad (2.12)$$

As condições fronteiras do problema na sua forma adimensional ficam:

- Condição inicial:

$$\theta^*(x, 0) = 1 \quad (2.12a)$$

- Condições de fronteira espaciais:

$$\left. \frac{\partial \theta^*}{\partial x^*} \right|_{x^*=0} = 0 \quad (2.12b)$$

$$\left. \frac{\partial \theta^*}{\partial x^*} \right|_{x=L} = -Bi \theta^*(1, t^*) \quad (2.12c)$$

Por último, solucionando a equação (2.12) pelo método da separação de variáveis, obtêm-se a seguinte solução:

$$\theta^*(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \exp(-\xi_n^2 Fo) \cos(\xi_n x^*) , \text{ com } C_n = \frac{4 \sin(\xi_n)}{2\xi_n + \sin(2\xi_n)} \quad (2.13)$$

Onde ξ_n são os valores das raízes positivas que se encontram normalmente tabelados e provém da seguinte equação

$$\xi_n \tan(\xi_n) = Bi \quad (2.14)$$

Quando o número de Fourier, Fo , é superior a 0,2, a solução pode ser aproximada apenas usando o primeiro termo da série ($n = 1$) obtida pela solução exata (2.13).

$$\theta^*(r, t) = C_1 \exp(-\xi_1^2 Fo) \cos(\xi_1 x^*) \quad (2.15)$$

De forma análoga, a equação (2.16) representa a solução analítica para um sistema de coordenadas cilíndricas, com o raio adimensionalizado da seguinte maneira.

$$\theta^*(r, t) = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \exp(-\xi_n^2 Fo) J_0(\xi_n r^*) , \text{ com } C_n = \frac{2}{\xi_n} \cdot \frac{J_1(\xi_n)}{J_0^2(\xi_n) + J_1^2(\xi_n)} \quad (2.16)$$

$$r^* = \frac{r}{r_0} \quad (2.17)$$

Em que as raízes ξ_n , agora, são provenientes da seguinte equação:

$$\xi_n \frac{J_1(\xi_n)}{J_0(\xi_n)} = Bi \quad (2.18)$$

Sendo J_1 e J_0 , funções de Bessel de 1ª espécie de ordem 0 e 1, respetivamente, representada pela equação (2.18) e pelo gráfico e tabela da Figura 2-3.

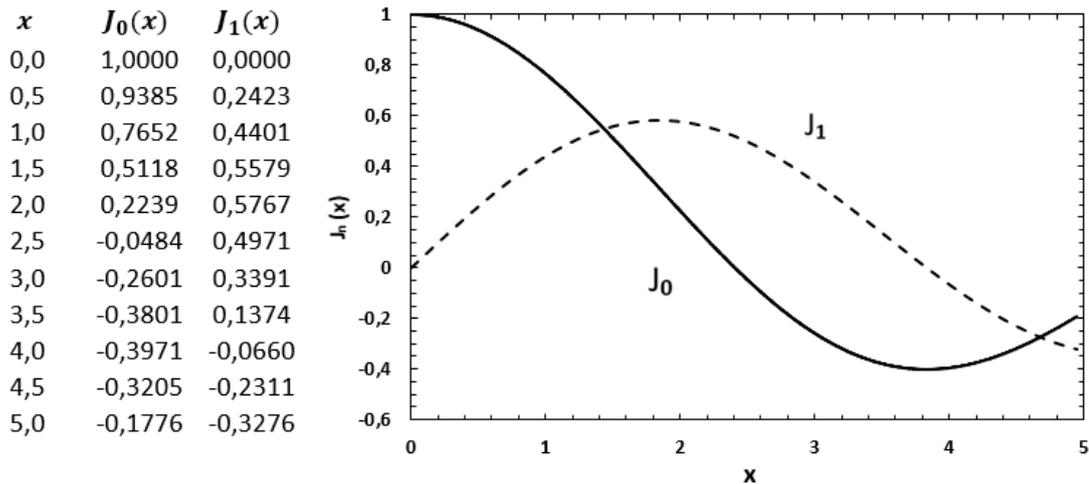


Figura 2-3- Representação das funções de Bessel de 1ª espécie de ordem 0 e 1.

2.1.3 Condução transiente num tronco de cilindro

Anteriormente, resolveu-se analiticamente o problema da condução em regime transiente, assumindo que havia trocas de calor num plano infinitamente longo na direção y e z . Contudo, a solução analítica obtida é apenas unidimensional, sendo função de x e do tempo. Nesta secção, será apresentada a solução analítica para condução em duas dimensões, i.e., num tronco de cilindro. Para tal, deve-se recorrer ao princípio da sobreposição de soluções, ou seja, a solução bidimensional será o produto de duas soluções apenas numa determinada dimensão.

Na Figura 2-4 pode-se visualizar um exemplo onde é aplicado o princípio da sobreposição. Este exemplo trata de um problema de condução transiente de um corpo cilíndrico de raio r_0 , altura a , temperatura uniforme inicial T_i , sem geração de calor e que está imerso num fluido com temperatura T_∞ e coeficiente de convecção h .

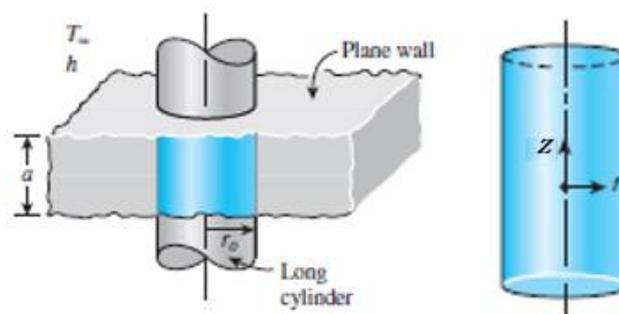


Figura 2-4 - Condução em regime transiente de um cilindro pelo princípio da sobreposição (Çengel, et al., 2015). Posto isto, a solução bidimensional (r e z) será dada pela multiplicação da solução exata de um dado plano infinito que intersecta um outro plano de um cilindro infinito, ou seja, matematicamente pode ser expressa da seguinte maneira:

$$\theta^*(z, r, t)|_{cilindro} = \theta^*(z, t)|_{plano \infty} \times \theta^*(r, t)|_{cilindro \infty} \quad (2.19)$$

Onde $\theta^*(z, t)$ e $\theta^*(r, t)$ são soluções analíticas unidimensionais:

$$\theta^*(z, t)|_{plano \infty} = \left(\frac{T - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} \right)_{plano \infty} \quad (2.19a)$$

$$\theta^*(r, t)|_{cilindro \infty} = \left(\frac{T - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} \right)_{cilindro \infty} \quad (2.19b)$$

Assim, pode-se determinar a temperatura em qualquer ponto espacial do cilindro e em qualquer instante de tempo, fazendo a interseção dos dois planos, tendo como solução a equação (2.19c)

$$\theta(z, r, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4\sin(\xi_n)}{2\xi_n + \sin(2\xi_n)} e^{-\xi_n^2 \cdot Fo} \cos(\xi_n x^*) \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{\xi_n} \cdot \frac{J_1(\xi_n)}{J_0^2(\xi_n) + J_1^2(\xi_n)} e^{-\xi_n^2 \cdot Fo} \cdot J_0(\xi_n \cdot r^*) \quad (2.19c)$$

2.2 Análise da solução analítica

Uma vez mostrada a solução analítica para a condução em regime transiente multidimensional, é necessário determiná-la com o objetivo de validar as soluções que serão obtidas recorrendo à simulação no software *Abaqus*. Para tal, as propriedades térmicas do material e as condições ambientais onde este se insere devem ser as mesmas em ambas as soluções para que haja uma comparação coerente.

Assim sendo, pretende-se fazer a análise de uma solução analítica referente ao aquecimento num forno de um cilindro em aço H11 que posteriormente irá servir como padrão. Para isto, utilizou-se a peça cilíndrica oca assinalada com a letra “A”, na anterior Figura 1-1 como ponto de partida. Com o intuito de simplificar o problema, de forma a ser possível obter uma solução analítica, considerou-se que a referida peça se assemelha a um cilindro maciço com um raio, r_0 , de 82,5 mm e uma altura, a de 500 mm, cujas propriedades térmicas do material e as condições atmosféricas se encontram na seguinte Tabela 2-1.

Tabela 2-1 - Propriedades térmicas do material e da envolvente usadas para a determinação da solução analítica

Propriedades térmicas do material		
k	28,65	$[\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}]$
c_p	476,5	$[\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}]$
ρ	7765	$[\text{kgm}^{-3}]$
Propriedades da envolvente		
T_i	25	$[\text{°C}]$
T_∞	900	$[\text{°C}]$
h	350	$[\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}]$

É importante salientar que o coeficiente de convecção foi escolhido considerando as condições interiores de um forno para tratamentos térmicos na fase de aquecimento, tendo um valor de $350 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$. Este valor representa pois um caso extremo e é por isso o ideal para posteriormente se testar as soluções numéricas.

Como a solução analítica expressa pela equação (2.13) se trata de uma série infinita de termos, é importante ter em conta o erro de truncadura cometido ao considerar a série finita. Segundo o Pedro Maia (2013), o maior erro dá-se quando se pretende analisar a temperatura nos vértices do sólido, visto que é aí onde se encontram os maiores gradientes de temperatura. Este autor também defendeu que o erro da solução analítica é maior nos 10 primeiros segundos durante a fase de aquecimento. Contudo, ele argumentou que o erro pode ser diminuído e é tanto menor quanto maior o número de raízes usadas, havendo uma boa aproximação quando são usadas mais de 25 raízes. Então, efetuando os cálculos com 50 raízes, nos pontos indicados conforme a Figura 2-5, pôde-se apresentar na Figura 2-6 a evolução da temperatura ao longo do tempo no centro e na extremidade do cilindro a partir dos 10 segundos.

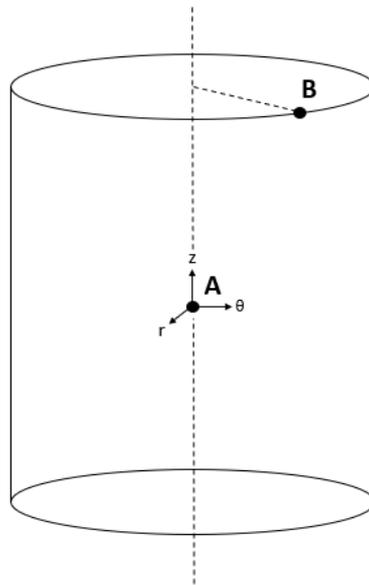


Figura 2-5 - Esquema do cilindro e visualização dos pontos usados para a solução analítica e numérica.

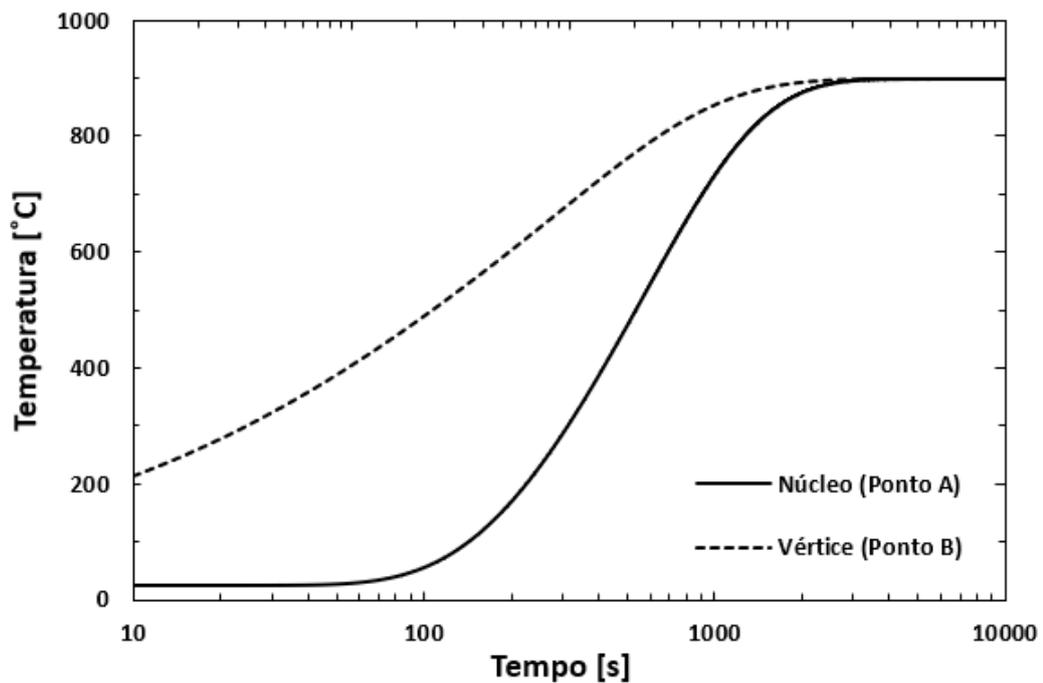


Figura 2-6 - Evolução da temperatura ao longo do tempo no centro e vértice do cilindro.

Como seria de esperar, na Figura 2-6 pode-se constatar que a temperatura do núcleo evolui de forma mais lenta do que a temperatura num dado ponto do vértice do cilindro. Isto porque, calculado o número de Biot com base na equação (2.1a), conclui-se que vale cerca de 1,01, ou seja, o cilindro terá uma variação espacial de temperatura que não pode ser desprezada, dado que o número de Biot possui um número superior a 0,1.

2.3 Análise e validação solução numérica

O Abaqus é um software que permite a análise de sistemas físicos complexos através do método de elementos finitos, visto que nem sempre é possível obter-se uma solução analítica ou experimental. Este método foi desenvolvido discretizando as equações diferenciais que descrevem o problema fisicamente. A discretização origina um elevado número de equações algébricas que são resolvidas pelo software. A solução é obtida fazendo o cálculo em cada um dos elementos finitos representados por pontos discretos (nós) que estão interligados entre si pelas condições de fronteira, formando um sistema “quase” contínuo (malha). Assim, este software permite simular problemas de transferência de calor, o que é bastante útil para a análise e estudos de otimização de tratamentos térmicos.

Este software resolve problemas de transferência de calor usando três abordagens diferentes, dependendo do grau de complexidade: Análise térmica desacoplada, análise térmica sequencial, e análise completamente acoplada. Neste caso, será feita uma análise térmica desacoplada, ou seja, uma análise onde se obtém apenas o campo de temperaturas, independentemente dos campos de tensão e deformação do corpo em estudo. As outras abordagens referem-se a problemas mais complexos (têm em conta o campo de tensões e deformação) que não serão do interesse desta dissertação nem interferem com o erro da solução numérica obtida.

Posto isto, para proceder à simulação de um modelo de malha no software *Abaqus*, tomaram-se os seguintes passos:

1. **Criar o sólido:** o cilindro maciço e homogéneo;
2. **Definir material:** aço com as propriedades presentes na Tabela 2-1;
3. **Selecionar o tipo de problema:** Transferência de calor em regime transiente;
4. **Escolher o set-up do tempo da simulação:** Fez-se apenas a simulação para os 100 primeiros segundos, de forma a diminuir o tempo de cálculo e estudar o erro durante esta fase, que segundo o estudo de Pedro Maia (2013), é máximo. O incremento inicial de tempo usado nas simulações foi de 0,1s, com um incremento mínimo de 0,001s e um máximo de 5s;
5. **Escolher máxima variação de temperatura por passo no tempo:** Esta opção permite que a temperatura não varie mais do que um determinado valor definido por passo no tempo. Quanto menor esse valor mais tempo demora o processo de cálculo, pois o programa terá de fazer mais iterações de forma a que a solução convirja respeitando essa condição;

6. **Definir as condições de fronteira:** Convecção em toda a superfície do cilindro imerso num meio a 900°C;
7. **Definir as condições iniciais:** Temperatura inicial do cilindro de 25°C;
8. **Escolher elementos finitos:** tipo hexaédricos;
9. **Criar malha:** malha de forma que seja mais refinada no sentido axial e no sentido radial em direção ao exterior, como se pode observar na Figura 2-7. Isto deve-se ao facto de ser nesta zona que o gradiente de temperaturas é mais elevado e, conseqüentemente, um maior refinamento é necessário. Assim, com este refinamento otimiza-se a malha colocando mais elementos onde estes são necessárias.

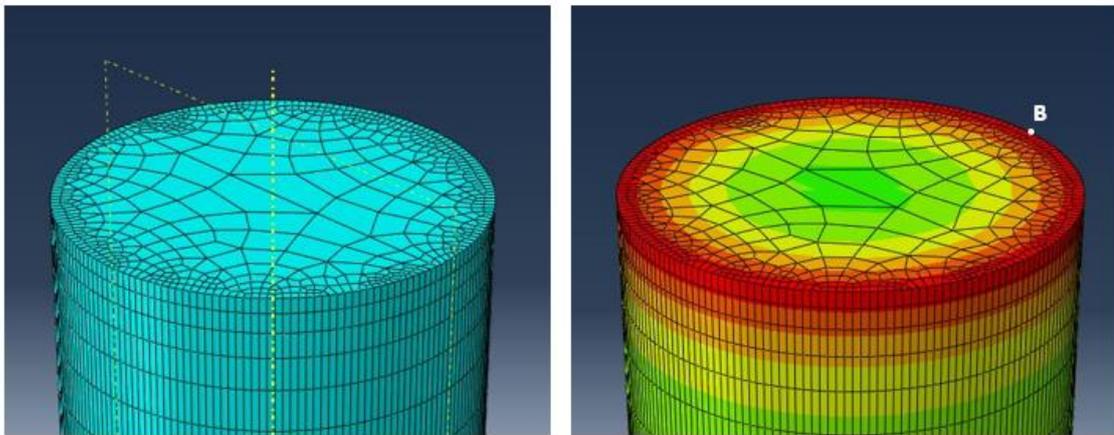


Figura 2-7 - Malha refinada no sentido radial e no sentido do eixo concêntrico do cilindro.

Uma vez seguidos estes passos, efetuou-se o estudo dos vários modelos de malhas de forma a otimizar a simulação, registando-se os resultados a partir dos 10 primeiros segundos do ponto B, aresta circunferencial do cilindro (zona crítica). Usando um incremento inicial de tempo de 0,1s, obtiveram-se os resultados patentes na Tabela 2-2, onde para cada tipo de malha 1,2,3 e 4 com o mesmo refinamento, obtiveram-se 2 modelos de malha diferindo apenas na variação máxima de temperatura por passo no tempo.

Tabela 2-2 - Malhas usadas para obtenção da solução numérica e sua designação

Nº da Malha	1	2	3	4
Nº de Elementos	23670	71460	99180	115710
Variação máxima de temperatura 10°C	Malha 1.10	Malha 2.10	Malha 3.10	Malha 4.10
Variação máxima de temperatura 5°C	Malha 1.05	Malha 2.05	Malha 3.05	Malha 4.05

Na Figura 2-8, pode ver-se o grau de refinamento dos 4 tipos de malha estudadas, em que o número de elementos finitos é de 23670, 71460, 99180 e 115710, pela respetiva ordem apresentada.

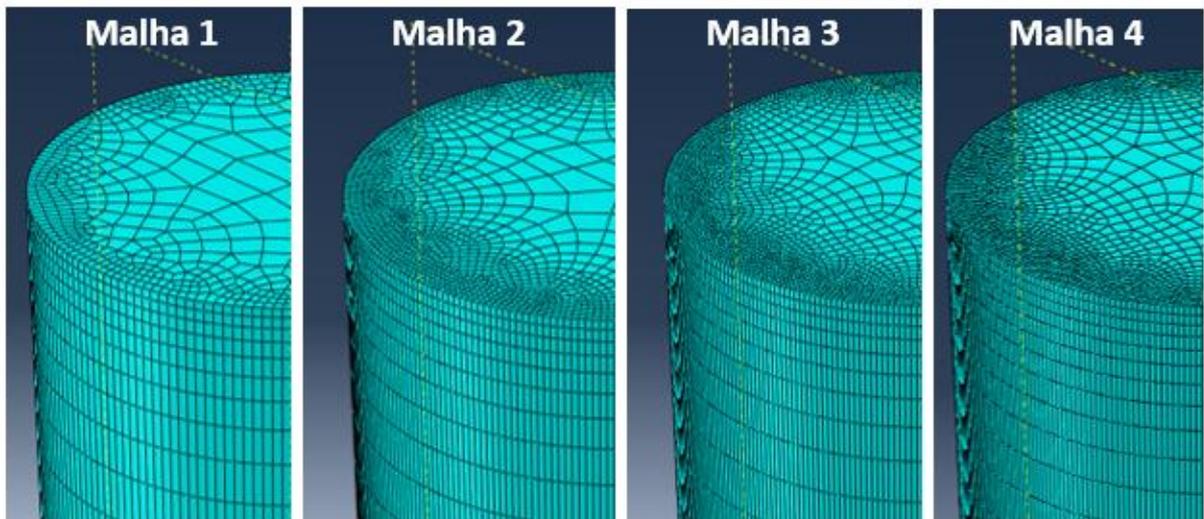


Figura 2-8 - Grau de refinamento dos 4 tipos de malha estudadas.

Na tabela 2-3, encontram-se presentes os tempos de simulação das malhas estudadas até aos 100 segundos de aquecimento para cada variação máxima de temperatura definida por passo no tempo (5°C e 10°C), assim como os erros obtidos dessas soluções, máximos e médios.

Tabela 2-3 - Resultados obtidos no estudo das malhas até os primeiros 100 s de aquecimento

Nº da Malha	1	2	3	4
Varição máxima de temperatura [°C]	10			
Tempo de simulação (CPU) [s]	168	515	593	650
Erro máximo	1,53%	1,24%	1,18%	1,06%
Erro médio	0,79%	0,68%	0,68%	0,61%
Varição máxima de temperatura [°C]	5			
Tempo de simulação (CPU) [s]	329	923	1053	1205
Erro máximo	1,26%	1,03%	0,98%	0,87%
Erro médio	0,61%	0,54%	0,53%	0,46%

Observando a Tabela 2-3 pode-se concluir que à medida que o número de elementos da malha aumenta, menor é o erro e mais lenta é a simulação. Tal ocorre porque quanto maior o número de elementos, mais cálculos o software realiza, sendo a solução mais próxima da real. O mesmo sucede quando se define uma menor variação máxima de temperatura por passo no tempo. Apesar de ambas terem o efeito de aumentar o tempo de simulação, o refinamento da malha é a opção mais vantajosa.

O erro máximo é calculado a partir das temperaturas registadas em ambas as soluções, analítica e numérica, no mesmo ponto espacial e no mesmo instante de tempo aplicando a equação (2.20). O erro médio é simplesmente a média aritmética dos erros registados dos 10 aos 100 segundos

$$\frac{|T_{analítica} - T_{numérica}|}{T_{analítica}} \quad (2.20)$$

Apesar das diferenças, todos os modelos de malha apresentam um erro médio abaixo de 1% o que significa que, embora haja erros superiores a 1%, estes tendem a diminuir ao longo do tempo. Analisando os erros presentes na Tabela 2-3, conclui-se que os modelos de malhas que melhor descrevem o aquecimento do cilindro são os modelos da Malha 3 e da Malha 4, dado que registam os menores erros, o que implica, contudo, maior tempo de simulação, ao contrário da Malha 1 e a Malha 2. Contudo, com o objetivo de alcançar um erro máximo inferior a 1%, constatou-se que a Malha 3.05 é melhor malha para o menor tempo de simulação possível.

Posto isto, Figura 2-8 pode-se comparar a evolução temporal de temperatura no vértice e no centro do cilindro obtida através da solução analítica com as curvas homólogas obtidas pela

solução numérica utilizando a Malha 3.05, concluindo que são praticamente coincidentes. Na Figura 2-9, pode-se observar mais detalhadamente essa evolução, onde erro inicialmente é mais elevado. Ao longo do tempo, as curvas vão se aproximando cada vez mais porque, como foi referido anteriormente, o erro vai decaindo como é visível na Figura 2-10. O máximo erro é sempre registado nos instantes iniciais, começando a diminuir desde então, indo dos 0,98% aos 0,30%.

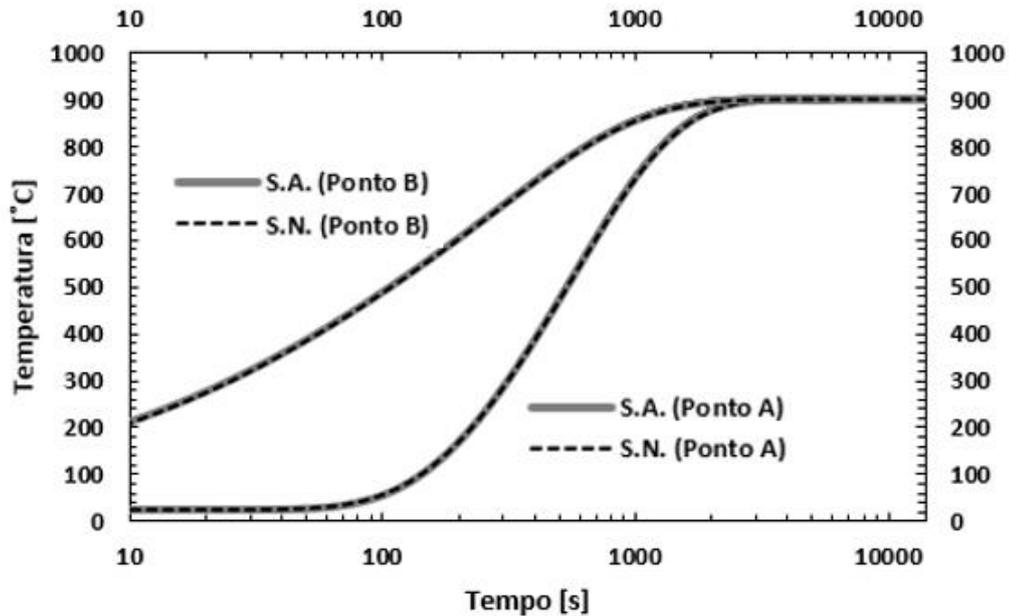


Figura 2-9 - Evolução da temporal da temperatura da solução analítica e da solução numérica.

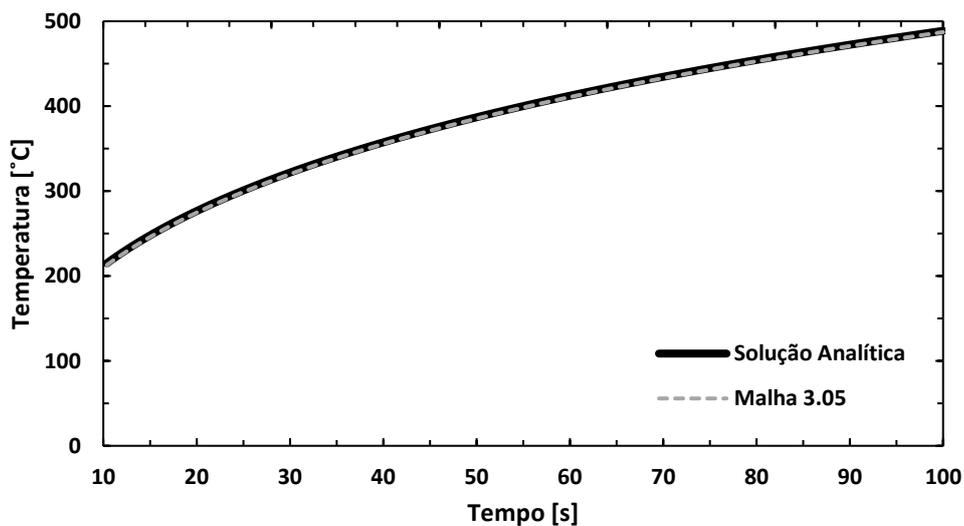


Figura 2-10 - Evolução temporal da temperatura da solução analítica e da solução numérica, no vértice do cilindro.

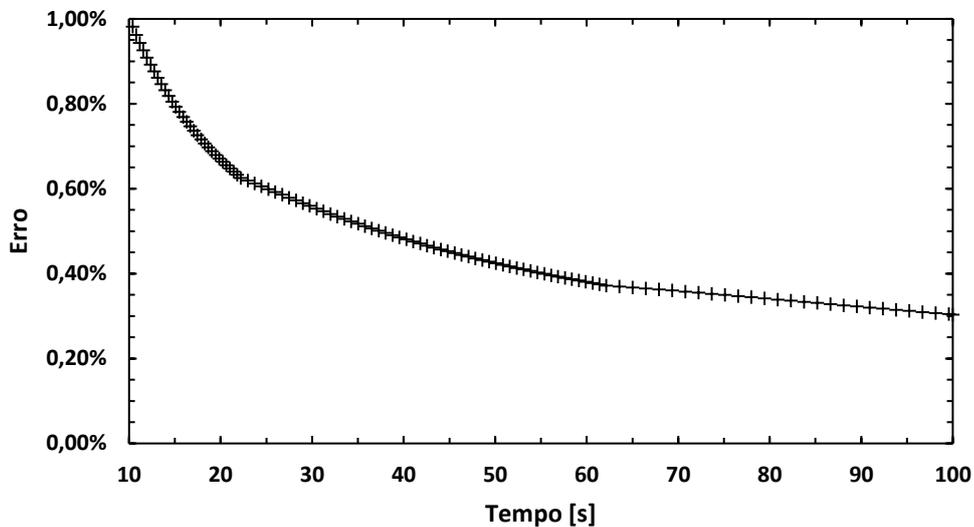


Figura 2-11 - Evolução temporal da temperatura da solução numérica, no vértice do cilindro.

Na Figura 2-10, verifica-se, também, que ao longo do tempo a simulação vai dando resultados cada vez mais espaçados no tempo porque, inicialmente, os incrementos no tempo são muito pequenos e os cálculos iterativos decorrem de modo a respeitarem a condição de máxima variação de temperatura por passo no tempo. Uma vez que ao longo do tempo a diferença de temperaturas é cada vez menor, a condição pode ser respeitada em intervalos de tempo maiores até que, a determinada altura, os incrementos do tempo atingem o máximo pré-definido de 5s. No entanto, para efetuar simulações de 4h de aquecimento, o incremento máximo é alterado de 5 para 100 segundos de forma a tornar o processo mais célere sem alterar a evolução do erro. Assim, o tempo de uma simulação de 4 horas de aquecimento do cilindro para a malha 3.05, reduziu de cerca de 4h04min para um tempo de simulação que ronda 1h06min.

Em síntese, a malha que melhor representa o processo de aquecimento do cilindro no forno no menor tempo possível, é a Malha 3.05. Esta malha regista um erro máximo inferior a 1%, decaindo ao longo do tempo, contendo 99180 elementos, isto é, tem uma densidade média de elementos por volume próximos dos 9,27 por centímetro cúbico.

Nas próximas simulações de peças reais, procurar-se-á, pois, construir malhas que tenham uma densidade e distribuição de elementos semelhante à da malha 3.05.

3. Propriedades dos aços usados

O atual capítulo tem o intuito de apresentar as propriedades térmicas dos aços usados, aço H11 e aço AISI 304, relevantes para o problema em análise, em função da temperatura, por meio de expressões matemáticas e tabelas. Para além disso, foi feita uma experiência laboratorial para a determinação experimental da emissividade do aço AISI 304. Essas propriedades terão grande utilidade, pois serão futuramente usadas nas posteriores simulações no software *Abaqus*. Assim, as simulações representarão melhor o que acontece durante o processo de têmpera.

3.1 Propriedades do aço H11

O aço usado nos tratamentos térmicos em vácuo é, como já foi referido, o AISI H11, segundo a norma americana, ou EN X36CrMoV5-1, segundo a norma europeia ou DIN 1.2343 de acordo com a norma alemã.

Trata-se de um aço para trabalho a quente, isto é, trabalho em que uma ferramenta está sujeita a uma temperatura mínima permanente de 200°C. (Soares, 2009, p. 135) Portanto, o aço H11 tem como principais aplicações: fieiras para extrusão de alumínio, moldes para plásticos e moldes para fundição injetada.

As propriedades deste aço H11 são muito semelhantes às do aço H13, fruto de uma composição química também ela semelhante, apresentando, no entanto, o primeiro uma melhor dureza. Assim, e recorrendo aos dados da dissertação do Pedro Maia (2013) as propriedades físicas e mecânicas do aço H13 podem ser observadas na Tabela 3-1, enquanto que a composição química dos aços H13 e H11 podem ser observadas na Tabela 3-2, segundo o catálogo de aços da empresa *Ramada Aços S.A.* (2016).

Tabela 3-1 - Propriedades físicas e mecânicas do aço H13 à temperatura ambiente retirada da dissertação do Pedro Maia (2013)

Coeficiente de expansão, α_e	$10,2 \times 10^{-6} - 10,7 \times 10^{-6}$	$[\text{°C}^{-1}]$
Calor específico, c_p	467 – 486	$[\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}]$
Condutividade térmica, k	27,5 – 29,8	$[\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}]$
Massa volúmica, ρ	7690 – 7840	$[\text{kgm}^{-3}]$
Módulo de elasticidade, $E_{\text{aço}}$	210	$[\text{GPa}]$
Coeficiente de Poisson, ν	0,3	$[-]$

Tabela 3-2 - Composição química do aço H13 e do aço H11

	Carbono	Silício	Manganês	Crómio	Molibdénio	Vanádio
Aço H13	0,40%	1,00%	0.40%	5,20%	1,30%	1,00%
Aço H11	0,36%	0,30%	0,30%	5,00%	1,30%	0,50%

Com base nos dados de fichas técnicas do aço H11 de diferentes fabricantes (presentes no Anexo A), pode-se expressar matematicamente a variação das propriedades térmicas, valores médios do conjunto das várias fontes, com a temperatura, T [$^{\circ}\text{C}$], com dados retirados num intervalo de 20°C a 800°C .

Condutividade térmica, k , T [$^{\circ}\text{C}$]

$$6,7410 \times 10^{-8}T^3 - 9,4762 \times 10^{-5}T^2 + 3,7932 \times 10^{-2}T + 26,592 \quad [\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}] \quad (3.1)$$

Coeficiente expansão, α_e , usando 20°C como temperatura de referência, T [$^{\circ}\text{C}$]

$$1,2750 \times 10^{-9}T^3 - 3,0818 \times 10^{-5}T^2 + 5,2954T + 1,117710^{-1} \quad [\text{°C}^{-1}] \quad (3.2)$$

Calor específico, c_p , T [$^{\circ}\text{C}$]

$$0,2126 \times T + 453,98 \quad [\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}] \quad (3.3)$$

Massa-volúmica, ρ , T [$^{\circ}\text{C}$]

$$-3,3809 \times 10^{-4}T + 7,8207 \quad [\text{kgm}^{-3}] \quad (3.4)$$

Uma vez que o software *Abaqus* tem um tempo de cálculo superior ao serem inseridas as equações que descrevem a variação das propriedades térmicas em função da temperatura, indicou-se os valores das propriedades no software de forma tabelada para cada temperatura, como pode ser observado na Tabela 3-3.

Tabela 3-3 - Propriedades térmicas do aço H11 a diferentes temperaturas

Temperatura [°C]	Condutividade térmica [Wm ⁻¹ K ⁻¹]	calor específico [Jkg ⁻¹ K ⁻¹]	Massa- volúmica [10 ³ kgm ⁻³]
20 (293K)	27,3	458	7,81
50 (323K)	28,3	465	7,80
100 (373K)	29,5	475	7,79
150 (423K)	30,4	486	7,77
200 (473K)	30,9	497	7,75
250 (523K)	31,2	507	7,74
300 (573K)	31,3	518	7,72
350 (623K)	31,2	528	7,70
400 (673K)	30,9	539	7,68
450 (723K)	30,6	550	7,67
500 (773K)	30,3	560	7,65
550 (823K)	30,0	571	7,63
600 (873K)	29,8	582	7,62
650 (923K)	29,7	592	7,60
700 (973K)	29,8	603	7,58
750 (1023K)	30,2	613	7,57
800 (1073K)	30,8	624	7,55

A emissividade é outra propriedade que varia significativamente com a temperatura. Recorrendo aos dados da dissertação do Pedro Maia (2013), os valores da emissividade do aço H13, cujo acabamento superficial é muito semelhante ao aço H11, estão representados por intervalos de temperatura na Tabela 3-4. Desta forma, considerou-se que para o presente trabalho, a emissividade do aço H11 será a mesma do aço H13.

Tabela 3-4 - Valores da emissividade por degraus de temperatura para o aço H13

Intervalos de Temperatura	Emissividade [-]
15°C a 650°C	0,17
650°C a 750°C	0,21
750°C a 850°C	0,22
850°C a 1030°C	0,46

3.2 Propriedades do aço AISI 304

Como já foi dito anteriormente, o bloco padrão deve representar a peça mais crítica, devendo ser constituído por um material com baixa condutibilidade térmica de forma a ter dimensões mais pequenas que a peça homóloga real. Assim, o processo de aquecimento do bloco será representativo do tratamento térmico de peças em aço H11 com as maiores dimensões na carga. Posto isto, o seu material será constituído pelo aço inox AISI 304 ou X5CrNi18-10. A composição química deste aço encontra-se na Tabela 3-5 e as suas propriedades físicas na Tabela 3-6, segundo o trabalho de Committee *et al.* (2008).

Tabela 3-5 - Composição química do aço AISI 304 (Catálogo Aços, 2016)

	Carbono	Silício	Manganês	Crómio	Níquel
AISI 304	≤ 0,08%	≤ 1,00%	≤ 2,00%	18,50%	9,50%

Tabela 3-6 - Propriedades térmicas do aço AISI 304.

Propriedades térmicas T [K]	
Calor específico, c_p	$0,443 + 2 \times 10^{-4}T - 8 \times 10^{-10}T^2$ [K]kg ⁻¹ K ⁻¹
Condutividade térmica, k	$10,33 + 15,4 \times 10^{-3}T - 7,0 \times 10^{-7}T^2$ [Wm ⁻¹ k ⁻¹]
Massa volúmica, ρ	$8020 - 50,1 \times 10^{-2}(T - 298)$ [kgm ⁻³]

As expressões desta Tabela 3-6 são em função de temperatura, T , em Kelvin, sendo válidas para uma gama de temperaturas entre 298K a 1727K e no caso do calor específico e da condutividade térmica entre 298K a 1633K. Então, como anteriormente explicado, apresentam-se os valores tabelados das propriedades térmicas na Tabela 3-7 que serão introduzidos no programa *Abaqus*.

Tabela 3-7 - Propriedades térmicas do aço AISI 304 a diferentes temperaturas

Temperatura [°C]	Condutividade térmica [Wm ⁻¹ K ⁻¹]	calor específico [Jkg ⁻¹ K ⁻¹]	Massa- volúmica [10 ³ kgm ⁻³]
20 (293K)	14,8	502	8,02
50 (323K)	15,2	508	8,03
100 (373K)	16,0	517	8,06
150 (423K)	16,7	527	8,08
200 (473K)	17,5	537	8,11
250 (523K)	18,2	547	8,13
300 (573K)	18,9	557	8,16
350 (623K)	19,7	567	8,18
400 (673K)	20,4	577	8,21
450 (723K)	21,1	587	8,23
500 (773K)	21,8	597	8,26
550 (823K)	22,5	607	8,28
600 (873K)	23,2	617	8,31
650 (923K)	23,9	627	8,33
700 (973K)	24,7	637	8,36
750 (1023K)	25,4	647	8,38
800 (1073K)	26,0	657	8,41

A variação da emissividade deste aço com a temperatura pode ser encontrada num estudo publicado por Roger et al. (1979), onde se apresentam valores da emissividade que podem ser expressos pela seguinte equação, retirada da dissertação de Pedro Pereira (2017), onde a temperatura, T , se encontra em Kelvin.

$$\varepsilon = 0,0394 + 2,13 \times 10^{-4}T - 6,42 \times 10^{-8}T^2 \quad (3.5)$$

Os valores da emissividade também foram determinados experimentalmente. As experiências foram realizadas com recurso aos equipamentos representados pelas seguintes letras A, B, C e D, presentes em baixo na Figura 3-1, sendo:

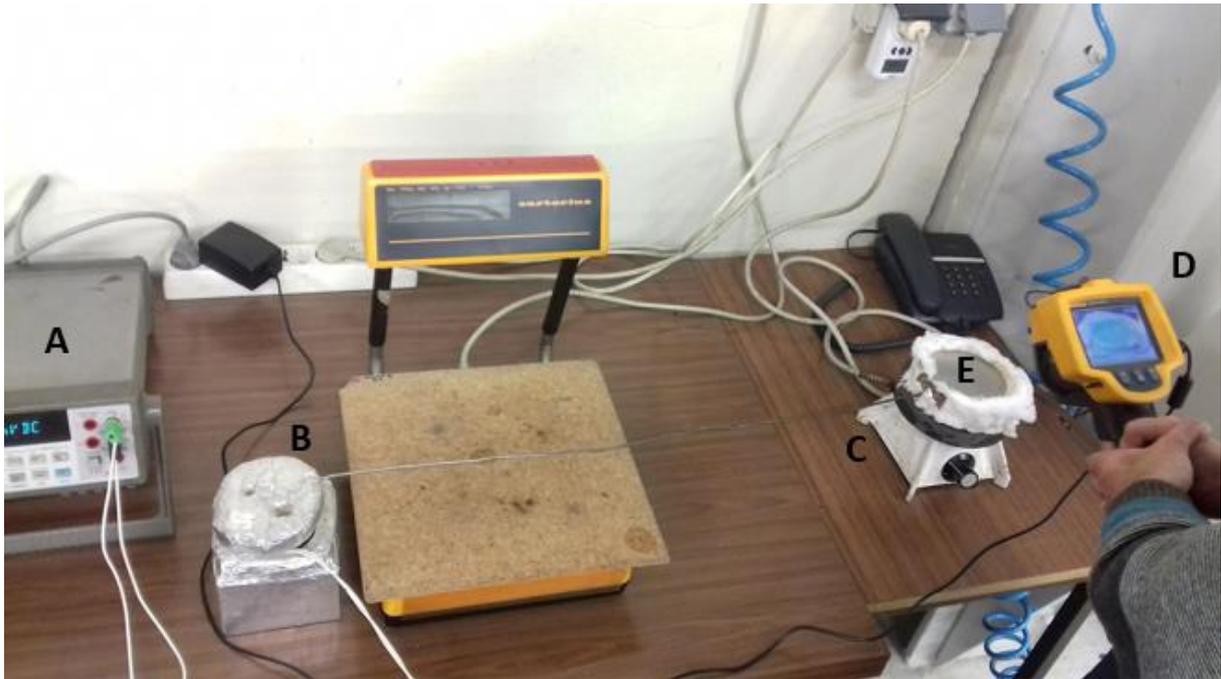


Figura 3-1 - Ensaio de medição da emissividade do disco em aço AISI 304.

- A. Voltímetro, usado para medir a diferença de potencial entre a junta quente e a junta fria, cujos valores eram traduzidos de milivoltes para graus Celcius usando a função *VoltTC* do *EES (Engineering Equation Solver)*.
- B. Caixa térmica com gelo fundente, usada para criar uma junta-fria a uma temperatura constante de 0°C;
- C. Disco elétrico, utilizado para aquecer o disco em aço AISI 304 (E) que estava lateralmente isolado com fibra de vidro;
- D. Câmara de infravermelhos Fluke Ti25, usada para medir a temperatura à superfície sendo a emissividade desta um parâmetro ajustável.

Nestas experiências foi usado um termopar tipo K, cuja junta-quente foi colocada no núcleo do disco em aço AISI 304, que foi sendo aquecido pelo disco elétrico com a potência máxima de 1300W. O método de medição consistiu num processo iterativo, no qual o valor da temperatura fornecido pelo termopar, no interior do disco, era usado para determinar temperatura à superfície do disco, através das equações de transferência de calor presentes nas funcionalidades do *EES*, e esta temperatura à superfície teria de coincidir com o valor medido pela câmara de infravermelhos, alterando para o efeito o valor da emissividade.

O disco em aço AISI 304, foi aquecido desde dos 22°C até aos 350°C, uma vez que o termómetro Fluke Ti25 Infrared Camera tem uma gama de medição de -20°C a 350°C tendo uma precisão de ± 2 °C ou 2% (o que for maior).

Sabendo que a emissividade é altamente influenciada pelo estado superficial do disco em aço AISI 304, efetuaram-se dois ensaios experimentais medindo os vários valores da emissividade para o disco com uma superfície reluzente, estado novo do aço, e com uma superfície baça, estado superficial normal do aço após vários revenidos.

Primeiramente, apresentam-se os resultados para o disco com superfície reluzente. A qualidade desta superfície é, pois, típica dos blocos padrão que ainda não foram sujeitos a nenhum tratamento térmico. Assim, obtiveram-se os seguintes resultados:

Tabela 3-8 - Emissividade da superfície reluzente determinada experimentalmente e pela equação (3.5)

Temperatura [°C]	Emissividade	
	Experimental	Literatura
50	0,10	0,10
142	0,12	0,12
155	0,11	0,12
168	0,11	0,12
180	0,11	0,12
211	0,11	0,13
225	0,12	0,13
273	0,12	0,14
304	0,12	0,14
333	0,12	0,14
352	0,12	0,15
Média	0,12	0,13

Observando os dados da Tabela 3-8, conclui-se que os valores médios obtidos experimentalmente e teoricamente são valores próximos, podendo corroborar a expressão (3.5) para a emissividade do aço AISI 304. Portanto, a expressão (3.5) refere-se à emissividade do aço quando este apresenta uma superfície brilhante.

Porém, com o decorrer do tempo, as superfícies dos blocos padrão vão se tornando mais baças, pois estes serão submetidos, durante o seu tempo útil, a sucessivos tratamentos térmicos. Então, para que o disco em aço AISI 304 apresentasse uma superfície mais baça, teve de ser submetido a vários tratamentos térmicos na empresa *Ramada Aços*. Deste modo, o disco deverá apresentar valores típicos da emissividade dos blocos padrão usualmente utilizados.

Tabela 3-9 - Emissividade da superfície baça determinada experimentalmente e pela equação (3.5)

Temperatura [°C]	Emissividade		
	Experimental	Literatura Eq. (3.5)	Teórico Eq. (3.6)
61,2	0,20	0,10	0,14
73,1	0,20	0,11	0,14
85	0,20	0,11	0,15
97	0,19	0,11	0,15
109	0,18	0,11	0,15
121	0,21	0,11	0,16
182,4	0,17	0,12	0,17
217	0,16	0,13	0,18
256	0,16	0,13	0,19
268,2	0,16	0,14	0,19
280,2	0,16	0,14	0,19
292,2	0,17	0,14	0,19
304,1	0,16	0,14	0,20
316	0,16	0,14	0,20
327,8	0,16	0,14	0,20
339,6	0,16	0,15	0,20
Média	0,18	0,12	0,18

Conforme se pode ver na Tabela 3-9, a emissividade experimental regista uma média de 0,18, enquanto que a emissividade que provem da aplicação da equação (3.5) é de 0,12. Assim, confirma-se objetivamente que a superfície se encontra mais baça.

No entanto, com o propósito de representar a emissividade para uma maior gama de temperaturas, aplicou-se a seguinte equação:

$$\frac{1}{1,273} = \frac{\left(\frac{1 - \varepsilon_{II}}{A_1/A_2 \cdot \varepsilon_{II}}\right) + \left(\frac{1}{A_1/A_2 \cdot F_{12}}\right) + \left(\frac{1 - \varepsilon_p}{\varepsilon_p}\right)}{\left(\frac{1 - \varepsilon_I}{A_1/A_2 \cdot \varepsilon_I}\right) + \left(\frac{1}{A_1/A_2 \cdot F_{12}}\right) + \left(\frac{1 - \varepsilon_p}{\varepsilon_p}\right)} \quad (3.6)$$

Esta equação representa a razão de potências do calor transferido por radiação das paredes do forno para um cilindro de acabamento superficial brilhante e baço, 1/1,273, obtida recorrendo aos dados experimentais relativos às duas situações patentes na dissertação de Pedro Pereira (2017, p. 40-42).

O ε_I corresponde aos valores de emissividade dados pela equação (3.5) para uma superfície brilhante, ε_{II} o valor da emissividade para uma superfície baça a calcular pela equação (3.6), o A_1/A_2 é o quociente da área do bloco padrão cilíndrico pela área do forno, que tem valor estimado em 0,1, e o F_{12} é o fator forma entre as duas superfícies estimado em 0,3.

Os resultados obtidos pela equação (3.6), também apresentados na tabela 3.9 estão mais em consonância com os resultados determinados experimentalmente para uma superfície baça, visto que a média da emissividade é bastante próxima de 0,18, sendo ela para a mesma gama de temperaturas (50°C a 350°C) cerca de 0,17. Na Tabela 3-10, apresentam-se os dados obtidos da emissividade por degraus usados nas simulações dos blocos padrão em aço AISI 304.

Tabela 3-10 - Valores da emissividade por degraus de temperatura para o aço AISI 304 com superfície baça

Intervalos de Temperatura	Emissividade [-]
15°C a 650°C	0,20
650°C a 750°C	0,27
750°C a 850°C	0,28
850°C a 1020°C	0,30

4. Dimensionamento de blocos padrão em aço AISI 304

Uma vez validada a solução numérica através da solução analítica, pode-se então, proceder à simulação da fase de aquecimento do tratamento térmico de têmpera de peças típicas em aço H11, bem como a simulação do comportamento dos correspondentes blocos padrão em aço AISI, cujas propriedades térmicas de ambos os aços em função da temperatura se encontram no capítulo anterior. Basicamente, pretende-se encontrar com o programa Abaqus, para cada uma das peças em aço H11 a estudar, reais ou fictícias, as dimensões mais corretas possíveis de um bloco padrão em aço AISI 304 que tenha o mesmo comportamento de temperatura versus tempo durante o aquecimento que a peça correspondente, cujo comportamento também ele é obtido com o referido programa. Contudo, primeiramente, é necessário conhecer as condições reais durante o processo de aquecimento no interior do forno e como estas variam ao longo do tempo. Após efetuadas as simulações serão apresentados os seus resultados, tendo em vista obter posteriormente uma correlação geométrica entre os blocos padrão e as peças correspondentes.

4.1 Processo de aquecimento num tratamento de têmpera

As simulações dos tratamentos térmicos devem ser o mais fiáveis possível, para tal é necessário conhecer as condições reais que afetam o processo de aquecimento. Até agora, as simulações de aquecimento no forno só tiveram apenas em consideração a transferência de calor por convecção forçada. No entanto, como já foi mencionado, o aquecimento é feito por degraus com recurso a resistências elétricas de grafite localizadas à volta das paredes do forno. Assim, com recurso a dados disponibilizados anteriormente pela *Ramada Aços*, foi possível conhecer como variam tipicamente as condições no interior do forno num tratamento de têmpera.

4.1.1 Temperatura das paredes do forno e a sua emissividade

De acordo com a dissertação de Sérgio Moreira (2014), na empresa *Ramadas Aços*, o aquecimento pode ser realizado em 4 patamares como está indicado na Tabela 4-1:

Tabela 4-1 - Patamares de temperatura no processo de têmpera

Patamar de temperatura [°C]	Taxa de aquecimento a [°C/min]	Tempo de duração [s]
650	14,5	3621
750	17,1	4476
840	12,2	5268
1020	8,9	6354

Nesta tabela estão representados os patamares de temperatura na fase de aquecimento de um típico processo de têmpera e o respetivo tempo de duração, assim como, uma taxa de aquecimento aproximada entre patamares.

A emissividade considerada para as paredes do forno foi de 0,8, valor usado no trabalho de Pedro Maia (2013), bem como em outros trabalhos anteriores.

4.1.2 Temperatura da atmosfera de azoto

A atmosfera de gás azoto no interior do forno vai sendo aquecida por convecção através das paredes do forno e transferindo calor para as peças também por convecção. A diferença entre a temperatura das paredes do forno, T_{par} , e do gás azoto, $T_{gás}$, foram alvo de um estudo anterior Martinho Oliveira (2011), que desenvolveu a equação (4.1) que permite estimar a temperatura do gás, uma vez conhecida a temperatura das paredes do forno.

$$T_{par} - T_{gás} = 1,10611780 \times 10^{-4} T_{par}^2 - 2,59688290 \times 10^{-2} T_{par} + 13,4805553 \text{ [°C]} \quad (4.1)$$

Deste modo, pode-se visualizar na Figura 4-1 a evolução temporal das duas temperaturas referidas e, na Tabela 4-2, os valores que estas tomam nos estágios a temperatura constante.

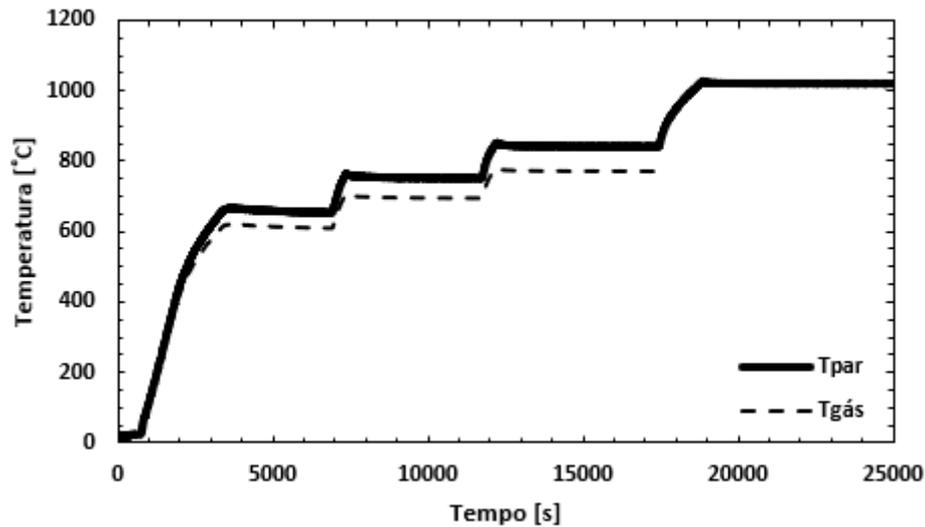


Figura 4-1 - Evolução temporal de temperatura das paredes do forno e do gás para um processo de têmpera de aços H11.

Tabela 4-2 - Temperatura das paredes do forno e do gás no seu interior

Temperatura de estágio da parede, T_{par} [°C]	Temperatura de estágio do gás, $T_{gás}$ [°C]	Diferença de temperaturas $T_{par} - T_{gás}$ [°C]
650	566	84
750	647	103
840	718	122
1020	-	-

Note que quando a temperatura do forno atinge o último patamar de temperatura, o azoto é extraído do forno pelo sistema de vácuo. Obviamente, nesse dado momento, o processo de transferência de calor é feito exclusivamente por radiação.

4.1.3 Convecção no interior do forno

Para além da radiação, parte do aquecimento das peças é devido à transferência de calor por convecção. Assim, torna-se indispensável conhecer o coeficiente de convecção. Contudo, o coeficiente de convecção não é igual em todas as partes da peça nem em todas as partes do forno. Dado que o forno possui um ventilador na porta que está em funcionamento até os 850°C, a zona próxima da porta terá um coeficiente de convecção maior, e conseqüentemente, a zona

mais afastada da porta terá um coeficiente menor. Com base na dissertação de Miguel Oliveira (2011), utilizou-se um coeficiente de convecção médio de $10,1 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$.

4.2 Dimensões iniciais estimadas do bloco padrão em aço AISI 304

Para determinar as dimensões do bloco padrão, a obter através de um processo de aproximações sucessivas com o programa Abaqus, partiu-se da correlação geométrica sugerida por Pedro Pereira (2017) para se obter as dimensões iniciais. Na sua dissertação, foram apresentadas várias relações entre peças e blocos padrão com base no número de Biot, no número de Fourier e na constante de tempo, com o intuito de obter uma expressão para o comprimento característico do bloco padrão, equação (2.1b). Encontradas as três relações, elas foram manipuladas obtendo-se a equação (4.2a).

$$\frac{L_{c,bloco}}{L_{c,peça}} = 0,8279 \sqrt{\frac{\alpha_{bloco}}{\alpha_{peça}}} \quad (4.2a)$$

Onde α , é a difusividade térmica se encontra definida pela expressão abaixo e indica o quão rápido é a propagação de calor por todo um dado corpo. Para calcular a difusividade foram usados os valores das propriedades à temperatura média de têmpera de 450°C .

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad (4.2b)$$

Esta equação, equação (4.2a), possui um carácter mais geral, dado que envolve simultaneamente as três propriedades físicas que afetam diretamente a propagação do calor num corpo. Dessa forma, apesar da equação (4.2) ter sido obtida com base em peças de aço diferente, o AISI D2, esta continua, em princípio, válida para outros materiais com diferentes difusividades térmicas e poderá servir como ponto de partida para obter uma primeira estimativa do comprimento característico dos blocos padrão em aço AISI 304.

Uma vez determinado o comprimento característico do bloco padrão, interessa definir a sua geometria. Contudo, para o cálculo do comprimento característico, considerou-se a área da base onde assenta o bloco padrão e a peça no forno, isolada termicamente, dado que nessa zona não há praticamente transferência de calor e porque, segundo Pedro Pereira (2017), essa consideração aproxima-se do comportamento real da peça. Assim, optou-se por analisar duas geometrias simples para o bloco padrão:

- Cubo

A geometria cúbica de comprimento de aresta l , tem um volume dado pela equação abaixo.

$$V_{bloco} = l^3 \quad (4.3a)$$

A área superficial, considerando a base isolada, é dada por

$$A_{s,bloco} = 5l^2 \quad (4.3b)$$

Assim, tem-se que o seu comprimento característico é,

$$L_{c,bloco} = \frac{l}{5} \quad (4.3c)$$

- Cilindro

Um cilindro de diâmetro D , e de igual altura a , tem um volume de,

$$V_{bloco} = \pi \frac{D^2}{4} a \quad (4.4a)$$

A área superficial, considerando a base isolada, é,

$$A_{s,bloco} = a\pi D + \frac{\pi D^2}{4} \quad (4.4b)$$

Assim, igualando, numa primeira abordagem, o diâmetro à altura, tem-se que o seu comprimento característico é,

$$L_{c,bloco} = \frac{D}{5} \quad (4.4c)$$

Mediante o exposto, pode-se constatar na equação (4.5) que optar por um bloco padrão de forma cilíndrica é mais vantajoso, uma vez que para o mesmo comprimento característico o cilindro tem menor volume, o que traduz uma poupança de material em 27,3%.

$$\frac{V_{bloco,cubo}}{V_{bloco,cilindro}} = \frac{4}{\pi} \approx 1,273 \quad (4.5)$$

Para além disso, o bloco padrão cilíndrico é aquele que melhor representa o aquecimento de uma dada peça comparativamente com o bloco padrão cúbico, Pedro Pereira (2017).

Concluindo, optou-se para dimensões iniciais um bloco padrão cilíndrico com um diâmetro igual à altura de,

$$D = 5 \times 0,8279 \cdot L_{c,pe\c{c}a} \sqrt{\frac{\alpha_{bloco}}{\alpha_{pe\c{c}a}}} \quad (4.6)$$

4.3 Simulações de peças reais típicas em aço H11

Uma vez conhecidas todas as variáveis do forno, prosseguiu-se à simulação de peças típicas em aço H11 presentes na Figura 4-2.

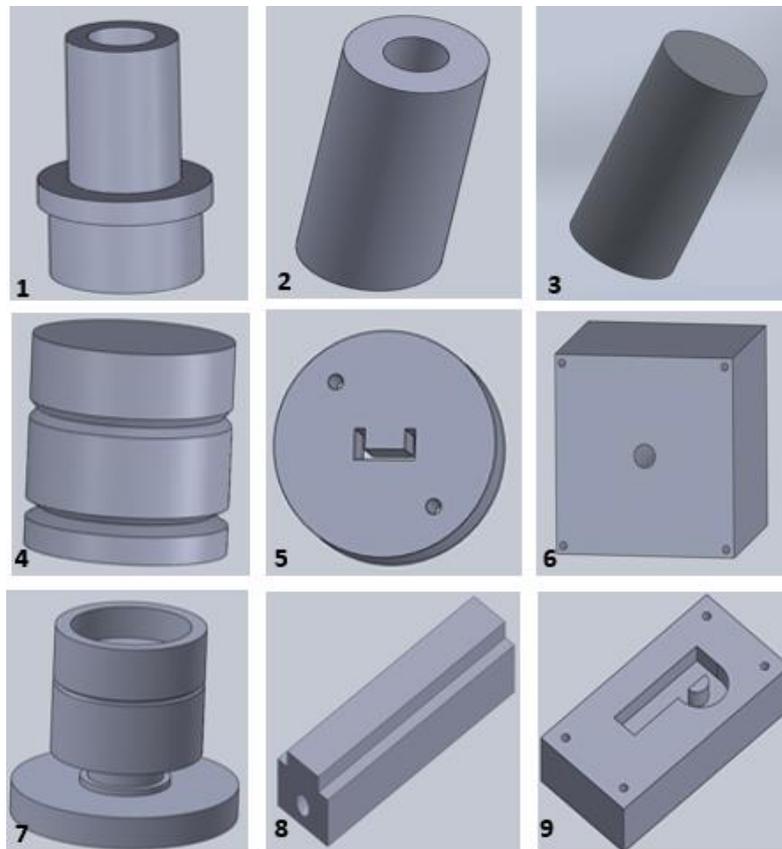


Figura 4-2 - Peças típicas de aço em H11 simuladas no *Abaqus*.

Nesta Figura 4-2, pode-se observar as diferentes geometrias de peças simuladas, das quais se encontram peças típicas de H11, inclusive moldes para fundição injetada de alumínio, bem como, matrizes típicas de um aço para trabalho a quente. Assim, apresentam-se na Tabela 4-3, as principais características das peças simuladas.

Tabela 4-3 - Características das peças típicas em aço H11 simuladas

Nº Peça (Fig. 4-2)	Volume [m ³]	Área de transferência [m ²]	massa [kg]	Lc [mm]	Nº Elementos
1	0,01377	0,35742	108	39	129780
2	0,00957	0,31570	75	30	90351
3	0,01069	0,25700	84	42	99820
4	0,00128	0,05391	10	24	12383
5	0,00228	0,07843	18	29	29280
6	0,00120	0,06800	9	18	12300
7	0,00133	0,06050	10	22	15625
8	0,00920	0,24544	72	38	15625
9	0,00446	0,16300	35	27	60583

O número de elementos das peças procura manter a densidade média de elementos /cm³ da malha definida no capítulo 2. A mesma densidade será usada também para o estudo dos blocos padrão.

Após a estimativa inicial das dimensões do bloco padrão de forma cilíndrica, simulou-se o aquecimento dos respetivos blocos de cada peça de forma a obter-se a curva de aquecimento. Por um processo de simulação iterativo refinou-se as dimensões do bloco padrão de forma ao seu comportamento ser o mais idêntico possível ao da peça. Os diâmetros dos blocos padrão nem sempre têm as dimensões estimadas inicialmente, equação (4.6), visto que é necessário escolher diâmetros de acordo com os varões em aço AISI 304 disponíveis na empresa *Ramada Aços*. Portanto, os diâmetros dos blocos devem ser iguais aos diâmetros dos varões disponíveis e os mais próximos dos valores estimados. Efetuadas as simulações, é feita uma análise de erros, calculando para cada instante os erros médios relativos, máximos relativos, e absolutos aplicando as equações abaixo expressas.

$$\text{Erro absoluto} = |T_{pe\tilde{c}a} - T_{bloco}| \quad (4.7a)$$

$$\text{Erro relativo} = \frac{|T_{pe\tilde{c}a} - T_{bloco}|}{T_{pe\tilde{c}a}} \quad (4.7b)$$

$$\text{Erro médio relativo} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|T_{pe\tilde{c}a_i} - T_{bloco_i}|}{T_{pe\tilde{c}a_i}} \quad (4.7c)$$

O cálculo destes erros foram feitos no software *EES (Engineering Equation Solver)*. Os dados das simulações foram interpolados de forma a obter as temperaturas da peça e do bloco padrão para os mesmos instantes de tempo.

Todavia, e como referido anteriormente, o processo de dimensionamento dos blocos é um processo iterativo e moroso, porque há a necessidade de ajustar as dimensões inicialmente estimadas com base na equação (4.6). Para tal, é necessário realizar várias simulações para os vários blocos padrão. O ajuste das dimensões é efetuado através da alteração do diâmetro conforme os varões existentes ou através da alteração da altura dos blocos cilíndricos.

Posto isto, apresentam-se seguidamente alguns dos resultados obtidos por meio de gráficos que demonstram a evolução temporal de temperatura nos centros das peças e dos respetivos blocos padrão. Os restantes resultados podem ser encontrados no ANEXO B.

4.3.1 Resultados das simulações

A Peça 1, figura 4-2, tem uma forma cilíndrica e oca. Esta peça tem cerca de 108 kg e um comprimento característico de 39 mm. Após várias simulações efetuadas com o objetivo de encontrar o melhor bloco padrão, obtiveram-se os seguintes resultados. Na figura 4-3, apresenta-se a evolução da temperatura da parede, T_{par} , juntamente com a evolução temporal de temperaturas do núcleo da Peça 1 e do respetivo bloco padrão

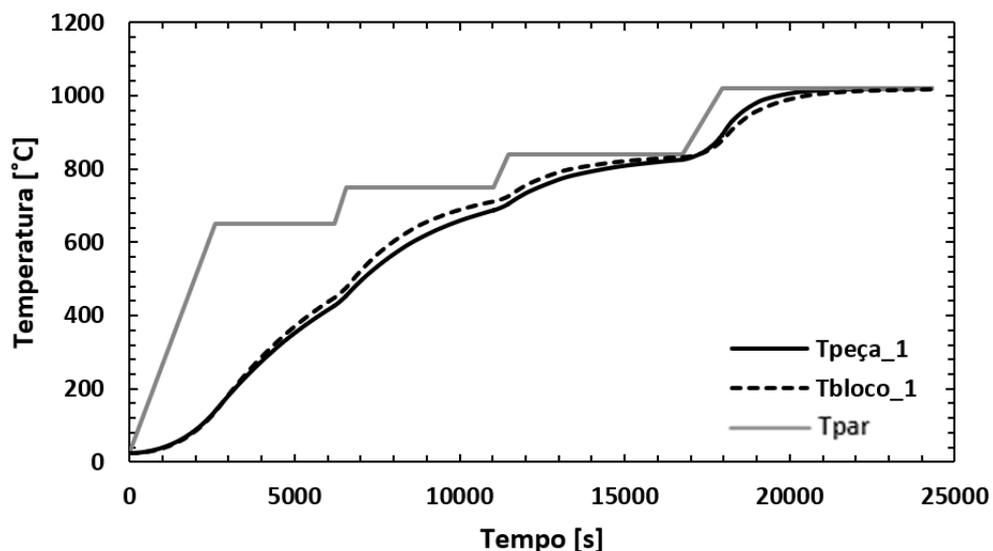


Figura 4-3 - Evolução temporal de temperatura da Peça 1 e do respetivo bloco padrão.

O bloco padrão que melhor representava a Peça 1 é um bloco de 130mm diâmetro e de igual altura. Após uma análise dos dados, determinou-se que o erro médio era de 2,88%, sendo de 6,43% e 35,1°C o maior erro relativo e absoluto, respetivamente. Observando a Figura 4-3, constata-se que o aquecimento do bloco padrão é quase sempre mais rápido que o da peça,

contudo mais lento no último estágio à temperatura de têmpera. A explicação deve-se ao facto de no último patamar de temperatura a transferência de calor ser apenas por radiação, visto que nesse patamar a atmosfera do forno é retirada (vácuo), sendo a emissividade do aço do bloco, AISI 304, menor que a emissividade do aço da peça, H11 (rever Tabela 3-4 e Tabela 3-10)

Mediante isto, é normal que se encontre o mesmo comportamento nos outros gráficos. Este comportamento do bloco não é de todo desfavorável, pelo contrário, pois registando um aquecimento mais lento no último patamar, garante que a respetiva peça a temperar atinge primeiro a temperatura de têmpera, estando, pois, do lado da segurança.

A Peça 2, figura 4-2, tem também uma forma cilíndrica oca, tendo uma massa de 75kg e um comprimento característico de 30mm. Posto isto, apresenta-se abaixo os resultados da melhor simulação obtida.

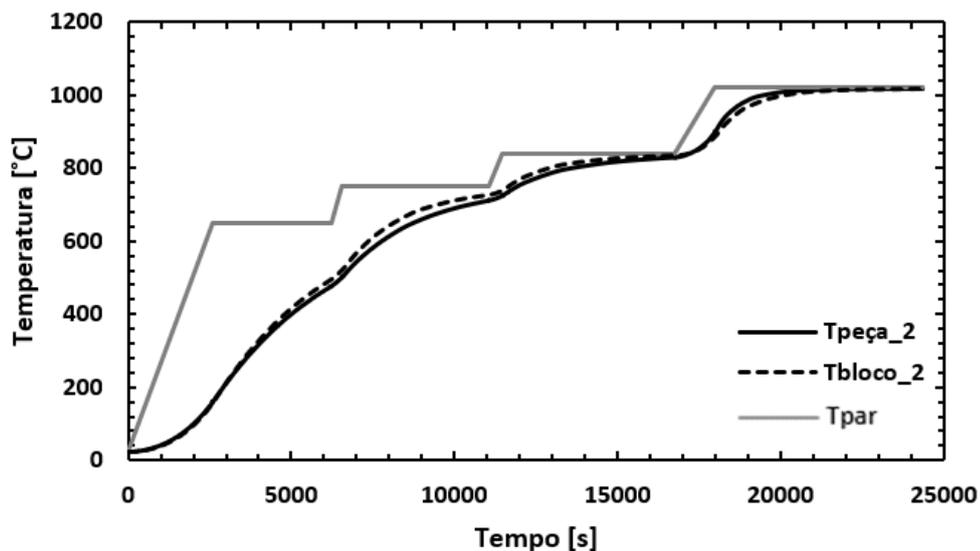


Figura 4-4 - Evolução temporal de temperatura da Peça 2 e do respetivo bloco padrão.

Vizualizando a Figura 4-4, regista-se que o comportamento mencionado na simulação da Peça 1. A evolução temporal de temperatura do bloco quase segue perfeitamente a evolução da peça. O bloco padrão representado tem um diâmetro de 110mm e uma altura de 100mm, apresentando um erro médio de 2,11% e erro máximo relativo e absoluto de 4,86% e 29°C, respetivamente.

4.3.2 Simulação de peças para otimização dos resultados

A correlação geométrica para os blocos padrão, i.e., relação entre os comprimentos característicos da peça e do respetivo bloco padrão, é tanto melhor quanto mais resultados de simulações forem obtidos. Então, foram simuladas mais 9 peças hipotéticas com forma de cubos e paralelepípedos, visto que a sua simples geometria facilita o cálculo do comprimento

característico, implicando um menor erro. Desta forma, apresentam-se as características principais das peças adicionais na Tabela 4-4.

Tabela 4-4 - Características das peças de geometria simples em aço H11 simuladas

Peças	Volume [m ³]	Área isolada [m ²]	massa [kg]	Lc [mm]	Nº Elementos
Cubo1	0,00013	0,01250	1,0	10	3375
Cubo2	0,00022	0,01800	1,7	12	3375
Cubo3	0,00034	0,02450	2,7	14	3375
Cubo4	0,00051	0,03200	4,0	16	5832
Cubo5	0,00073	0,04050	5,7	18	8000
Paralelepípedo1	0,00900	0,26250	70,3	34	84732
Paralelepípedo2	0,00004	0,006625	0,3	6	365
Paralelepípedo3	0,00002	0,00520	0,2	5	365
Paralelepípedo4	0,00001	0,00323	0,1	3	286

4.4 Análise dos resultados das simulações

Esta secção destina-se a apresentar os dados obtidos pelas simulações efetuadas. Na Tabela 4-5, estão indicados os blocos padrão que melhor representam o aquecimento das respetivas peças simuladas, o erro médio e máximo relativo, assim como, o erro máximo absoluto.

Tabela 4-5 - Resultados dos blocos padrão para peças em aço H11 e os respetivos erros

Nº PEÇA (Tabelas 4-3 e 4-4)	Bloco padrão		Nº Elementos do Bloco	Lc,bloco [mm]	Erro médio [%]	Erro máximo [%]	Erro absoluto máx. [°C]
	Diâmetro [mm]	Altura [mm]					
1	130	130	17589	26	2,88%	6,43%	35,1
2	110	100	9093	22	2,11%	4,86%	29,0
3	180	180	45360	36	3,31%	6,58%	3,2
4	100	100	8925	20	1,67%	4,43%	21,3
5	100	125	9944	21	1,94%	4,62%	21,7
6	75	75	3150	15	0,71%	3,08%	29,9
7	110	100	9093	22	1,43%	4,42%	2,5
8	140	140	20524	28	1,89%	4,85%	27,4
9	125	125	16380	25	1,25%	2,89%	17,5
Cubo 1	50	50	2197	10	0,73%	4,86%	21,9
Cubo 2	60	60	4454	12	0,84%	5,30%	23,6
Cubo 3	70	70	5436	14	1,25%	4,45%	25,7
Cubo 4	75	75	3150	15	1,36%	3,72%	22,9
Cubo 5	80	80	4096	16	1,50%	4,57%	24,8
Paralelepípedo1	160	160	32380	32	4,08%	8,79%	46,4
Paralelepípedo2	20	20	2158	4	0,62%	4,90%	22,6
Paralelepípedo3	12	12	2067	2,4	0,37%	5,39%	9,00
Paralelepípedo4	27	27	2249	5,4	0,46%	2,95%	14,6

Para além dos dados presentes nesta Tabela 4-5, convém salientar que no último patamar à temperatura de têmpera, os erros tendem, para zero, demonstrando que no final do tratamento térmico, tanto a peça como o seu respetivo bloco atingem a mesma temperatura praticamente ao mesmo tempo. Tal facto ocorre, dado que a temperatura de ambos os sólidos já se tinham intercetado no patamar anterior (à temperatura de 840°C), tendo a partir daí, curvas de aquecimento coincidentes.

4.4.1 Correlação geométrica

Uma vez conhecidos os resultados, foi possível relacionar as geometrias das peças simuladas com os seus respetivos blocos padrão. Posto isto, na Figura 4-5, encontra-se representada graficamente a correlação geométrica bloco-peça.

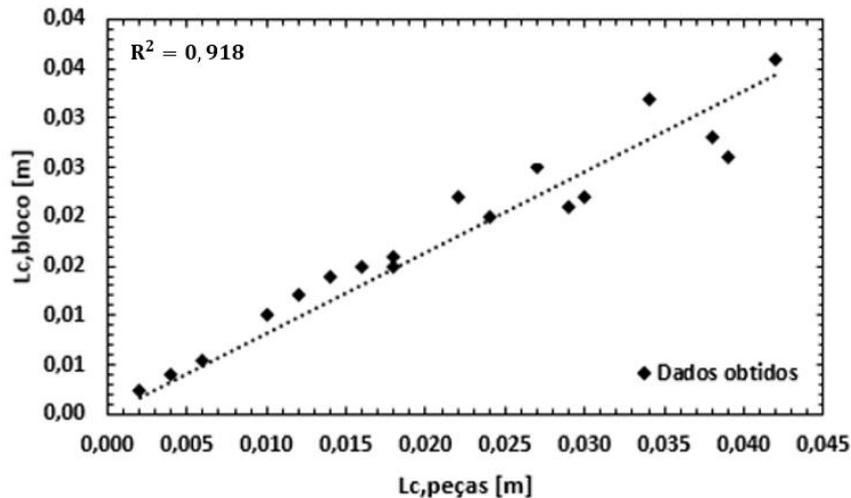


Figura 4-5 - Correlação geométrica bloco-peça com o comprimento característico.

Como se pode avaliar pela Figura 4-5, a dispersão aumenta há medida que o comprimento característico das peças também aumenta. Isto acontece, pois, os diâmetros dos blocos padrão são dimensionados com base nos diâmetros de varões em aços AISI 304 disponíveis na empresa Ramada Aços S.A, tendo esta maior diversidade de diâmetros para menores dimensões. Assim, quanto menor e mais simples for a peça em aço H11, mais facilmente se encontra o diâmetro do respetivo bloco padrão e menores são os erros no cálculo do comprimento característico.

Obtendo uma regressão linear dos dados apresentados, obtém-se uma reta representada pela expressão (4.8) com um coeficiente de determinação de 91,79%, válida para uma peça em aço H11 e um bloco padrão em aço AISI 304 com um acabamento superficial baço

$$\frac{L_{c,bloco}}{L_{c,peça}} = 0,8208 \quad (4.8)$$

Uma outra forma de representar a correlação, é apresentá-la com a razão da difusividade térmica dos aços usados, à semelhança da equação (4.1). Esta correlação tem a vantagem de poder ser generalizada para vários aços, dado o carácter universal da difusividade térmica, como já foi anteriormente mencionado. Desta forma, usou-se os valores obtidos no anterior capítulo, determinando a difusividade térmica à temperatura média de 450°C, de forma a posteriormente se poder comparar os dados obtidos com os dados da dissertação de Pedro Pereira (2017). Assim, obteve-se a seguinte correlação presente na Figura 4-6.

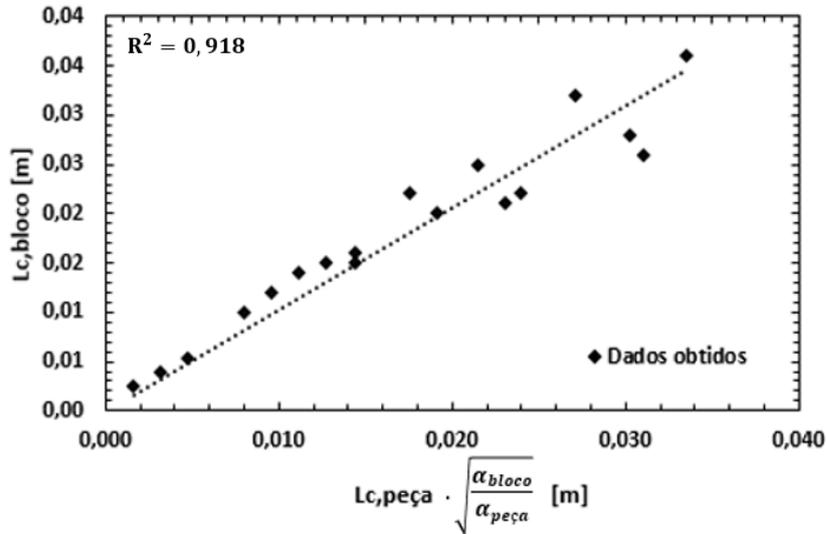


Figura 4-6 - Correlação geométrica bloco-peça com o comprimento característico e a razão difusividade. Desta forma, apresenta-se abaixo a expressão da reta obtida por regressão linear presente na Figura 4-6, onde o aço do bloco padrão é o AISI 304 e o aço da peça o H11, com o mesmo erro associado.

$$\frac{L_{c,bloco}}{L_{c,peça}} = 1,0300 \cdot \sqrt{\frac{\alpha_{bloco}}{\alpha_{peça}}} \quad (4.9)$$

4.4.2 Correlação geométrica com o efeito da emissividade

Apesar do carácter genérico da correlação anteriormente conseguida, para se poder comparar os dados obtidos com os dados da dissertação de Pedro Pereira (2017) é necessário ter em conta o efeito das diferentes emissividades do aço AISI 304, dado que a emissividade do aço altera significativamente o comportamento térmico do bloco padrão, quando este é aquecido por radiação. Assim sendo, solucionou-se o problema através das seguintes equações provenientes do trabalho anterior (Pedro Pereira) e do atual, usando as propriedades térmica dos aços a 450°C.

$$\begin{cases} L_{c,peça} \cdot 0,8785 \sqrt{\frac{\alpha_{304,brilh}}{\alpha_{D2}}} = L_{c,peça} \cdot \beta \left(\frac{\varepsilon_{304,brilh}}{\varepsilon_{H13}} \right)^n \sqrt{\frac{\alpha_{304,brilh}}{\alpha_{D2}}} \\ L_{c,peça} \cdot 1,0300 \sqrt{\frac{\alpha_{304,baço}}{\alpha_{H11}}} = L_{c,peça} \cdot \beta \left(\frac{\varepsilon_{304,baço}}{\varepsilon_{H13}} \right)^n \sqrt{\frac{\alpha_{304,baço}}{\alpha_{H11}}} \end{cases} \quad (4.10)$$

Onde a primeira equação é retirada da correlação de Pedro Pereira correspondente ao aço AISI 304 com superfície reluzente e, a segunda é retirada pela correlação encontrada na equação (4.9), onde a superfície do aço AISI 304 é baça.

Desenvolvendo as expressões, chega-se à conclusão o valor do expoente n é de 0,4384.

$$\frac{0,8785}{1,0300} = \left(\frac{\varepsilon_{304,brilh}}{\varepsilon_{304,baço}} \right)^n \Leftrightarrow \frac{0,8785}{1,0300} = \left(\frac{0,16}{0,23} \right)^n \Leftrightarrow n = 0,4384 \quad (4.11)$$

Mediante o exposto, segue-se a Figura 4-7, que representa a correlação geométrica bloco-peça a partir dos resultados obtidos.

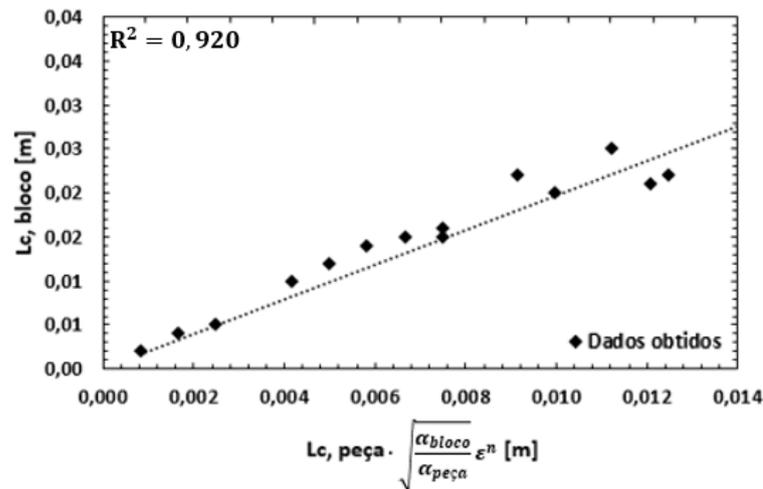


Figura 4-7 - Correlação geométrica bloco-peça com o efeito da emissividade de 0,23 do aço AISI 304.

Concluindo, o declive da reta obtida por regressão linear, com um coeficiente de determinação de 91,96%, para qualquer que seja o valor da emissividade do bloco padrão é:

$$\frac{L_{c,bloco}}{L_{c,peça}} = 1,9732 \cdot \sqrt{\frac{\alpha_{bloco}}{\alpha_{peça}}} \varepsilon_{bloco}^n \quad (4.12)$$

Contabilizado o efeito da emissividade, pode-se agora adicionar à correlação geométrica anterior os dados obtidos por Pedro Pereira. Desta forma, obtém-se mais pontos no gráfico, o que permite ter uma melhor aproximação e menor erro, como se pode verificar no seguinte gráfico da Figura 4-8.

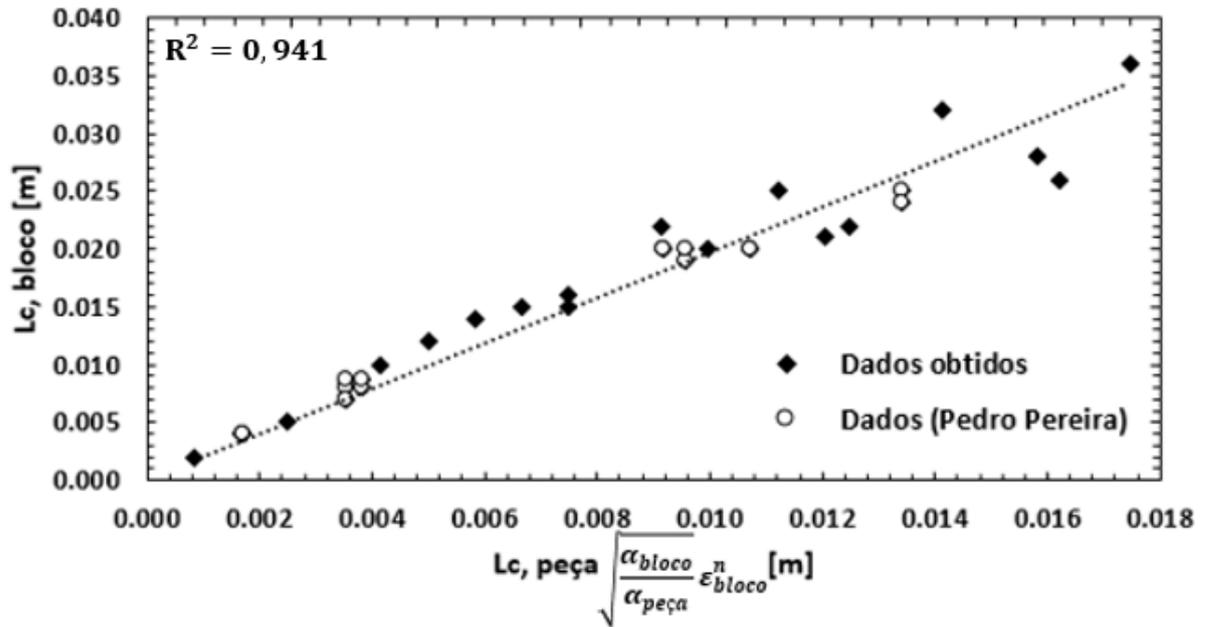


Figura 4-8 - Correlação geométrica bloco-peça final.

Seguindo o mesmo procedimento anterior, como se pode observar na Figura 4-8, apresenta-se uma outra regressão linear para o mesmo conjunto de pontos que passa na origem. A reta (a pontead) que passa na origem contém um coeficiente de determinação de 0,941, sendo o seu declive de:

$$\frac{L_{c,bloco}}{L_{c,peça} \sqrt{\frac{\alpha_{bloco}}{\alpha_{peça}}} \epsilon_{bloco}^n} = 1,9694 \quad (4.13)$$

Esta equação, em princípio, é válida para uma peça em qualquer tipo de aço desde que tenha uma emissividade idêntica ao aço H13 e um bloco padrão em qualquer tipo de aço e emissividade. Então, a correlação geométrica para obter blocos padrão em aço AISI 304 (baço) de peças em aço H11 é dada pela expressão (4.13), que está abaixo apresentada de forma simplificada ao substituir as propriedades térmicas dos aços à temperatura de 450°C, com emissividade de 0,23 e expoente n de 0,4384.

$$L_{c,bloco} = 0,8240 \cdot L_{c,peça} \quad (4.14)$$

Por último, também se pode escrever uma expressão geral válida, em princípio, para qualquer combinação de aços, tomando a seguinte forma:

$$L_{c,bloco} = L_{c,peça} \cdot \beta \left(\frac{\epsilon_{bloco}}{\epsilon_{peça}} \right)^n \sqrt{\frac{\alpha_{bloco}}{\alpha_{peça}}} \quad (4.15)$$

Onde o valor de β , é obtido desenvolvendo as expressões da equação (4.10), e que neste caso particular é dado pela expressão:

$$\beta = \frac{L_{c,bloco}}{L_{c,peça} \sqrt{\frac{\alpha_{bloco}}{\alpha_{peça}}}} \cdot \varepsilon_{H13}^n = 1,9694 \cdot \varepsilon_{H13}^n \quad (4.16)$$

Onde o valor 1,9694 corresponde ao declive da reta de regressão linear da equação (4.13) que intersesta a origem, tomando β o valor de 0,906 pois a emissividade da peça, tomada como sendo igual à do aço H13, é de 0,17, Tabela 3-4. Se os dados utilizados para estes cálculos fossem exatos, então a constante β teria o valor 1. Assim, o valor de β está 9% abaixo do esperado, isto se admitirmos que apenas a emissividade e a difusividade térmica de ambos os aços, peça e bloco padrão, são os únicos fatores relevantes neste processo. Este desvio de 9% não é muito significativo e está dentro da mesma ordem de grandeza da incerteza aleatória associada ao valor do declive da regressão linear, i.e. um declive de 1,9694, presente na figura 4-8, incerteza essa que é de $\pm 8,2\%$ (faltando ainda contabilizar a correspondente incerteza sistemática).

Assim sendo, e partindo da equação (4-15), é de esperar que a correlação genérica entre comprimento característico da peça e comprimento característico do bloco padrão seja a seguinte,

$$L_{C,bloco} = L_{C,peça} \cdot \left(\frac{\varepsilon_{bloco}}{\varepsilon_{peça}} \right)^{0,4384} \sqrt{\frac{\alpha_{bloco}}{\alpha_{peça}}} \quad (4.17)$$

válida para qualquer tipo de aços envolvidos e respetivas emissividades.

5. Ensaio experimental

Uma vez encontrada a correlação geométrica que permite encontrar o bloco padrão em aço AISI 304 para uma determinada peça a tratar em aço H11, é necessário que esta seja confirmada por meio de um ensaio de medição. O ensaio consiste em medir, ao longo do tempo, a temperatura do núcleo de uma peça em aço H11 de forma cúbica de 85mm e do seu respetivo bloco padrão cilíndrico, em aço inox AISI 304. Após uma análise dos dados obtidos, pode-se calcular o erro registado ao usar, na prática, a correlação geométrica encontrada no capítulo anterior, equação (4.14).

5.1 Ensaio e Peça - Bloco padrão

5.1.1 Dimensões do Bloco Padrão

A peça em aço H11 a simular é uma peça de forma cúbica com 85mm de lado, o que corresponde a um comprimento característico de 0,017 m.

Aplicando a equação (4.14), determinou-se que o comprimento característico do bloco padrão corresponde a 0,014 m. Desta forma, por meio de várias iterações determinou-se as seguintes dimensões do bloco padrão, presentes na Tabela 5-1.

Tabela 5-1 - Dimensões do bloco padrão para o ensaio experimental de emissividade 0,23

Bloco padrão	AISI 304 (superficialmente baço)
Diâmetro [mm]	70
Altura [mm]	68

O processo para determinar as dimensões do bloco padrão consistiram em efetuar cálculos iterativos, ajustando a altura deste de forma a que atingisse o comprimento característico de 0,014m. O ponto de partida para interação consistiu em arranjar um bloco padrão com diâmetro igual à altura.

Observando a expressão (4.17), percebe-se que outra forma de se reduzir as dimensões do bloco padrão é tornando a sua emissividade mais baixa, isto é, tornando a sua superfície mais brilhante. Contudo, na prática esta solução levaria que a empresa tivesse que polir os seus blocos padrão, pois à medida que estes são sujeitos a vários tratamentos térmicos que tornam as suas superfícies mais baças, o que não seria muito viável.

Para além disso, importa referir que a empresa Ramada Aços S.A. também possui varões de aço AISI 310, um aço semelhante ao aço AISI 304, possuindo apenas uma condutividade térmica menor, e consequentemente, uma difusividade menor. Ou seja, para a mesma peça em aço H11, poder-se-ia ter um bloco padrão com menores dimensões ao optar pelo aço AISI 310, havendo uma poupança de material. Assim, na Tabela 5-2 apresenta-se a diferença da difusividade térmica e do comprimento característico entre os aços usados.

Tabela 5-2 - Diferença do comprimento característico usando diferentes aços para o bloco padrão

	<i>Peça</i>	<i>Bloco padrão</i>	<i>Bloco padrão</i>
<i>Aço</i>	H11	AISI 304	AISI 310
Difusividade térmica [m^2/s]	$7,38 \cdot 10^{-6}$	$4,68 \cdot 10^{-6}$	$4,02 \cdot 10^{-6}$
Comprimento característico [m]	0,017	0,014	0,013

Também na Tabela 5-3 pode-se observar as diferenças nas dimensões entre os diferentes blocos padrão de aço AISI 304 e AISI 310 para diferentes emissividades.

Tabela 5-3 - Diferenças das dimensões entre blocos padrão AISI 304 e AISI 310 para superfícies brilhantes e baças

Nº Peça (Fig. 4-2)	Bloco padrão	AISI 304 (brilhante)	AISI 304 (baço)	AISI 310 (brilhante)	AISI 310 (baço)
	Diâmetro	Altura [mm]	Altura [mm]	Altura [mm]	Altura [mm]
1	140	126	365	92	191
2	110	90	230	67	132
4	90	67	155	51	96
6	70	46	94	35	62

A Tabela 5-3 foi feita de modo que o bloco padrão tivesse o mesmo diâmetro em cada caso, de forma a tornar no processo de comparação mais fácil e intuitivo. Ao analisar as tabelas pode-se evidenciar que as dimensões do bloco padrão com uma superfície mais brilhante são menores, como era expectável. O mesmo acontece quando se opta por um bloco padrão em aço de menor difusividade térmica para a mesma peça.

Uma outra maneira de apresentar estas diferenças é apresentá-las na forma analítica, podendo ser aplicadas para diferentes geometrias de peças. Deste modo seguem-se as seguintes expressões:

- Aço AISI 304 com superfície brilhante (emissividade de 0,16);

$$L_{c,bloco} = 0,7028 \cdot L_{c,peça} \quad (5.1)$$

- Aço AISI 304 com superfície baça (emissividade de 0,23);

$$L_{c,bloco} = 0,8240 \cdot L_{c,peça} \quad (5.2)$$

- Aço AISI 310 com superfície brilhante (emissividade de 0,16);

$$L_{c,bloco} = 0,6511 \cdot L_{c,peça} \quad (5.3)$$

- Aço AISI 310 com superfície baça (emissividade de 0,23);

$$L_{c,bloco} = 0,7633 \cdot L_{c,peça} \quad (5.4)$$

Na Tabela 5-5, mostra o bloco padrão que se iria obter ao optar pelo aço AISI 310. Este teria menos 17 mm de espessura, isto é, uma poupança de material de exactamente 25%.

Tabela 5-4 - Diferença das dimensões usando diferentes aços para o bloco padrão

Bloco padrão	AISI 304	AISI 310
Diâmetro [mm]	70	70
Altura [mm]	68	51

5.1.2 Posição da peça e do bloco padrão no forno

A posição onde o bloco padrão é colocado no forno é importante, pois influencia a evolução da temperatura ao longo do tratamento térmico. Segundo Pedro Pereira (2017), apesar do coeficiente de convecção ser semelhante em qualquer ponto da carga levada ao forno, estas estão sujeitas a diferentes transferências de calor por radiação. As peças que são posicionadas no centro da carga recebem menos radiação emitida pelas paredes do forno, pois as peças circundantes agem como escudo de radiação, provocando um aquecimento mais lento. Assim, conclui-se que os blocos padrão apresentam resultados no lado da segurança sempre que estes estejam posicionados no centro da carga.

Visto que o aquecimento depende da posição no forno, a peça cúbica de 85 mm e o seu bloco padrão devem estar o mais próximos de si, de forma a ter as mesmas condições de aquecimento, como se pode verificar na Figura 5-1, que mostra a posição de ambos no ensaio realizado para comparar as respectivas curvas de temperatura versus tempo.



Figura 5-1 - Localização da peça de forma cúbica e respetivo bloco padrão cilíndrico na carga com termopares colocados nos seus núcleos.

5.2 Resultados do ensaio

Uma vez efetuado o ensaio nas condições anteriormente descritas, registaram-se as temperaturas ao longo do processo, resultando no gráfico da Figura 5-2.

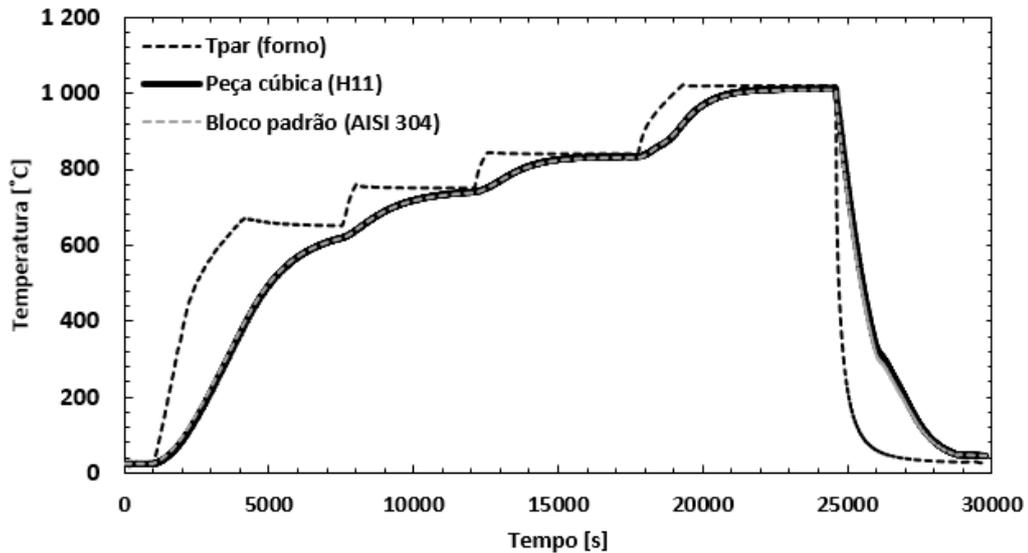


Figura 5-2 - Evolução temporal de temperatura da peça cúbica e o respetivo bloco padrão obtidos no ensaio. Pela Figura 5-2, pode-se constatar que as curvas de aquecimento são coincidentes, o que à partida mostra que a correlação geométrica obtida é fiável. Usando a equação (4.7a) e (4.7b) para calcular os erros absolutos e relativos, pode-se apresentar na Figura 5-3 a evolução ao longo do tempo dos referidos erros e na Tabela 5-6 os respetivos valores médios e máximos.

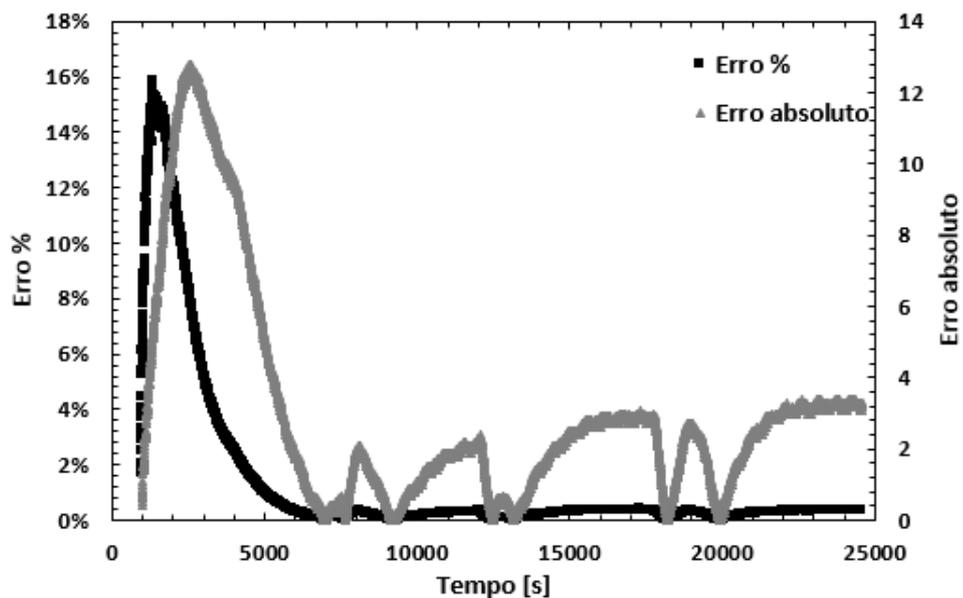


Figura 5-3 - Evolução temporal do erro relativo e absolutos do ensaio na fase de aquecimento.

Tabela 5-5 - Erros obtidos no ensaio experimental

	Erro %	Erro Absoluto
Máximo	15,9%	12,8°C
Médio	1,4%	3,0°C

Na Tabela 5-6, constata-se que o erro máximo é de 16%, contudo este erro ocorre numa fase inicial do processo de têmpera com temperaturas a rondar os 140°C, tendo um erro absoluto associado de 5,8°C. Por outro lado, o erro médio é de 1,4%, o que é ótimo dado que o coeficiente de determinação para a correlação geométrica escolhida é de 0,941. O erro mínimo ocorre antes e após o erro atingir o seu máximo, 16%, como pode ser visto na Figura 5-3. Nessa mesma figura, pode-se notar que ocorrem várias alterações bruscas no erro absoluto, e consequentemente de forma mais atenuada, no erro relativo uma vez que é nesses momentos que surge o início e o fim dos estágios a temperatura constante.

Perante estes dados, pode-se afirmar que a correlação geométrica encontrada parece traduzir corretamente a relação entre os comprimentos característicos da peça e do respetivo bloco padrão, muito embora fosse necessário realizar mais ensaios com outras peças, até de forma mais complexa, para se poder avaliar com mais rigor o desempenho da mesma.

6. Conclusão e sugestões de trabalhos futuros

6.1 Conclusão

Após a análise dos resultados obtidos por simulação chegou-se à conclusão de que, neste caso particular, malha que otimiza o processo de simulação do aquecimento de um cilindro no forno é a Malha 3.05, Tabela 2-3. Associado a esta malha utilizou-se uma variação máxima de temperatura por passo no tempo de 5°C , um incremento inicial de tempo de 0,1s, e um incremento mínimo e máximo de 0,001s e 100s, respetivamente, com uma densidade média de elementos por volume próximos dos 9,27 por centímetro cúbico. O incremento máximo foi alterado de 5s para 100s visto que tornava a simulação mais célere sem alterar a evolução do erro, dado que este é mais crítico numa situação inicial.

Efetuada um ensaio experimental com o intuito de medir a emissividade em função da temperatura do aço AISI 304, verificou-se que os resultados experimentais estavam em consonância com os resultados obtidos pela equação (3.6) para uma superfície baça, sendo a emissividade média de ambas as abordagens de 0,18, como consta na Tabela 3-9. Neste ensaio confirmou-se, também que objetivamente a superfície de uma peça em aço AISI 304 escurece quando é submetida a vários tratamentos térmicos passando de uma emissividade de 0,12 para 0,18, neste caso.

Decorridas as simulações e analisados os resultados, pôde-se encontrar uma correlação entre os comprimentos característicos das peças e os dos respetivos blocos padrão. Contudo, para melhorar essa correlação optou-se por adicionar os dados obtidos por Pedro Pereira, utilizando um aço para as peças diferente do utilizado no presente trabalho, tendo também sido necessário contabilizar o efeito da emissividade uma vez que no referido trabalho utilizou-se blocos padrão com um acabamento superficial brilhante. Desta forma, pôde-se chegar à correlação geométrica para este caso específico presente na equação (4.14). Foi também proposta uma relação geral, equação (4.17), que em princípio é válida para qualquer aço com que sejam feitas as peças e os blocos padrão, e emissividades.

A melhor geometria para um bloco padrão é a geometria cilíndrica, dado que o comprimento crítico comparado com o comprimento de uma geometria cúbica, representa uma poupança de material de cerca de 27,3% para um diâmetro igual a altura. Contudo, as dimensões do bloco padrão podem ser ainda mais reduzidas ao ter em conta propriedades térmicas como a difusividade térmica e a emissividade. Visto que a empresa Ramadas Aços S.A. possui varrões de aço AISI 310, aço com menor difusividade do que o aço AISI 304, esta poderá futuramente optar pelo primeiro, reduzindo ainda mais as dimensões do bloco padrão. Para além disso, podia tirar partido do efeito da emissividade para reduzir ainda mais as dimensões do bloco. Ao analisar a expressão (4.17), conclui-se que quanto menor for a emissividade menor serão as dimensões do bloco padrão. Porém, menor emissividade implica que a superfície do bloco seja mais brilhante, o que traduzido na prática, significa que o bloco padrão terá de ser polido com regularidade de forma a manter sempre o mesmo aspeto superficial brilhante à medida que vai sofrendo vários tratamentos térmicos, pois estes tendem a escurecer a superfície, como foi referido anteriormente. Contudo, esta prática não é a melhor opção para a empresa, pois implicaria mais custos e tempo para polir o bloco padrão. Assim, aconselha-se a empresa a usar blocos padrão em aço AISI 310 e de geometria cilíndrica ao invés de usar blocos padrão de geometria cúbica em aço AISI 304.

Com o ensaio efetuado na empresa Ramadas Aços S.A. pode-se afirmar que a correlação geométrica encontrada é adequada, pois no caso analisado originou um bloco padrão que apresentou um erro médio relativo de 1,4% e um erro médio absoluto 3°C relativamente ao resultado experimental da peça homóloga.

6.2 Sugestões de trabalhos futuros

Para trabalhos futuros deveriam ser efetuados mais ensaios com outras peças e respetivos blocos padrão de forma a garantir que o desempenho da correlação geométrica encontrado é fiável.

Uma outra sugestão, poderia ser um trabalho com vários ensaios experimentais de forma a comprovar se a equação (4.17) tem, efetivamente, carácter geral, fazendo ensaios para diferentes aços com diferentes emissividades poder-se-ia testar a validade da equação.

Referências

- Catálogo Aços*. 2016. http://www.ramada.pt/ficheiros_upload/ramada-aos_catalogo170316130332.pdf (acedido em 2018 de Fevereiro de 20).
- Çengel, Yunus A., e Afshin J. Ghajar. *Heat and Mass Transfer*. 5ª. Mc Graw Hill Education, 2015.
- Edenhofer, Bernd, e Jan W. Bouwman. “Vacuum Heat Treatment.” Em *Steel Heat Treatment Handbook*. New York: Marcel Dekker, 1997.
- Incropera, Frank P., David P. Dewitt, Theodore L. Bergman, e Adrienne S. Lavine. *Principles of Heat and Mass Transfer*. 7º. Jonh Wiley & Sons, Inc., 2013.
- Loureiro, António de Pádua. *Curso Sobre Tratamentos Térmicos dos Aços*. 1º. Vol. Parte VI. Lisboa, 1978.
- Maia, Pedro. *Estudo da fase de aquecimento em tratamentos térmicos de peças em aço de grandes dimensões*. Porto: FEUP, 2013.
- Moreira, Sérgio. *Análise térmica e mecânica da têmpera em vácuo de peças de aço de médias dimensões*. FEUP, 2014.
- Pereira, Pedro. *Otimização de blocos padrão para monitorização e controlo do processo de tratamento térmico em vácuo*. Porto: FEUP, 2017.
- Qamar, Sayyad Zahid. “Effect of heat treatment on mechanical properties of H11 tool steel.” *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 2009: 117.
- Ramada Aços*. 16 de Fevereiro de 2018. <http://www.ramada.pt/pt/sobre-nos.html>.
- “Relatório e Contas 2016.” 2017.
- Roger, C. R., S. H. Yen, e K. G. Ramanathan. “Temperature variation of total hemispherical emissivity of stainless steel AISI 304.” *Journal of the Optical Society of America*, 1979.
- Shatla, Mahmoud, Christian Kerk, e Taylan Atlan. “Process modeling in machining.” *International Journal of Machine & Manufacture 41 Part I: determination of flow stress data* (2001).
- Soares, Joaquim Pinto. *Aços: características, tratamentos*. 6ª. Porto, 2009.
- Totten, G.E., C.E. Bates, e N.A. Clinton. *Handbook of Quenchants and Quenching Technology*. ASM International, 1993.

ANEXO A: Dados das propriedades térmicas do aço H11

Para determinar as propriedades térmicas aço H11 em função da temperatura, recorreu-se às seguintes fichas técnicas:

- [1] EST Edelstahl Trading GmbH (steel 1.2343) - <http://www.edelstahl-trading.de/flyer/1.2343%20Mod.%20for%20AL.pdf>, consultado em Maio, 2018.
- [2] Thechnical Card Gruppo Lucefin (steel 1.2343) - http://www.lucefin.com/wp-content/files_mf/1.2343en.pdf, consultado em Maio, 2018.
- [3] Bohler-Uddeholm BÖHLER W400 VMR (H11 Hot Work Tool Steel) - <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=dbedea524d8b43febd2c444a10da9a1&ckck=1>, consultado em Maio, 2018.
- [4] Aubert & Duval Steel BMV4 40CrMoV20 - https://www.aubertduval.com/wp-media/uploads/sites/2/pdf/BMV4_GB.pdf, consultado em Maio, 2018.
- [5] Uddeholm Vidar Superior, https://www.uddeholm.com/files/PB_Uddeholm_vidar_superior_english.pdf, consultado em Maio, 2018.

As propriedades térmicas aço H11 encontram-se presentes respetivas tabelas.

Tabela A - 1- Propriedades do aço H11, [1]

Temperatura	Massa-volúmica [Kg m ⁻³]	Condutividade térmica [W m ⁻¹ K ⁻¹]	Coefficiente de expansão [°C ⁻¹]
100°C		28,4	11,9
200°C		29,7	12,4
300°C		30,2	12,8
400°C		30,1	13,2
500°C	7,85	30,0	13,6
600°C	7,69	29,7	14,2
700°C		30,0	14,4
800°C			14,4

Tabela A - 2- Propriedades do aço H11, [2]

Temperatura	Calor específico [J kg ⁻¹ K ⁻¹]	Condutividade térmica [W m ⁻¹ K ⁻¹]
20°C	460	25,0
500°C	550	28,5
600°C	590	29,3

Tabela A - 3- Propriedades do aço H11, [3]

Temperatura	Massa-volúmica [Kg m ⁻³]	Calor específico [J kg ⁻¹ K ⁻¹]	Condutividade térmica [W m ⁻¹ K ⁻¹]	Coefficiente de expansão [°C ⁻¹]
20°C	7,80	460		
100°C			32,1	11,5
200°C			32,6	12,0
300°C			32,8	12,2
400°C			32,6	12,5
500°C	7,64	550	32,1	12,9
600°C	7,60	590	30,5	13,0
700°C			29,6	13,2

Tabela A - 4- Propriedades do aço H11, [4]

Temperatura	Condutividade térmica [W m ⁻¹ K ⁻¹]	Coefficiente de expansão [°C ⁻¹]
20°C	29	
200°C		11,9
400°C		12,6
600°C		13,4
800°C		13,9

Tabela A - 5- Propriedades do aço H11, [5]

Temperatura	Massa-volúmica [Kg m ⁻³]	Condutividade térmica [W m ⁻¹ K ⁻¹]	Coefficiente de expansão [°C ⁻¹]
20°C	7,80		
200°C	7,75	30	11,6
400°C	7,70	30	12,4
600°C	7,60	31	

ANEXO B: Gráficos das simulações

Neste anexo encontram-se nas figuras B-1 a B-16 a evolução temporal da temperatura das peças e dos respetivos blocos padrão obtidos pelas simulações realizadas no Abaqus para complementar as figuras homologas que constam no capítulo 4.

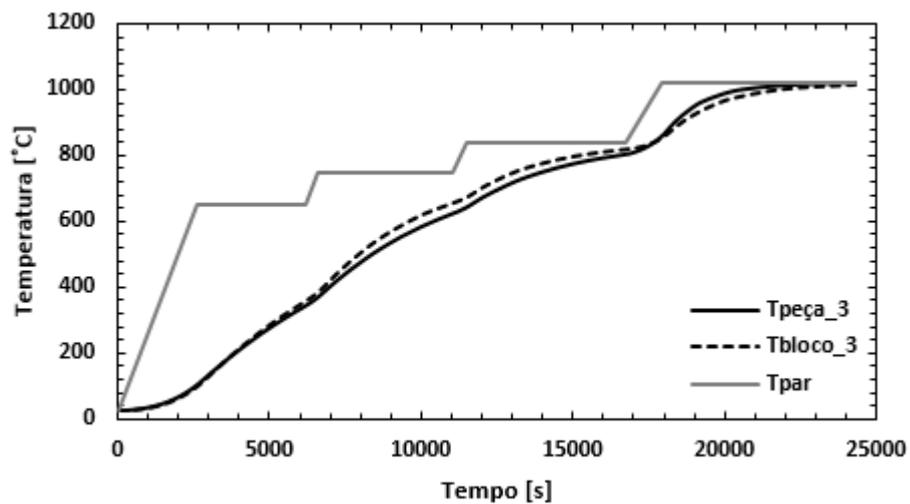


Figura B - 1 - Evolução temporal de temperatura da Peça 3 e do respetivo bloco padrão.

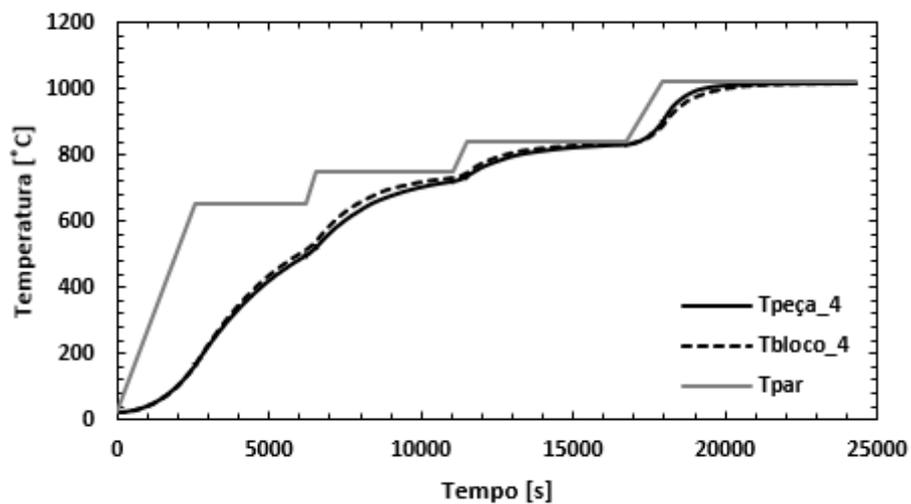


Figura B - 2 - Evolução temporal de temperatura da Peça 4 e do respetivo bloco padrão.

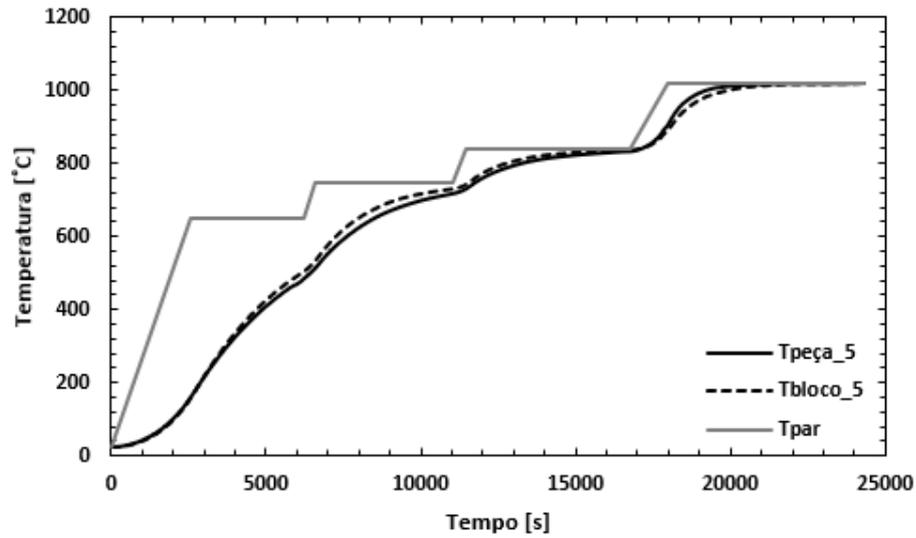


Figura B - 3 - Evolução temporal de temperatura da Peça 5 e do respetivo bloco padrão.

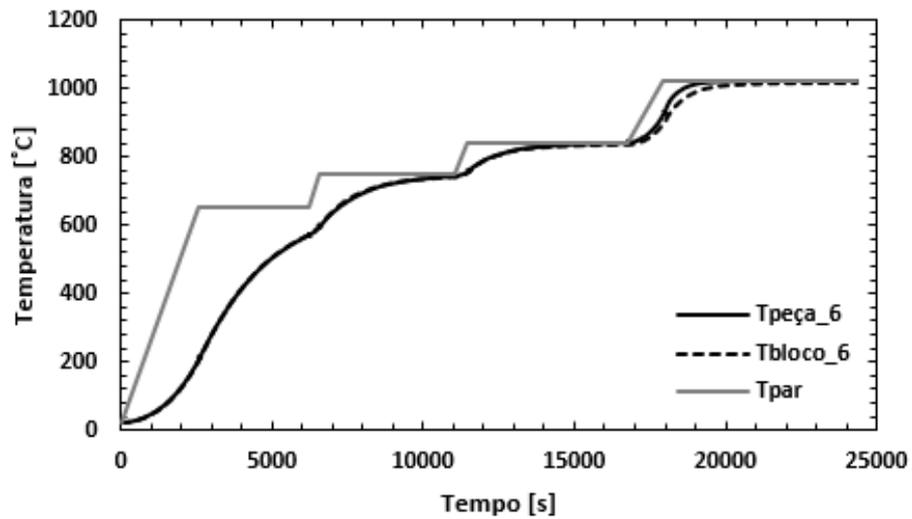


Figura B - 4 - Evolução temporal de temperatura da Peça 6 e do respetivo bloco padrão.

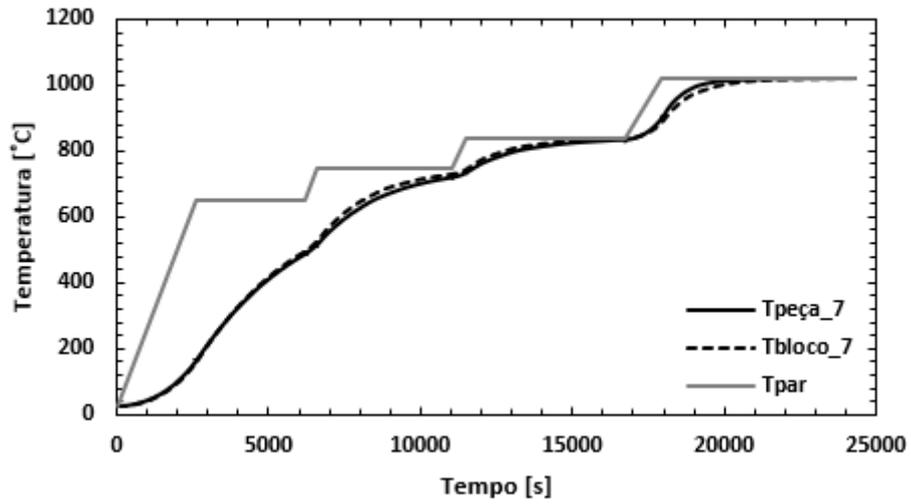


Figura B - 5 - Evolução temporal de temperatura da Peça 7 e do respetivo bloco padrão.

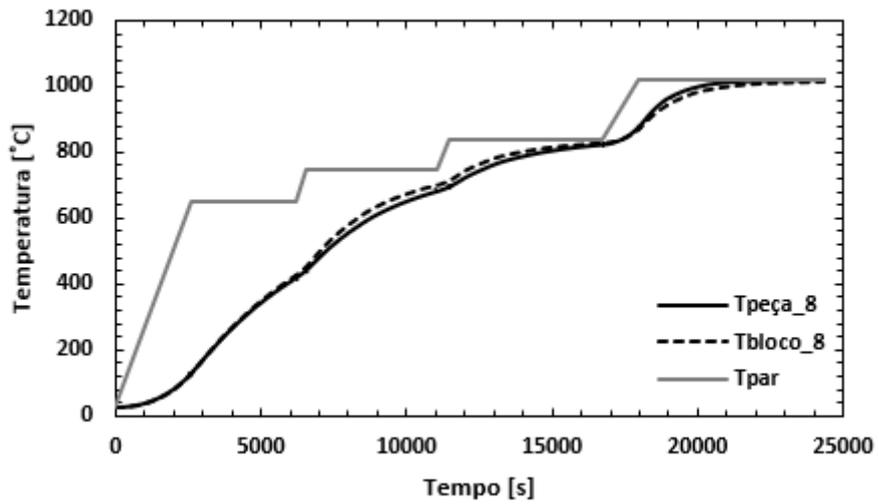


Figura B - 6 - Evolução temporal de temperatura da Peça 8 e do respetivo bloco padrão.

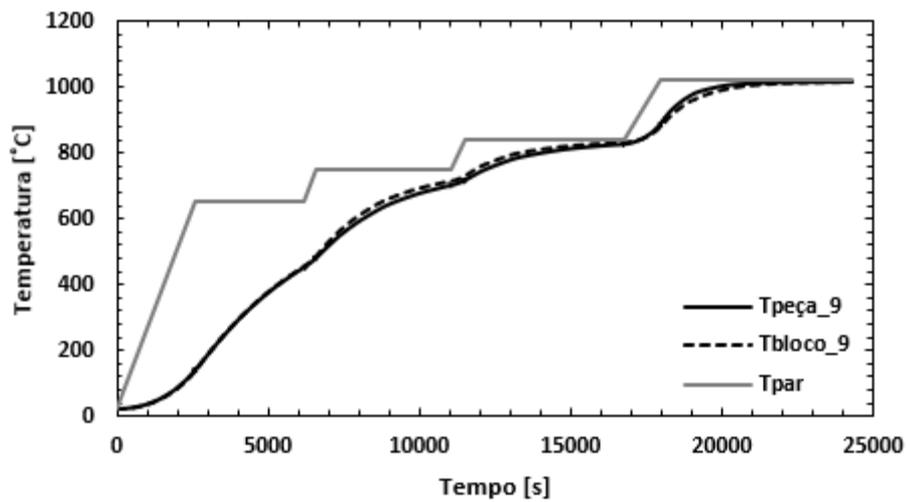


Figura B - 7 - Evolução temporal de temperatura da Peça 9 e do respetivo bloco padrão.

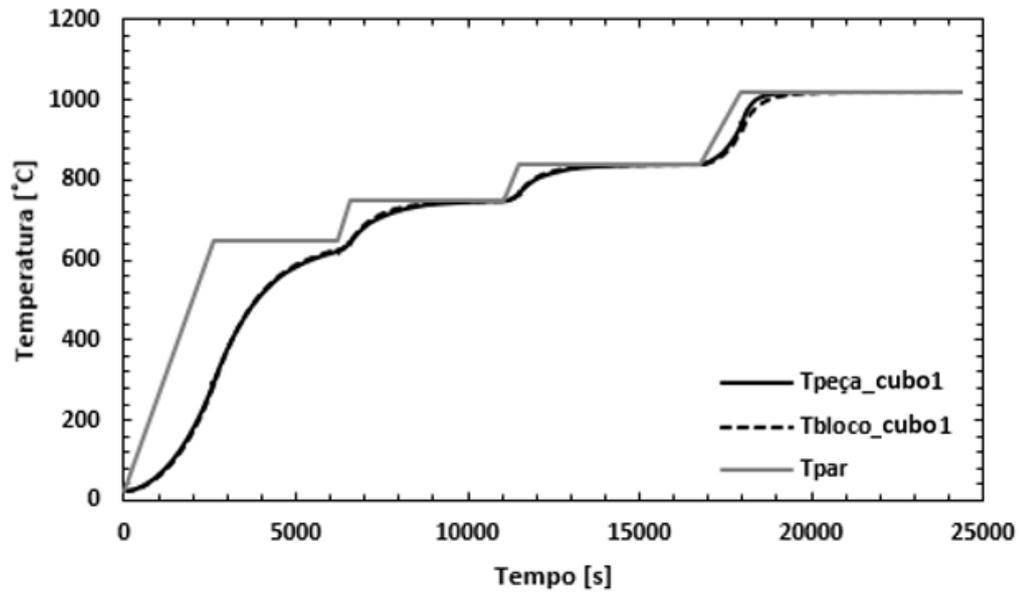


Figura B - 8 - Evolução temporal de temperatura da peça cúbica 1 e do respetivo bloco padrão.

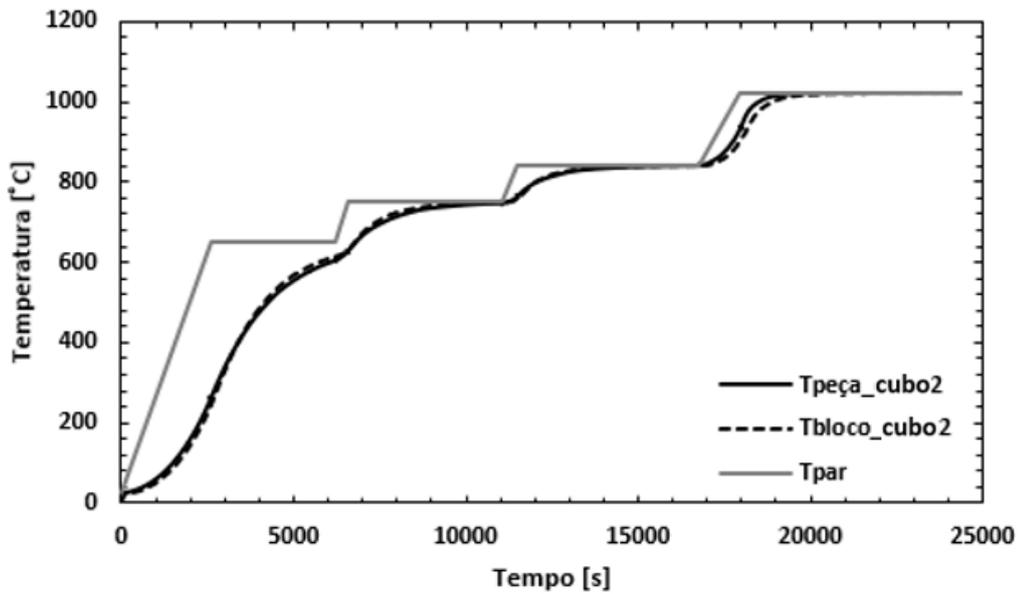


Figura B - 9 - Evolução temporal de temperatura da peça cúbica 2 e do respetivo bloco padrão.

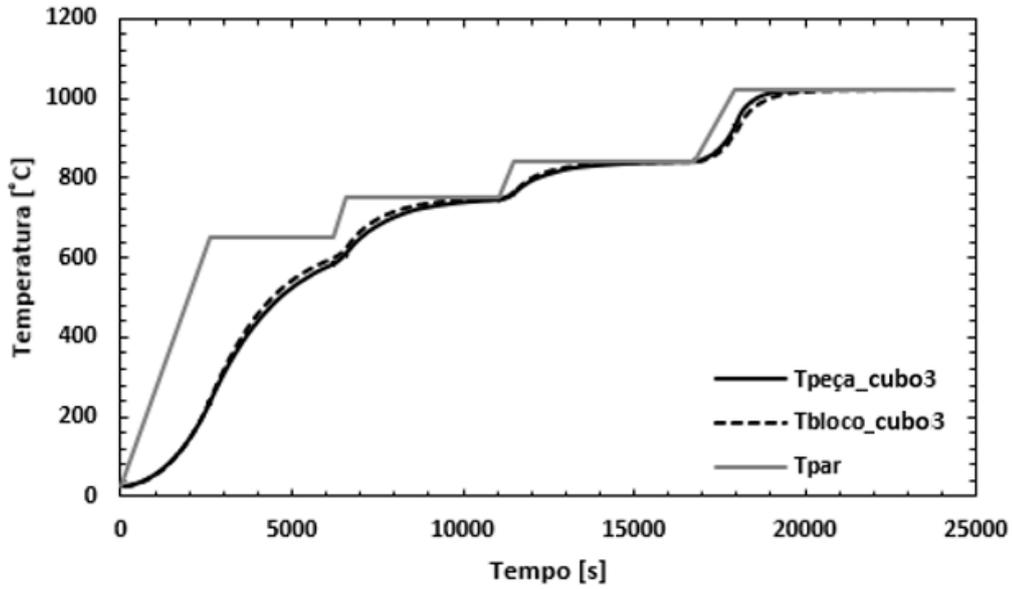


Figura B - 10 - Evolução temporal de temperatura da peça cúbica 3 e do respetivo bloco padrão.

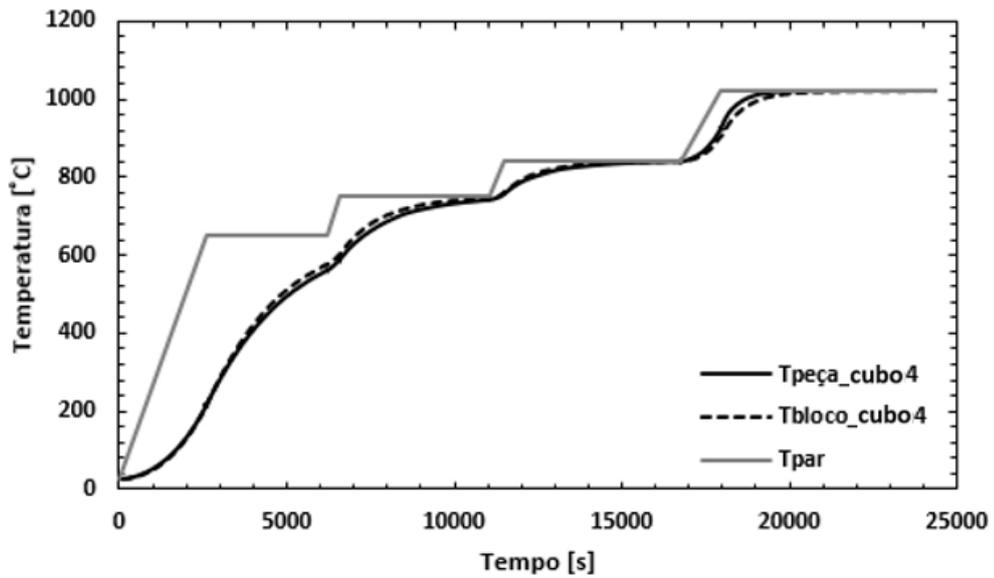


Figura B - 11 - Evolução temporal de temperatura da peça cúbica 4 e do respetivo bloco padrão.

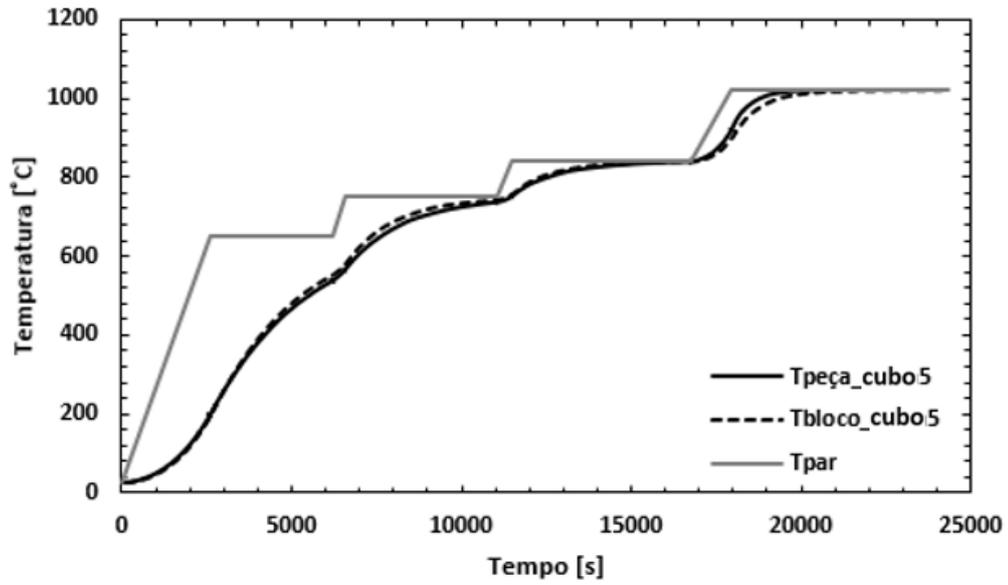


Figura B - 12 - Evolução temporal de temperatura da peça cúbica 5 e do respectivo bloco padrão.

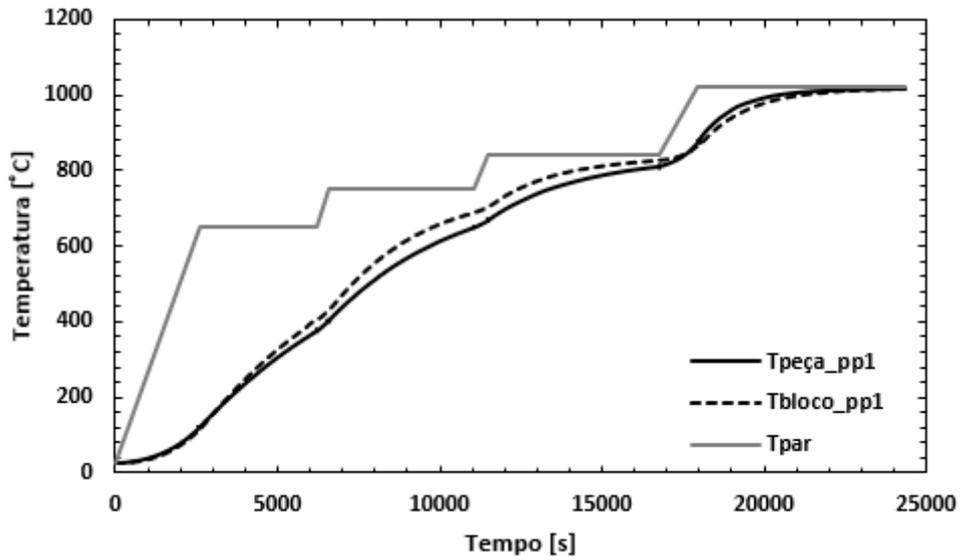


Figura B - 13 - Evolução temporal de temperatura da peça paralelepípeda 1 e do respectivo bloco padrão.

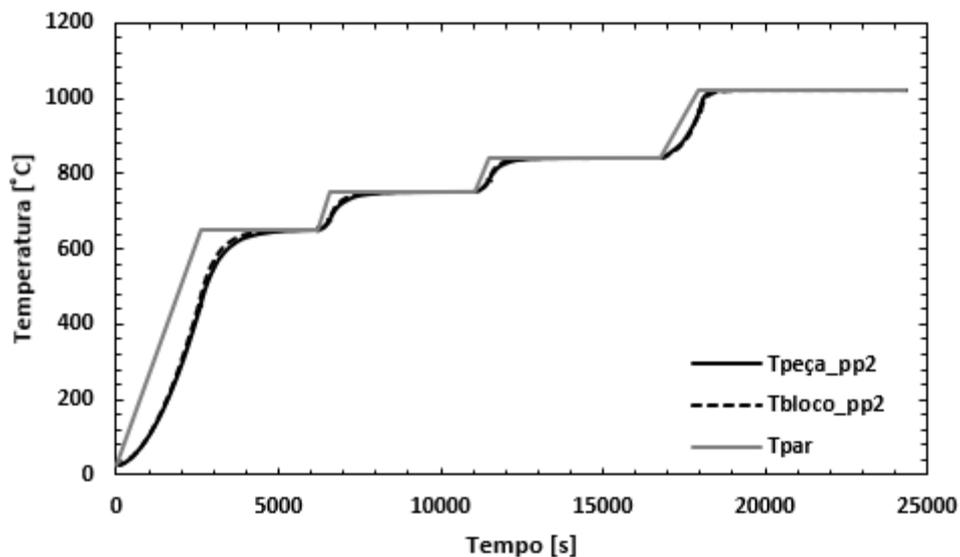


Figura B - 14 - Evolução temporal de temperatura da peça paralelepípeda 2 e do respetivo bloco padrão.

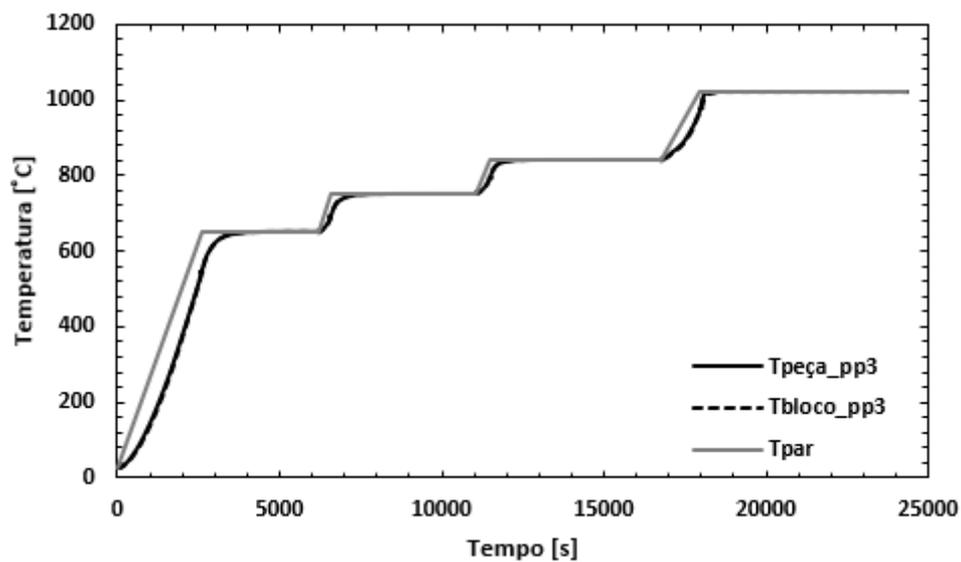


Figura B - 15 - Evolução temporal de temperatura da peça paralelepípeda 3 e do respetivo bloco padrão.

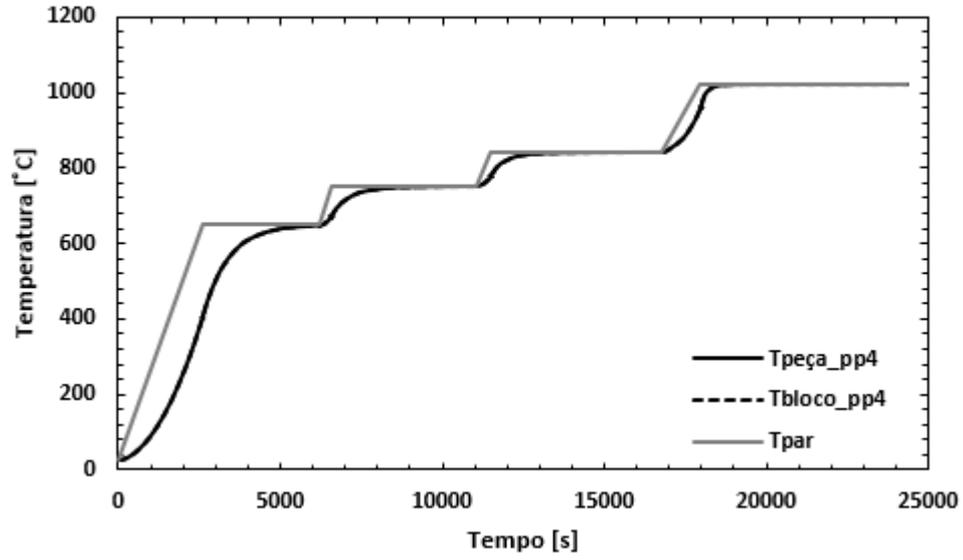


Figura B - 16 - Evolução temporal de temperatura da peça paralelepipedica 4 e do respetivo bloco padrão.