

Tratamento Térmico de matrizes em aço, optimização do seu aquecimento por convecção/radiação

Carlos Manuel de Sousa Pereira Martins Amaro

Projecto Final / Dissertação do MIEM

Orientador na F. Ramada: Engenheiro António Paulo Cerqueira Duarte

Orientadores na FEUP: Professor Paulo José da Silva Martins Coelho

Professor José Duarte Ribeiro Marafona



FEUP

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Julho de 2012

Resumo

Em virtude da colaboração do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto com a empresa F. Ramada, Aços e Indústrias S.A., e de forma a dar continuidade ao trabalho desenvolvido por Oliveira (2011), a presente dissertação centra-se na optimização do aquecimento de matrizes em aço inerente ao tratamento térmico de têmpera realizado na referida empresa.

Após ter sido analisado o estado da arte, numa primeira fase foram determinados os coeficientes de transferência de calor experimentais, recorrendo-se aos dados experimentais de três ensaios para duas peças de teste distintas, um cilindro de teste, de massa 0.38 kg, e um disco de teste, de massa 30.4 kg, efectuados na empresa F. Ramada.

De seguida, através da utilização dos coeficientes experimentais já determinados, foram realizadas as simulações numéricas com o intuito de se poder reproduzir numericamente a fase de aquecimento do tratamento térmico real, tendo sido para isso, utilizado programa de simulação numérica Abaqus.

Numa fase posterior, na posse dos melhores ajustes possíveis das curvas numéricas às curvas reais (experimentais), foi implementada a metodologia de redução do tempo de aquecimento proposta por Oliveira (2011), tendo sido analisados os tempos de aquecimento das peças de teste, integrando-se neste grupo um terceiro e um quarto disco de maiores dimensões.

Do mesmo modo, e com o intuito de verificar as consequências da implementação da metodologia referida, realizou-se um estudo relativo ao campo de tensões instalado nas peças de teste durante a fase de aquecimento lenta e mais rápida, de forma a garantir que durante o aquecimento mais rápido não houvesse problemas a nível estrutural nas peças a tratar.

Seguidamente, e antes de se apresentarem as conclusões, foram também realizadas outras análises, nomeadamente, a análise do aquecimento de peças isoladas, a comparação do efeito do valor da condutibilidade térmica do material no aquecimento e no campo de tensões das peças e também uma análise relativa à utilidade do funcionamento da ventoinha existente na porta dos fornos de tratamento na F. Ramada.

Thermal treatment of steel dies, optimization of heating by means of convection / radiation

Abstract

Due to the cooperation of the Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering of the University of Porto, with the company F. Ramada, Aços e Indústrias S.A., and in order to continue the work of Oliveira (2011), this paper focuses on the optimization of the heating steel dies inherent to the quenching heat treatment performed in the company.

After having examined the prior art, were initially determined coefficients of heat transfer, using the experimental data to the three tests for two pieces of different test: a test cylinder with 0.38 kg of mass, and a test disc with 30.4 kg of mass, made in the company F. Ramada.

Then, by using the experimental coefficients already determined, numerical simulations were carried out in order to be able to reproduce numerically the heating phase the actual heat treatment. To this was used a numerical simulation software, Abaqus.

At a later step in the possession of the best possible fit of the numerical curves to real curves (experimental), the methodology was implemented to reduce the heating time proposed by Oliveira (2011) and were analyzed the heating times of the test pieces, integrating to this group a third and fourth disc of larger dimensions.

Similarly, and in order to check the effects of implementing the method above, a study was conducted on the stress field installed in the test pieces during the slow and fast heating, in order to ensure that during the faster heating there were problems at the structural parts to be treated.

Thereafter, and prior to the present findings, other tests were also performed, in particular, analysis of the heating parts isolated, comparing the effects of the value of thermal conductivity of the material to heat and stress field of parts and also analysis the utility of a fan on the treatment furnace door at F. Ramada.

Agradecimentos

Quero, desde já, deixar um agradecimento muito especial ao Professor Paulo José da Silva Martins Coelho e ao Professor José Duarte Ribeiro Marafona, por todo o apoio e por toda a disponibilidade prestados durante o desenvolvimento deste trabalho. Um Muito Obrigado pelo conhecimento técnico e pessoal transmitido ao longo deste período. Deixo também um agradecimento ao Engenheiro António Paulo Cerqueira Duarte.

Quero deixar um grande agradecimento a todos os meus amigos, ao José Peixoto, Miguel Pereira, João Costa, Elson Pina, Vitor Germano e Gonçalo Lagarto que me acompanharam nesta caminhada.

Por último, e como não podia deixar de ser, um agradecimento muito especial aos meus Pais e ao meu Irmão, por todo o apoio e pelo que me proporcionaram ao longo deste longo caminho.

Muito Obrigado!

Índice de Conteúdos

Nomenclatura.....	xxii
1 Introdução.....	1
1.1 Visão Geral	1
1.2 Estado da arte	3
1.2.1 Resumo do trabalho anteriormente realizado	4
1.3 O presente trabalho	10
1.4 Estrutura da dissertação	10
2 Coeficientes de Transferência de Calor experimentais	11
2.1 Peças a utilizar como sondas para a determinação de h	11
2.2 Procedimento de cálculo dos coeficientes globais de transferência de calor.....	12
2.3 Procedimento de cálculo do coeficiente de convecção médio e da temperatura do gás	17
2.4 Resumo dos resultados obtidos.....	19
3 Simulação numérica da fase de aquecimento	21
3.1 Validação do método numérico para o cilindro de teste.....	22
3.1.1 Refinamento da malha	22
3.1.2 Estudo da máxima variação espacial de temperatura por intervalo de tempo....	25
3.2 Dados de entrada do programa de simulação	26
3.2.1 Ensaio 1	27
3.2.2 Ensaio 2	29
3.2.3 Ensaio 3	30
3.2.4 Comparação da evolução temporal da temperatura do ponto 1 do disco de teste colocado nos três locais estudados	31
3.3 Ajustamento das curvas numéricas às curvas experimentais.....	32
3.3.1 Resultados obtidos utilizando o modelo numérico de radiação em cavidade para o disco de teste.....	32
3.3.2 Resultados obtidos utilizando o modelo numérico de radiação entre dois corpos para o disco de teste.....	37
3.3.3 Resultados obtidos para o cilindro de teste	39
4 Otimização da fase de aquecimento	43
4.1 Curvas de temperatura da parede em função do tempo propostas e resposta das peças de teste	43
4.1.1 Análise ao disco de teste.....	43
4.1.2 Análise ao cilindro de teste.....	45

4.1.3	Análise do comportamento de peças de maior dimensão.....	47
4.1.4	Comparação do comportamento de peças de dimensões distintas	51
4.2	Estudo dos tempos necessários para alcançar a temperatura de têmpera	53
5	Campo de tensões e campo de deformações nas peças de teste	57
5.1	Análise do campo de tensões e do campo de deformações no disco de teste	58
5.2	Análise ao campo de tensões e do campo de deformações no cilindro de teste	62
5.3	Análise do campo de tensões nas peças de maior dimensão	66
6	Análises diversas	69
6.1	Análise do aquecimento de peças isoladas	69
6.2	Condutibilidade térmica.....	73
6.3	Funcionamento da ventoinha	80
7	Conclusões e perspectivas de trabalhos futuros	85
7.1	Conclusões	85
7.2	Perspectivas de trabalhos futuros.....	87
	Anexo A: Resultados experimentais e resultados analíticos – Ensaio 1, Ensaio 2 e Ensaio 3.....	89
A.1	Ensaio 1 – Peças de teste colocadas junto à porta do forno - caso apresentado no capítulo 2 (disco).....	89
A.2	Ensaio 2 - Peças de teste colocadas no meio da carga a tratar	90
A.3	Ensaio 3 – Peças de teste colocadas do lado oposto à porta do forno	93
	Anexo B – Resultados intermédios obtidos para uma emissividade de 0.35 e um factor de forma de 0.5 – pontos 1 e 2 do disco no ensaio 1.....	97
	Anexo C – Validação do método numérico – disco 3 e disco 4.....	99
	Anexo D – Tempos de aquecimento para os locais 1 e 3 correspondentes aos ensaios 1 e 3, respectivamente	101
	Referências Bibliográficas.....	103

Índice de Figuras

Figura 1.1 – Colocação das peças em aço no forno de tratamento.....	2
Figura 1.2 - Fornos de tratamento	2
Figura 1.3 - Tratamento Térmico de têmpera.....	3
Figura 1.4 - Solução analítica da geometria de teste (Oliveira 2011)	5
Figura 1.5 - Escudo de radiação (Oliveira 2011).....	6
Figura 1.6 - Aspecto da malha usada nas simulações de Oliveira (2011) com 75×62 nós	8
Figura 2.1 - Disco de teste tendo assinalados os furos de 35 mm e 65 mm	11
Figura 2.2 - Cilindro de reduzidas dimensões	12
Figura 2.3 - Carga de peças a tratar com as peças de teste integradas (1 – disco de teste e 2 – cilindro de teste)	13
Figura 2.4 - Curvas experimentais do ensaio 1 da temperatura versus tempo. Linha, — T_{pf} , — . Temperatura do termopar no escudo de radiação, ---- T_{disco} , ***** $T_{cilindro}$	14
Figura 2.5 - Estágio utilizado para a determinação do coeficiente global para o furo mais profundo do disco (65 mm). Símbolos, $\triangle$ T_{pf} , $\times$ Temperatura do termopar no escudo de radiação, $\square$ $T_{cilindro}$, $\diamond$ T_{disco}	15
Figura 2.6 - Evolução da curva analítica e da curva experimental, Símbolo, $\triangle$ Pontos experimentais. Linha, — Curva analítica	16
Figura 2.7 - Coeficiente global de transferência de calor e o erro em função da temperatura aparente. Símbolos, $\triangle$ h_g , $\blacktriangle$ erro (equação 2.2) a linha a vermelho assinala o h_g escolhido .	17
Figura 3.1 - Esquema representativo do modelo numérico de radiação em cavidade.....	21
Figura 3.2 - Cilindro de teste	22
Figura 3.3 - Aspecto da malha utilizada para o cilindro com 10 X 46 nós	23
Figura 3.4 - Curva de temperatura em função do tempo obtida analiticamente e numericamente no ponto B do cilindro para uma temperatura aparente de 900 °C e um coeficiente de convecção de 350 W/m ² °C. Linha, — Curva analítica, ***** Curva numérica	24
Figura 3.5 - Evolução do erro nos primeiros 100 segundos para os diferentes valores da máxima variação de temperatura admissível por incremento de tempo para o ponto B do cilindro. Linha, — 1 °C, ***** 3 °C, ---- 5 °C, — . 10 °C	25
Figura 3.6 - Esquema de um disco. Ponto menos profundo (35 mm) – ponto 1; ponto mais profundo (65 mm) - ponto 2; centro – ponto A; ponto mais afastado do centro – ponto B	27
Figura 3.7 - Evolução temporal da temperatura do furo menos profundo (35 mm) e do furo mais profundo (65 mm) obtida experimentalmente. Linha ***** T_{d-1} , — T_{d-2}	27
Figura 3.8 - Curva de temperatura em função do tempo da parede do forno experimental e implementada no Abaqus. Símbolo, $\triangle$ Pontos experimentais. Linha, — Curva implementada no Abaqus	28

Figura 3.9 - Curva de temperatura em função do tempo do gás experimental e implementada no Abaqus. Símbolo, $\triangle$ Pontos experimentais. Linha, — Curva implementada no Abaqus	29
Figura 3.10 - Evolução temporal da temperatura do furo menos profundo (35 mm) e do furo mais profundo (65 mm) obtida experimentalmente. Linha T_{d-1} , — T_{d-2}	30
Figura 3.11 - Evolução temporal da temperatura do furo menos profundo (35 mm) e do furo mais profundo (65 mm) obtida experimentalmente. Linha T_{d-1} , — T_{d-2}	31
Figura 3.12 – Evolução da temperatura do ponto 1 do disco de teste colocado nos três locais estudados. Linha, — Local 1, ... Local 2, --- Local 3	31
Figura 3.13 - Curva de temperatura em função do tempo do ponto 1 do disco obtidas experimentalmente e numericamente para o ensaio 1. Linha, — Curva experimental. Curva numérica	33
Figura 3.14 - Curva de temperatura em função do tempo do ponto A e do ponto B do disco obtidas numericamente para o ensaio 1. Linha, ... T_{d-A} . --- T_{d-B} , — $T_{d-B}-T_{d-A}$	33
Figura 3.15 - Curva de temperatura em função do tempo do ponto 1 do disco obtidas experimentalmente e numericamente para o ensaio 2. Linha, — Curva experimental. Curva numérica	34
Figura 3.16 - Curva de temperatura em função do tempo do ponto A e do ponto B do disco obtidas numericamente para o ensaio 2. Linha, ... T_{d-A} . --- T_{d-B} , — $T_{d-B}-T_{d-A}$	34
Figura 3.17 - Curva de temperatura em função do tempo do ponto 1 do disco obtidas experimentalmente e numericamente para o ensaio 3. Linha, — Curva experimental. Curva numérica	35
Figura 3.18 - Curva de temperatura em função do tempo do ponto A e do ponto B do disco obtidas numericamente para o ensaio 3. Linha, ... T_{d-A} . --- T_{d-B} , — $T_{d-B}-T_{d-A}$	35
Figura 3.19 - Curva de temperatura em função do tempo do ponto 1 do disco obtida experimentalmente e numericamente para o ensaio 1. Linha, — Curva experimental. Curva numérica	38
Figura 3.20 - Curva de temperatura em função do tempo do ponto 1 do disco obtida experimentalmente e numericamente para o ensaio 2. Linha, — Curva experimental. Curva numérica	38
Figura 3.21 - Curva de temperatura em função do tempo do ponto 1 do disco obtida experimentalmente e numericamente para o ensaio 3. Linha, — Curva experimental. Curva numérica	39
Figura 3.22 - Curva de temperatura em função do tempo do ponto A do cilindro obtida experimentalmente e numericamente para o ensaio 1 pelo modelo de radiação entre dois corpos. Linha, — Curva experimental. Curva numérica.....	40
Figura 3.23 - Curva de temperatura em função do tempo do ponto A e do ponto B do cilindro obtida numericamente para o ensaio 1 pelo modelo da radiação entre dois corpos. Linha, ... T_{c-A} . --- T_{c-B} , — $T_{c-B}-T_{c-A}$	40
Figura 3.24 - Curva de temperatura em função do tempo do ponto A do cilindro obtida experimentalmente e numericamente para o ensaio 1 pelo modelo de radiação em cavidade. Linha, — Curva experimental. Curva numérica	41

Figura 3.25 - Curva de temperatura em função do tempo do ponto A e do ponto B do cilindro obtida numericamente para o ensaio 1 pelo modelo da radiação em cavidade. Linha, ... T_{C-A} , ---- T_{C-B} , — $T_{C-B}-T_{C-A}$ 41

Figura 3.26 - Curva de temperatura em função do tempo do ponto A do cilindro obtida experimentalmente e numericamente pelo modelo de radiação entre dois corpos para o ensaio 3. Linha, — Curva experimental. Curva numérica 42

Figura 3.27 - Curva de temperatura em função do tempo do ponto A e do ponto B do cilindro obtida numericamente pelo modelo de radiação entre dois corpos para o ensaio 3. Linha, ... T_{C-A} , ---- T_{C-B} , — $T_{C-B}-T_{C-A}$ 42

Figura 4.1 - Curva de temperatura em função do tempo da parede do forno, do gás e do disco no ponto 1 para o aquecimento mais rápido e mais lento no local do ensaio 1. Linha, — T_{pf} no aquecimento mais rápido, ---- $T_{gás}$ no aquecimento mais rápido, ... T_{d-1} causada pelo aquecimento mais rápido, — T_{pf} no aquecimento mais lento, — $T_{gás}$ no aquecimento mais lento, — T_{d-1} causada pelo aquecimento mais lento 44

Figura 4.2 - Curva de temperatura em função do tempo da parede do forno, do gás e do disco no ponto A e no ponto B para o aquecimento mais rápido e diferença de temperatura entre o ponto B e o ponto A no local do ensaio 1. Linha, — T_{pf} , ---- $T_{gás}$, ... T_{d-B} , — T_{d-A} , — $T_{d-B}-T_{d-A}$ ao longo do aquecimento.....45

Figura 4.3 - Curva de temperatura em função do tempo da parede do forno, do gás e do cilindro no ponto A para o aquecimento mais rápido e mais lento no local do ensaio 1. Linha, — T_{pf} , ---- $T_{gás}$, ... T_{C-A} no aquecimento mais rápido, — T_{pf} , — $T_{gás}$, — T_{C-A} no aquecimento mais lento 46

Figura 4.4 - Curva de temperatura em função do tempo da parede do forno, do gás e do cilindro no ponto A e no ponto B para o aquecimento mais rápido e diferença de temperatura entre o ponto B e o ponto A no local do ensaio 1. Linha, — T_{pf} , ---- $T_{gás}$, ... T_{C-B} , — T_{C-A} , — $T_{C-B}-T_{C-A}$ ao longo do aquecimento.....47

Figura 4.5 - Curva de temperatura em função do tempo da parede do forno, do gás no caso do disco 3 no ponto A para o aquecimento mais rápido e mais lento no local do ensaio 1. Linha, — T_{pf} , ---- $T_{gás}$, ... T_{d3-A} no aquecimento mais rápido, — T_{pf} , — $T_{gás}$, — T_{d3-A} no aquecimento mais lento 48

Figura 4.6 - Curva de temperatura em função do tempo da parede do forno, do gás no caso do disco 3 no ponto A e no ponto B para o aquecimento mais rápido e diferença de temperatura entre o ponto B e o ponto A no local do ensaio 1. Linha, — T_{pf} , ---- $T_{gás}$, ... T_{d3-B} , — T_{d3-A} , — $T_{d3-B}-T_{d3-A}$ ao longo do aquecimento 49

Figura 4.7 - Curva de temperatura em função do tempo da parede do forno, do gás e do disco 4 no ponto A para o aquecimento mais rápido e mais lento no local do ensaio 1. Linha, — T_{pf} , ---- $T_{gás}$, ... T_{d4-A} no aquecimento mais rápido, — T_{pf} , — $T_{gás}$, — T_{d4-A} no aquecimento mais lento 50

Figura 4.8 - Curva de temperatura em função do tempo da parede do forno, do gás e do disco 4 no ponto A e no ponto B para o aquecimento mais rápido e diferença de temperatura do ponto B e do ponto A no local do ensaio 1. Linha, — T_{pf} , ---- $T_{gás}$, ... T_{d4-B} , — T_{d4-A} , — $T_{d4-B}-T_{d4-A}$ ao longo do aquecimento 50

- Figura 4.9 - Curva de temperatura em função do tempo do cilindro, do disco, do disco 3 e do disco 4 para o aquecimento rápido no local correspondente ao ensaio 1. Linha, — T_{c-A} , ... T_{d-A} , — • T_{d3-A} , ---- T_{d4-A} 52
- Figura 4.10 - Curva de temperatura em função do tempo do disco, do disco 3, do disco 4, do disco de 5.7 kg, do disco de 11.3 kg e do disco de 15.1 kg para o aquecimento rápido no local correspondente ao ensaio 2. Linha, — T_{d4-A} , ... T_{d-A} , — • T_{d3-A} , ---- Temperatura do disco de 15.1 kg, — Temperatura do disco de 10 kg, — - Temperatura do disco de 5.7 kg 53
- Figura 4.11 - Tempo de aquecimento correspondente à constante de tempo relativo às peças em análise. Símbolo, ■ Tempo de aquecimento relativo ao aquecimento rápido, ▲ Tempo de aquecimento relativo ao aquecimento lento, ■, ▲ cilindro no local 1 e disco em que existem dados experimentais, ■, ▲ cilindro no local 3 55
- Figura 5.1 - Esquema representativo do campo de tensões instalado no disco no instante mais crítico, sendo o ponto B um dos pontos críticos da secção 58
- Figura 5.2 - Curva de tensão e de temperatura em função do tempo obtida numericamente no ponto B do disco para o aquecimento mais lento e para o aquecimento mais rápido no local correspondente ao ensaio 1. Linha, — Curva de tensão do aquecimento mais lento, ... Curva de tensão do aquecimento mais rápido, — • T_{d-B} no aquecimento mais lento, ---- T_{d-B} no aquecimento mais rápido 59
- Figura 5.3 - Curva de tensão e de temperatura em função do tempo obtida numericamente no ponto B do disco para o aquecimento mais rápido no local correspondente ao ensaio 2. Linha, — Curva de tensão no ponto B do disco, ---- T_{d-B} 60
- Figura 5.4 - Curva de tensão e de temperatura em função do tempo obtida numericamente no ponto B do disco para o aquecimento mais rápido no local correspondente ao ensaio 3. Linha, — Curva de tensão no ponto B do disco, ---- T_{d-B} 60
- Figura 5.5 - Campo de deformações do disco de teste no final do aquecimento mais rápido e mais lento.....61
- Figura 5.6 - Evolução da deformação ao longo do tempo no ponto B do disco de teste no aquecimento mais rápido e no aquecimento mais lento. Linha, — Deformação no aquecimento mais lento, ... Deformação no aquecimento mais rápido.....62
- Figura 5.7 - Esquema representativo do campo de tensões instalado no cilindro no instante mais crítico, assinalando a seta um dos pontos críticos da secção 63
- Figura 5.8 - Curva de tensão e de temperatura em função do tempo obtida numericamente no ponto crítico do cilindro para o aquecimento mais lento e para o aquecimento mais rápido no local correspondente ao ensaio 1. Linha, — Curva de tensão do aquecimento mais lento, ... Curva de tensão do aquecimento mais rápido, — • Temperatura do ponto crítico do cilindro no aquecimento mais lento, ---- Temperatura do ponto crítico do cilindro no aquecimento mais rápido.....64
- Figura 5.9 - Curva de tensão e de temperatura em função do tempo obtida numericamente no ponto crítico do cilindro para o aquecimento mais rápido no local correspondente ao ensaio 3. Linha, — Curva de tensão, ---- Temperatura do ponto crítico do cilindro 64
- Figura 5.10 - Campo de deformações do cilindro de teste no final do aquecimento mais rápido e mais lento.....65

Figura 5.11 - Evolução da deformação ao longo do tempo no ponto B do cilindro de teste no aquecimento mais rápido e no aquecimento mais lento. Linha, — Deformação no aquecimento mais lento, ***** Deformação no aquecimento mais rápido.....66

Figura 5.12 - Curva de tensão e de temperatura em função do tempo obtida numericamente no ponto B do disco 3 para o aquecimento mais lento e para o aquecimento mais rápido no local correspondente ao ensaio 1. Linha, — Curva de tensão do aquecimento mais lento, ... Curva de tensão do aquecimento mais rápido, — . T_{d3-B} no aquecimento mais lento, ---- T_{d3-B} no aquecimento mais rápido 67

Figura 5.13 - Curva de tensão e de temperatura em função do tempo obtida numericamente no ponto B do disco 4 para o aquecimento mais lento e para o aquecimento mais rápido no local correspondente ao ensaio 1. Linha, — Curva de tensão do aquecimento mais lento, ... Curva de tensão do aquecimento mais rápido, — . T_{d4-B} no aquecimento mais lento, ---- T_{d4-B} no aquecimento mais rápido 67

Figura 6.1 - Curva de temperatura em função do tempo obtida numericamente no ponto A do cilindro, do disco e do disco 3 para o aquecimento com a carga completa e para o aquecimento da peça isolada. Linha, — T_{c-A} , ***** T_{d-A} , ---- T_{d3-A} , no aquecimento da peça isolada, — . T_{c-A} , — T_{d-A} , — T_{d3-A} , no aquecimento com a carga completa....70

Figura 6.2 - Curva de tensão em função do tempo obtida numericamente para os pontos críticos do cilindro, do disco e do disco 3 para o aquecimento mais lento. Linha, , — Tensão do cilindro, ***** Tensão do disco, ---- Tensão do disco 3.....71

Figura 6.3 - Curva de temperatura em função do tempo obtida numericamente no ponto A do cilindro, do disco e do disco 3 para o aquecimento rápido. Linha, — T_{c-A} , ***** T_{d-A} , ---- T_{d3-A} 72

Figura 6.4 - Curva de tensão em função do tempo obtida numericamente nos pontos críticos do cilindro, do disco e do disco 3 para o aquecimento mais rápido. Linha, , — Tensão do cilindro, ***** Tensão do disco, ---- Tensão do disco 3.....73

Figura 6.5 - Curva de temperatura em função do tempo obtida numericamente no ponto A do disco para uma condutibilidade térmica de 36.8 W/mK e para uma condutibilidade térmica de 15 W/mK no aquecimento lento. Linha, — T_{d-A} , ---- T_{d-B} , para uma condutibilidade térmica de 36.8 W/mK, ***** T_{d-A} , — . T_{d-B} , para uma condutibilidade térmica de 15 W/mK....74

Figura 6.6 - Diferença entre a temperatura do ponto B e a temperatura do ponto A do disco para uma condutibilidade térmica de 36.8 W/mK e para uma condutibilidade térmica de 15 W/mK no aquecimento mais lento. Linha, — $T_{d-B}-T_{d-A}$ para uma condutibilidade térmica de 36.8 W/mK, ***** $T_{d-B}-T_{d-A}$ para uma condutibilidade térmica de 15 W/mK 75

Figura 6.7 - Curva de tensão em função do tempo obtida numericamente no ponto B do disco para uma condutibilidade térmica de 36.8 W/mK e para uma condutibilidade térmica de 15 W/mK no aquecimento mais lento. Linha, — Tensão do disco para uma condutibilidade térmica de 36.8 W/mK, ***** Tensão do disco para uma condutibilidade térmica de 15 W/mK 76

Figura 6.8 - Curva de temperatura em função do tempo obtida numericamente no ponto A do disco para uma condutibilidade térmica de 36.8 W/mK e para uma condutibilidade térmica de 15 W/mK no aquecimento rápido. Linha, — T_{d-A} para uma condutibilidade térmica de 36.8 W/mK, ***** T_{d-A} para uma condutibilidade térmica de 15 W/mK.....77

Figura 6.9 - Diferença entre a temperatura do ponto B e a temperatura do ponto A do disco para uma condutibilidade térmica de 36.8 W/mK e para uma condutibilidade térmica de 15 W/mK no aquecimento mais rápido. Linha, — $T_{d-B}-T_{d-A}$ para uma condutibilidade térmica de 36.8 W/mK, ... $T_{d-B}-T_{d-A}$ para uma condutibilidade térmica de 15 W/mK	78
Figura 6.10 - Curva de tensão em função do tempo obtida numericamente no ponto B do disco para uma condutibilidade térmica de 36.8 W/mK e para uma condutibilidade térmica de 15 W/mK no aquecimento mais rápido. Linha, — Tensão do disco para uma condutibilidade térmica de 36.8 W/mK, ... Tensão do disco para uma condutibilidade térmica de 15 W/mK	79
Figura 6.11 - Evolução da tensão do ponto B do disco e evolução da diferença entre a temperatura do ponto B e do ponto A do disco ao longo do tempo no aquecimento mais lento para uma condutibilidade térmica de 36.8 W/mK. Linha, — $T_{d-B}-T_{d-A}$, ---- Tensão no ponto B do disco	80
Figura 6.12 - Curva de temperatura em função do tempo da parede do forno e do gás e temperatura no ponto A do disco obtida numericamente para o aquecimento lento com convecção forçada e para o aquecimento lento com convecção natural. Linha, — T_{pf} , ---- $T_{gás}$, — . T_{d-A} no aquecimento com convecção forçada, ... T_{d-A} no aquecimento com convecção natural	81
Figura 6.13 - Curva de temperatura em função do tempo da parede do forno e do gás e temperatura no ponto A do disco obtida numericamente para o aquecimento rápido com convecção forçada e para o aquecimento rápido com convecção natural. Linha, — T_{pf} , ---- $T_{gás}$, — . T_{d-A} no aquecimento com convecção forçada, ... T_{d-A} no aquecimento com convecção natural	82
Figura A.0.1 - Evolução da curva analítica e da curva experimental, Símbolo, $\triangle$ Pontos experimentais. Linha, — Curva analítica	89
Figura A.0.2 - Coeficiente global de transferência de calor e erro em função da temperatura aparente. Símbolos, $\triangle$ h_g , $\blacktriangle$ erro	90
Figura A.0.3 - Carga a tratar no ensaio 2, as setas assinalam as peças de teste	90
Figura A.0.4 - Curvas experimentais do ensaio 2 da temperatura versus tempo. Linha, — Temperatura da parede do forno, ... Temperatura do termopar no escudo, ---- Temperatura do disco de teste	91
Figura A.0.5 - Estágio utilizado para a determinação do coeficiente global para o furo mais profundo do disco (65 mm). Símbolos, $\triangle$ Temperatura da parede do forno, $\diamond$ Temperatura do termopar no escudo de radiação, $\square$ Temperatura do disco de teste, — Temperatura obtida analiticamente do disco	92
Figura A.0.6 - Coeficiente global de transferência de calor e erro em função da temperatura aparente. Símbolos, $\square$ h_g , $\blacksquare$ erro	92
Figura A.0.7 - Carga a tratar no ensaio 3, as setas assinalam as peças de teste	93
Figura A.0.8 - Curvas experimentais do ensaio 3 da temperatura versus tempo. Linha, — Temperatura da parede do forno, ... Temperatura do termopar no escudo, — . Temperatura do disco de teste, ---- Temperatura do cilindro de teste	93
Figura A.0.9 - Estágio utilizado para a determinação do coeficiente global para o furo mais profundo do disco (65 mm). Símbolos. $\triangle$ Temperatura da parede do forno, $\diamond$ Temperatura	

do termopar no escudo de radiação, □ Temperatura experimental do disco de teste, × Temperatura experimental do cilindro de teste. Símbolos. Linha, — Temperatura obtida analiticamente do disco, ... Temperatura obtida analiticamente do cilindro 94

Figura A.0.10 - Coeficiente global de transferência de calor e erro em função da temperatura aparente. Símbolos, □ h_g , ■ erro 95

Figura A.0.11 - Coeficiente global de transferência de calor e erro em função da temperatura aparente. Símbolos, △ h_g , ▲ erro 95

Figura B.0.1 - Curvas de temperatura em função do tempo do ponto 1 obtidas experimentalmente e numericamente. Linha, — Curva experimental, ... Curva numérica 97

Figura B.0.2 - Curvas de temperatura em função do tempo do ponto 2 obtidas experimentalmente e numericamente. Linha, — Curva experimental, ... Curva numérica 97

Figura C.0.1 - Curva de temperatura em função do tempo obtida analiticamente e numericamente no ponto B do disco 3 para uma temperatura aparente de 900 °C e um coeficiente de convecção de 350 W/m²°C. Linha, — Curva analítica, ... Curva numérica 99

Figura C.0.2 - Curva de temperatura em função do tempo obtida analiticamente e numericamente no ponto B do disco 4 para uma temperatura aparente de 900 °C e um coeficiente de convecção de 350 W/m²°C. Linha, — Curva analítica, ... Curva numérica 100

Índice de Tabelas

Tabela 1.1 - Valores do coeficiente global de transferência de calor e do coeficiente de convecção, Oliveira (2011)	6
Tabela 2.1 - Valores obtidos dos coeficientes de transferência de calor, da temperatura aparente e da temperatura do gás.....	19
Tabela 3.1 - Erro médio nos primeiros 100 segundos e tempo de simulação para os diferentes refinamentos de malha.....	24
Tabela 3.2 - Erros médios obtidos para os primeiros 100 segundos para diferentes valores da máxima variação espacial de temperatura admissível por incremento de tempo e respectivos tempos de simulação.....	26
Tabela 3.3 - Resumo dos parâmetros utilizados para os ajustes das curvas numéricas	37
Tabela 4.1 - Tempos de aquecimento correspondentes a cada peça no local 2.....	54
Tabela 5.1 - Propriedades térmicas e mecânicas do aço ALVAR 14.....	57
Tabela 6.1 - Tempos de aquecimento das peças isoladamente.....	70
Tabela 6.2 - Tempos de aquecimento do processo com convecção forçada e convecção natural	82
Tabela C.1 - Erro médio nos primeiros 100 segundos para o disco 3 e disco 4.....	100
Tabela D.1 - Tempos de aquecimento do local 1 correspondente ao ensaio 1.....	101
Tabela D.2 - Tempos de aquecimento do local 3 correspondente ao ensaio 3.....	101

Nomenclatura

Símbolo	Descrição	Unidades
a	Espessura do disco	[m]
r	Raio do disco	[m]
Bi	Número de Biot	-
h_g	Coeficiente de transferência de calor global	[W/m ² °C]
h_r	Coeficiente de radiação	[W/m ² °C]
h_c	Coeficiente de convecção	[W/m ² °C]
h_{real}	Coeficiente de convecção real	[W/m ² °C]
$\bar{h}_c$	Coeficiente de convecção médio	[W/m ² °C]
$\bar{h}_r$	Coeficiente de radiação médio	[W/m ² °C]
L_e	Comprimento característico	[m]
k	Condutibilidade térmica	[W/mK]
$V_{sólido}$	Volume do sólido	[m ³]
$A_{sólido}$	Área total do sólido	[m ²]
T_{pf}	Temperatura da parede do forno	[°C]
T_{escudo}	Temperatura do termopar no escudo de radiação	[°C]
$\dot{Q}_{parede-disco}$	Calor transferido da parede do forno para o disco	[W]
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	[W.m ⁻² .K ⁻⁴]
T_{disco}	Temperatura do disco de teste	[°C]
$T_{cilindro}$	Temperatura do cilindro de teste	[°C]
A_{pf}	Área da parede do forno	[m ²]
ε_{parede}	Emissividade da parede do forno	-
$F_{parede-disco}$	Factor de forma parede-disco	-
A_{disco}	Área superficial do disco	[m ²]
ε_{disco}	Emissividade do disco	-
$F_{disco-parede}$	Factor de forma disco-parede	-
$T_{aparente}$	Temperatura aparente	[°C]
$T_{\square}$	Temperatura resultante da temperatura da parede do forno e da temperatura do gás	[°C]
$T_{experimental}$	Temperatura obtida experimentalmente	[°C]

$T_{analítica}$	Temperatura obtida analiticamente	[°C]
$T_{numérica}$	Temperatura obtida numericamente	[°C]
$\dot{Q}_r$	Calor transferido por radiação	[W]
$\dot{Q}_{total}$	Calor total transferido à peça	[W]
$\dot{Q}_c$	Calor transferido por convecção	[W]
T_{c-A}	Temperatura no ponto A do cilindro	[°C]
T_{c-B}	Temperatura no ponto B do cilindro	[°C]
T_{d-A}	Temperatura no ponto A do disco	[°C]
T_{d-B}	Temperatura no ponto B do disco	[°C]
T_{d-1}	Temperatura no ponto 1 do disco	[°C]
T_{d-2}	Temperatura no ponto 2 do disco	[°C]
T_{d3-A}	Temperatura no ponto A do disco 3	[°C]
T_{d3-B}	Temperatura no ponto B do disco 3	[°C]
T_{d4-A}	Temperatura no ponto A do disco 4	[°C]
T_{d4-B}	Temperatura no ponto B do disco 4	[°C]
$t_{99\%}$	Tempo real	[s]
ρ	Massa volúmica do material	[kg.m ⁻³]
c_p	Calor específico do material	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
τ	Constante de tempo	[s]

Outras designações

Local 1	Local correspondente ao ensaio 1
Local 2	Local correspondente ao ensaio 2
Local 3	Local correspondente ao ensaio 3

1 Introdução

Os tratamentos térmicos utilizados para a melhoria das propriedades mecânicas dos aços têm associados a si processos de transferência de calor que são a base destes, sendo esta portanto uma matéria de elevada importância não só para o estudo e melhoria desses tratamentos térmicos, como também para a optimização de todo o processo, num mundo onde a redução de custos de produção e de emissões poluentes é cada vez mais premente.

1.1 Visão Geral

A F. Ramada, Aços e Indústrias S.A. é uma empresa que apresenta os aços e as ferramentas como as suas áreas de negócio. A empresa é líder nacional nos seguintes ramos:

- Aços especiais - comercial;
- Arco de aço laminado a frio;
- Aço estirado a frio;
- Realização de tratamentos térmicos;
- Ferramentas para fabrico de aglomerado e reciclagem de plásticos;

A preocupação relativamente à redução dos custos de produção é grande fazendo com que a empresa tente procurar soluções que se possam traduzir na obtenção de processos mais eficientes. Desta forma e em colaboração com a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e em particular com o Departamento de Engenharia Mecânica, a F. Ramada, Aços e Indústrias S.A. pretende optimizar um dos tratamentos térmicos que lá se realizam, designadamente o processo de têmpera. Este tratamento realiza-se recorrendo a fornos específicos para o efeito onde são introduzidas as peças a tratar como se pode verificar na Figura 1.1 e Figura 1.2.



Figura 1.1 – Colocação das peças em aço no forno de tratamento



Figura 1.2 - Fornos de tratamento

A têmpera, como os outros tratamentos térmicos é um processo constituído por três etapas distintas, o aquecimento, o estágio à temperatura de têmpera e o arrefecimento brusco. Com o referido estágio pretende-se a austenização completa da massa do aço para que com um adequado arrefecimento posterior a transformar em martensite, Soares (1992). Como todos os outros tratamentos térmicos, também a têmpera tem como finalidade a melhoria das propriedades mecânicas dos aços, sendo exemplo destas as seguintes:

- Aumento da dureza;
- Aumento do limite de elasticidade;
- Aumento da resistência mecânica;
- Aumento da resistência ao desgaste;

A duração total do processo de têmpera, que inclui as três etapas referidas, é maioritariamente ocupada pela fase de aquecimento, cerca de 70% do tratamento térmico. Esta etapa é normalmente constituída por vários patamares intermédios, como se pode observar na Figura 1.3, que representa a curva de temperatura versus tempo num processo real de têmpera.

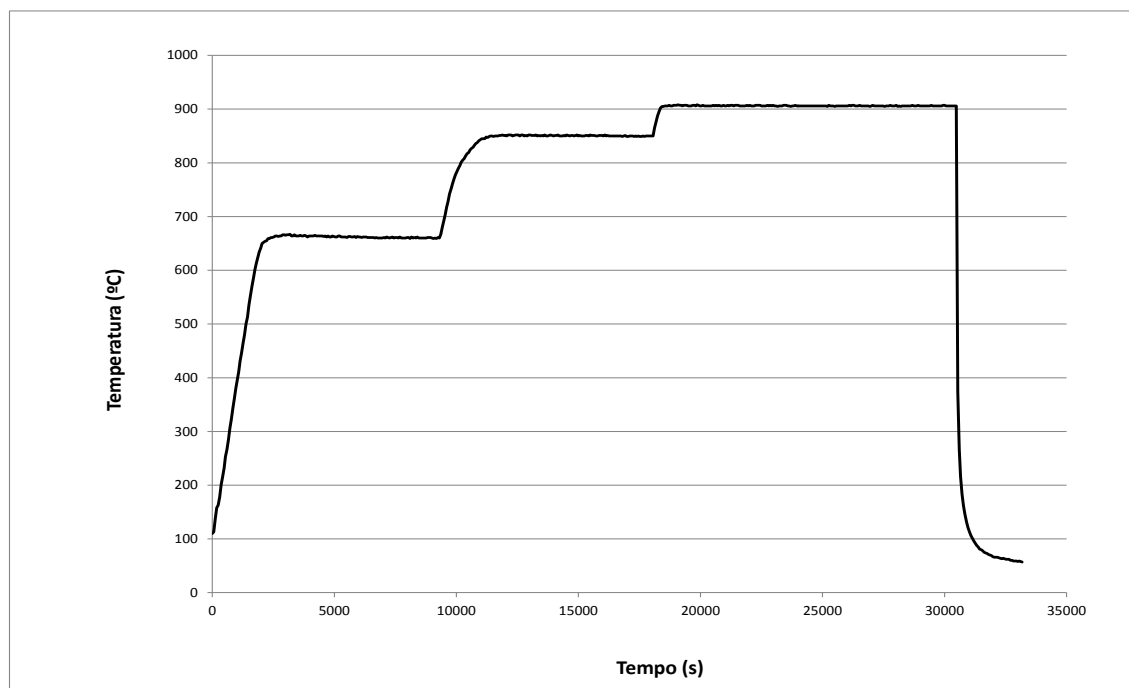


Figura 1.3 - Tratamento Térmico de têmpera

A evolução da temperatura ao longo do tempo na fase de aquecimento é definida por diferentes patamares como se comprova na Figura 1.3, podendo estes patamares ser alterados. Por este motivo um dos objectivos deste trabalho será a redução do tempo da etapa de aquecimento pela alteração destes mesmos patamares. De salientar que qualquer alteração à fase de aquecimento, tem de ter em conta as propriedades do aço, nomeadamente a condutividade térmica.

1.2 Estado da arte

O tratamento térmico de têmpera é constituído por três fases distintas. A primeira fase diz respeito ao aquecimento, onde o objectivo é colocar as peças a tratar a uma determinada temperatura durante um dado período de tempo, sendo este aquecimento realizado pelos processos de transferência de calor por convecção e por radiação. A fase seguinte do tratamento, após um estágio a uma elevada temperatura, é a fase do arrefecimento rápido sendo esta a fase mais crítica de todo o processo. Este arrefecimento torna-se a fase mais crítica pois acontece num período de tempo muito mais curto, sendo difícil de ter um arrefecimento rápido e homogéneo das matrizes, e dele depende grandemente a melhoria significativa das propriedades mecânicas destas matrizes em tratamento. Talvez por isto, grande parte dos trabalhos publicados até à data sobre tratamentos térmicos incidam

sobretudo sobre esta fase do processo como se comprova pelo trabalho de revisão bibliográfica de Mackerle (2003).

A fase de aquecimento, por seu lado, embora menos estudada, corresponde aproximadamente a 70% do tempo total do tratamento, facto este que automaticamente a elege como uma área preferencial de estudo, se o objectivo for, como é o do presente trabalho, o de reduzir o tempo do ensaio tendo em vista reduzir os custos energéticos e aumentar a produtividade.

Ao contrário da fase de arrefecimento, na fase de aquecimento as trocas de calor dão-se através de dois modos – convecção e sobretudo por radiação. Nesta fase o modo de transferência de calor por radiação é muito significativo sendo mesmo o único modo de transferência de calor na gama de temperaturas entre os 850 °C e os 1300 °C (Elkatatny *et al.*, 2003) pelo facto do gás utilizado, normalmente o azoto, ser retirado da câmara para temperaturas superiores a 850 °C por recomendação dos fabricantes de fornos.

Embora existam também recomendações dos fabricantes dos fornos para a fase de aquecimento das peças, estas são normalmente genéricas de forma a servirem qualquer tipo de material, e geometria, a ser tratado termicamente. No caso presente está-se interessado em estudar o tratamento de matrizes construídas no aço ALVAR 14 (DIN 56 NiCrMoV7), possuindo uma condutibilidade térmica, k , que varia pouco com a temperatura e cujo valor é de 36.8 W/(m²°C. Como a condutividade térmica deste aço é particularmente elevada, e tratando-se de peças relativamente pequenas, é possível, em princípio, ser menos exigente nos tempos e estágios intermédios necessários para atingir a temperatura à qual as peças devem ser mantidas, designada por temperatura de têmpera conforme apontam as conclusões do trabalho de Oliveira (2011).

1.2.1 Resumo do trabalho anteriormente realizado

O presente trabalho surge no seguimento do estudo realizado anteriormente por Oliveira (2011), onde foi modelizado o processo de aquecimento no tratamento térmico de têmpera, de uma matriz de aço em forma de disco, tendo sido verificada a existência da possibilidade de se introduzirem melhorias importantes com o objectivo final de reduzir o tempo de aquecimento das matrizes em aço. O referido trabalho consistiu num estudo analítico, experimental e numérico do aquecimento de um disco em aço ALVAR 14 com as dimensões de 230 mm de diâmetro e de 95 mm de espessura tendo o disco usado no trabalho experimental dois furos radiais com profundidades de 35 mm e de 65 mm onde foram introduzidos termopares de 1,5 mm de diâmetro que registaram a temperatura da peça ao longo do tempo.

O início do estudo efectuado por Oliveira (2011) do processo de aquecimento no tratamento térmico de têmpera passou pela implementação das soluções analíticas existentes na literatura, Incropera (1996), na folha de cálculo Excel com o intuito de obter uma ferramenta que permitisse validar as soluções numéricas e também estimar os coeficientes globais de transferência de calor experimentais entre o forno e a peça. As soluções analíticas implementadas foram obtidas através da conjugação de duas soluções analíticas distintas.

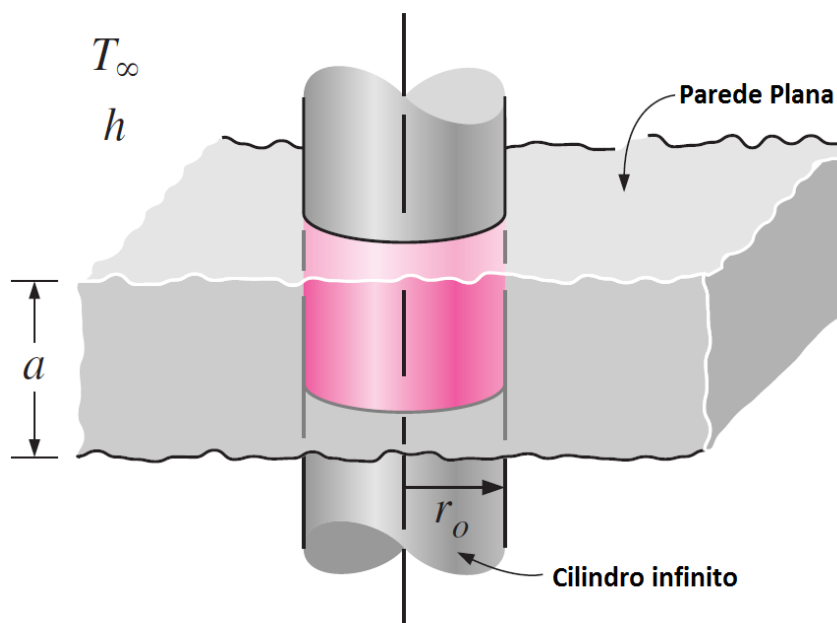


Figura 1.4 - Solução analítica da geometria de teste (Oliveira 2011)

Como se pode observar na Figura 1.4, as soluções analíticas para o caso da geometria estudada – disco de espessura a e de raio $R=r_o$ – foram determinadas através da intersecção da solução analítica para um cilindro infinito de raio R com a solução analítica para uma placa plana infinita de espessura a , ver Oliveira (2011) para mais detalhes.

Com base nesta ferramenta matemática foram calculados os coeficientes globais de transferência de calor e os coeficientes de convecção para três temperaturas de parede do forno, T_{pf} , estando o disco colocado junto à porta, onde os coeficientes de convecção são maiores em virtude da presença nesse local de uma ventoinha. Na Tabela 1.1 podem ser observados os valores então obtidos, não só dos coeficientes global, h_g , e de convecção, h_c , mas também os respectivos valores do número de Biot, Bi , calculado a partir da expressão seguinte,

$$Bi = \frac{h_g L_e}{k} \quad (1.1)$$

em que L_e representa o comprimento característico dado por $L_e = \frac{V_{sólido}}{A_{sólido}}$, h_g é o coeficiente

global de transferência de calor e k é a condutibilidade térmica do material constituinte do sólido.

Tabela 1.1 - Valores do coeficiente global de transferência de calor e do coeficiente de convecção, Oliveira (2011)

	T_{pf} [°C]	h_g [W/m ² °C]	h_c [W/m ² °C]	Bi
Estágio 1	55	18.2	17	0.013
Estágio 2	108	16.8	14	0.012
Estágio 3	157	12.4	9	0.009

Analisando os valores da Tabela 1.1 pode afirmar-se desde já que o coeficiente de convecção é moderadamente baixo tendo-se verificado que só é relevante para baixas temperaturas pois para o caso de temperaturas altas o fenómeno da radiação é dominante, Oliveira (2011). Relativamente ao número de Biot pode notar-se que este, para estas temperaturas, é baixo e inferior ao valor de referência, que é de 0.1 ($Bi = 0.1$), abaixo do qual se pode admitir que as variações espaciais de temperatura são desprezáveis, i.e., o denominado sistema global.

A importância dos dados experimentais no estudo do processo de aquecimento é elevada. O trabalho experimental assegurado na empresa, consistiu na obtenção da evolução temporal das temperaturas das peças em análise, da parede do forno, e do termopar colocado no interior de um escudo de radiação. Os dados mais relevantes dos ensaios experimentais são a evolução temporal das temperaturas do disco de teste, da parede do forno e caso fosse possível da temperatura do gás (azoto) existente no forno durante o processo.

A evolução da temperatura do gás existente no forno durante o processo de aquecimento é muito difícil de conhecer em virtude do efeito da radiação sobre o sensor de temperatura (Coelho 2011/2012). De forma a diminuir ou anular o efeito da radiação foi projectado e dimensionado o escudo de radiação referido anteriormente, no interior do qual era colocado o termopar, como se mostra na Figura 1.5, e que permite realizar uma medição da temperatura mais próxima da temperatura real do gás, uma vez que o escudo reduz a energia que chega ao termopar por radiação.



Figura 1.5 - Escudo de radiação (Oliveira 2011)

Para ser possível a utilização com segurança do modelo numérico, implementado utilizando o software Abaqus, houve a necessidade de proceder à validação do método numérico utilizado. A validação do método numérico requereu a actuação sobre alguns parâmetros importantes entre os quais os seguintes:

- Passo no tempo – tempo associado a cada incremento no tempo;
- Refinamento da malha;
- Máxima variação espacial de temperatura admissível por intervalo de tempo;

Bem como a realização de comparações entre os resultados numéricos e as soluções analíticas para o caso de um hipotético aquecimento por convecção do disco, sendo o coeficiente de convecção de $350 \text{ W/m}^2\text{C}$, i.e., cerca de três vezes superior ao coeficiente global de transferência de calor experimental, de forma a testar o comportamento do modelo numérico numa situação bem mais exigente que a real.

Relativamente ao passo de tempo, foi escolhido para valor mínimo 1×10^{-6} segundos e para valor máximo 20 segundos que é igual ao tempo usado em cada incremento nas soluções analíticas.

Foram estudadas cinco tipos de malhas sendo o refinamento de cada uma delas diferente. Em todas elas a aglomeração de células da malha é maior na periferia da secção do que no seu centro pelo facto de ser espectável que os gradientes de temperatura sejam mais elevados junto à superfície do que no centro da matriz (Oliveira 2011). Como o problema em causa era axi simétrico, e por isso bidimensional em coordenadas cilíndricas, e a fim de reduzir o número de células necessárias, as malhas utilizadas eram coincidentes com o plano de simetria que contém o eixo do disco, conforme se representa na Figura 1.6.

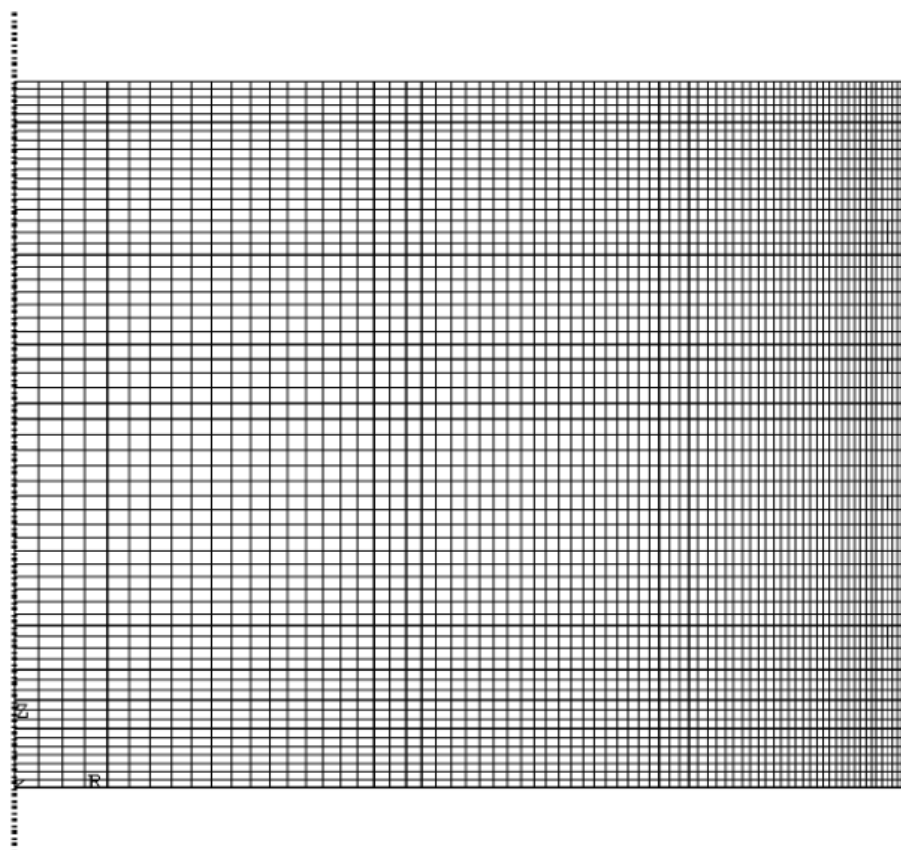


Figura 1.6 - Aspecto da malha usada nas simulações de Oliveira (2011) com 75×62 nós

A malha utilizada, Figura 1.6, tinha o número de nós ideal a partir do qual um aumento do número de nós não se traduziria numa alteração dos resultados obtidos na simulação.

Relativamente à máxima variação espacial de temperatura admissível por intervalo de tempo foram também analisados diferentes valores tendo sido concluído que quanto menor for a máxima variação espacial de temperatura admissível por intervalo de tempo mais próximos estão os resultados numéricos dos resultados obtidos pelas soluções analíticas. Desta forma foi escolhido para a máxima variação de temperatura admissível por intervalo de tempo um valor de 1 °C. Para mais detalhes consultar o trabalho de Oliveira (2011)

Posteriormente e com os referidos parâmetros optimizados foram realizadas as simulações numéricas com a finalidade de se simular toda a fase de aquecimento de um tratamento térmico de têmpera, cujos valores experimentais correspondentes também eram conhecidos, de forma a, numa fase posterior se poderem realizar comparações entre ambos.

Tendo em vista a obtenção do melhor ajuste possível entre as curvas de aquecimento numérica e experimental e tendo em conta os factos já referidos foi necessário analisar a transferência de calor entre o disco de teste e as paredes do forno. Na realidade, a evolução da temperatura do disco de teste ao longo do tempo foi obtida num processo de tratamento de têmpera normal, ou seja no interior do forno de tratamento existia, além do disco, também a carga das peças a tratar como já foi possível observar na Figura 1.1. Uma vez que o modelo numérico não simulava o aquecimento de uma carga típica, teve-se que actuar nas variáveis disponíveis de forma a contornar este obstáculo e assim obter resultados numéricos mais próximos dos experimentais.

Recorrendo à expressão de troca de calor por radiação entre dois corpos, equação 1.3, expressão esta simplificada face ao que ocorre na realidade mas que permite ter alguma noção dos factores que interferem neste modo de transferência de calor, foi possível aproximar os resultados da simulação dos resultados experimentais.

$$\dot{Q}_{\text{parede-disco}} = \frac{\sigma \cdot (T_{\text{pf}}^4 - T_{\text{disco}}^4)}{\frac{1 - \varepsilon_{\text{parede}}}{A_{\text{pf}} \cdot \varepsilon_{\text{parede}}} + \frac{1}{A_{\text{pf}} \cdot F_{\text{parede-disco}}} + \frac{1 - \varepsilon_{\text{disco}}}{A_{\text{disco}} \cdot \varepsilon_{\text{disco}}}} \quad (1.3)$$

De forma a simplificar a expressão anterior pode desprezar-se a primeira parcela do denominador dado que $A_{\text{pf}} \gg A_{\text{disco}}$, ou seja $\frac{1 - \varepsilon_{\text{parede}}}{A_{\text{pf}} \cdot \varepsilon_{\text{parede}}} \cong 0$. Por outro lado do mesmo modo

para facilitar os cálculos é possível afirmar, atendendo ao Teorema da Reciprocidade, Fernandes *et al.* (2011/2012), que $A_{\text{pf}} \cdot F_{\text{parede-disco}} = A_{\text{disco}} \cdot F_{\text{disco-parede}}$.

Assim a expressão final da equação 1.3 toma a seguinte forma

$$\dot{Q}_{\text{parede-disco}} = \frac{\sigma \cdot (T_{\text{pf}}^4 - T_{\text{disco}}^4)}{\frac{1}{A_{\text{disco}} \cdot F_{\text{disco-parede}}} + \frac{1 - \varepsilon_{\text{disco}}}{A_{\text{disco}} \cdot \varepsilon_{\text{disco}}}} \quad (1.4)$$

Atendendo à equação anterior, verifica-se que a emissividade da peça e o factor de forma são as variáveis que afectam as trocas de calor por radiação, tendo sido precisamente estas duas variáveis que foram alteradas no modelo numérico de forma a que, este desse origem a resultados o mais próximos possível dos experimentais.

Com o objectivo de ajustar o melhor possível a curva numérica à curva experimental testaram-se diversos valores para as variáveis referidas anteriormente tendo-se encontrado a emissividade do disco e o factor de forma disco-parede que melhoravam tal ajuste. Assim, a emissividade do disco foi de 0.35 ($\varepsilon_{\text{disco}} = 0.35$) e o factor de forma disco-parede foi de 0.5 ($F_{\text{disco-parede}} = 0.5$), Oliveira (2011).

Como principais conclusões do trabalho de Oliveira (2011), podem-se referir as seguintes: O coeficiente de transferência de calor por convecção médio obtido foi de 11 W/m²°C com um intervalo de confiança a 95% da incerteza assimétrica sistemática de $10.4 \leq h_{\text{real}} \leq 17.6$ W/m²°C;

A única simulação numérica efectuada mostrou que a fase de aquecimento do tratamento térmico é bem retratada numericamente apesar de haver algumas diferenças na gama de temperaturas mais elevada;

A solução do problema pode ser obtida pelo método do sistema global já que o valor máximo obtido para o número de Biot foi de 0.12 ($Bi = 0.12$). O valor normalmente utilizado como critério para se considerar sistema global é de 0.1 ($Bi \leq 0.1$);

O método de optimização, redução, do tempo de aquecimento sugerido consiste no aumento mais rápido da temperatura do forno que aquele que é feito actualmente, de forma a levar mais rapidamente a temperatura da peça até à temperatura de têmpera. Os resultados numéricos da implementação desta metodologia apontam para uma redução significativa no tempo de aquecimento que foi estimada em aproximadamente uma hora e meia no caso de se

utilizar apenas um estágio intermédio em toda a fase de aquecimento (Oliveira 2011). Esta abordagem só será em princípio possível dada a elevada condutividade térmica do aço em análise.

1.3 O presente trabalho

No seguimento do estudo da fase de aquecimento do tratamento térmico de têmpera desenvolvido anteriormente o presente trabalho pretende dar-lhe continuidade tendo, da mesma forma como principal objectivo a optimização do referido processo.

Antes de se analisar a viabilidade da metodologia proposta no trabalho de Oliveira (2011), para reduzir o tempo da fase de aquecimento, ir-se-á avaliar o efeito da localização da peça no forno, e do seu tamanho, no coeficiente global de transferência de calor e no coeficiente de convecção. Para tal serão utilizados novos dados experimentais, e novas peças em aço, num trabalho que decorrerá na firma F. Ramada.

Seguidamente, serão simuladas as curvas de aquecimento obtidas experimentalmente e, com base nos resultados assim obtidos, será avaliado o desempenho da metodologia de optimização proposta, recorrendo-se novamente a simulações no programa Abaqus. Com base no referido programa será também analisada a distribuição de tensões geradas nas peças de teste, em virtude de um aquecimento mais brusco, para verificar a influência da metodologia de optimização proposta na estabilidade mecânica das mesmas peças.

1.4 Estrutura da dissertação

A presente dissertação iniciar-se-á com a determinação dos coeficientes de transferência de calor experimentais no capítulo 2, para duas peças de teste e três ensaios realizados na empresa F. Ramada.

Seguidamente, no capítulo 3 apresentar-se-ão os resultados das simulações numéricas realizadas para as duas peças de teste.

No capítulo 4, com base nos ensaios experimentais e nas simulações numéricas realizadas, procede-se à verificação da metodologia de optimização proposta por Oliveira (2011).

Na continuidade das curvas da temperatura da parede propostas e da resposta das peças de teste, no capítulo 5 far-se-á a análise das tensões nas peças devidas ao aquecimento mais rápido verificado no capítulo 4.

No capítulo 6 apresentar-se-ão outras análises relativas ao processo de aquecimento tendo em vista a avaliação do efeito de diferentes parâmetros.

Finalmente, no capítulo 7 apresentar-se-ão as conclusões e perspectivas de trabalhos futuros.

2 Coeficientes de Transferência de Calor experimentais

Nesta secção serão apresentados os resultados dos trabalhos experimentais, curvas de aquecimento a baixa temperatura realizados na firma F. Ramada que permitirão, posteriormente, calcular, com base neles, os coeficientes globais de transferência de calor e de se estimar o coeficiente de convecção médio, em vários locais do forno, em torno de peças seleccionadas e previamente instrumentadas com termopares. Os locais onde se colocarão essas peças serão essencialmente três onde se prevê que haja uma grande variação dos coeficientes. São eles: junto à porta do forno – local 1 - onde está uma ventoinha que promove o deslocamento do azoto; a meio do forno – local 2; e na extremidade do forno oposta à porta – local 3. O efeito do tamanho da peça no coeficiente de transferência de calor também será estudado.

O facto destes ensaios se realizarem a baixa temperatura, i.e., aquecimento desde a temperatura ambiente até 100 °C, tem como objectivo reduzir o peso da radiação no calor total transferido à peça, de forma ao coeficiente de convecção não ser tão afectado pelo referido mecanismo de transferência de calor.

2.1 Peças a utilizar como sondas para a determinação de h

Para ser possível a realização destes ensaios utilizou-se como sonda o disco de teste já utilizado no trabalho anterior (Oliveira 2011), que é um disco com um diâmetro de 230 mm e uma espessura de 95 mm. Este disco tem dois furos onde foram introduzidos dois termopares para se obterem as temperaturas ao longo do processo nestes dois diferentes pontos do sólido, um deles com uma profundidade de 35 mm – furo menos profundo – e o outro com uma profundidade de 65 mm – furo mais profundo - e desfasados de 90° entre si. O disco de teste é constituído pelo material ALVAR 14 (DIN 56 NiCrMoV7) tendo uma massa volúmica de 7700 kg/m³, um calor específico, c_p , de 460 J/kgK e uma condutibilidade de térmica, k , que varia pouco com o aumento da temperatura e tem um valor de 36.8 W/mK, podendo observar-se na Figura 2.1 uma fotografia do mesmo.

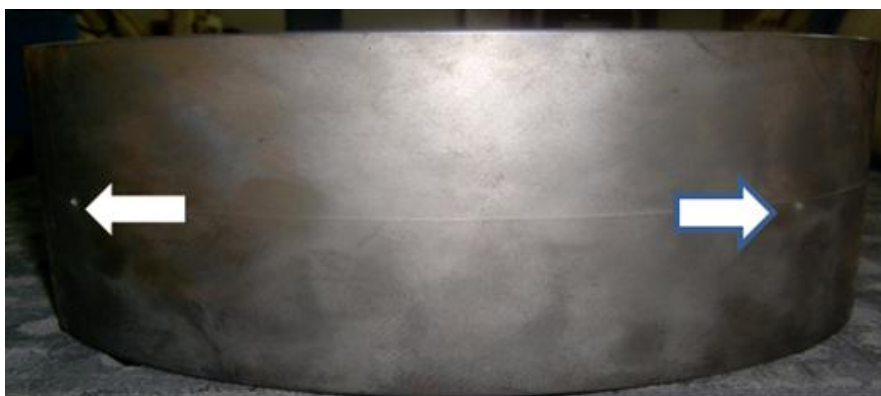


Figura 2.1 - Disco de teste tendo assinalados os furos de 35 mm e 65 mm

Além do disco de teste mostrado na Figura 2.1, também se realizaram ensaios experimentais para o caso de uma peça de aço com uma geometria de menor dimensão representada na Figura 2.2. Esta peça é de igual modo um cilindro que apresenta menores dimensões. O material constituinte deste cilindro é idêntico ao material do disco, i.e., o ALVAR 14 (DIN 56 NiCrMoV7).

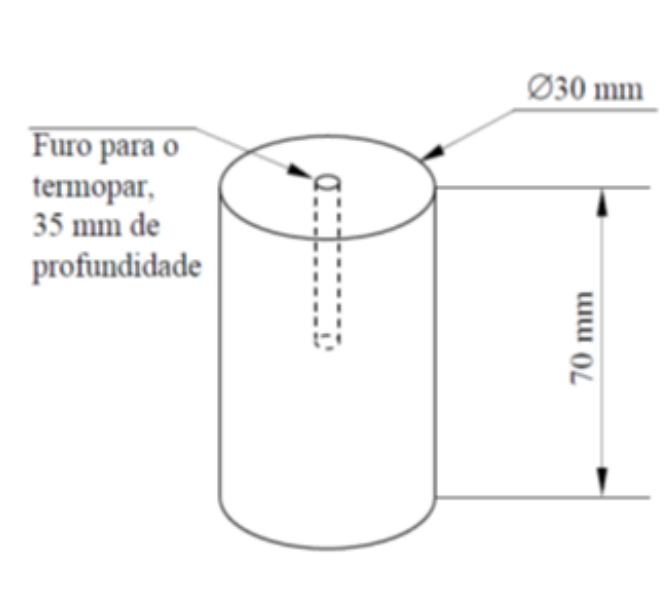


Figura 2.2 - Cilindro de reduzidas dimensões

Do mesmo modo que já sucedia no disco da Figura 2.1, o cilindro da Figura 2.2 apresenta também um furo onde será introduzido um termopar tendo este furo uma profundidade de 35 mm como se pode observar na Figura 2.2.

Existem ainda dois discos de dimensões superiores às dimensões do disco apresentado anteriormente que serão utilizados no estudo numérico, não havendo para estes de momento ensaios experimentais realizados. Designando por disco 3 e por disco 4, estes apresentam as seguintes dimensões:

- Disco 3 – diâmetro de 250 mm e espessura de 105 mm;
- Disco 4 – diâmetro de 250 mm e espessura de 60 mm;

2.2 Procedimento de cálculo dos coeficientes globais de transferência de calor

Dado um dos objectivos do presente trabalho estar voltado para a análise da variação do coeficiente de convecção com a localização das peças no forno, nos tratamentos térmicos de têmpera, foram realizados diferentes ensaios utilizando as peças de teste, apresentadas na secção anterior, juntamente com a carga de peças a tratar normalmente utilizada como se pode observar na Figura 2.3. Estes ensaios experimentais tiveram a particularidade de em cada um deles a posição das peças de teste na carga no interior do forno ser diferente, ou seja, um dos

ensaio apresenta as peças de teste à beira da porta do forno – local 1, outro dos ensaios apresenta as peças posicionadas no meio da carga no forno – local 2 - e no outro ensaio as peças de teste estão colocadas no lado oposto à porta do forno – local 3, respectivamente ensaios 1, 2 e 3.



Figura 2.3 - Carga de peças a tratar com as peças de teste integradas (1 – disco de teste e 2 – cilindro de teste)

O procedimento de cálculo dos coeficientes globais de transferência de calor é o mesmo para qualquer um dos ensaios experimentais utilizados independentemente do posicionamento das peças de teste no interior do forno. Desta forma, será apresentado junto com a descrição do procedimento de determinação do coeficiente global de transferência de calor o caso do ensaio experimental com a peça de teste colocada junto à porta do forno – local 1 - como exemplo, denominado de ensaio 1.

Na Figura 2.4 apresenta-se a evolução das temperaturas ao longo do tempo da parede do forno, T_{pf} , do termopar colocado dentro do escudo de radiação, do disco de teste, T_{disco} , e do cilindro de teste $T_{cilindro}$, relativa a todo o ensaio 1, sendo apenas utilizados os dados entre os 5000 e os 10000 segundos no processo de cálculo dos coeficientes de transferência de calor.

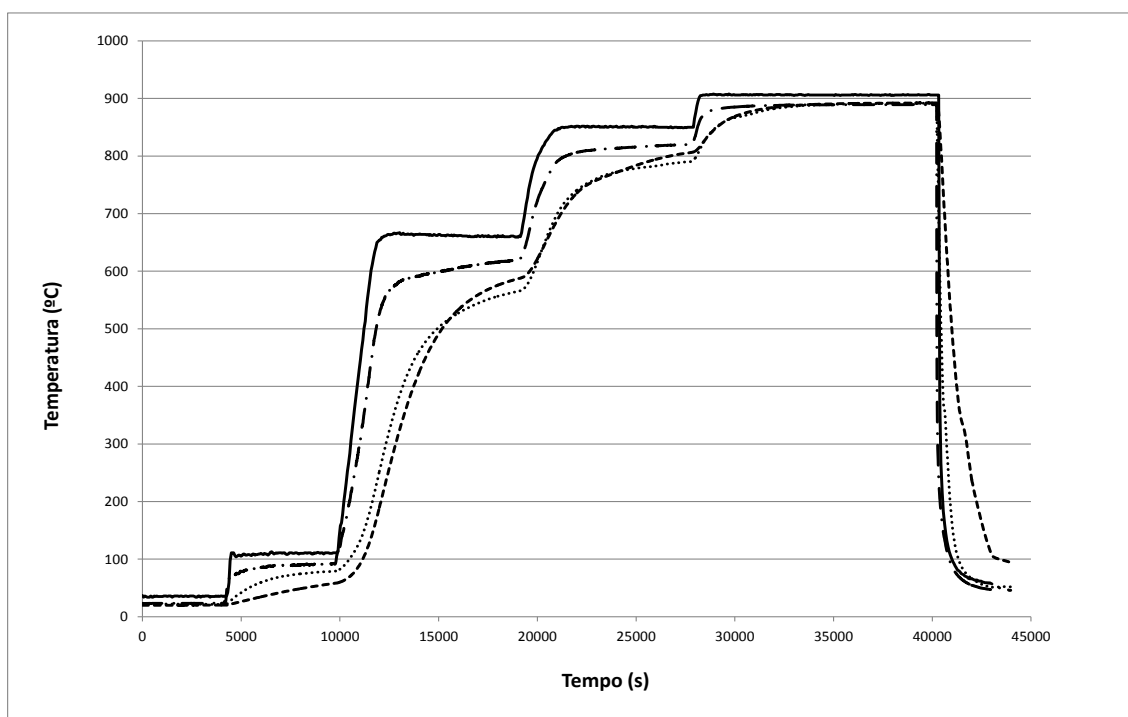


Figura 2.4 - Curvas experimentais do ensaio 1 da temperatura versus tempo. Linha, — T_{pf} , — . Temperatura do termopar no escudo de radiação, - - - T_{disco} , ... $T_{cilindro}$

A importância da obtenção dos coeficientes globais de transferência de calor é elevada tendo estes valores um papel fundamental para a fase do cálculo dos coeficientes de convecção existentes e da temperatura do gás no interior do forno, que será abordada na secção seguinte.

Com base nos dados experimentais referentes ao aquecimento a baixa temperatura, entre os 5000 segundos até aos 10000 segundos, patentes na Figura 2.4, que apresenta a evolução temporal da temperatura de cada uma das peças de teste, da parede do forno e do termopar dentro do escudo de radiação ao longo de um tratamento térmico de têmpera, é possível estimar o coeficiente global de transferência de calor. O estágio a 100 °C foi propositadamente introduzido no processo de tratamento de têmpera a fim de se obter um aquecimento controlado das peças de teste a baixa temperatura, de forma a se reduzir o peso da radiação, e a se poder estimar de forma mais adequada o coeficiente de convecção. Na Figura 2.5 apresenta-se apenas o patamar de aquecimento utilizado no cálculo do coeficiente global para o caso do ensaio em que o disco de teste se encontra junto à porta do forno – local 1, ensaio 1.

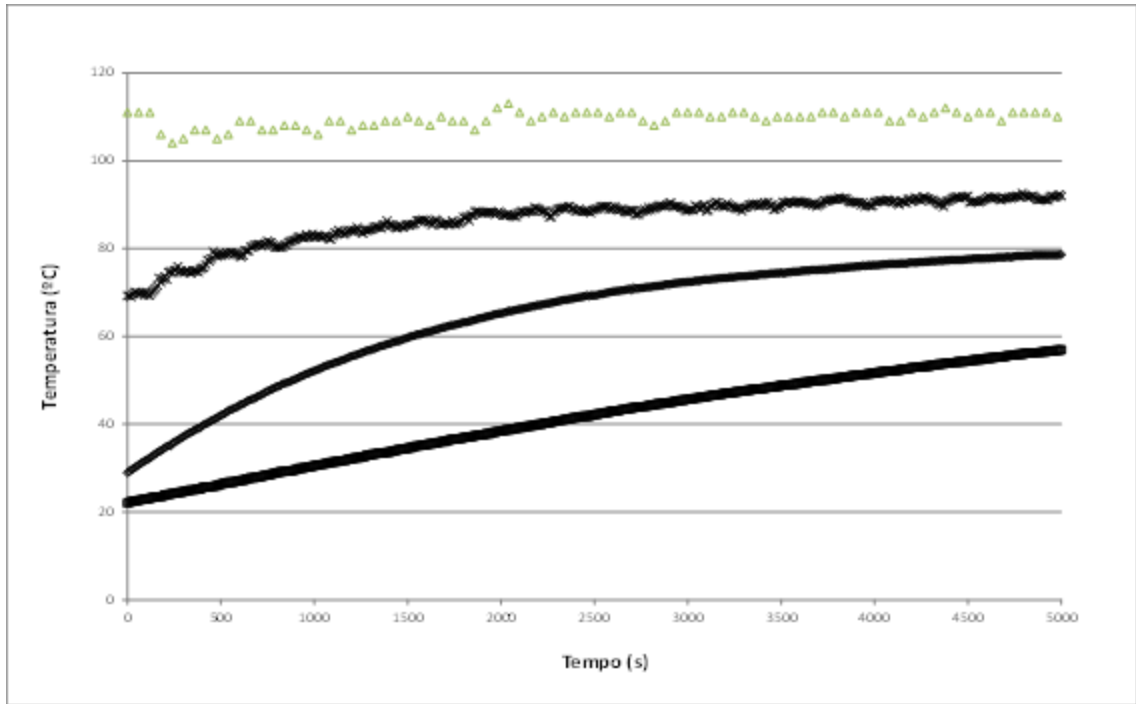


Figura 2.5 - Estágio utilizado para a determinação do coeficiente global para o furo mais profundo do disco (65 mm). Símbolos, Δ T_{pb} , $\times$ Temperatura do termopar no escudo de radiação, $\square$ $T_{cilindro}$, $\diamond$ T_{disco}

As soluções analíticas referidas no capítulo anterior não contabilizam a evolução temporal da temperatura da parede do forno, T_{pf} , nem da temperatura do gás, $T_{gás}$, pois pressupõem que só há troca de calor por convecção com um gás a uma temperatura constante, $T_{\square}$. No caso em análise será pois necessário utilizar uma só temperatura que aqui se designa de temperatura aparente, $T_{aparente}$, que ocupará o lugar de $T_{\square}$ nas soluções analíticas e que terá de ser determinada juntamente com o coeficiente global de transferência de calor, h_g , de maneira a que a curva analítica coincida o melhor possível com a curva experimental. Desta forma, o calor transferido por convecção e por radiação à peça no interior do forno irá ser substituído por uma temperatura aparente, $T_{aparente}$, e um coeficiente global de transferência de calor, h_g , c.f. equação 2.1.

$$h_c(T_{gás} - T_{disco}) + h_r(T_{pf} - T_{disco}) = h_g(T_{aparente} - T_{disco}) \quad (2.1)$$

A equação 2.1 representa o calor total transferido à peça, que é constituído pelo calor transferido por convecção e por radiação. Nesta equação h_c é o coeficiente de convecção, h_r o coeficiente de transferência de calor por radiação, h_g o coeficiente global de transferência de calor, $T_{gás}$ a temperatura do gás no interior do forno, T_{pf} a temperatura da parede do forno, $T_{aparente}$ a temperatura aparente e T_{disco} a temperatura do disco de teste.

O método de determinação do coeficiente global de transferência de calor foi iterativo sendo comparadas as soluções analíticas, correspondentes à evolução temporal da temperatura do disco, com a evolução temporal da temperatura do mesmo disco obtida experimentalmente, para o mesmo ponto do disco. Analisando e comparando estas duas evoluções o objectivo é determinar o coeficiente global e a temperatura aparente que conduzam ao melhor ajuste, i.e.,

menor erro entre os valores obtidos analiticamente e os valores experimentais no referido patamar.

Para o mesmo caso do disco colocado junto à porta do forno pode observar-se na Figura 2.6 a evolução das curvas analítica e experimental finais obtidas para o caso em análise.

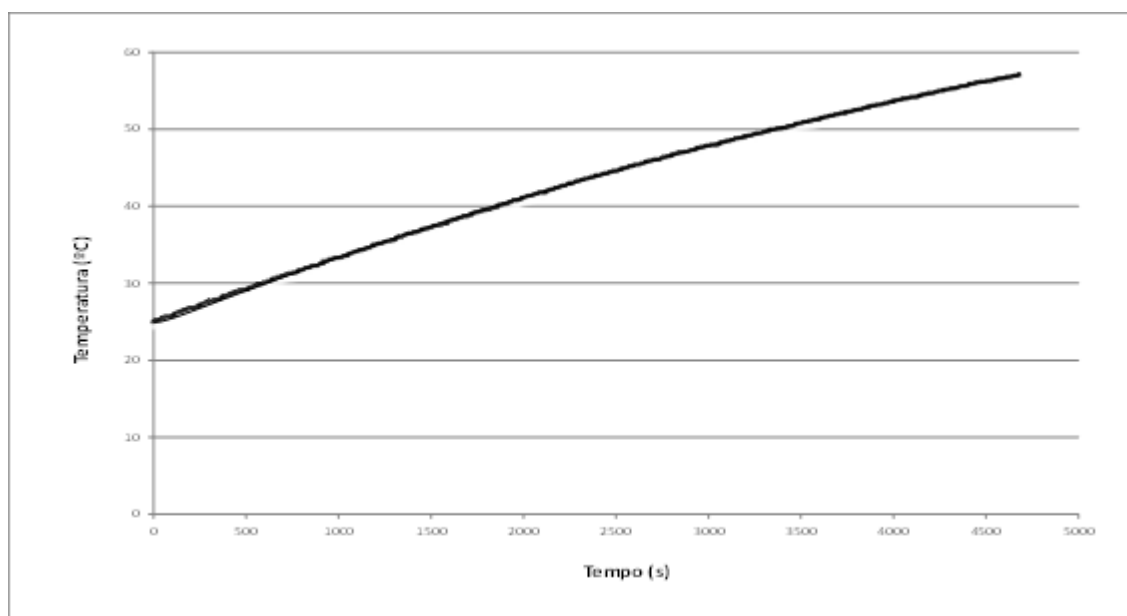


Figura 2.6 - Evolução da curva analítica e da curva experimental, Símbolo, Δ Pontos experimentais. Linha, — Curva analítica

Avaliando e comparando a evolução de curvas do género das apresentadas na Figura 2.6 e com o auxílio da folha de cálculo Excel obtiveram-se assim os valores do coeficiente global de transferência de calor e da temperatura aparente que minimizam o erro entre as referidas curvas. Na Figura 2.7 apresenta-se a evolução do h_g e do erro em função da $T_{aparente}$, para o caso em análise. Os valores escolhidos foram aqueles aos quais correspondia o erro mínimo, assinalado na Figura 2.7 através de uma linha vertical.

$$erro = \frac{(T_{experimental} - T_{analítica})^2}{T_{experimental}} \quad (2.2)$$

O cálculo do erro foi efectuado de acordo com a equação 2.2, relacionando a temperatura experimental, $T_{experimental}$, com a temperatura obtida analiticamente, $T_{analítica}$, sendo esta última determinada com base no coeficiente global de transferência de calor e na temperatura aparente. Os valores de h_g e $T_{aparente}$ obtidos para as diversas situações estudadas estão patentes na Tabela 2.1.

No Anexo A poder-se-á ver os gráficos homólogos aos das Figuras 2.6 e 2.7 para as outras situações analisadas.

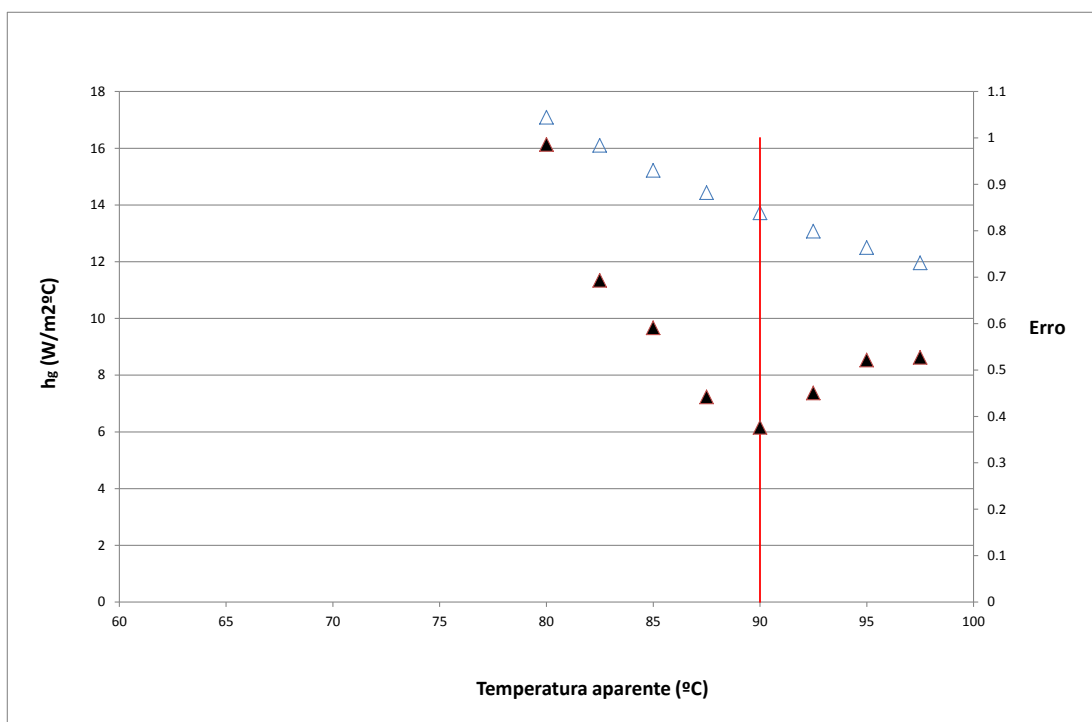


Figura 2.7 - Coeficiente global de transferência de calor e o erro em função da temperatura aparente. Símbolos, Δ h_g , $\blacktriangle$ erro (equação 2.2) a linha a vermelho assinala o h_g escolhido

2.3 Procedimento de cálculo do coeficiente de convecção médio e da temperatura do gás

Nesta secção descrever-se-á o procedimento de cálculo do coeficiente de convecção e da temperatura do gás que se encontra no forno de tratamento, também para o caso do disco de teste apenas. Estes dois parâmetros foram calculados juntamente. Como acontece no caso do cálculo do coeficiente global de transferência de calor, o método de determinação do coeficiente de convecção e da temperatura do gás é semelhante para todos os ensaios e para todas as peças de teste.

Como já foi referido, o calor transferido por convecção e por radiação para a peça dentro do forno pode ser substituído por uma temperatura aparente e um coeficiente global de transferência de calor como está representado e mostrado na equação 2.1.

A partir da equação 2.1 tem-se a relação entre o calor total transferido à peça com o calor transferido por convecção e por radiação. Como se referiu na secção anterior, a determinação do coeficiente global de transferência de calor e da temperatura aparente foi uma das etapas utilizadas no processo para se conseguir determinar o coeficiente de convecção e a temperatura do gás.

Tendo ao dispor os dados experimentais da evolução das temperaturas da parede e da peça e tendo já sido calculados os parâmetros coeficiente global de transferência de calor e a temperatura aparente, o que resta determinar é o coeficiente de convecção e a temperatura do gás. Ainda desconhecido também, é o coeficiente de transferência de calor por radiação h_r , que tem de ser determinado recorrendo unicamente às equações de transferência de calor por

radiação. A equação 2.3 permite relacionar o fluxo de calor transferido por radiação com o coeficiente de transferência de calor que se pretende calcular.

$$\dot{Q}_r = h_r A_{\text{disco}} (T_{\text{pf}} - T_{\text{disco}}) \quad (2.3)$$

O coeficiente de transferência de calor por radiação em cada instante pode ser então aproximado da seguinte forma, atendendo à equação 1.4,

$$h_r = \frac{\dot{Q}_r}{A_{\text{disco}}(T_{\text{pf}} - T_{\text{disco}})} = \frac{\sigma(T_{\text{pf}}^2 + T_{\text{disco}}^2)(T_{\text{pf}} + T_{\text{disco}})}{\frac{1 - \varepsilon_{\text{disco}}}{\varepsilon_{\text{disco}}} + \frac{1}{F_{\text{disco-parede}}}} \quad (2.4)$$

A equação anterior é válida para a troca de calor entre duas superfícies, tendo uma delas, neste caso a parede do forno, uma área muito superior à outra, disco de teste.

Numa primeira abordagem utilizou-se a equação 2.4 com $\varepsilon_{\text{disco}}$ e $F_{\text{disco-parede}}$ obtidos por Oliveira (2011), que conduziram na altura a um melhor ajuste entre os resultados numéricos e experimentais no referido trabalho. Numa segunda iteração, utilizaram-se os valores de $\varepsilon_{\text{disco}}$ e $F_{\text{disco-parede}}$ do presente trabalho que conduziram ao melhor ajuste entre os resultados numéricos e experimentais presentes no capítulo 3. Desta forma, utilizando as equações descritas anteriormente - equação 2.1 e equação 2.4 - foram determinados os parâmetros desconhecidos - o coeficiente de convecção e a temperatura do gás - que minimizam, em cada instante de tempo, o erro quadrado entre o calor transferido por convecção e por radiação, membro esquerdo da equação 2.1, e o calor total transferido à peça, membro direito da equação 2.1. Na equação 2.5 apresenta-se a expressão do erro, calculado em cada instante de tempo, e cuja minimização do seu somatório permitiu determinar estas duas variáveis, $T_{\text{gás}}$ e h_c , recorrendo-se à ferramenta Solver na folha de cálculo Excel.

$$\begin{aligned} \text{erro} &= \frac{[\dot{Q}_{\text{total}} - (\dot{Q}_c + \dot{Q}_r)]^2}{\dot{Q}_{\text{total}}} \\ &= \frac{[h_g(T_{\text{aparente}} - T_{\text{disco}}) - [h_c(T_{\text{gás}} - T_{\text{disco}}) + h_r(T_{\text{pf}} - T_{\text{disco}})]]^2}{h_g(T_{\text{aparente}} - T_{\text{disco}})} \end{aligned} \quad (2.5)$$

Uma vez que o processo de aquecimento pode ser tratado como sistema global, admitiu-se nestes cálculos que a temperatura à superfície do disco, onde ocorre a radiação e convecção, é igual à temperatura experimental medida a 35 mm de profundidade.

2.4 Resumo dos resultados obtidos

Os ensaios experimentais apresentam uma diferença importante relativamente ao posicionamento do disco de teste, isto é, a posição do disco de teste nos três ensaios realizados foi diferente estando o disco à beira da porta do forno, no meio do forno e ao fundo do forno, nos ensaios 1, 2 e 3 respectivamente. É muito importante ter em atenção este ponto dado que a maioria dos fornos utilizados para o processo de têmpera na empresa estão equipados com uma ventoinha na sua porta. O diferente posicionamento da peça de teste no interior do forno de tratamento é também importante para se avaliar a variação do coeficiente de convecção de um local para outro dentro do forno.

Na Tabela 2.1 apresentam-se os valores obtidos do coeficiente global de transferência de calor, da temperatura aparente, do coeficiente de convecção médio e da temperatura do gás determinados pelos métodos descritos anteriormente.

Tabela 2.1 - Valores obtidos dos coeficientes de transferência de calor, da temperatura aparente e da temperatura do gás

	Ensaio 1		Ensaio 2		Ensaio 3	
Peça	Disco	Cilindro	Disco	Cilindro	Disco	Cilindro
$T_{pf} [^{\circ}C]$	110		110		110	
$T_{escudo} [^{\circ}C]$	86.5		76.6		87.7	
$h_g [W/m^2^{\circ}C]$	13.7	13.2	3.3	*	4.1	7.4
$T_{aparente} [^{\circ}C]$	90	81	110.1	*	114.2	57
$\bar{h}_c [W/m^2^{\circ}C]$	11.8	9.4	1.9	*	2.2	5.3
$T_{gás} [^{\circ}C]$	79.3	62.2	73	*	102.2	30.9
$\bar{h}_r [W/m^2^{\circ}C]$	1.9	2.4	1.8	*	2.2	2.1
Bi	0.01	0.002	0.002	*	0.003	0.001

*Neste ensaio o termopar que media a temperatura do cilindro avariou

Face aos resultados presentes nesta tabela pode concluir-se que os valores mais coerentes, por exemplo, temperatura aparente com um valor inferior à temperatura da parede do forno mas

não muito, só ocorre para o ensaio 1, peças junto à ventoinha da porta – local 1. Este facto pode ser explicado pelo coeficiente de convecção só ser significativo no ensaio 1, nas outras posições longe da ventoinha o coeficiente de convecção é da mesma ordem de grandeza do coeficiente de transferência de calor por radiação pelo que os erros desta metodologia aumentam.

No ensaio 1, os valores obtidos são da mesma ordem de grandeza daqueles obtidos por Oliveira (2011), o que aponta para a existência de reprodutibilidade nos valores do coeficiente de convecção neste local. Por outro lado, os baixos valores deste coeficiente em outros locais do forno levam a questionar a utilidade da ventoinha, e da energia que esta consome, durante o ensaio.

3 Simulação numérica da fase de aquecimento

Neste capítulo será abordada a simulação numérica da fase de aquecimento do tratamento térmico, nomeadamente o processo de ajustamento das curvas numéricas às curvas experimentais e, posteriormente, a apresentação dos parâmetros que melhor permitem ajustar as mesmas curvas. Para tal, recorreu-se ao programa Abaqus e optou-se também por utilizar o mesmo modelo de trocas de calor por radiação, dos dois modelos disponíveis no referido programa, também utilizado por Oliveira (2011), já que permitia realizar uma simulação mais próxima da situação real e, como tal, os resultados são também melhores. Este modelo, denominado de radiação em cavidade, permite a colocação de mais que um disco em paralelo, o que possibilita simular o efeito de obstrução/sombreamento que as várias peças no forno causam à radiação proveniente das paredes. Na Figura 3.1 estão representados esquematicamente as paredes do forno, o disco de estudo – disco a cinzento, e os discos vizinhos que causam alguma obstrução. Neste modelo, as principais variáveis que se podem alterar para obter um melhor ajuste entre os resultados numéricos e experimentais são a emissividade do disco de teste e a distância entre discos que permite variar o factor de forma disco-parede, $F_{\text{disco-parede}}$, ambos afectam as trocas de calor através da equação 1.4. O número de discos utilizado foi de sete discos e foi escolhido de forma a tornar os resultados independentes da temperatura da superfície que fecha os topos da parede do forno, já que esta última, por limitação do programa, tem de tomar um valor constante, não podendo variar como a temperatura da parede do forno.

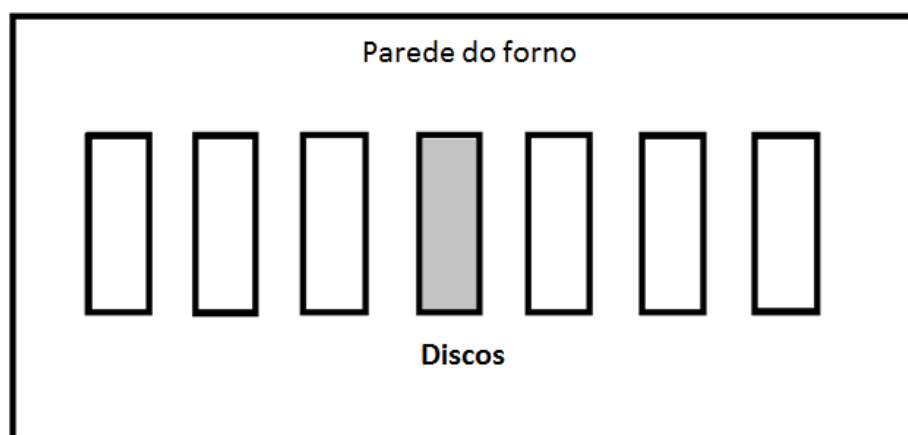


Figura 3.1 - Esquema representativo do modelo numérico de radiação em cavidade

Numa fase posterior da análise, nomeadamente na determinação do campo de tensões nas peças de teste ao longo do aquecimento, em virtude dos gradientes de temperatura gerados pelo aquecimento, não foi possível utilizar-se o modelo referido anteriormente por limitações do programa. Neste último caso, teve de se utilizar o modelo denominado de radiação entre dois corpos, em que a peça a estudar troca calor com uma superfície envolvente, parede do forno, em todas as direcções sendo que forçosamente, no caso presente, o factor de forma disco-parede tem de ser um, ($F_{\text{disco-parede}} = 1$), não podendo pois ser possível utilizar uma

obstrução à radiação por parte de peças vizinhas como existia no modelo inicial. Neste caso, o objectivo é que a curva de aquecimento simulada seja o mais próxima possível à curva experimental, de preferência com aquecimentos mais rápidos, para que posteriormente o cálculo do campo de tensões seja conservativo, i.e., situação mais exigente que a realidade. Para obter o melhor ajuste, ir-se-á actuar ao nível da emissividade da peça e do próprio coeficiente de convecção se for necessário.

Desta forma utilizaram-se dois modelos numéricos para se ter a possibilidade de estudar não só o aquecimento como também o campo de tensões instaladas nas peças de teste durante o seu aquecimento.

3.1 Validação do método numérico para o cilindro de teste

Nesta secção será descrito o processo de validação do método numérico utilizado para o caso do cilindro de teste. Baseada no esquema de validação já realizada em Oliveira (2011) para o caso do disco de teste, que também foi utilizado neste trabalho, a presente validação utilizará os mesmos valores do passo no tempo, sendo avaliado o efeito da malha e da máxima variação espacial de temperatura por passo no tempo comparando as soluções analíticas com as soluções numéricas para uma solicitação extrema, a temperatura do forno de 900 °C e um coeficiente de convecção de 350 W/m²°C, para o ponto B representado na Figura 3.2, sendo este o ponto sujeito a maior variação de temperatura com o tempo este é pois o ponto mais crítico da peça em termos de simulação.

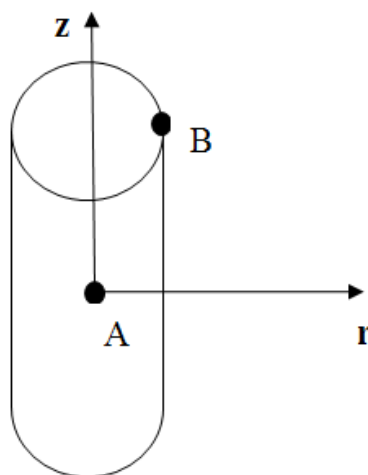


Figura 3.2 - Cilindro de teste

3.1.1 Refinamento da malha

Relativamente ao tipo de malha utilizado, dado o cilindro ter a sua geometria semelhante à do disco, com menores dimensões, optou-se por manter o mesmo número de nós por unidade de comprimento utilizado neste último. Obteve-se assim uma malha constituída por 10 nós na

direcção do raio e 46 nós na direcção do seu comprimento. Na Figura 3.3 pode observar-se o aspecto da malha utilizada.

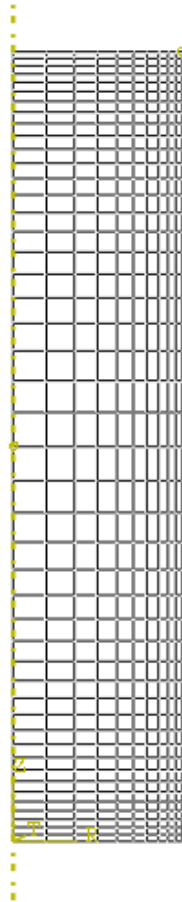


Figura 3.3 - Aspecto da malha utilizada para o cilindro com 10 X 46 nós

Para verificar que os resultados são independentes do tipo de malha utilizado realizaram-se três simulações com o refinamento da malha cada vez maior para uma máxima variação de temperatura admissível de 3 °C. Na Figura 3.4 pode observar-se a evolução da temperatura determinada analiticamente e a evolução da temperatura determinada numericamente para o caso da malha com 10 X 46 nós.

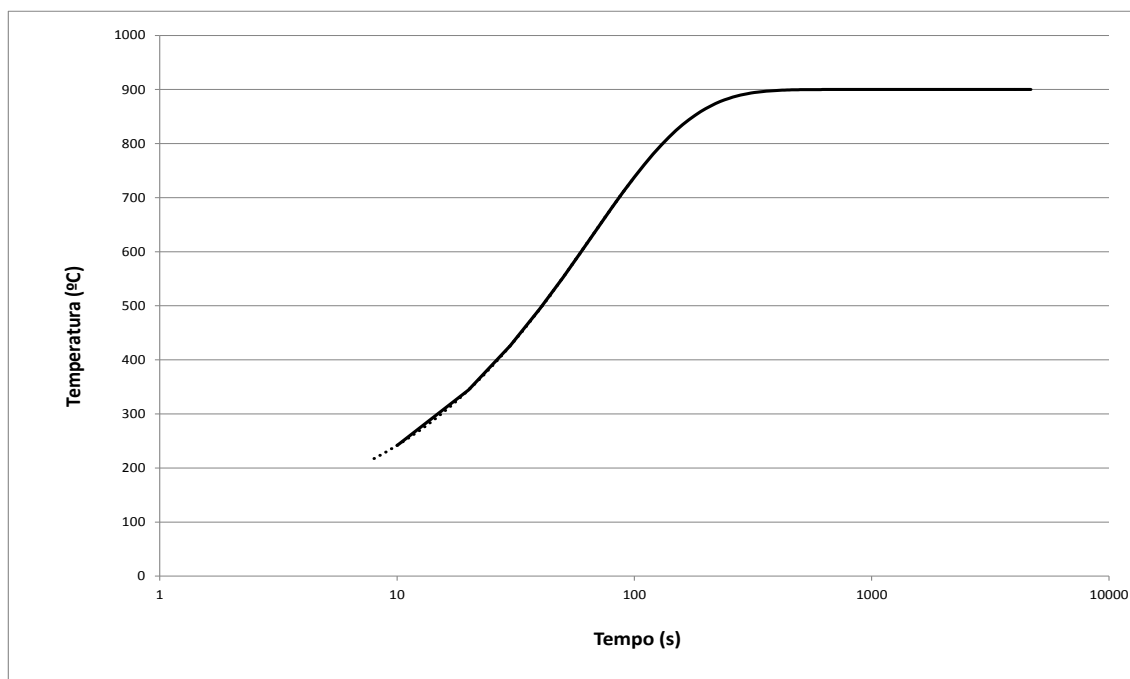


Figura 3.4 - Curva de temperatura em função do tempo obtida analiticamente e numericamente no ponto B do cilindro para uma temperatura aparente de 900 °C e um coeficiente de convecção de 350 W/m²°C. Linha, — Curva analítica, ... Curva numérica

A equação 3.1 mostra como se calculou o erro entre os resultados analíticos e numéricos.

$$erro = \frac{|T_{analítica} - T_{numérica}|}{T_{analítica}} \times 100 \quad (3.1)$$

Na Tabela 3.1 apresenta-se um resumo dos erros médios obtidos para os primeiros 100 segundos, região onde ocorrem os maiores erros, utilizando os diferentes refinamentos de malha. A malha seleccionada foi a malha constituída por 10 X 46 nós pois, apesar de apresentar um erro superior aos restantes, o tempo de simulação é menor.

Tabela 3.1 - Erro médio nos primeiros 100 segundos e tempo de simulação para os diferentes refinamentos de malha

Número de nós	Erro médio (%)	Tempo de simulação
10 X 46	0.092	5 minutos
20 X 92	0.078	25 minutos
40 X 184	0.074	1 hora

3.1.2 Estudo da máxima variação espacial de temperatura por intervalo de tempo

Nesta secção apresentar-se-á um estudo relativo à máxima variação espacial de temperatura admissível por incremento de tempo. Desta forma, para o caso da malha escolhida e mostrada anteriormente, determinaram-se os erros médios entre as soluções analíticas e as soluções numéricas para os primeiros 100 segundos. Estes erros médios foram determinados para valores de 10, 5, 3 e 1°C da máxima variação espacial de temperatura admissível. É de esperar que ocorra um aumento no tempo de simulação quando o valor da máxima variação de temperatura admissível por incremento de tempo diminui. Na Figura 3.5 pode-se observar as evoluções dos erros referentes aos quatro valores de temperatura estudados nos primeiros 100 segundos. A expressão de cálculo do erro é dada pela equação 3.1.

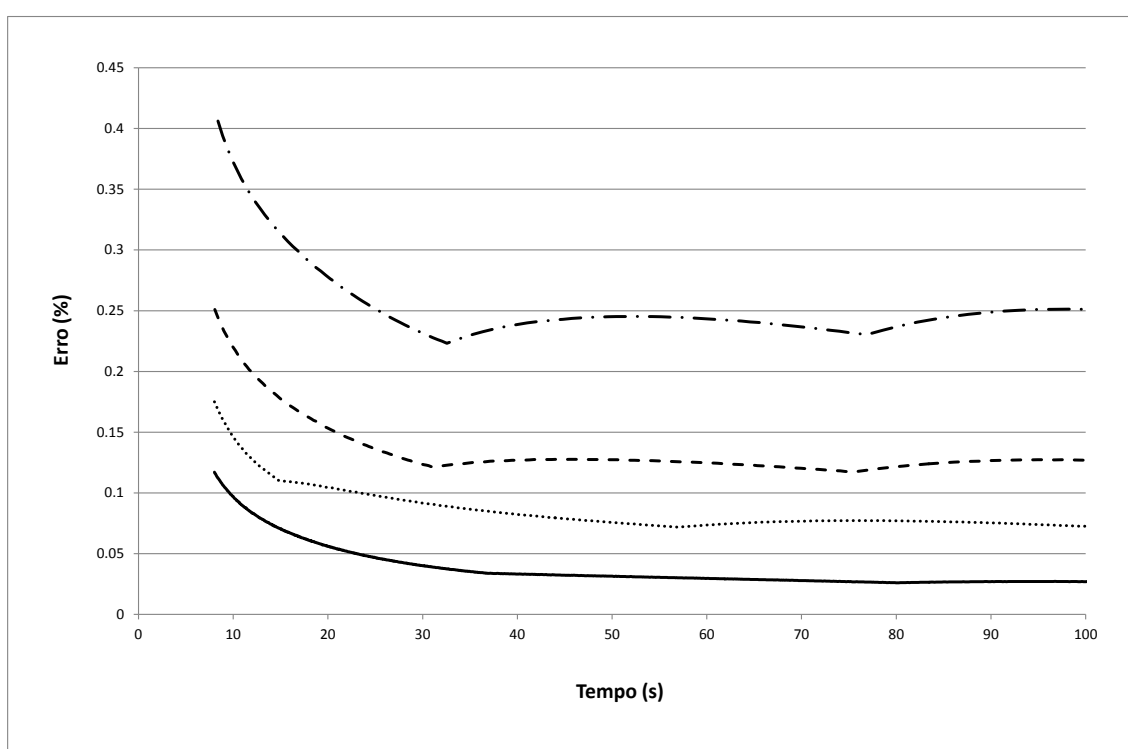


Figura 3.5 - Evolução do erro nos primeiros 100 segundos para os diferentes valores da máxima variação de temperatura admissível por incremento de tempo para o ponto B do cilindro. Linha, — 1 °C, ... 3 °C, ---- 5 °C, - . - 10 °C

Na Tabela 3.2 estão patentes os erros médios determinados para os primeiros 100 segundos e o respectivo tempo de simulação para o caso do ponto B da Figura 3.2.

Tabela 3.2 - Erros médios obtidos para os primeiros 100 segundos para diferentes valores da máxima variação espacial de temperatura admissível por incremento de tempo e respectivos tempos de simulação

Máxima variação de temperatura	Erro médio (%)	Tempo de simulação
10 °C	0.26	2 minutos
5 °C	0.14	3 minutos
3 °C	0.09	5 minutos
1 °C	0.04	10 minutos

Assim, o valor da máxima variação espacial de temperatura admissível por incremento no tempo utilizado será de 1 °C.

3.2 Dados de entrada do programa de simulação

Atendendo ao fenómeno da transferência de calor inerente ao processo de aquecimento e tendo por base os dados experimentais, foi necessário fornecer ao programa Abaqus a evolução temporal da temperatura da parede do forno e da temperatura do gás (azoto), para os vários casos estudados. De salientar que os dados referidos foram os mesmos nos dois modelos numéricos utilizados, tanto no modelo de radiação em cavidade como também no modelo de radiação entre dois corpos.

Pode verificar-se também que o tempo em que terminam as recolhas de dados é diferente nas curvas da temperatura de parede do forno e da temperatura do gás, devendo-se isto ao facto do gás utilizado no tratamento ser retirado a partir de determinada altura por imposição do fabricante dos fornos. A temperatura do gás foi estimada com base nos resultados do trabalho de Oliveira (2011).

Outro ponto importante que é necessário referir é a eliminação dos dois estágios iniciais bem visíveis na Figura 2.4. Como já tinha sido referido em Oliveira (2011), e também pode ser comprovado pelo número de Biot apresentado na Tabela 2.1, pelo menos nesta fase inicial a solução deste problema poderia ser determinada pelo método do sistema global, permitindo isto iniciar as simulações numéricas no fim dos estágios referidos, já que a distribuição da temperatura ao longo das peças de teste é uniforme, e assim diminuir o tempo de simulação em cerca de 25%.

O método do sistema global permite afirmar que apenas existe variação da temperatura do sólido com o tempo e não existe variação da temperatura espacial, i.e., todo o sólido aquece uniformemente ao longo do tempo. De forma a comprovar o que foi referido, pode recorrer-se à comparação dos dados experimentais obtidos, para o caso do disco, para o furo menos profundo (35 mm) – ponto 1 - e para o furo mais profundo (65 mm) – ponto 2, pontos estes representados na Figura 3.6, algo que também será realizado nas próximas três secções.

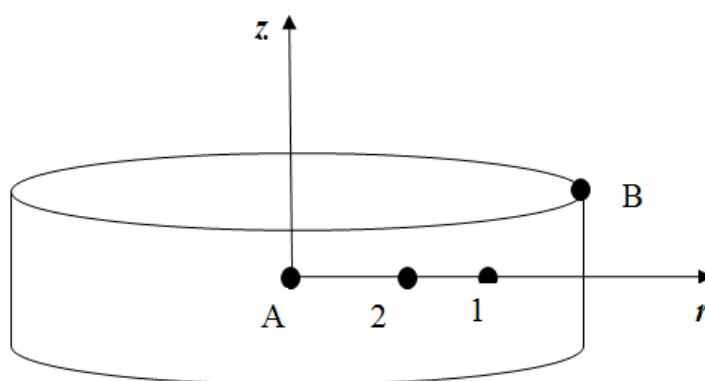


Figura 3.6 - Esquema de um disco. Ponto menos profundo (35 mm) – ponto 1; ponto mais profundo (65 mm) - ponto 2; centro – ponto A; ponto mais afastado do centro – ponto B

3.2.1 Ensaio 1

O ensaio 1 foi realizado, como já referido, estando as peças de teste colocadas junto à porta do forno – local 1 (Figura 2.3) sendo de esperar, neste caso, que as peças aqueçam mais rapidamente, devido à presença da ventoinha instalada na porta do forno, aumentando assim a transferência de calor por convecção para as peças.

Na Figura 3.7 apresentam-se as curvas relativas à evolução temporal da temperatura do ponto 1 e do ponto 2, respectivamente, T_{d-1} e T_{d-2} , apresentados na Figura 3.6. Analisando tais evoluções, pode concluir-se que não existe variação espacial da temperatura no sólido, entre os dois pontos, ao longo do tempo, ou seja, que a variação da temperatura apenas depende da variável tempo.

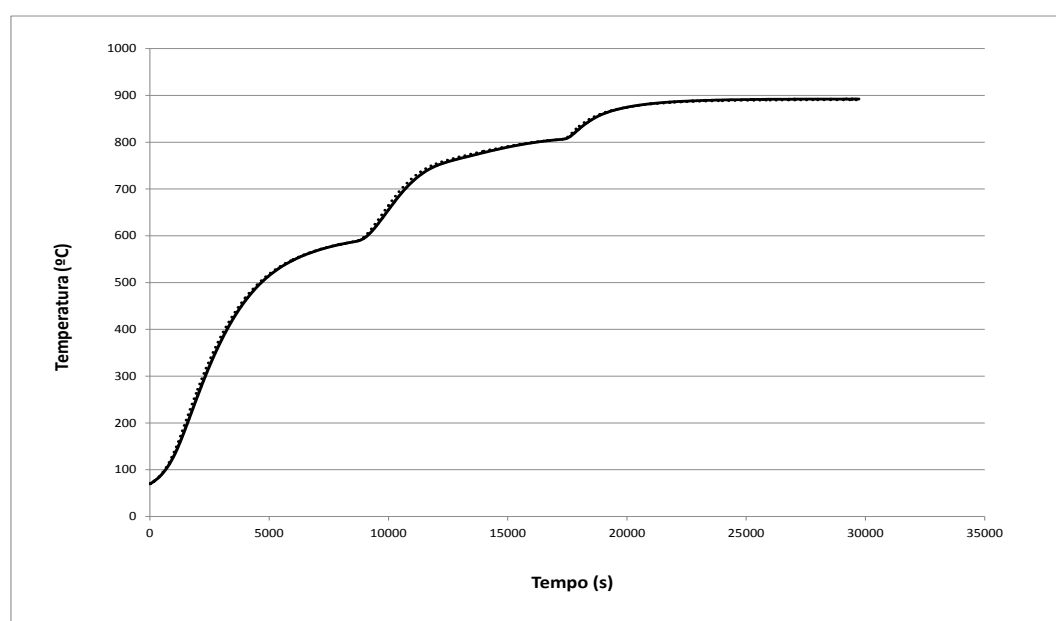


Figura 3.7 - Evolução temporal da temperatura do furo menos profundo (35 mm) e do furo mais profundo (65 mm) obtida experimentalmente. Linha T_{d-1} , — T_{d-2}

Na Figura 3.8 mostra-se a evolução temporal da temperatura de parede do forno obtida experimentalmente e implementada no programa de simulação. Um ajuste idêntico entre as mesmas curvas foi obtido para os restantes locais analisados.

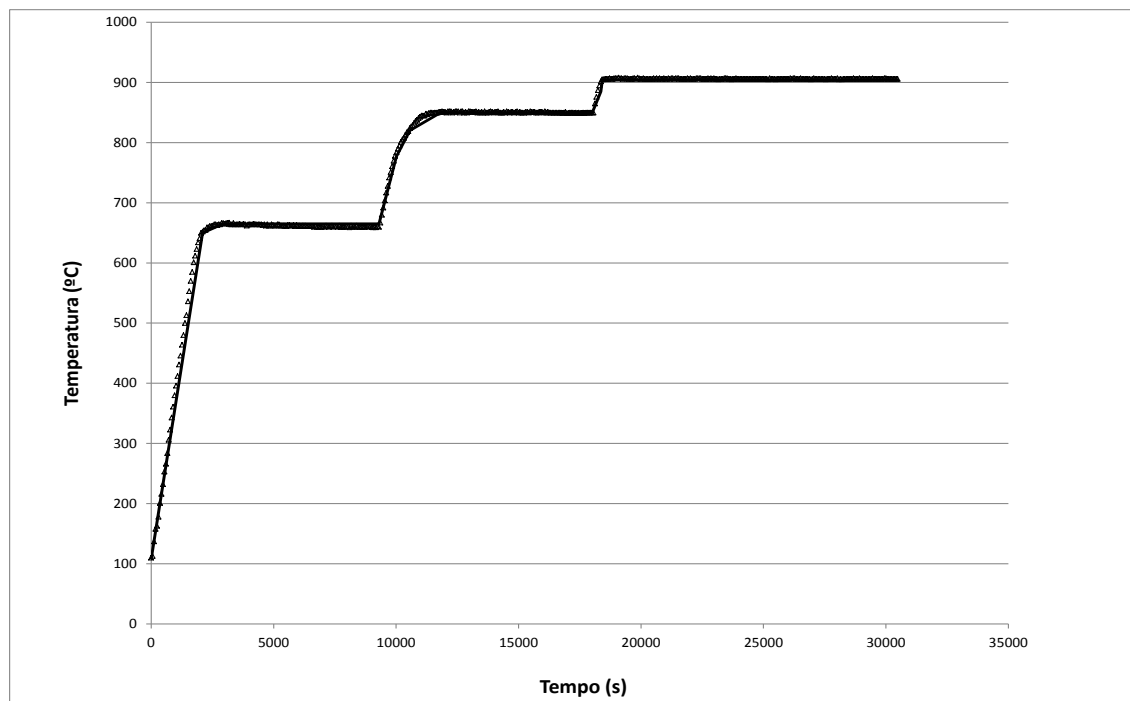


Figura 3.8 - Curva de temperatura em função do tempo da parede do forno experimental e implementada no Abaqus. Símbolo, Δ Pontos experimentais. Linha, — Curva implementada no Abaqus

No final dos 30480 segundos termina a fase de aquecimento, e o estágio à temperatura de têmpera, a partir deste ponto dar-se-á o arrefecimento brusco não representado neste trabalho.

Na Figura 3.9 está patente a evolução da temperatura do gás experimental e a evolução da temperatura do gás implementada no programa Abaqus. Neste caso, pode notar-se que o final da recolha de dados ocorre aos 18360 segundos, instante em que o gás é retirado do forno e a partir do qual a transferência de calor se dá apenas por radiação.

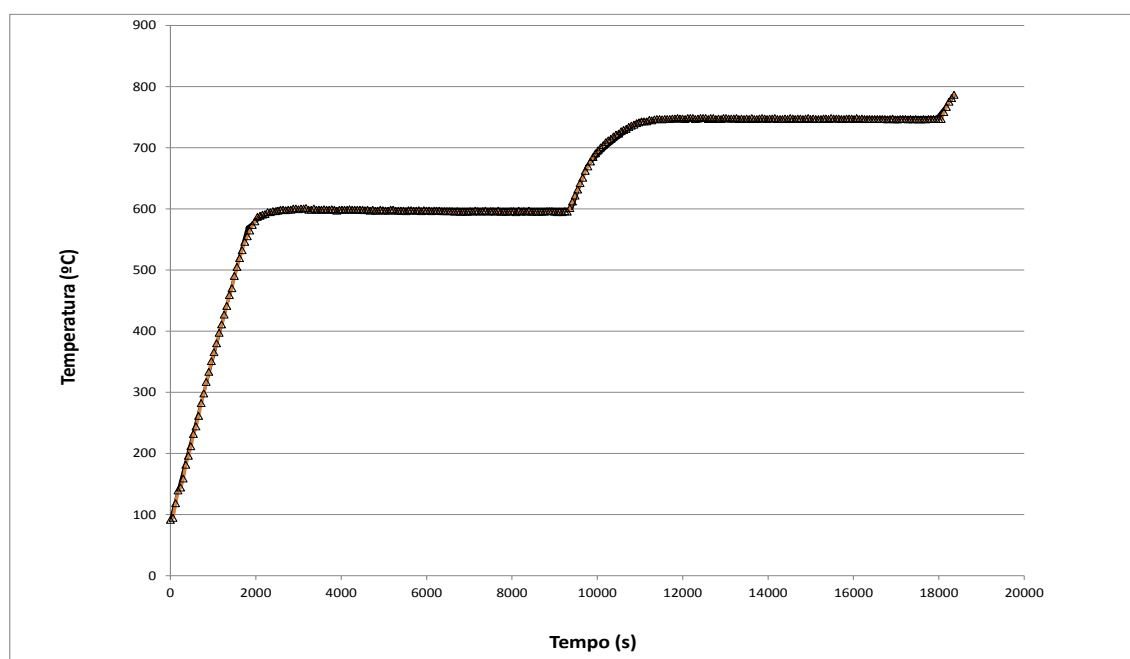


Figura 3.9 - Curva de temperatura em função do tempo do gás experimental e implementada no Abaqus. Símbolo, Δ Pontos experimentais. Linha, — Curva implementada no Abaqus

3.2.2 Ensaio 2

Nesta secção apresentar-se-ão as curvas de aquecimento experimentais para os pontos 1 e 2 do disco estando as peças de teste colocadas na parte central do forno – local 2, como se pode observar na Figura A.0.2 do anexo A.

Da mesma forma que no ensaio 1, a obtenção dos dados experimentais no disco de teste a duas profundidades diferentes permitem observar que as suas evoluções de temperatura são semelhantes como está patente na Figura 3.10.

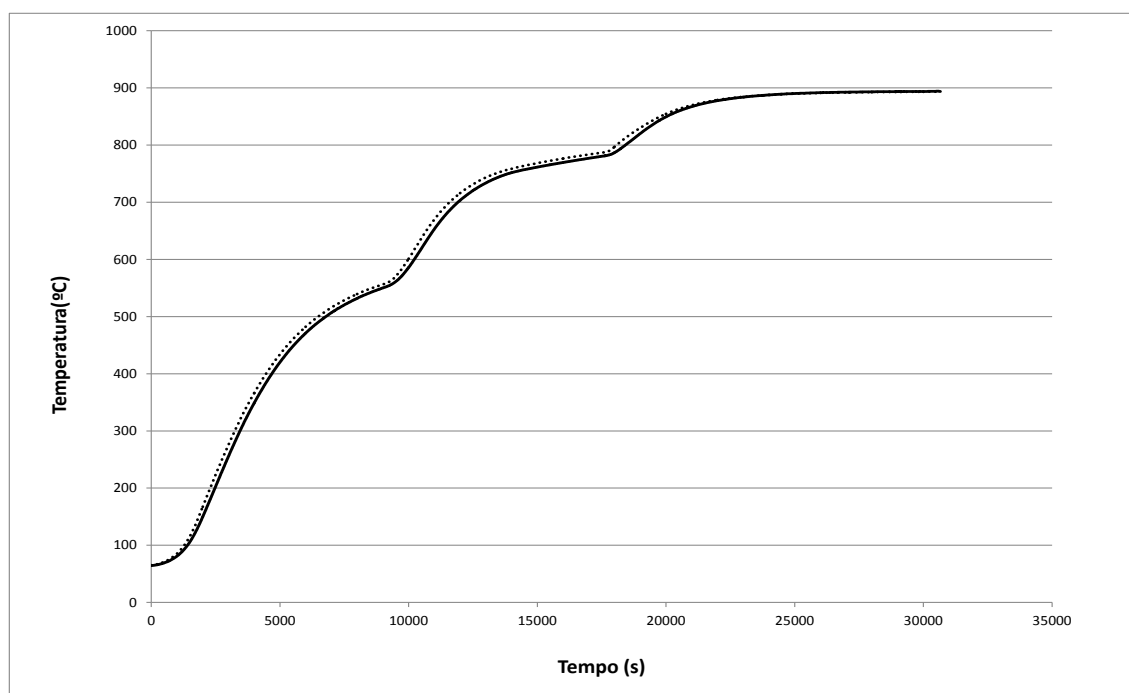


Figura 3.10 - Evolução temporal da temperatura do furo menos profundo (35 mm) e do furo mais profundo (65 mm) obtida experimentalmente. Linha T_{d-1} , — T_{d-2}

3.2.3 Ensaio 3

O caso do ensaio 3 diz respeito ao ensaio em que as peças de teste se encontram no fundo do forno – lado oposto à porta (local 3). Neste caso, a evolução da temperatura ao longo do tempo do ponto 1 e do ponto 2, patentes na Figura 3.6, apresenta um desfasamento como se pode observar na Figura 3.11. Comparando este caso com o do ensaio 1 e do ensaio 2, no caso presente um dos lados do disco está impedido de “ver” a parede pela existência de uma outra peça colocada na perpendicular, c.f. Figura A.0.7 do anexo A, o que causa uma assimetria no aquecimento por radiação e que se traduz no maior desvio verificado. Esta situação alerta para a necessidade de a colocação das peças no forno ser feita de forma a garantir, o melhor possível, que as peças recebem radiação da forma mais uniforme possível. Este cuidado é tanto mais necessário quanto mais rápido for o aquecimento, reduzindo-se assim o valor das tensões originadas por gradientes térmicos dentro da peça.

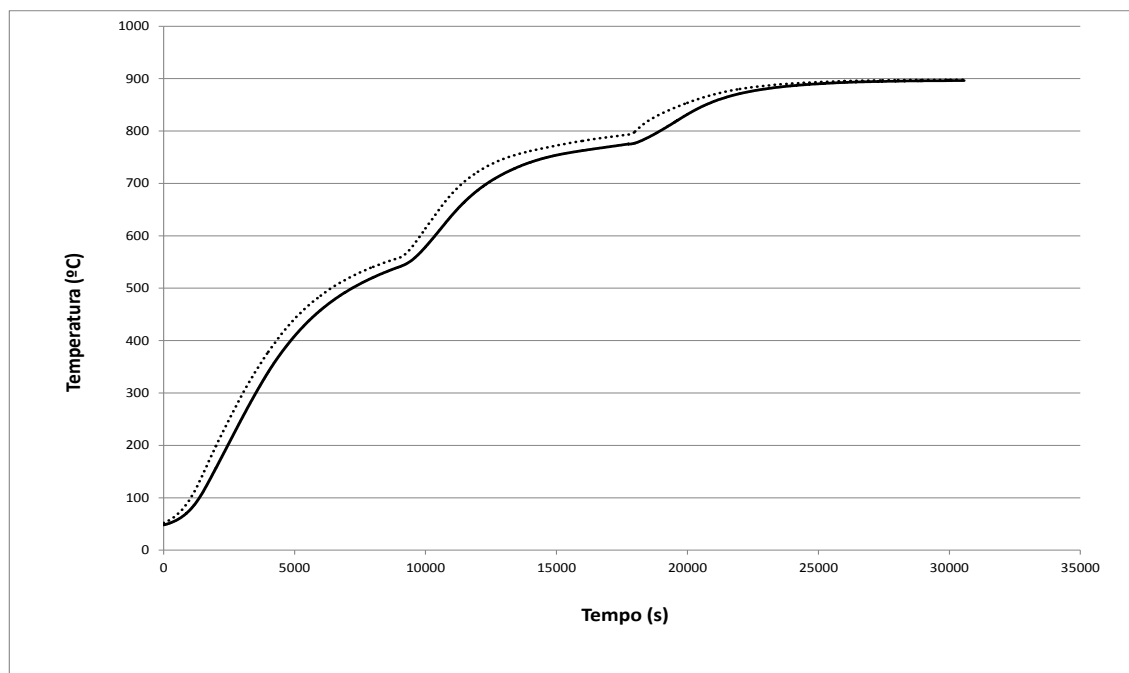


Figura 3.11 - Evolução temporal da temperatura do furo menos profundo (35 mm) e do furo mais profundo (65 mm) obtida experimentalmente. Linha T_{d-1} , — T_{d-2}

3.2.4 Comparação da evolução temporal da temperatura do ponto 1 do disco de teste colocado nos três locais estudados

Com o objectivo de se observar com mais clareza a evolução da temperatura ao longo do tempo no ponto 1 do disco de teste colocado nos três locais estudados apresentam-se na Figura 3.12 estas evoluções.

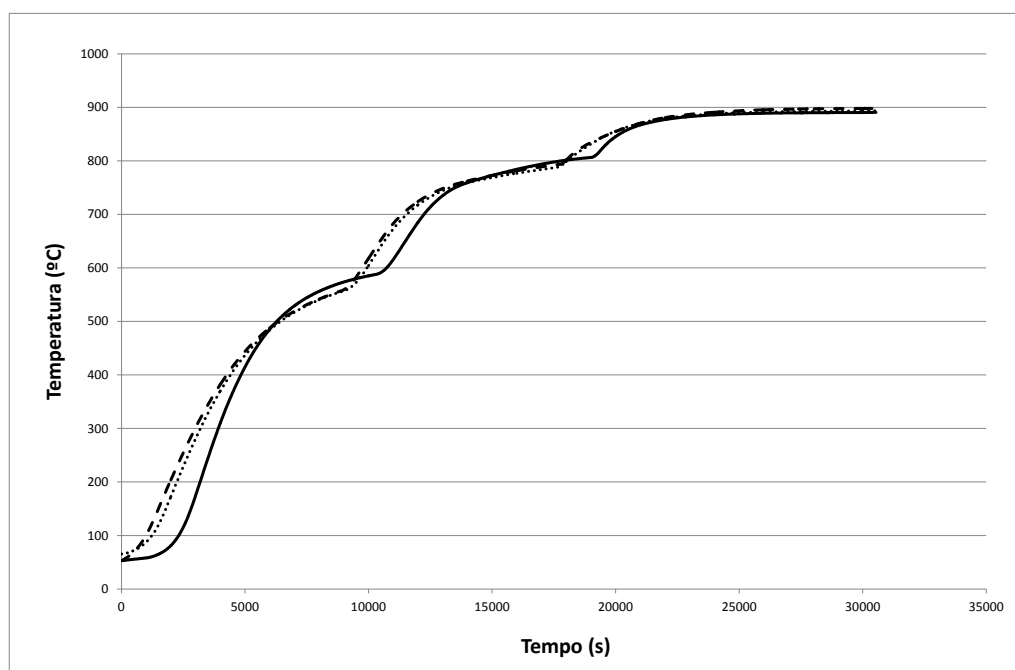


Figura 3.12 – Evolução da temperatura do ponto 1 do disco de teste colocado nos três locais estudados. Linha, — Local 1, ... Local 2, -.-.- Local 3

Apesar das condições iniciais da temperatura do mesmo ponto não se revelarem idênticas pode verificar-se que o tempo de aquecimento com o disco de teste colocado em locais distintos é muito semelhante.

3.3 Ajustamento das curvas numéricas às curvas experimentais

O processo de ajustamento das curvas numéricas às curvas experimentais pretende retratar numericamente o que acontece na realidade na fase de aquecimento do tratamento térmico. Desta forma será possível, posteriormente, analisar a evolução da temperatura e da tensão em vários locais da peça e para outras curvas de temperatura de parede do forno. Através das evoluções temporais da temperatura da parede do forno e da temperatura do gás apresentadas na secção anterior, realizaram-se várias simulações com o intuito de se obter evoluções temporais semelhantes das curvas experimentais e numéricas da temperatura nas peças de teste. Os resultados finais são apresentados seguidamente. No Anexo B apresentam-se os resultados intermédios, para um dos casos estudados, obtidos quando o coeficiente de convecção ainda tinha sido calculado com base numa emissividade de 0.35 e um factor de forma de 0.5, valores estes obtidos por Oliveira (2011).

3.3.1 Resultados obtidos utilizando o modelo numérico de radiação em cavidade para o disco de teste

Nesta secção serão apresentados os resultados obtidos numericamente para a evolução da temperatura ao longo do tempo do ponto 1 e também dos pontos A e B da Figura 3.6, para os ensaios 1, 2 e 3. Como seria de esperar, os resultados numéricos dificilmente apresentam uma evolução exactamente igual à que acontece na realidade. Apesar disto, conseguem-se resultados numéricos muito próximos, podendo a diferença entre tais resultados ser explicada pelo facto de no modelo numérico não estar exactamente representada a carga real a tratar, bem como o coeficiente de convecção e as propriedades das peças de teste estarem sujeitas a erros.

Na Figura 3.13 e na Figura 3.14 apresentam-se as evoluções da temperatura ao longo do tempo obtidas numericamente para os pontos 1, e A e B, respectivamente. De forma a ajustar da melhor maneira os resultados numéricos aos resultados experimentais foi necessário alterar a emissividade real do material em questão e o espaçamento entre os discos. Numa fase inicial utilizou-se o mesmo espaçamento que Oliveira (2011) que tinha sido de 1 cm, o que se verificou que não permitia ajustar da melhor forma as curvas numéricas às presentes curvas experimentais. Desta forma aumentou-se o espaçamento entre discos de 1 cm para 2.5 cm, o que provocou um aumento no factor de forma disco-parede e, consequentemente, um aumento na quantidade de calor transferida ao disco de teste. Assim, e para um valor da emissividade de 0.23 conseguiu-se um melhor ajuste para o ensaio 1, Figura 3.13.

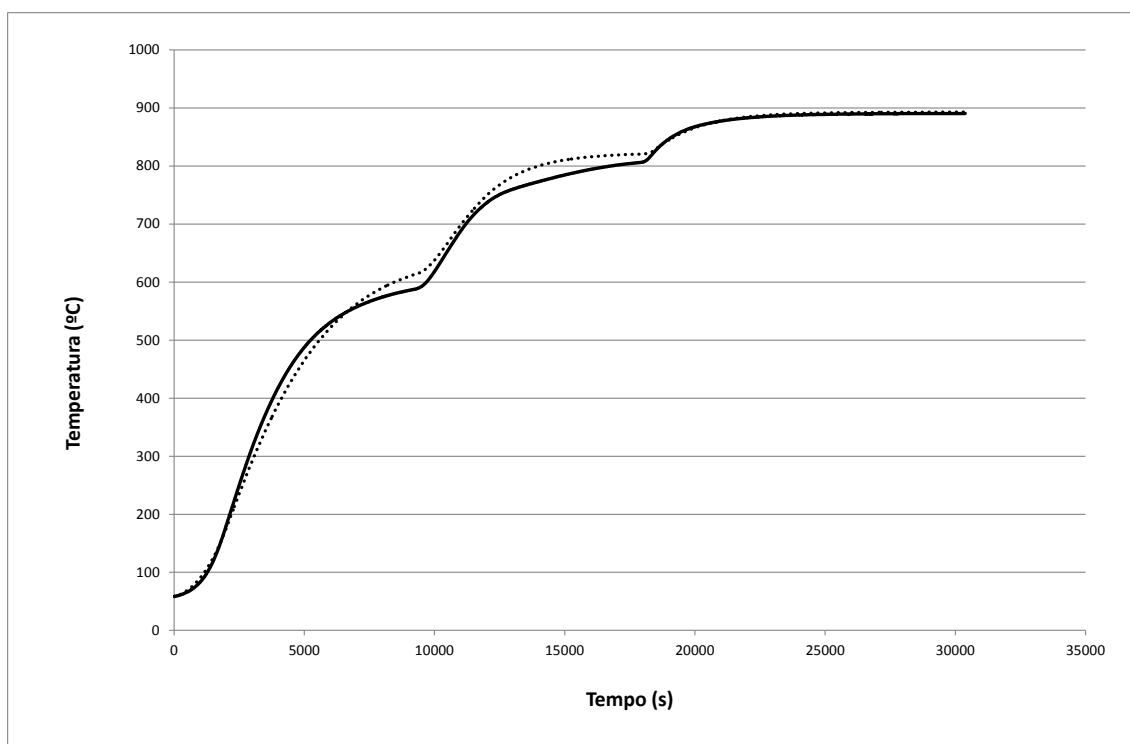


Figura 3.13 - Curva de temperatura em função do tempo do ponto 1 do disco obtidas experimentalmente e numericamente para o ensaio 1. Linha, — Curva experimental. Curva numérica

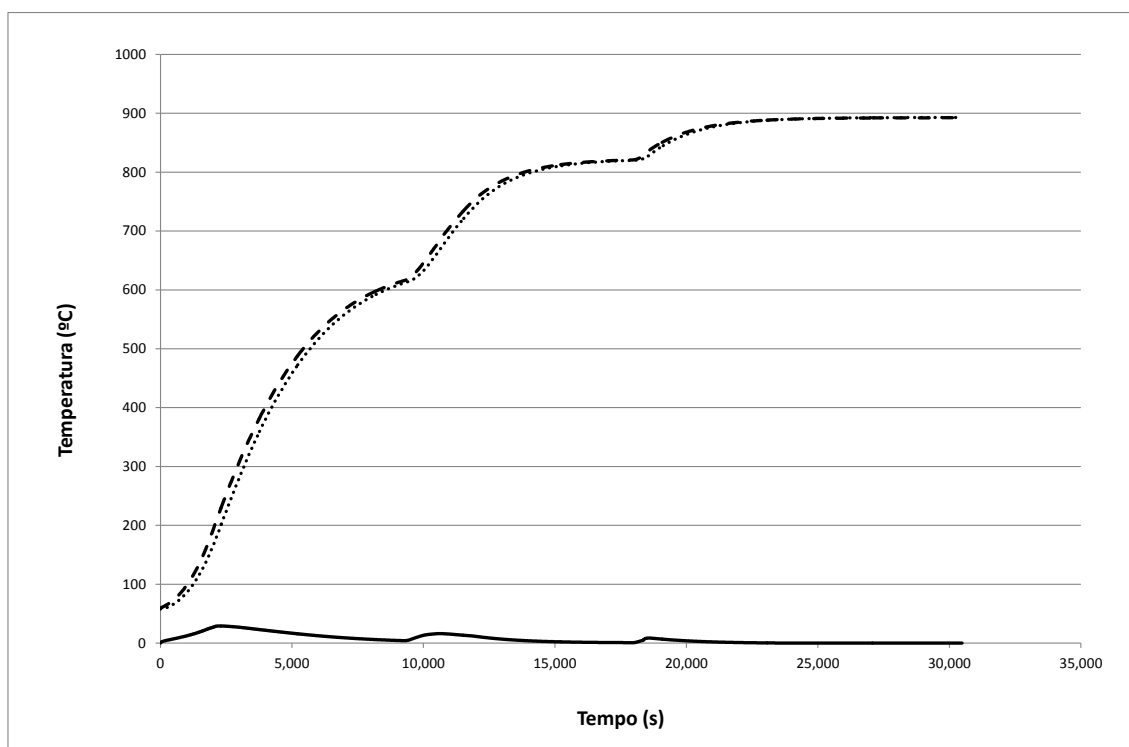


Figura 3.14 - Curva de temperatura em função do tempo do ponto A e do ponto B do disco obtidas numericamente para o ensaio 1. Linha, ... T_{d-A}, - - - T_{d-B}, — T_{d-B}-T_{d-A}

Do mesmo modo, obtiveram-se as evoluções temporais das temperaturas para os mesmos pontos para o caso do ensaio 2. Neste ensaio o valor da emissividade, para o qual a curva

numérica se ajusta melhor à curva experimental, é de 0.2. Na Figura 3.15 e Figura 3.16 estão representadas as evoluções homólogas da temperatura ao longo do tempo obtidas para este caso.

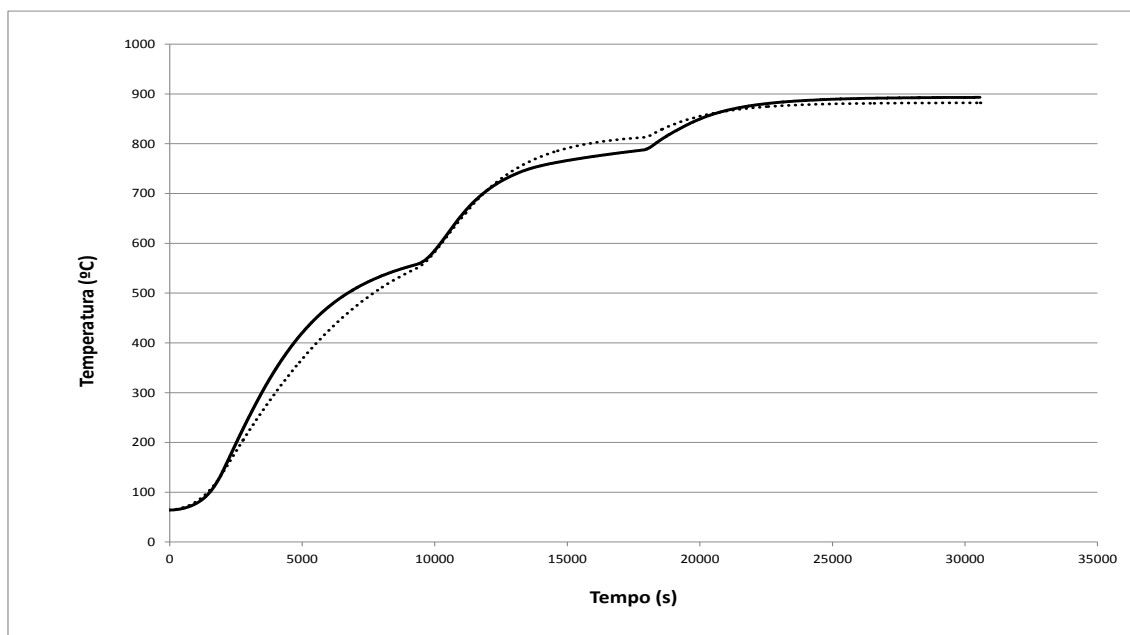


Figura 3.15 - Curva de temperatura em função do tempo do ponto 1 do disco obtidas experimentalmente e numericamente para o ensaio 2. Linha, — Curva experimental. Curva numérica

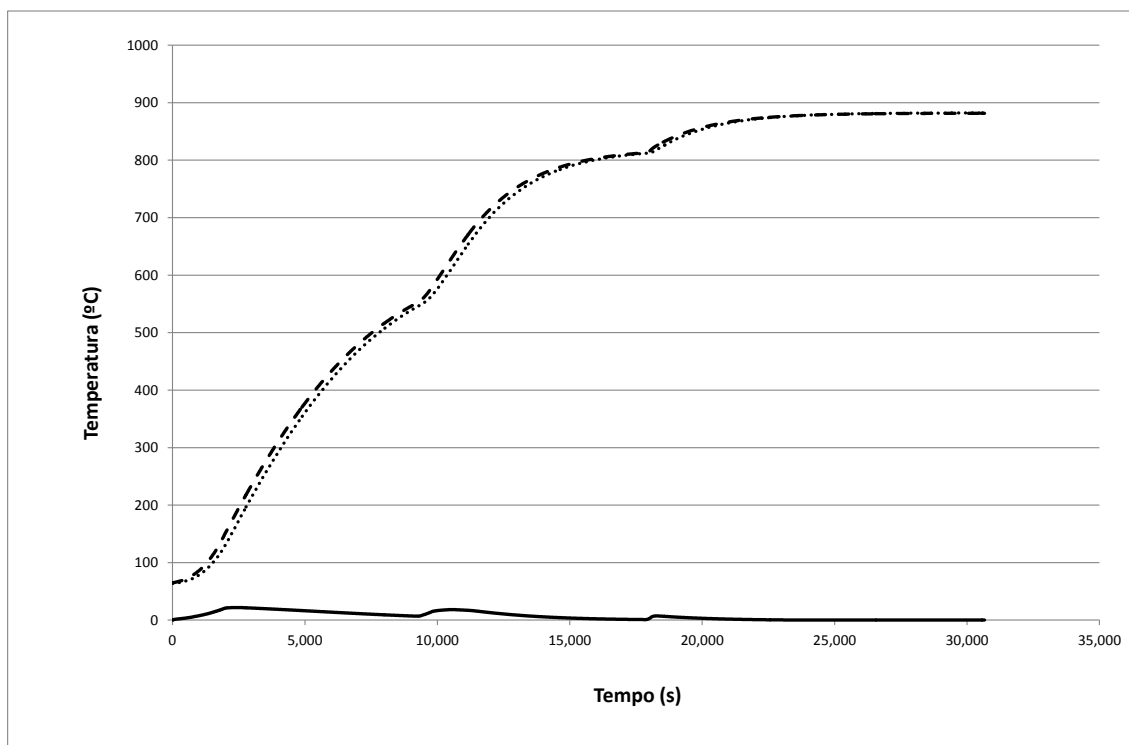


Figura 3.16 - Curva de temperatura em função do tempo do ponto A e do ponto B do disco obtidas numericamente para o ensaio 2. Linha, ... T_{d-A} . - - - T_{d-B} . — $T_{d-B} - T_{d-A}$

Para o ensaio 3, onde as peças de teste se encontram do lado oposto à porta do forno – local 3 - obtiveram-se as curvas homólogas apresentadas, de seguida, na Figura 3.17 e Figura 3.18. Estas curvas foram obtidas para uma emissividade de 0.28.

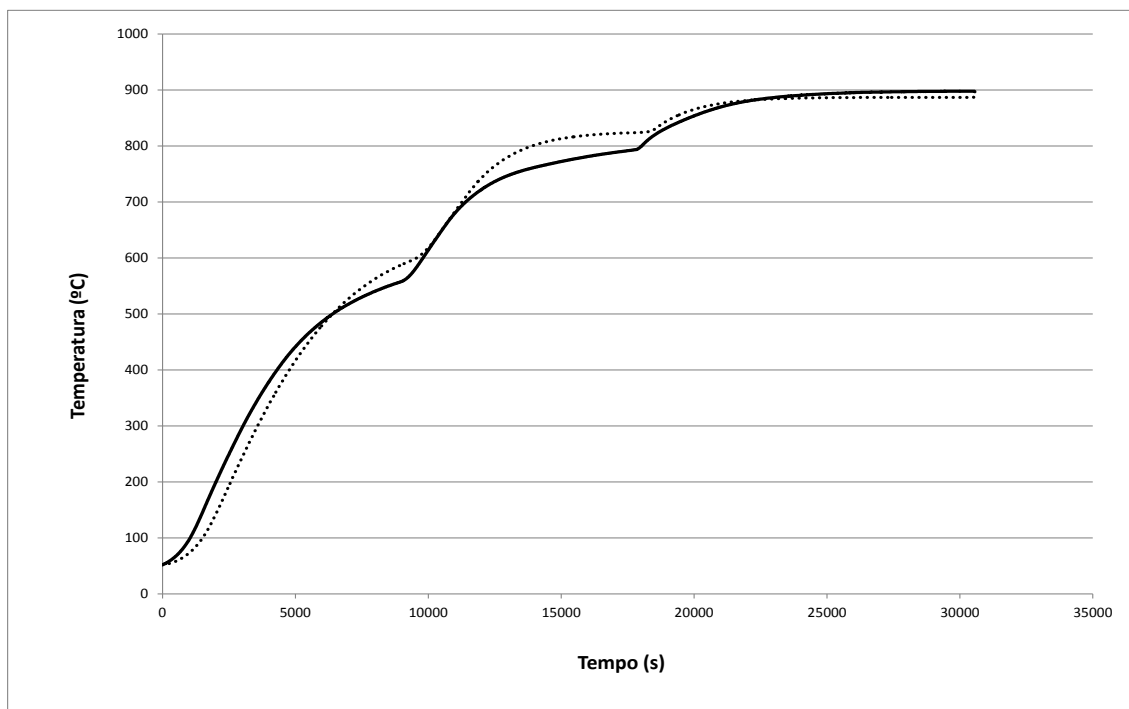


Figura 3.17 - Curva de temperatura em função do tempo do ponto 1 do disco obtidas experimentalmente e numericamente para o ensaio 3. Linha, — Curva experimental. Curva numérica

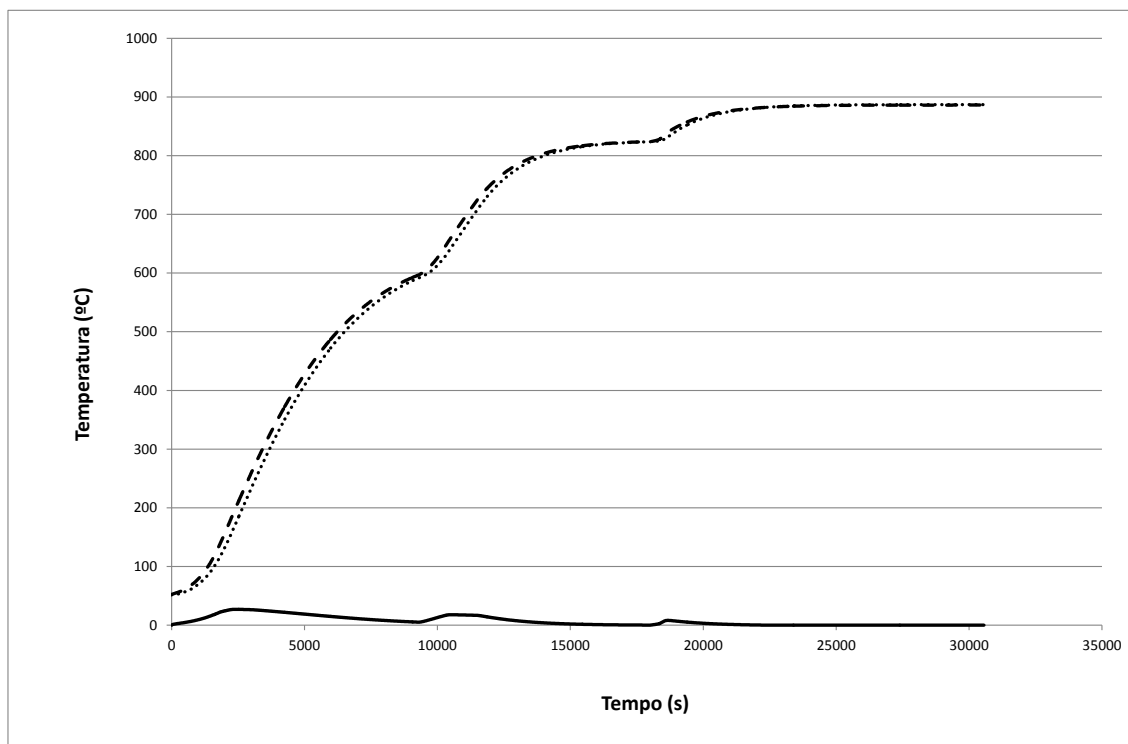


Figura 3.18 - Curva de temperatura em função do tempo do ponto A e do ponto B do disco obtidas numericamente para o ensaio 3. Linha, ... T_{d-A} , - - - T_{d-B} , — $T_{d-B} - T_{d-A}$

Como se pode ver nas Figuras 3.14, 3.16 e 3.18 as temperaturas dos pontos extremos A e B são muito próximas, o que sugere que o modelo designado por sistema global, e para o aço em análise, pode ser aplicado para todo o aquecimento. Esta característica de elevada condutibilidade térmica do aço utilizado poderá ser aquela que permitirá utilizar aquecimentos mais rápidos sem introduzir tensões térmicas adicionais significativas.

Na Tabela 3.3 apresenta-se um resumo dos parâmetros que permitiram obter o melhor ajuste possível para o caso dos ensaios 1, 2 e 3. A determinação do factor de forma $F_{\text{disco-parede}}$ foi possível recorrendo-se ao programa EES.

Tabela 3.3 - Resumo dos parâmetros utilizados para os ajustes das curvas numéricas

	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
Emissividade	0.23	0.2	0.28
Nº de discos	7 discos		
Distância entre discos (cm)	2.5		
$F_{\text{disco-parede}}$	0.559		
Temperatura média dos topos do forno (°C)	500		
h_c (W/m ² °C)	12.6	6	6

3.3.2 Resultados obtidos utilizando o modelo numérico de radiação entre dois corpos para o disco de teste

Apesar do modelo numérico de radiação entre dois corpos não traduzir a realidade da carga a tratar, i.e., não ser possível colocar no modelo o efeito da presença de mais peças, o resultado da evolução das temperaturas ao longo do tempo apresenta, contudo, um bom andamento quando comparado com o resultado experimental. A forçosa utilização deste modelo servirá para, posteriormente, se poder fazer uma avaliação do campo de tensões nas peças quando estas forem aquecidas mais rapidamente. Deste modo tentou-se obter os melhores ajustes possíveis, estando sempre presente o lado da segurança, tendo no caso numérico uma situação mais exigente, i.e., um aquecimento mais rápido do que aquele que ocorre na realidade. Tomou-se esta opção, pois na análise das tensões durante o aquecimento é preferível uma solicitação maior, já que não se conseguiu uma situação exactamente igual à da realidade.

Na Figura 3.18, Figura 3.20 e Figura 3.21 estão patentes os resultados obtidos, utilizando o disco, para o ajuste entre os resultados experimentais e os resultados numéricos para os casos dos ensaios 1, 2 e 3, respectivamente.

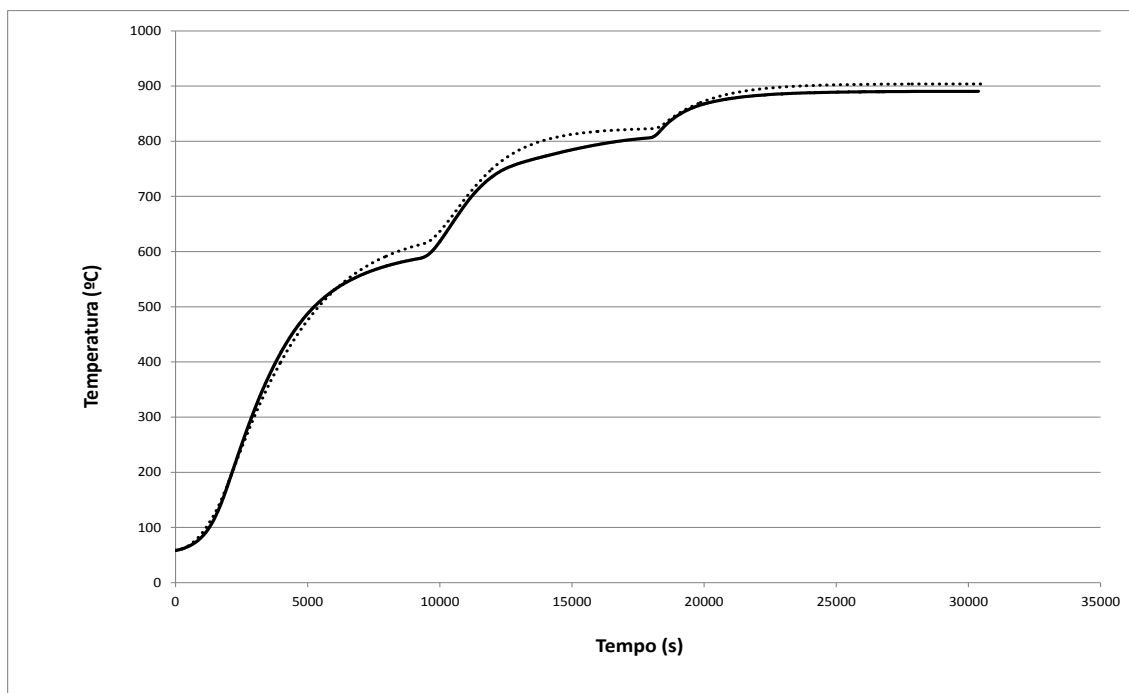


Figura 3.19 - Curva de temperatura em função do tempo do ponto 1 do disco obtida experimentalmente e numericamente para o ensaio 1. Linha, — Curva experimental. Curva numérica

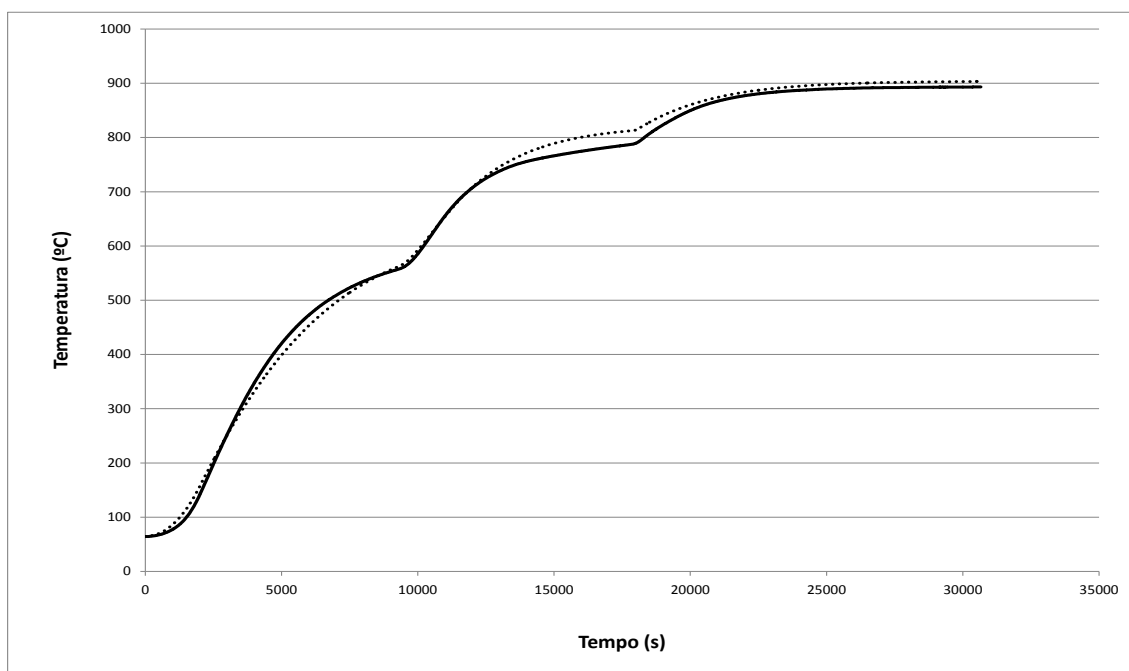


Figura 3.20 - Curva de temperatura em função do tempo do ponto 1 do disco obtida experimentalmente e numericamente para o ensaio 2. Linha, — Curva experimental. Curva numérica

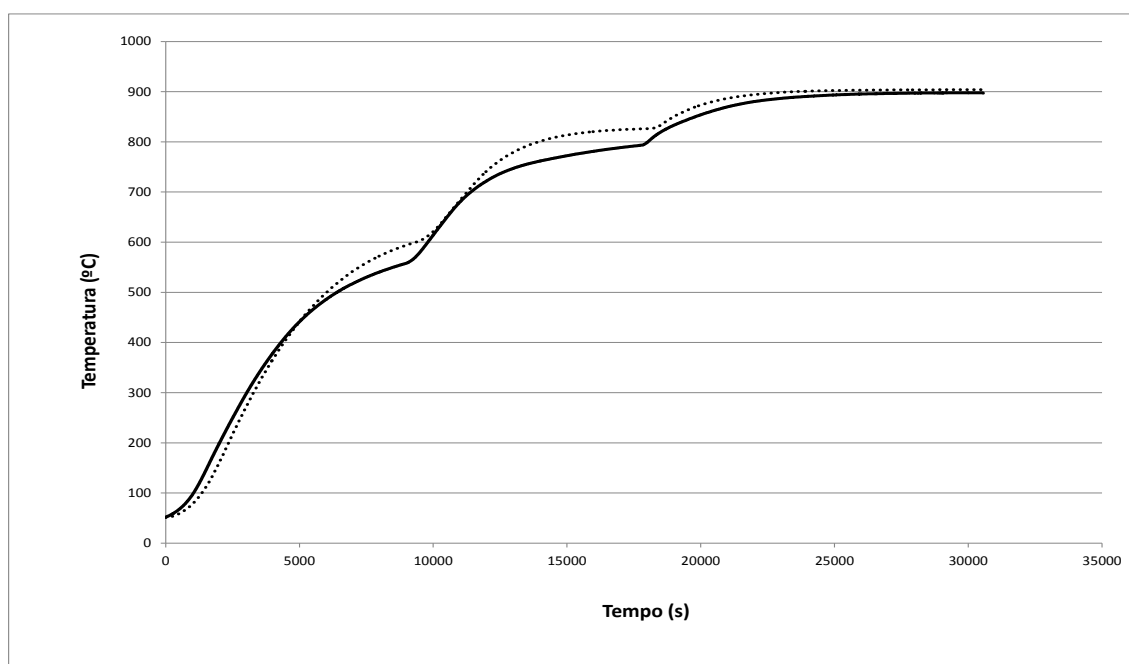


Figura 3.21 - Curva de temperatura em função do tempo do ponto 1 do disco obtida experimentalmente e numericamente para o ensaio 3. Linha, — Curva experimental. Curva numérica

3.3.3 Resultados obtidos para o cilindro de teste

Nesta secção mostrar-se-ão os resultados numéricos obtidos relativos ao cilindro de teste para os ensaios 1 e 3, pois como já foi referido anteriormente, no ensaio 2 o termopar que media a sua temperatura avariou. Se no caso do disco de teste a dificuldade de reproduzir a situação real, numericamente, é elevada, no caso do cilindro de teste ainda mais complicado se torna. Isto porque, na realidade, a carga a tratar é não uniforme ao nível de dimensões das diferentes peças. Dada a pequena geometria do cilindro, quando comparada com a dimensão das peças circundantes e que se traduz num maior peso das trocas de calor por radiação com as peças vizinhas, algo que o modelo numérico tem dificuldade em reproduzir, o ajuste das curvas numéricas apresenta um maior desfasamento relativamente às curvas experimentais que o observado no disco.

Na Figura 3.22 mostram-se as curvas experimentais e numéricas relativas ao ponto A e Figura 3.23 mostra-se o resultado numérico obtido para os pontos A e B, ambas para o cilindro no ensaio 1 – local 1, resultados estes obtidos pelo método da radiação entre dois corpos.

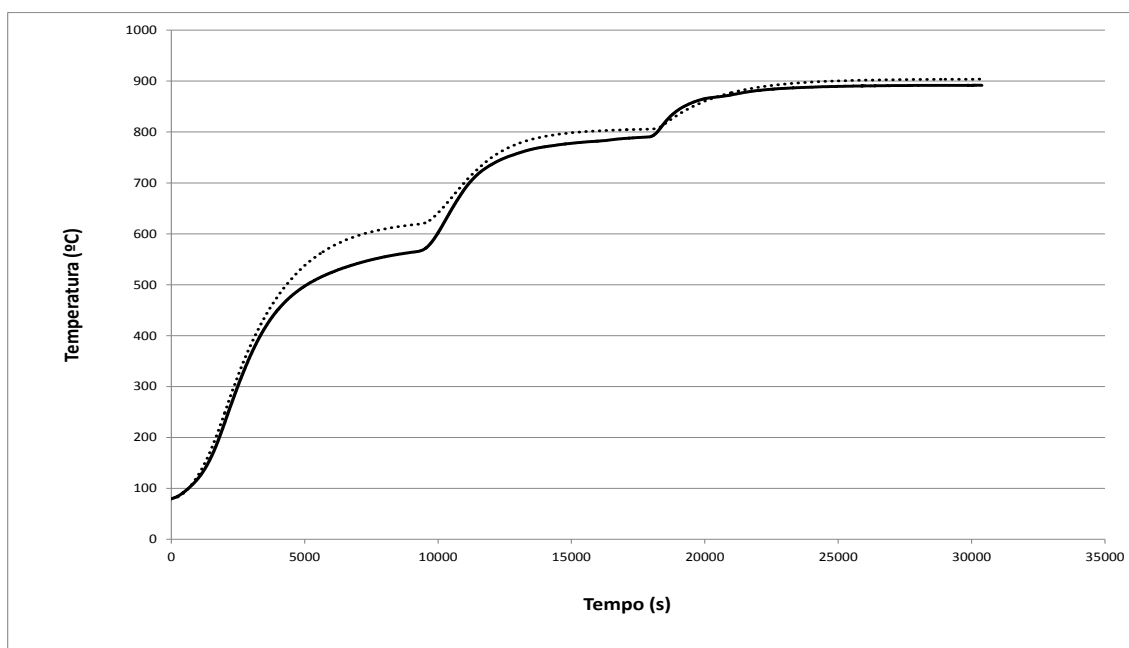


Figura 3.22 - Curva de temperatura em função do tempo do ponto A do cilindro obtida experimentalmente e numericamente para o ensaio 1 pelo modelo de radiação entre dois corpos. Linha, — Curva experimental. Curva numérica

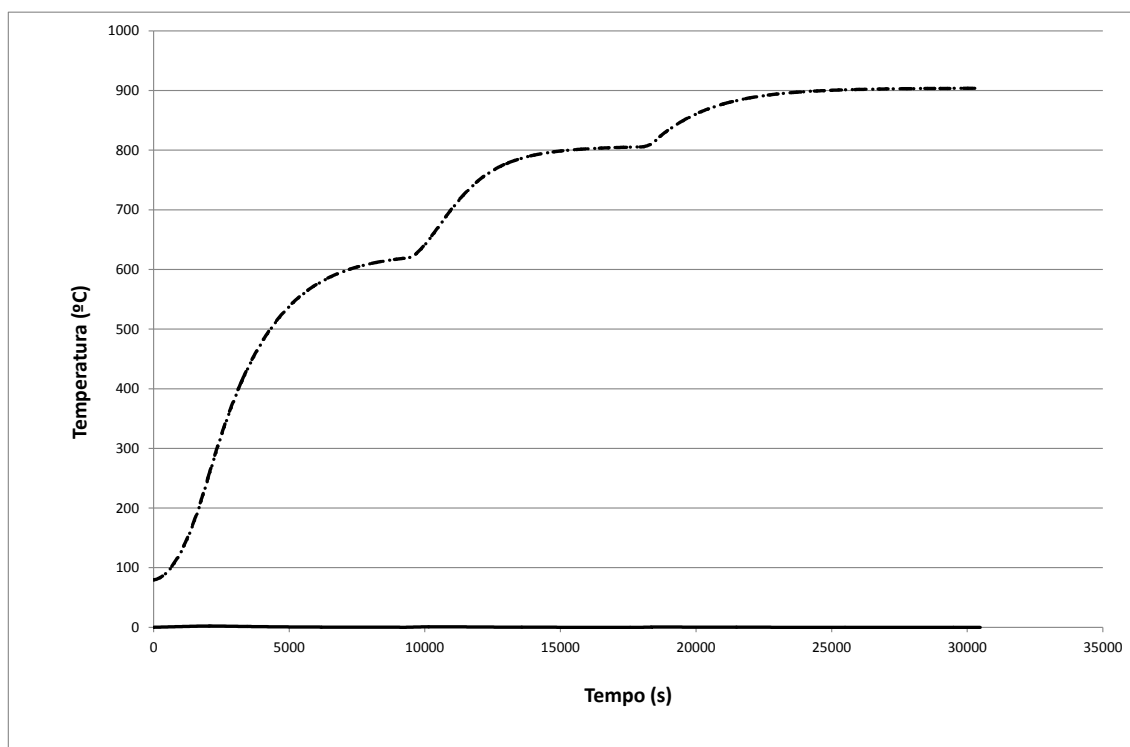


Figura 3.23 - Curva de temperatura em função do tempo do ponto A e do ponto B do cilindro obtida numericamente para o ensaio 1 pelo modelo da radiação entre dois corpos. Linha, ... T_{c-A} , ---- T_{c-B} , — $T_{c-B}-T_{c-A}$

Para o mesmo ensaio 1, obtiveram-se também os ajustes da curva numérica à curva experimental pelo modelo da radiação em cavidade que se apresentam na Figura 3.24. Na Figura 3.25 está representada a evolução da temperatura ao longo do tempo do ponto A e do ponto B do cilindro.

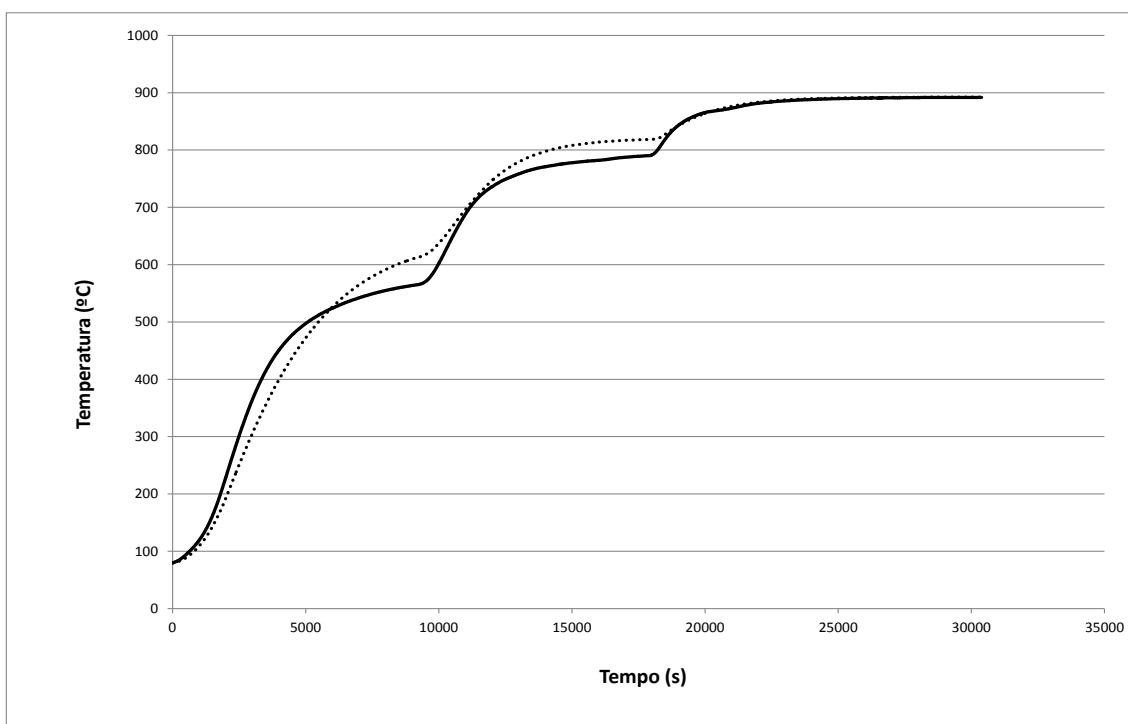


Figura 3.24 - Curva de temperatura em função do tempo do ponto A do cilindro obtida experimentalmente e numericamente para o ensaio 1 pelo modelo de radiação em cavidade. Linha, — Curva experimental. Curva numérica

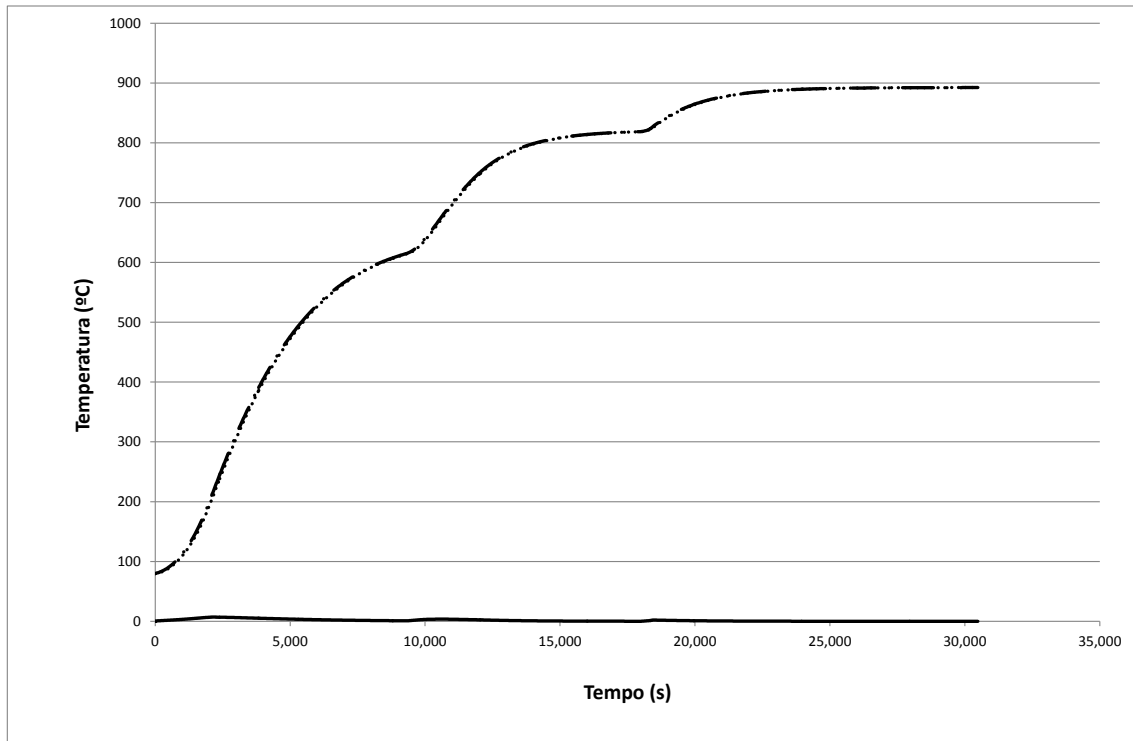


Figura 3.25 - Curva de temperatura em função do tempo do ponto A e do ponto B do cilindro obtida numericamente para o ensaio 1 pelo modelo da radiação em cavidade. Linha, ... T_{C-A} , ---- T_{C-B} , — $T_{C-B} - T_{C-A}$

Numa peça de menor dimensão, as diferenças de temperatura dos pontos A e B é praticamente inexistente, como se observa na Figura 3.23 e na Figura 3.25, uma vez que o comprimento

característico, L_e , neste caso é menor, o que conduz a um menor número de Biot e, conseqüentemente, a uma maior homogeneização espacial da temperatura.

Na Figura 3.26 mostram-se as curvas experimentais e numéricas relativas ao ponto A e na Figura 3.27 podem observar-se os resultados numéricos dos pontos A e B, ambas para o ensaio 3, obtidos através do modelo de radiação entre dois corpos.

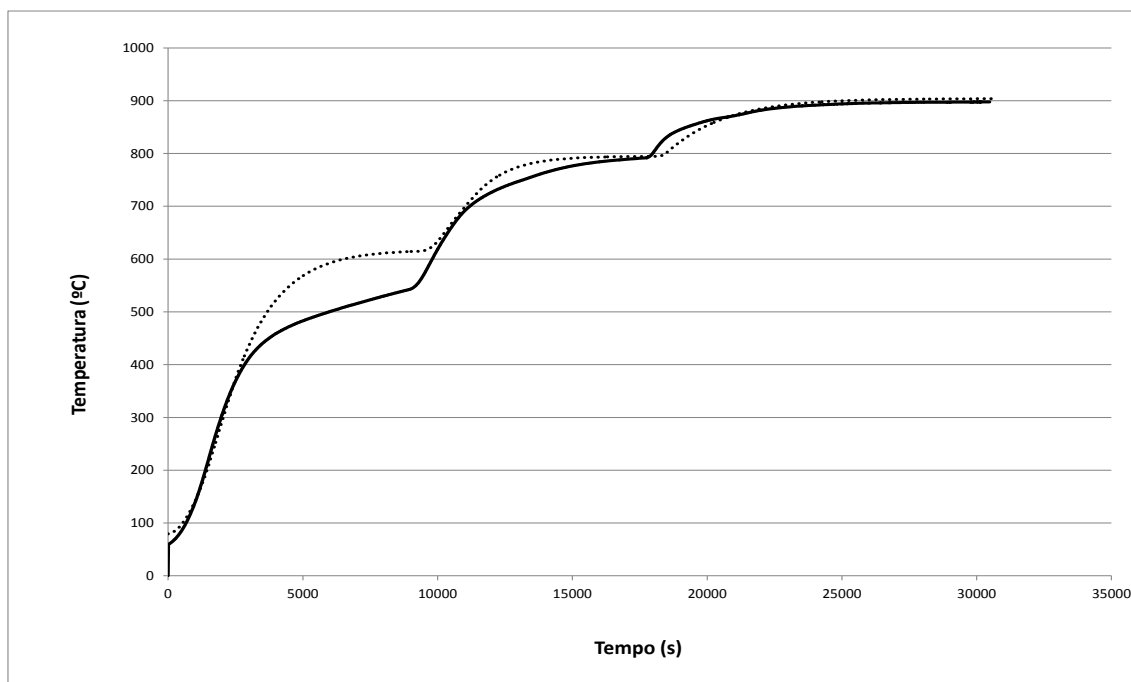


Figura 3.26 - Curva de temperatura em função do tempo do ponto A do cilindro obtida experimentalmente e numericamente pelo modelo de radiação entre dois corpos para o ensaio 3. Linha, — Curva experimental. Curva numérica

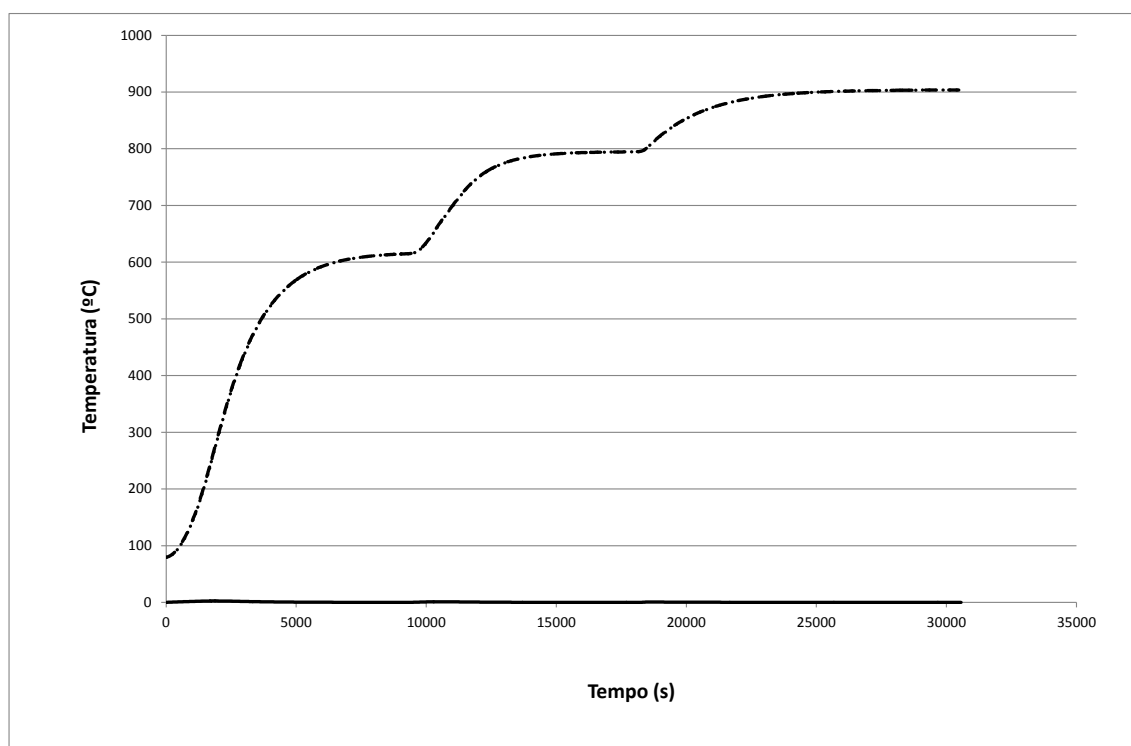


Figura 3.27 - Curva de temperatura em função do tempo do ponto A e do ponto B do cilindro obtida numericamente pelo modelo de radiação entre dois corpos para o ensaio 3. Linha, ... T_{c-A} . - - - T_{c-B} , — $T_{c-B} - T_{c-A}$

4 Otimização da fase de aquecimento

Neste capítulo serão abordados e apresentados os procedimentos bem como os resultados relativos à redução do tempo de aquecimento do tratamento térmico de têmpera. Com base em toda a informação descrita nos capítulos anteriores e, principalmente, com o auxílio dos modelos numéricos utilizados, verificar-se-á o desempenho da metodologia proposta em Oliveira (2011) em duas peças de teste de tamanho distinto, o disco e o cilindro, e no comportamento de peças de maior dimensão que também são tratadas na empresa F. Ramada. Neste último caso, só serão apresentados resultados de simulação. A obtenção dos melhores ajustes possíveis das curvas numéricas relativamente às experimentais tem uma elevada importância, pois se o modelo numérico traduz razoavelmente bem o comportamento das peças de teste durante o aquecimento normal é de prever que também o fará para outras curvas de aquecimento que encurtem o tempo do ensaio.

4.1 Curvas de temperatura da parede em função do tempo propostas e resposta das peças de teste

Com base na evolução da temperatura da parede do forno ao longo do tempo obtida experimentalmente, propõem-se, nesta secção, novas variantes às evoluções desta temperatura com o intuito de aquecer mais rapidamente as peças a tratar, reduzindo assim o tempo que estas demoram a atingir a temperatura de têmpera. Desta forma, apresentar-se-ão as novas curvas de temperatura da parede do forno e do gás em função do tempo e as respectivas respostas das peças de teste. É de esperar uma redução significativa no tempo de aquecimento das peças, pois a temperatura da parede do forno e a temperatura do gás aumentam mais rapidamente, o que aumentará a taxa de calor transferido às peças em tratamento.

De salientar que as respostas das diferentes peças obtidas numericamente, foram simuladas para a situação em que o ajuste curva numérica-curva experimental foi obtido, ou seja, o forno tem a carga completa no seu interior, i.e., que cada peça de teste tenha presente em seu redor outras peças, pois este factor é decisivo no processo de transferência de calor entre a parede do forno e a peça a testar, como se poderá verificar na secção 6.1.

4.1.1 Análise ao disco de teste

Na Figura 4.1 estão representadas as evoluções da temperatura ao longo do tempo da parede do forno T_{pf} , do gás $T_{gás}$ e do ponto 1 do disco de teste, T_{d-1} , para o aquecimento mais lento e para o aquecimento mais rápido, quando o disco está colocado junto à porta do forno – local 1. Pode observar-se uma grande diferença entre o tempo que, nos dois casos, a temperatura da peça demora a atingir a temperatura de têmpera, como já se havia constatado anteriormente, Oliveira (2011).

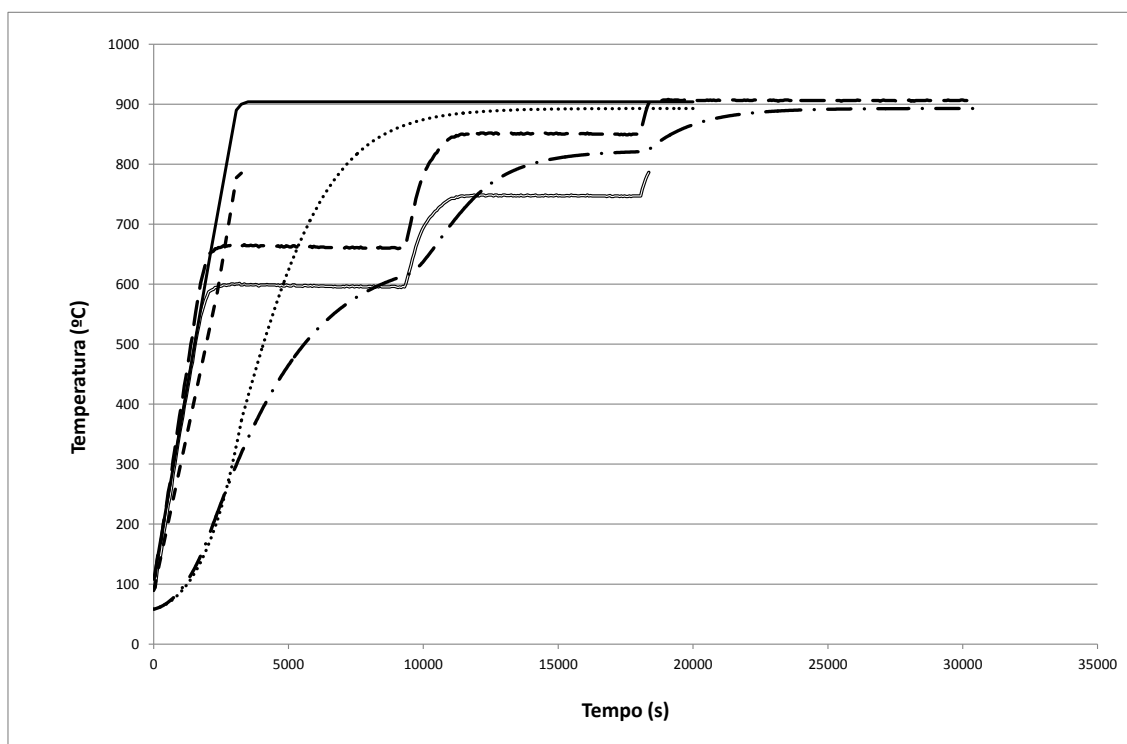


Figura 4.1 - Curva de temperatura em função do tempo da parede do forno, do gás e do disco no ponto 1 para o aquecimento mais rápido e mais lento no local do ensaio 1. Linha, — T_{pf} no aquecimento mais rápido, --- $T_{gás}$ no aquecimento mais rápido, ... T_{d-1} causada pelo aquecimento mais rápido, — . T_{pf} no aquecimento mais lento, == $T_{gás}$ no aquecimento mais lento, — . T_{d-1} causada pelo aquecimento mais lento

Do mesmo modo, na Figura 4.2 mostra-se a evolução da temperatura da parede do forno e do gás e também as evoluções da temperatura ao longo do tempo para os pontos A, T_{d-A} , e B, T_{d-B} , do disco e também a diferença de temperaturas $T_{d-B}-T_{d-A}$. Pode notar-se que o andamento das curvas de temperatura dos dois pontos é similar, i.e., o tempo que demoram a atingir a temperatura de têmpera é também similar, havendo no entanto um pico na diferença destas temperaturas, como se pode ver na Figura 4.2 à semelhança do que já ocorria no aquecimento lento. Os valores máximos desta diferença de temperaturas é de 54.5 °C e 29.1 °C, para o aquecimento mais rápido e mais lento, respectivamente. A diferença entre comportamentos do disco, no aquecimento mais lento e no aquecimento mais rápido, é semelhante no caso da colocação deste nos restantes locais do forno, pelo que esses casos não serão aqui apresentados.

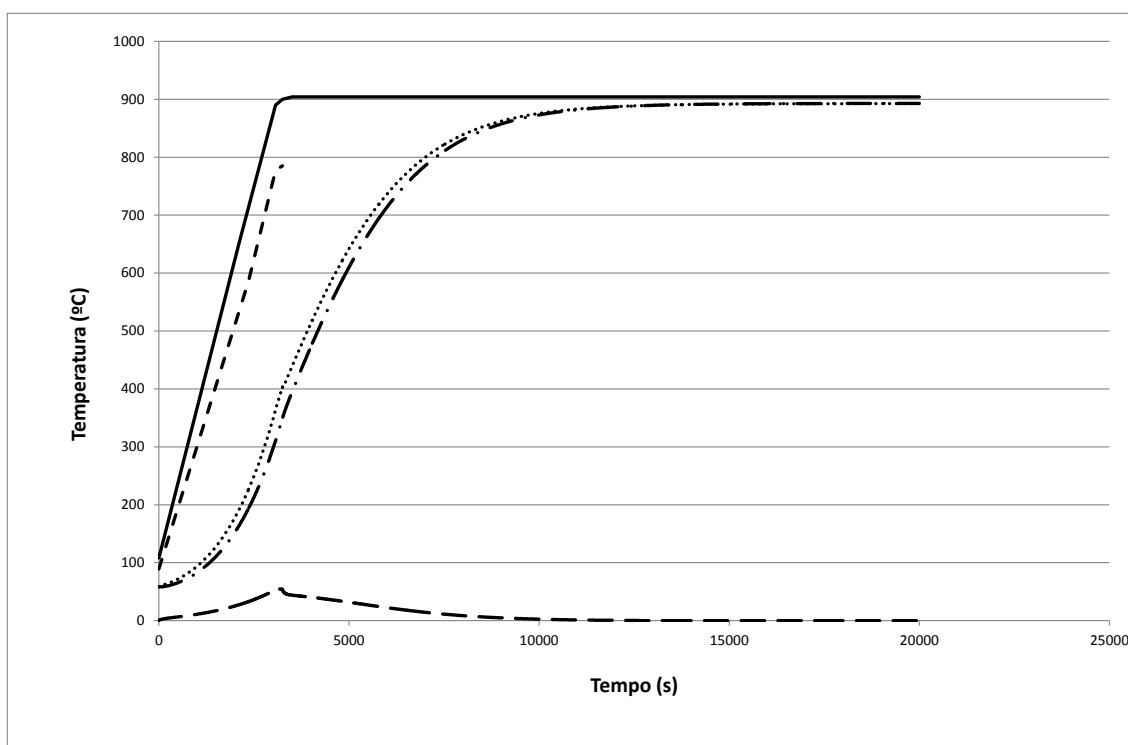


Figura 4.2 - Curva de temperatura em função do tempo da parede do forno, do gás e do disco no ponto A e no ponto B para o aquecimento mais rápido e diferença de temperatura entre o ponto B e o ponto A no local do ensaio 1. Linha, — T_{pf} , - - - T_{gas} , ... T_{d-B} , — . T_{d-A} , — — $T_{d-B}-T_{d-A}$ ao longo do aquecimento

4.1.2 Análise ao cilindro de teste

Atendendo aos parâmetros obtidos para alcançar os ajustes entre as curvas numéricas e as curvas experimentais do cilindro, apresenta-se a resposta deste à nova evolução da temperatura da parede do forno e do gás ao longo do tempo.

Um facto importante de referir nesta secção é a verificação experimental de que o cilindro de teste atinge a temperatura de têmpera em tempo semelhante ao disco de teste. Explicar-se-á mais à frente este facto, no resumo dos resultados obtidos.

Na Figura 4.3 mostra-se a resposta do cilindro no ponto A, T_{c-A} , submetido às condições de aquecimento do local correspondente ao ensaio 1, o cilindro colocado junto à porta do forno. Tal como acontecia no disco de teste, o cilindro apresenta também uma alteração de comportamento similar nas duas localizações, dentro do forno, estudadas,

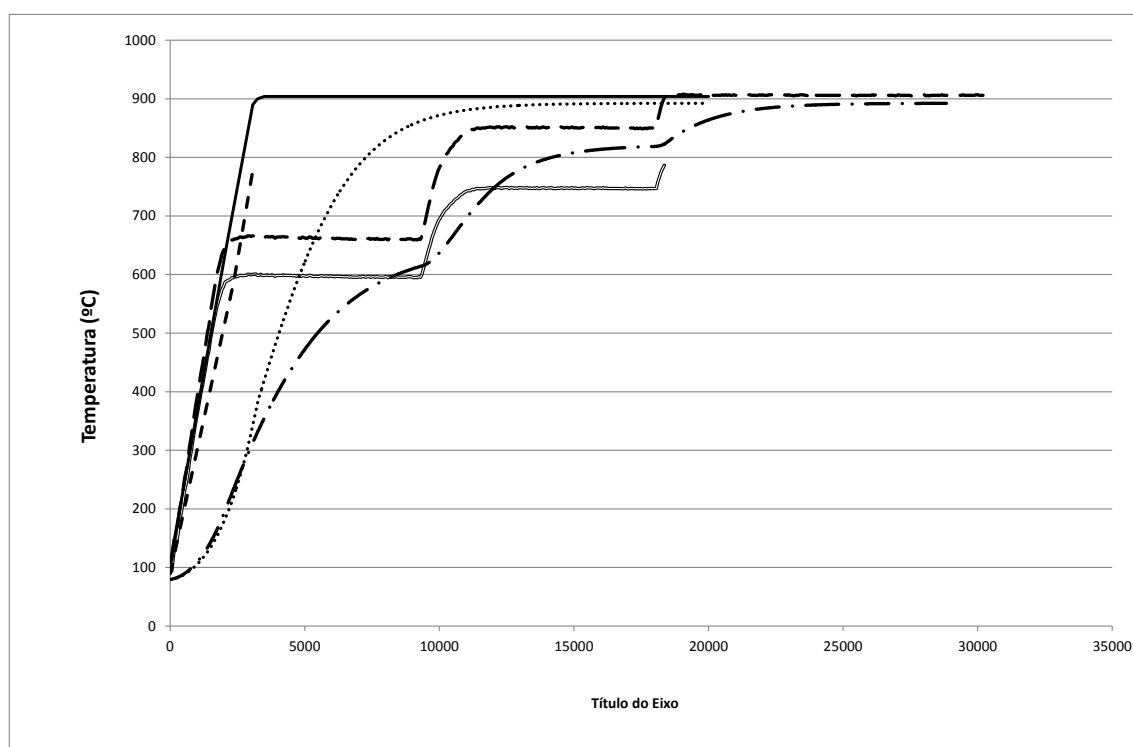


Figura 4.3 - Curva de temperatura em função do tempo da parede do forno, do gás e do cilindro no ponto A para o aquecimento mais rápido e mais lento no local do ensaio 1. Linha, — T_{pf} , --- $T_{gás}$, ... T_{c-A} no aquecimento mais rápido, — T_{pf} , — $T_{gás}$, — T_{c-A} no aquecimento mais lento

Na Figura 4.4 mostra-se a comparação entre a evolução da temperatura ao longo do tempo do ponto A, T_{c-A} , com a evolução da temperatura ao longo do tempo do ponto B, T_{c-B} . Pode notar-se, nesta situação, que as temperaturas no cilindro são mais homogêneas devido a um valor do número de Biot menor.

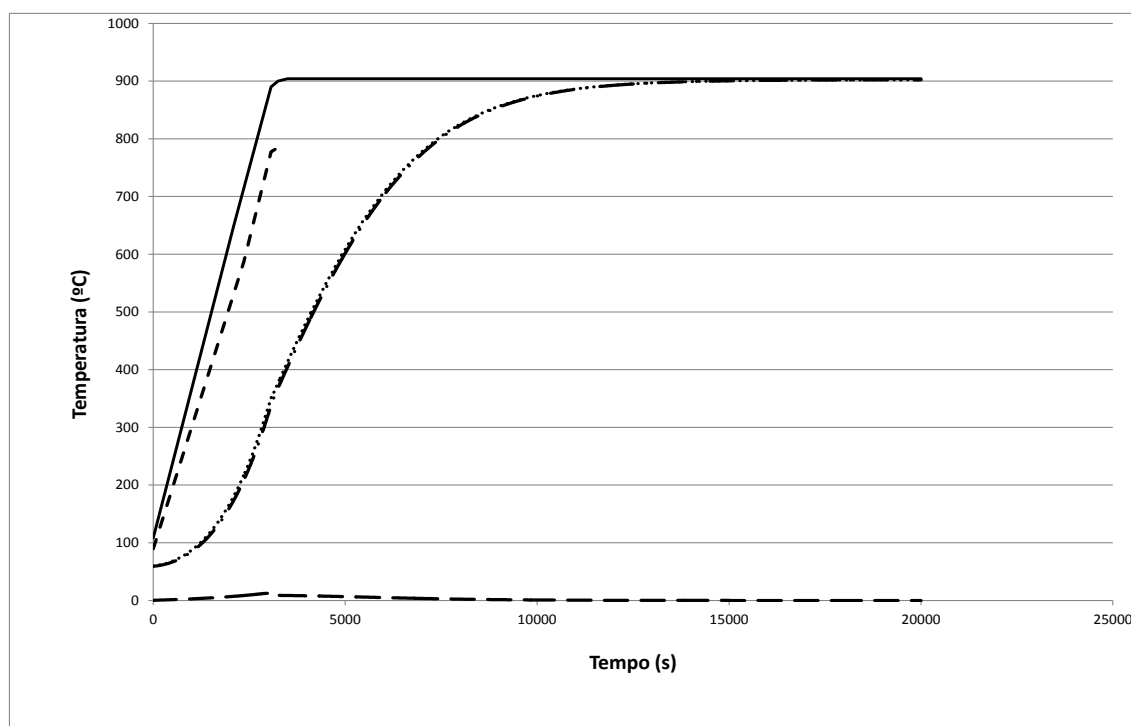


Figura 4.4 - Curva de temperatura em função do tempo da parede do forno, do gás e do cilindro no ponto A e no ponto B para o aquecimento mais rápido e diferença de temperatura entre o ponto B e o ponto A no local do ensaio 1. Linha, — T_{pf} , - - - $T_{gás}$, ... T_{c-B} , — . T_{c-A} , — — $T_{c-B}-T_{c-A}$ ao longo do aquecimento

4.1.3 Análise do comportamento de peças de maior dimensão

A necessidade de analisar o comportamento de peças de maiores dimensões levou ao estudo de mais dois discos, disco 3 e disco 4 apresentados na secção 2.1. Apesar de não existirem dados experimentais relativos a estes dois discos, realizaram-se as simulações numéricas para o aquecimento mais lento e para o aquecimento mais rápido, nas condições de melhor ajuste encontradas para o caso do disco de teste. De forma a verificar-se o que acontece em casos de peças de diferentes dimensões, analisaram-se os resultados numéricos também para o ponto A – centro dos discos – e também para o ponto B – ponto mais afastado do centro dos discos, c.f. Figura 3.6.

Assim apresentar-se-ão nesta secção, as evoluções da temperatura ao longo do tempo dos pontos A e B para o caso do disco 3 e do disco 4, respectivamente, T_{d3-A} , T_{d3-B} , T_{d4-A} , e T_{d4-B} , quando colocados junto à porta do forno – local 1. Do mesmo modo nestas peças a alteração ao comportamento é idêntica para as diferentes condições de aquecimento das três localizações dos discos dentro do forno. Na Figura 4.5 podem observar-se as respostas do ponto A do disco 3 no aquecimento mais lento e no aquecimento mais rápido.

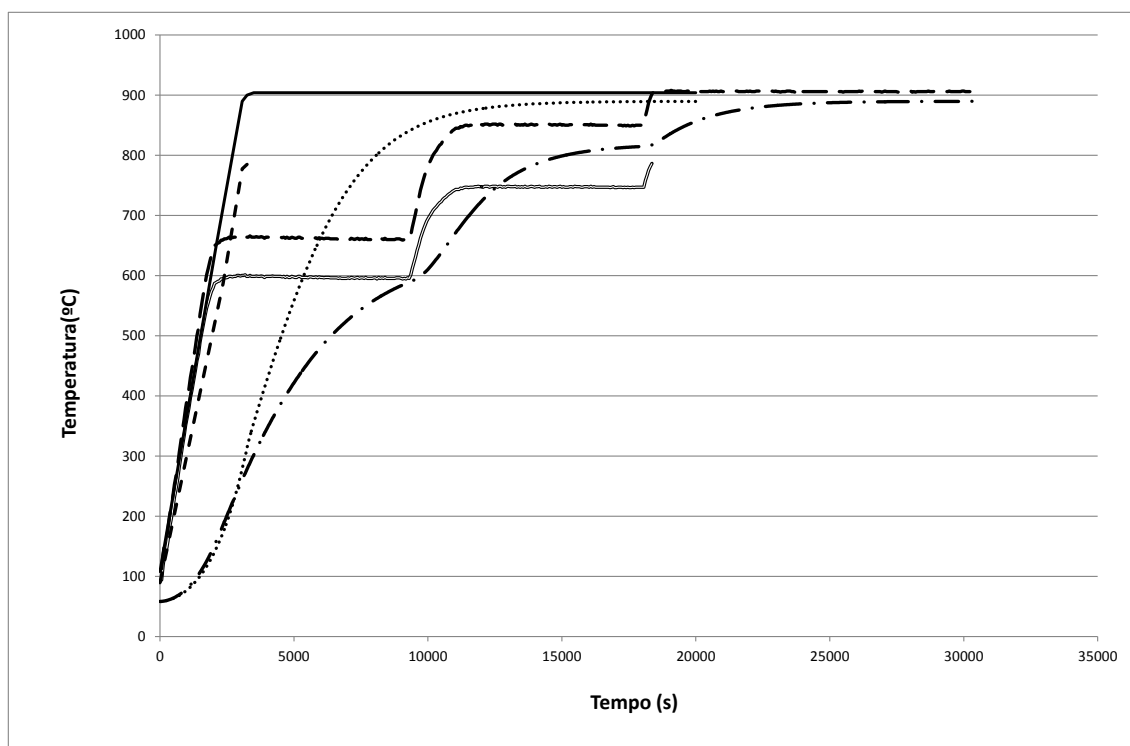


Figura 4.5 - Curva de temperatura em função do tempo da parede do forno, do gás no caso do disco 3 no ponto A para o aquecimento mais rápido e mais lento no local do ensaio 1. Linha, — T_{pf} , --- $T_{gás}$, ... T_{d3-A} no aquecimento mais rápido, — — T_{pf} , — $T_{gás}$, — . T_{d3-A} no aquecimento mais lento

Na Figura 4.6 apresenta-se a comparação entre a evolução da temperatura ao longo do tempo do ponto A e do ponto B, podendo também ser observada a diferença entre estas temperaturas ao longo do aquecimento mais rápido.

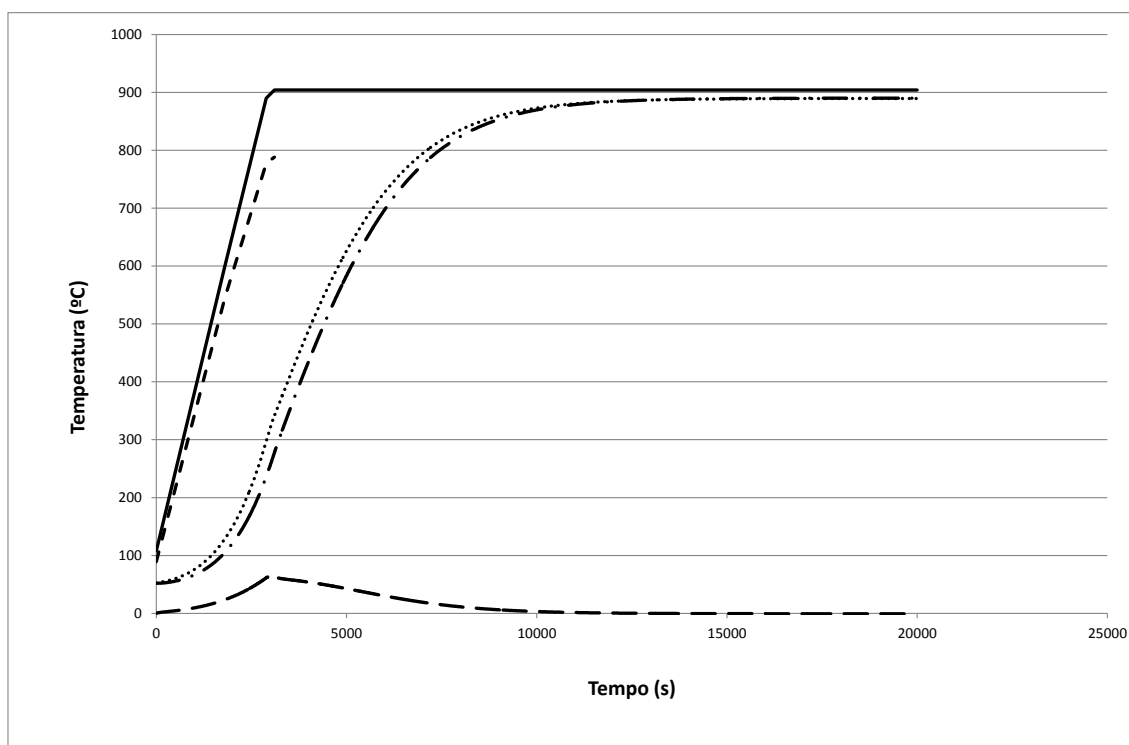


Figura 4.6 - Curva de temperatura em função do tempo da parede do forno, do gás no caso do disco 3 no ponto A e no ponto B para o aquecimento mais rápido e diferença de temperatura entre o ponto B e o ponto A no local do ensaio 1. Linha, — T_{pf} , - - - T_{gas} , ... T_{d3-B} , — . T_{d3-A} , — — $T_{d3-B} - T_{d3-A}$ ao longo do aquecimento

No caso do disco 4, que apresenta uma espessura menor que a espessura do disco 3, o aquecimento deste é mais rápido. Apesar do diâmetro ser de igual valor, a sua espessura altera o comprimento característico L_e , e, conseqüentemente, influencia o seu aquecimento. Na Figura 4.7 e Figura 4.8 estão patentes os resultados homólogos para o disco 4.

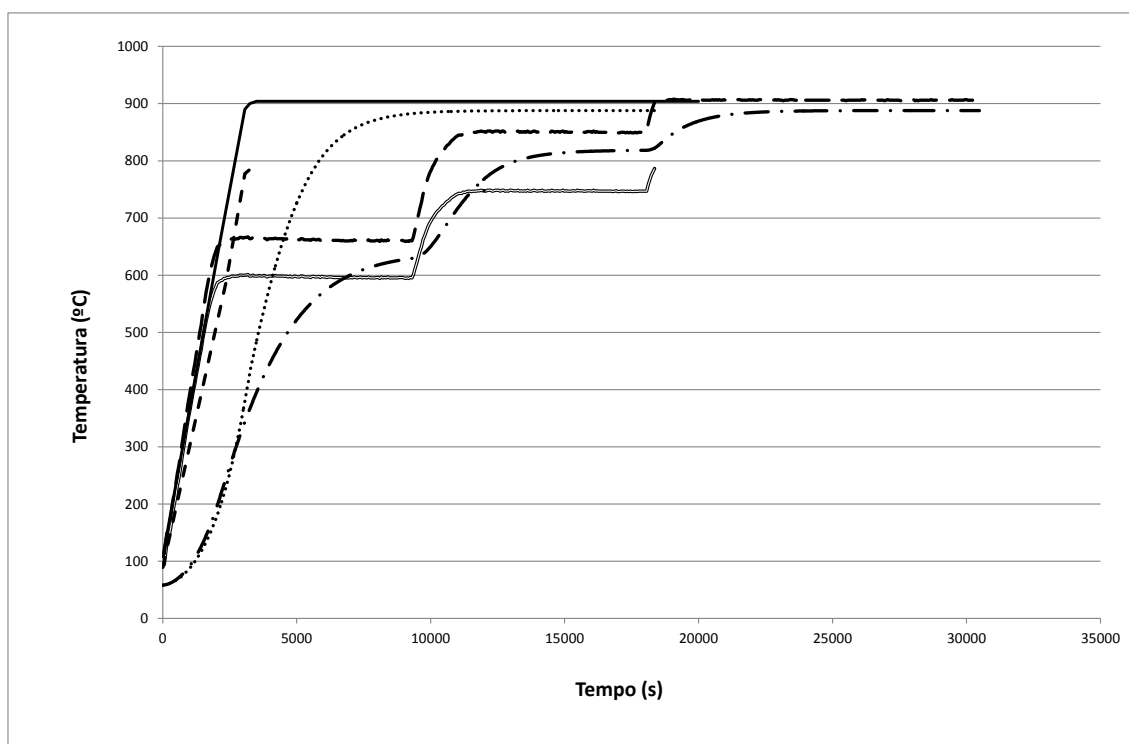


Figura 4.7 - Curva de temperatura em função do tempo da parede do forno, do gás e do disco 4 no ponto A para o aquecimento mais rápido e mais lento no local do ensaio 1. Linha, — T_{pf} , --- $T_{gás}$, ... T_{d4-A} no aquecimento mais rápido, — T_{pf} , — $T_{gás}$, — T_{d4-A} no aquecimento mais lento

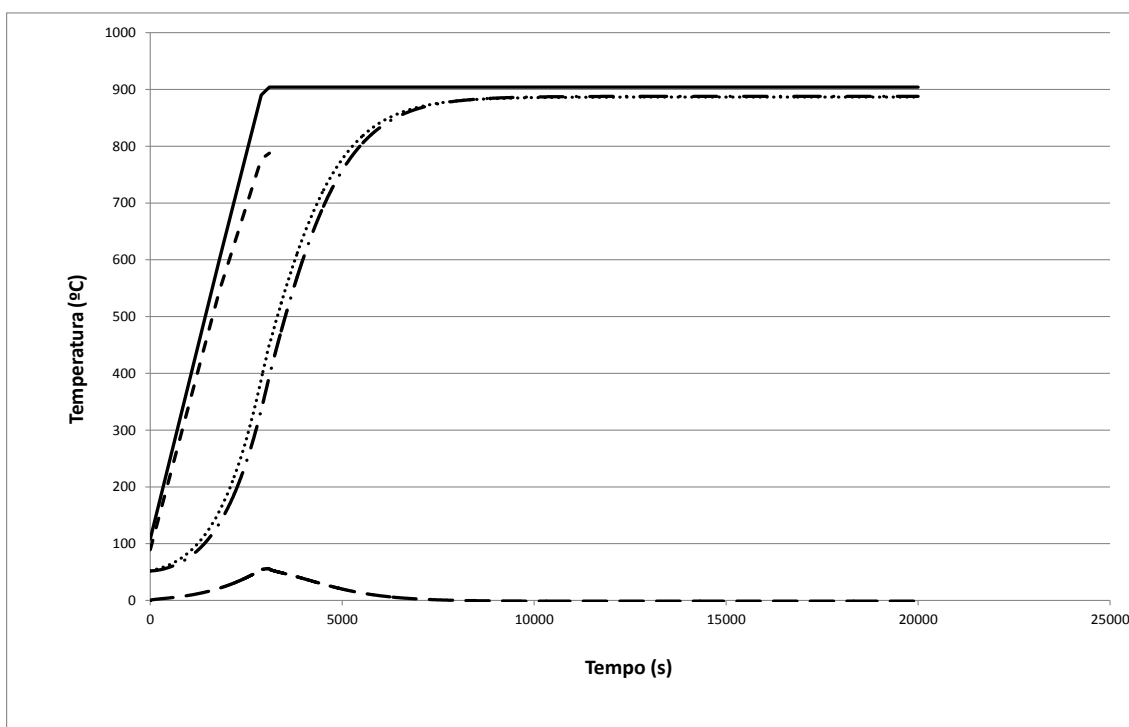


Figura 4.8 - Curva de temperatura em função do tempo da parede do forno, do gás e do disco 4 no ponto A e no ponto B para o aquecimento mais rápido e diferença de temperatura do ponto B e do ponto A no local do ensaio 1. Linha, — T_{pf} , --- $T_{gás}$, ... T_{d4-B} , — T_{d4-A} , — $T_{d4-B}-T_{d4-A}$ ao longo do aquecimento

4.1.4 Comparação do comportamento de peças de dimensões distintas

Após a obtenção dos dados apresentados na secção anterior, faz-se aqui um resumo e uma comparação entre as evoluções da temperatura das várias peças sujeitas às condições dos três locais do forno estudados.

Contrariamente ao que se verificou experimentalmente a peça de menor massa, dado o material ser o mesmo, não apresenta um menor tempo de aquecimento para atingir a temperatura de têmpera. É de salientar que as soluções apresentadas relativamente à melhoria do tempo de aquecimento, foram obtidas com base no pressuposto de que o forno apresentaria a carga completa a tratar. Este facto explica o que sucede, pois a presença de várias peças vizinhas dentro do forno influencia decisivamente o processo de transferência de calor por radiação entre cada peça e a parede do forno, que é o fenómeno mais relevante de transferência de calor neste tratamento. De facto o comportamento das peças estando em conjunto com outras peças é alterado quando comparado com uma peça isolada, desta forma o comportamento de cada peça individual, em virtude das interacções entre peças, tende para um comportamento médio que é aproximadamente o mesmo para todas as peças que estão no forno. Como forma de se comprovar o referido, no capítulo 6 apresentar-se-á uma secção relativa ao aquecimento do cilindro, do disco e do disco 3 isoladamente, por serem, respectivamente, as peças de menor dimensão, dimensão intermédia e de maior dimensão, sendo utilizada a emissividade real do material, pois como nesta situação trata-se de um aquecimento isolado, já não será necessário compensar a influência das restantes peças com a alteração da emissividade.

Na Figura 4.9 apresentam-se as respostas da temperatura do ponto A ao aquecimento rápido das quatro peças, o cilindro - c, o disco - d, o disco 3 - d3 e o disco 4 - d4, nas condições do local 1, junto à porta do forno, sendo que as únicas simulações que foram baseadas em dados experimentais são as simulações do cilindro e do disco de teste. As simulações numéricas realizadas do disco 3 e do disco 4 foram baseadas nos parâmetros obtidos para o caso do disco de teste.

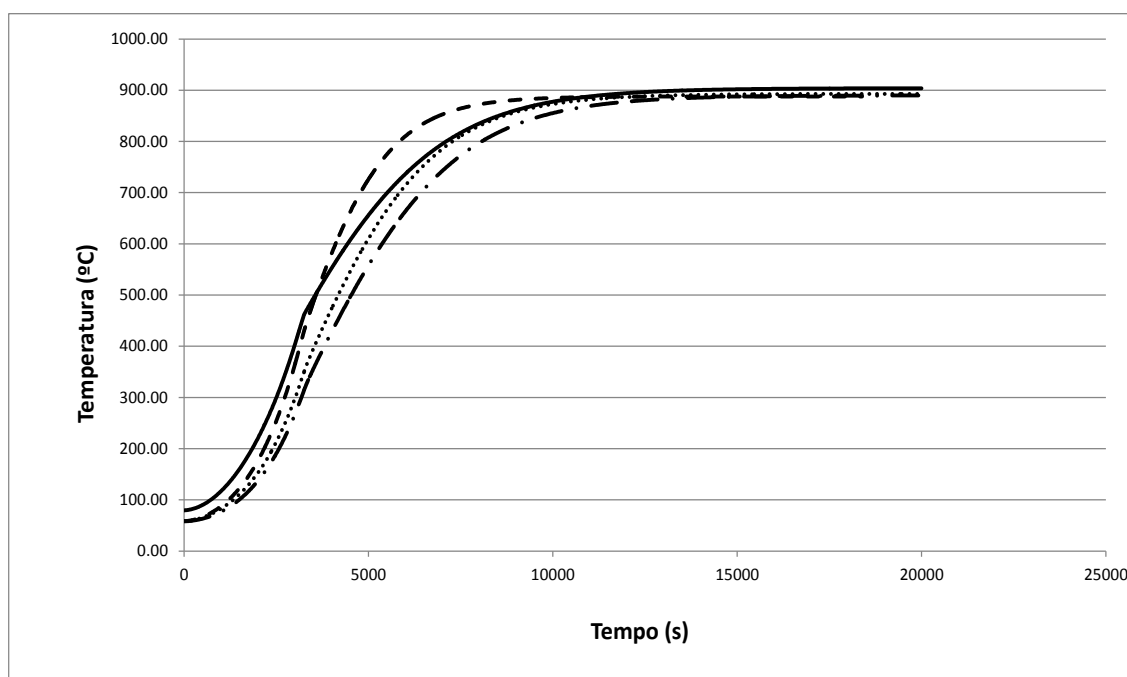


Figura 4.9 - Curva de temperatura em função do tempo do cilindro, do disco, do disco 3 e do disco 4 para o aquecimento rápido no local correspondente ao ensaio 1. Linha, — T_{c-A} , ... T_{d-A} , — . T_{d3-A} , ---- T_{d4-A}

Pode observar-se na Figura 4.9 que o tempo de aquecimento até à temperatura de têmpera do cilindro é idêntico ao do disco de teste, o que também acontece na realidade, de salientar que para estes dois casos os parâmetros usados na simulação numérica foram obtidos experimentalmente o que não sucede nas restantes geometrias, podendo ser comprovado pela Figura 2.4 que mostra a evolução da temperatura experimental do cilindro e do disco.

Como se constatou experimentalmente, na secção 4.1.1, o caso do local 2 correspondente ao ensaio 2 revelou-se ser o de aquecimento mais lento para o disco. Esta situação é a mais desfavorável em termos de tempo de aquecimento, desta forma, para este caso, estudaram-se mais três discos, com massas intermédias, sendo as suas dimensões iguais em termos de diâmetro, e diferentes ao nível da espessura. São eles o disco de 5.7 kg, de espessura 15 mm, o disco de 11.3 kg, de espessura 30 mm e o disco de 15.1 kg, de espessura 40 mm, tendo todos eles um diâmetro de 250 mm. Na Figura 4.10 apresentam-se as respostas destas peças sujeitas às condições do local 2 correspondente ao ensaio 2.

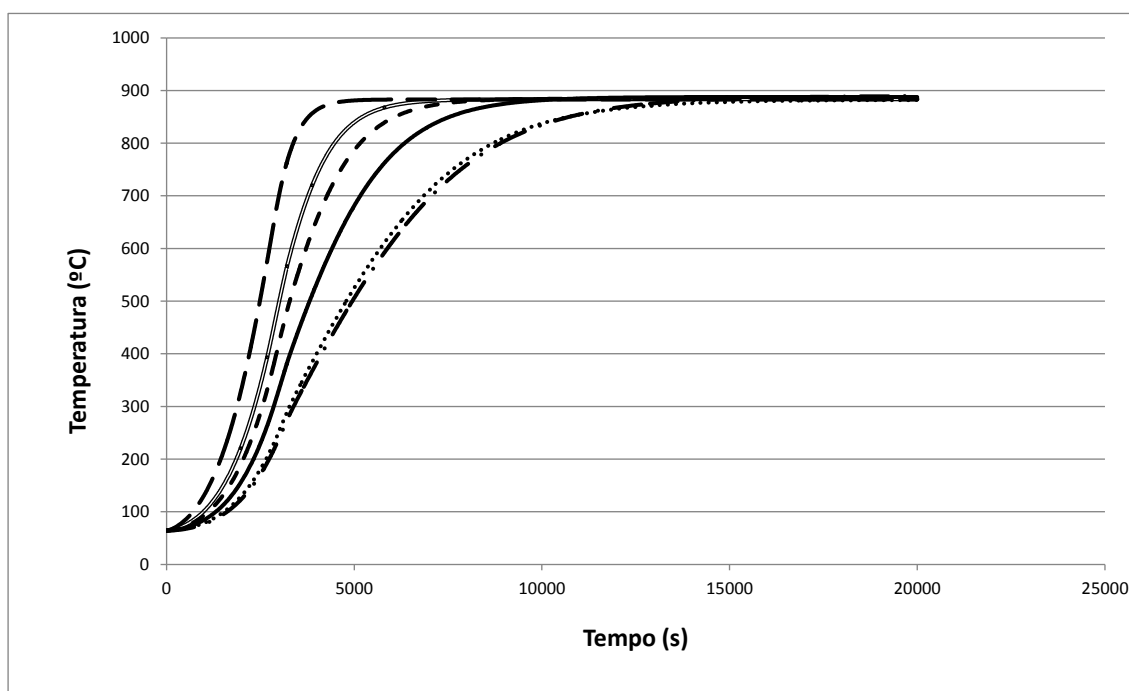


Figura 4.10 - Curva de temperatura em função do tempo do disco, do disco 3, do disco 4, do disco de 5.7 kg, do disco de 11.3 kg e do disco de 15.1 kg para o aquecimento rápido no local correspondente ao ensaio 2. Linha, — T_{d4-A} , ... T_{d-A} , — • — T_{d3-A} , - - - - Temperatura do disco de 15.1 kg, — Temperatura do disco de 10 kg, — — — Temperatura do disco de 5.7 kg

No caso do local 3 correspondente ao ensaio 3 as respostas do cilindro, do disco, do disco 3 e do disco 4 são idênticas às apresentadas para o local 1 correspondente ao ensaio 1.

4.2 Estudo dos tempos necessários para alcançar a temperatura de têmpera

O estudo dos tempos necessários para alcançar a temperatura de têmpera baseou-se na análise das simulações numéricas realizadas para os vários casos. Através da análise e comparação dos resultados obtidos para os casos do aquecimento mais lento e o aquecimento mais rápido, determinou-se o tempo necessário para se alcançar 99% da temperatura máxima que as peças atingem em cada situação. Assim foi possível determinar a diferença do tempo necessário entre o aquecimento rápido e o aquecimento lento, para as condições impostas pelos três locais estudados. Nesta secção apresentar-se-ão os tempos de aquecimento relativos ao caso em que estes são maiores, ou seja, para o caso mais lento de aquecimento que nos três locais analisados ocorreu quando as peças são colocadas no local 2.

Na Tabela 4.1 estão apresentados os tempos necessários para cada uma das peças atingir a temperatura de têmpera, tanto no aquecimento lento como também no aquecimento rápido. No Anexo D é possível observar, do mesmo modo, os tempos de aquecimento para o caso do local 1 e do local 3 correspondentes aos ensaios 1 e 3, respectivamente. Como se verifica, as reduções previstas no tempo de aquecimento são da ordem de 40%.

Tabela 4.1 - Tempos de aquecimento correspondentes a cada peça no local 2

	Local 2			
	Disco	Cilindro	Disco 3	Disco 4
Aquecimento Lento $t_{99\%}$ (horas)	6.18	6.12*	6.30	6.01
Aquecimento Rápido $t_{99\%}$ (horas)	3.67	3.19*	3.86	3.22
Diferença entre os tempos de aquecimento (horas)	2.51	2.93	2.44	2.79

*Apesar de não existirem dados do cilindro para este local, apresentam-se aqui os dados obtidos para o local 1

Como já foi referido, a solução do problema em estudo pode ser obtida pelo método do sistema global, o que pressupõe que a temperatura do corpo seja uniforme em todo ele. Para um corpo nestas circunstâncias a constante de tempo é dada pela expressão 4.1.

$$\tau = \frac{\rho V_{\text{sólido}} c_p}{h A_{\text{sólido}}} \quad (4.1)$$

Assim, para cada peça, determinou-se a constante de tempo relacionando-a com o tempo de aquecimento na situação do aquecimento lento e também do aquecimento rápido. Para todas as peças, a massa volúmica é de 7700 kg/m^3 , o calor específico c_p de 460 J/kgK , e onde h foi determinado através da equação 2.4, com a emissividade e o factor de forma relativos a cada peça, considerando o valor das temperaturas iguais em todos os casos. Desta forma obteve-se então a evolução apresentada na Figura 4.11. Apesar de não existirem dados experimentais relativos ao cilindro colocado no local 2 correspondente ao ensaio 2, optou-se por comparar os resultados obtidos deste no local 1 correspondente ao ensaio 1 e no local 3 correspondente ao ensaio 3, com as restantes peças incluindo o disco de teste.

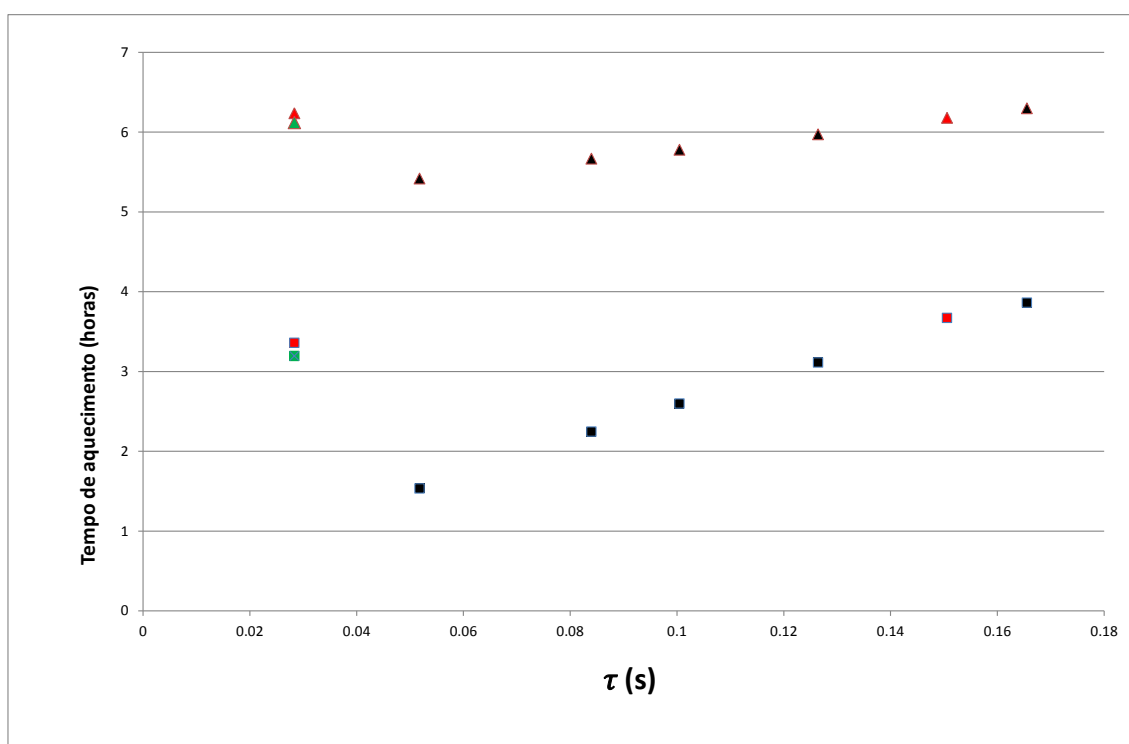


Figura 4.11 - Tempo de aquecimento correspondente à constante de tempo relativo às peças em análise. Símbolo, ■ Tempo de aquecimento relativo ao aquecimento rápido, ▲ Tempo de aquecimento relativo ao aquecimento lento, ■, ▲ cilindro no local 1 e disco em que existem dados experimentais, ■, ▲ cilindro no local 3

Os pontos apresentados na Figura 4.11 são relativos ao cilindro, disco de 5.7 kg, disco de 11.3 kg, disco de 15.1 kg, disco 4, disco de teste e disco 3. Embora, os dados obtidos exclusivamente por via numérica indiquem haver uma redução do tempo de aquecimento com a diminuição da massa, o mesmo não se passa com os dados semi-experimentais do cilindro e do disco de teste, que indicam que o tempo de aquecimento é independente do tamanho da peça a aquecer e igual ao tempo de aquecimento médio de todas as peças que constituem a carga. Estudos experimentais com peças de outras dimensões, conforme está previsto realizar futuramente, irão ajudar a compreender melhor o que se passa na realidade.

5 Campo de tensões e campo de deformações nas peças de teste

A realização dos tratamentos térmicos exige que sejam tomadas uma série de medidas e seguidas uma série de regras para que se possam diminuir os riscos de insucesso na prática destes tratamentos. Na realidade, mesmo que sejam tomados cuidados acontecem por vezes fracassos que nunca chegam a ser explicados. Um dos fracassos que pode ocorrer é a deformação inesperada e indesejada da peça ou das peças a tratar que se dá durante o tratamento (Soares 1992). Uma das causas desta deformação é o aquecimento rápido e irregular das peças a tratar sendo este um ponto importante a ter em atenção neste trabalho, dado que o objectivo principal é a redução do tempo de aquecimento do tratamento térmico de têmpera, através de um aumento mais rápido da temperatura. Até agora, a impossibilidade de medição das tensões térmicas fez desenvolver a tecnologia de simulação numérica no âmbito de se conhecerem os campos de tensões nos processos de têmpera (Lijun 2006).

Normalmente, nos tratamentos térmicos dos aços, a fase completa do aquecimento é constituída por vários estágios de temperatura pelo facto de se pretender obter um aquecimento, da carga a tratar, homogéneo e sem problemas estruturais para as peças.

De forma a conseguir-se obter uma redução no tempo de aquecimento, sem que esta cause problemas a nível estrutural às peças, é necessário fazer um estudo relativo ao campo de tensões nas peças, garantindo assim que essa redução do tempo de aquecimento não afecte de forma negativa a carga que se pretende tratar. Nesta análise comparar-se-ão os valores máximos das tensões sentidas nas peças, para o caso do aquecimento mais rápido, com o valor da tensão limite de elasticidade do material de teste. Antes da análise destes valores apresentar-se-á o valor máximo das tensões no cilindro, no disco e no disco 3, pelo facto de serem as peças de menor dimensão, dimensão intermédia e maior dimensão, para o caso do aquecimento mais lento, com o intuito de se verificar o aumento das tensões para o caso do aquecimento mais rápido. Para ser possível fazer-se esta comparação, é necessário ser conhecido o valor da tensão limite de elasticidade do material em questão, bem como as restantes propriedades (Ravne 2012). As principais propriedades do material constituinte das peças de teste, o aço ALVAR 14 (DIN 56 NiCrMoV7) estão apresentadas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Propriedades térmicas e mecânicas do aço ALVAR 14

Massa volúmica (kg/m³)	7700
Calor específico (J/kgK)	460
Condutibilidade térmica (W/mK)	36.8
Coefficiente de expansão térmica (°C⁻¹)	13.9 X 10 ⁻⁶
Módulo de Young (GPa)	185
Coefficiente de Poisson	0.3

As propriedades apresentadas na Tabela 5.1 foram consideradas constantes ao longo do tempo do tratamento térmico. Como é sabido, e como está patente na ficha técnica do aço, Ravne (2012), estas propriedades variam com a temperatura, não sendo considerada essa variação

para a análise aqui realizada. Relativamente ao valor da tensão limite de elasticidade, também está patente na mesma ficha técnica, que esta não é constante, sendo o valor mínimo atingido para uma temperatura de teste de 500 °C, de 550 MPa. Desta forma será considerado como referência a variação da tensão limite de elasticidade apresentada em Ravne (2012).

Dado o objectivo principal deste trabalho passar pela melhoria do tempo de aquecimento no tratamento térmico de têmpera, a situação mais favorável em termos de tempo de aquecimento pode traduzir-se numa situação mais desfavorável em termos de tensões instaladas nas peças. Deste modo, apresentam-se, seguidamente, os resultados obtidos para o disco de teste, o cilindro, o disco 3 e para o disco 4.

5.1 Análise do campo de tensões e do campo de deformações no disco de teste

No que diz respeito ao disco de teste, realizaram-se as simulações numéricas com intuito de determinar na secção da peça o valor da tensão máxima durante o processo de aquecimento, tanto para o aquecimento mais lento como também para o aquecimento mais rápido. É de esperar, que no processo de aquecimento mais lento, as tensões instaladas na peça sejam menos significativas do que as tensões instaladas para o caso do aquecimento mais rápido dados os maiores gradientes térmicos neste último caso.

Na Figura 5.1 apresenta-se esquematicamente a secção do disco e o respectivo campo de tensões obtido numericamente para o aquecimento mais lento. De salientar que nos restantes casos, o campo de tensões obtidos é muito semelhante.

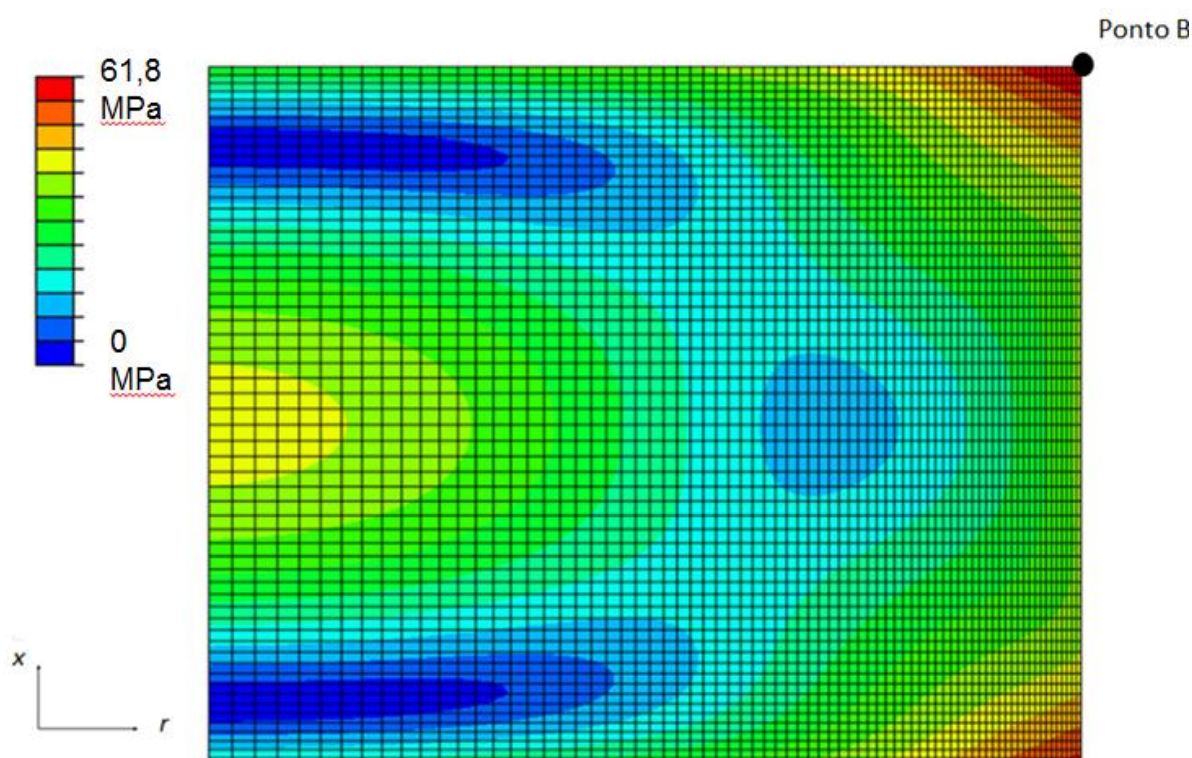


Figura 5.1 - Esquema representativo do campo de tensões instalado no disco no instante mais crítico, sendo o ponto B um dos pontos críticos da secção

Na Figura 5.2 podem observar-se as evoluções das tensões e temperaturas ao longo do aquecimento mais lento e também no aquecimento mais rápido para o ponto mais crítico da secção, que é nas duas situações o ponto mais afastado do centro, o ponto B do disco de teste.

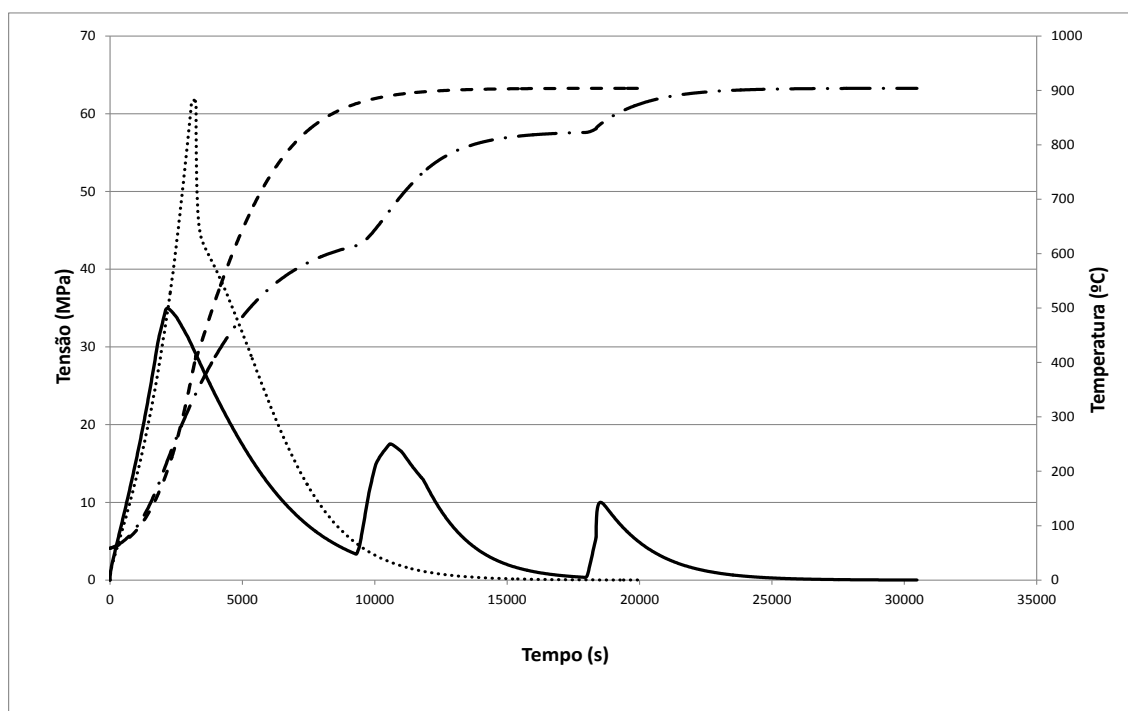


Figura 5.2 - Curva de tensão e de temperatura em função do tempo obtida numericamente no ponto B do disco para o aquecimento mais lento e para o aquecimento mais rápido no local correspondente ao ensaio 1. Linha, — Curva de tensão do aquecimento mais lento, ... Curva de tensão do aquecimento mais rápido, — . T_{d-B} no aquecimento mais lento, - - - T_{d-B} no aquecimento mais rápido

Analisando a Figura 5.2 pode notar-se, na curva de tensão em função do tempo para o aquecimento mais lento, que existem três picos, sendo estes devidos aos três aumentos de temperatura presentes no aquecimento mais lento. Do mesmo modo, no aquecimento mais rápido, existe também um pico de tensão que corresponde ao único aumento de temperatura presente no aquecimento rápido. Neste caso, a tensão máxima no aquecimento mais lento é 57% da tensão máxima no aquecimento mais rápido.

Pelo facto do comportamento desta peça ser semelhante em todos os locais estudados, ao nível das tensões apenas se apresenta na Figura 5.3 e Figura 5.4 as evoluções das tensões para o aquecimento mais rápido nos locais 2 e 3, correspondentes aos ensaios 2 e 3, respectivamente. De salientar, que para o caso do disco de teste, o ponto mais crítico em todos os tipos de aquecimento é o ponto B.

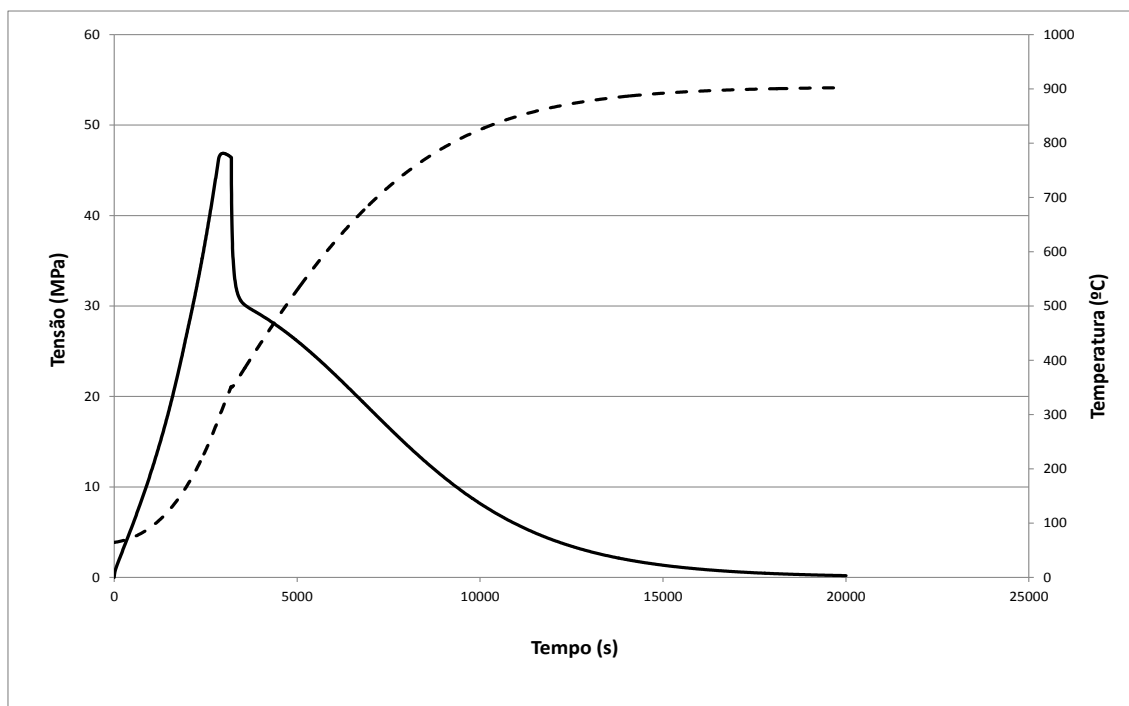


Figura 5.3 - Curva de tensão e de temperatura em função do tempo obtida numericamente no ponto B do disco para o aquecimento mais rápido no local correspondente ao ensaio 2. Linha, — Curva de tensão no ponto B do disco, - - - T_{d-B}

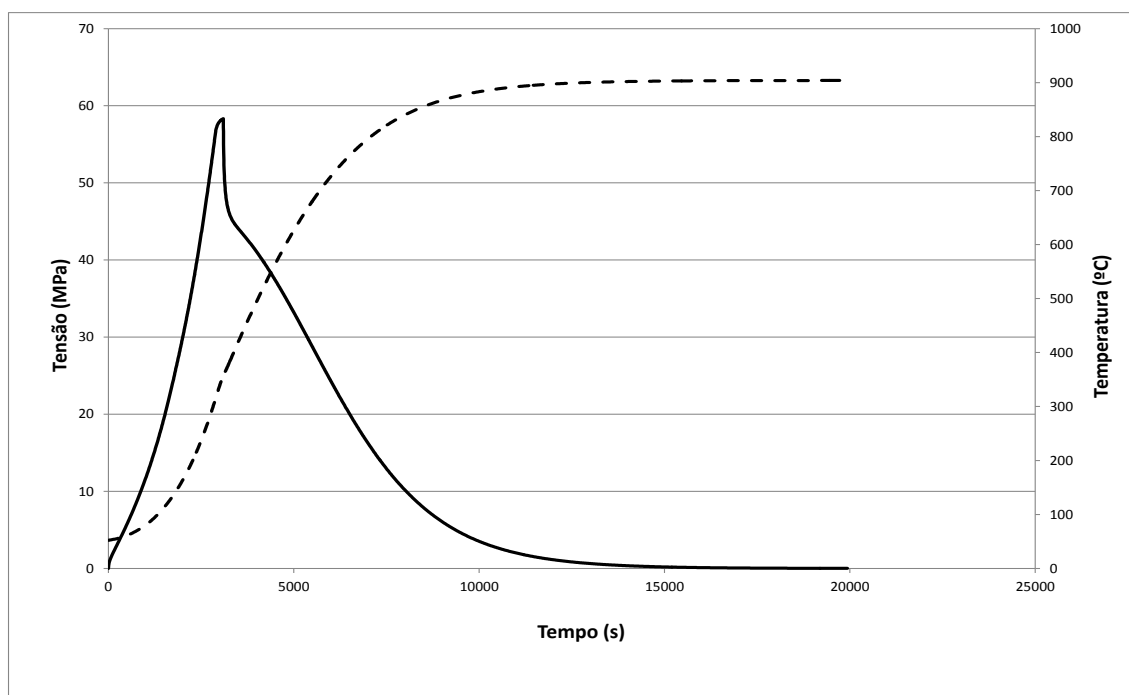


Figura 5.4 - Curva de tensão e de temperatura em função do tempo obtida numericamente no ponto B do disco para o aquecimento mais rápido no local correspondente ao ensaio 3. Linha, — Curva de tensão no ponto B do disco, - - - T_{d-B}

No que diz respeito ao campo de deformações do disco de teste realizou-se também um estudo relativo a este ponto e também relativo à evolução das deformações ao longo do aquecimento mais lento e do aquecimento mais rápido.

Na Figura 5.5 mostra-se o campo de deformações obtido para o disco de teste no final do aquecimento mais rápido e do aquecimento mais lento já que neste instante o campo de deformações é semelhante nos dois aquecimentos.

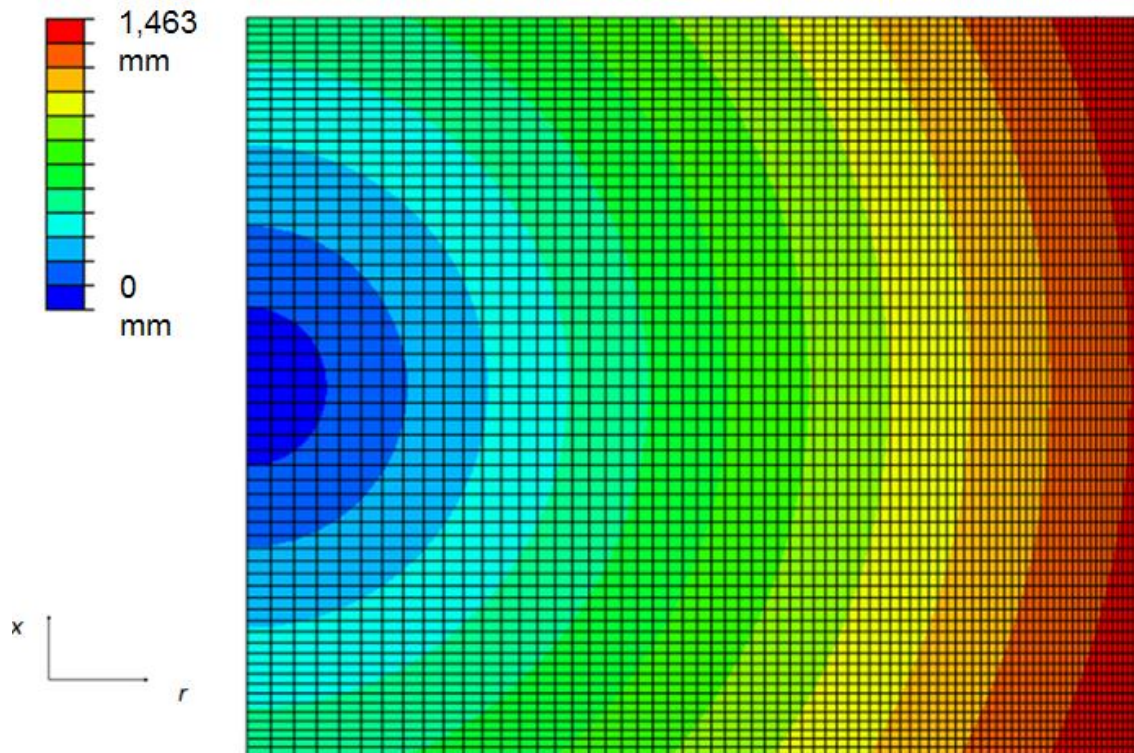


Figura 5.5 - Campo de deformações do disco de teste no final do aquecimento mais rápido e mais lento

Como se pode observar na Figura 5.5 os pontos da periferia da secção do disco de teste são os pontos onde a deformação é máxima, sendo este valor máximo de 1.463 mm no final dos dois aquecimentos mais rápido e mais lento.

Na Figura 5.6 apresenta-se a evolução da deformação num dos pontos mais críticos da secção – ponto B – também para o aquecimento mais rápido e mais lento.

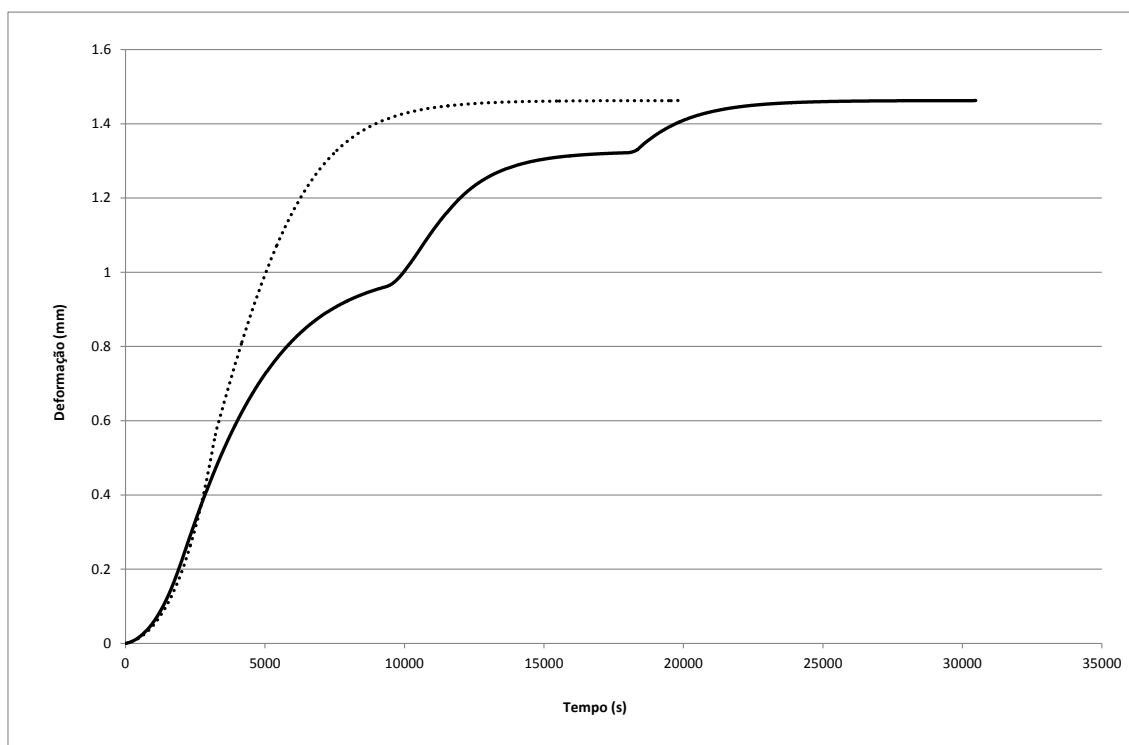


Figura 5.6 - Evolução da deformação ao longo do tempo no ponto B do disco de teste no aquecimento mais rápido e no aquecimento mais lento. Linha, — Deformação no aquecimento mais lento, ... Deformação no aquecimento mais rápido

Como se pode comprovar pela Figura 5.6 o valor máximo da deformação no ponto B da secção do disco de teste é o mesmo para o caso dos dois aquecimentos mais rápido e mais lento.

5.2 Análise ao campo de tensões e do campo de deformações no cilindro de teste

Relativamente ao cilindro de teste, e sendo esta a peça de menores dimensões estudada, é de prever que o valor máximo das tensões durante o seu aquecimento seja menor do que nas peças de maiores dimensões, em virtude da maior homogeneidade da temperatura existente nas peças pequenas. Como já foi possível verificar, a diferença de temperaturas dos pontos extremos, A e B, do cilindro é sempre menor do que a diferença de temperaturas nos pontos homólogos tanto do disco como do disco 3 e do disco 4. Desta forma, e como os gradientes de temperatura no cilindro são também menores, a consequência disto é que também as tensões sejam de menor valor. Antes de se apresentarem as respostas do cilindro, mostra-se na Figura 5.7 o campo de tensões desta peça, podendo observar-se que o ponto crítico se situa a meio da geratriz do cilindro. De salientar, que também no caso do cilindro, o aspecto do campo de tensões nos restantes casos é semelhante ao apresentado na Figura 5.7.

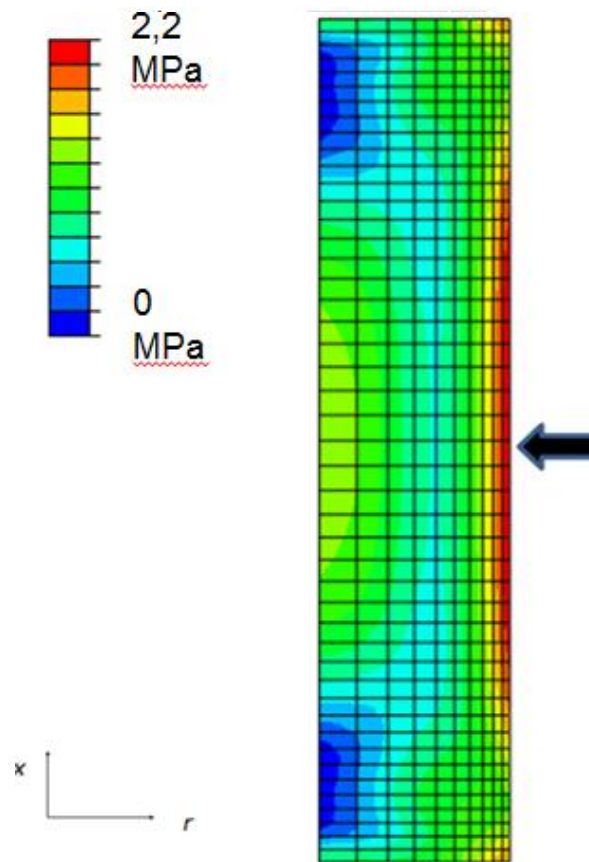


Figura 5.7 - Esquema representativo do campo de tensões instalado no cilindro no instante mais crítico, assinalando a seta um dos pontos críticos da secção

Posto isto, apresenta-se na Figura 5.8 a evolução das tensões ao longo do tempo para o aquecimento mais lento e para o aquecimento mais rápido, no local correspondente ao ensaio 1.

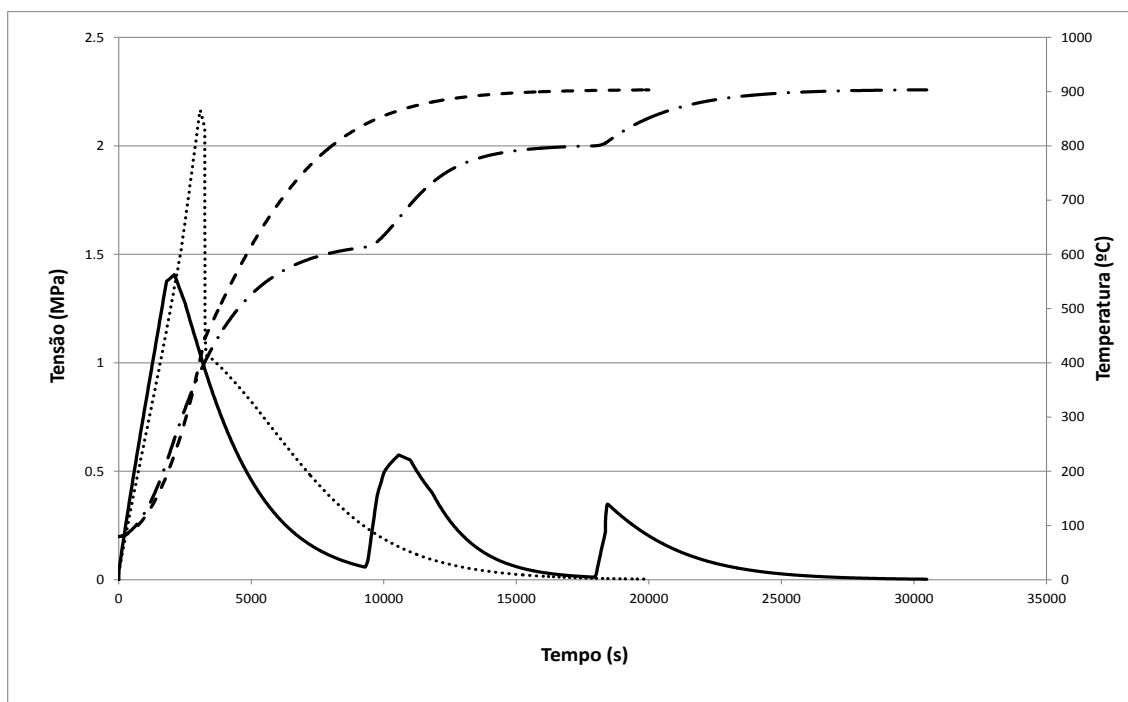


Figura 5.8 - Curva de tensão e de temperatura em função do tempo obtida numericamente no ponto crítico do cilindro para o aquecimento mais lento e para o aquecimento mais rápido no local correspondente ao ensaio 1.

Linha, — Curva de tensão do aquecimento mais lento, ... Curva de tensão do aquecimento mais rápido, — . Temperatura do ponto crítico do cilindro no aquecimento mais lento, - - - Temperatura do ponto crítico do cilindro no aquecimento mais rápido

Do mesmo modo, nos restantes locais estudados o comportamento do cilindro em termos de tensões é também semelhante. Assim, representa-se na Figura 5.9 a tensão e temperatura em função do tempo para o aquecimento mais rápido no local 3, correspondente ao ensaio 3.

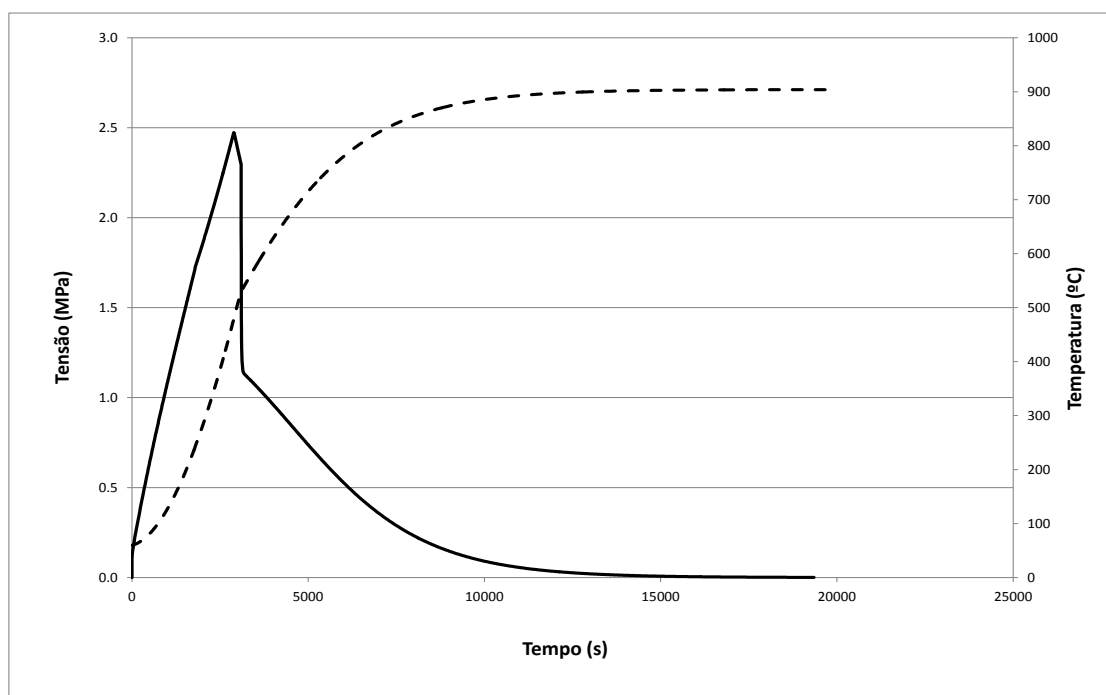


Figura 5.9 - Curva de tensão e de temperatura em função do tempo obtida numericamente no ponto crítico do cilindro para o aquecimento mais rápido no local correspondente ao ensaio 3. Linha, — Curva de tensão, - - - Temperatura do ponto crítico do cilindro

Analizando os valores máximos das tensões do cilindro e comparando com os mesmos valores no caso do disco, pode notar-se que no caso do cilindro estes valores são cerca de vinte vezes menores.

Relativamente ao campo de deformações do cilindro de teste, este está patente na Figura 5.10.

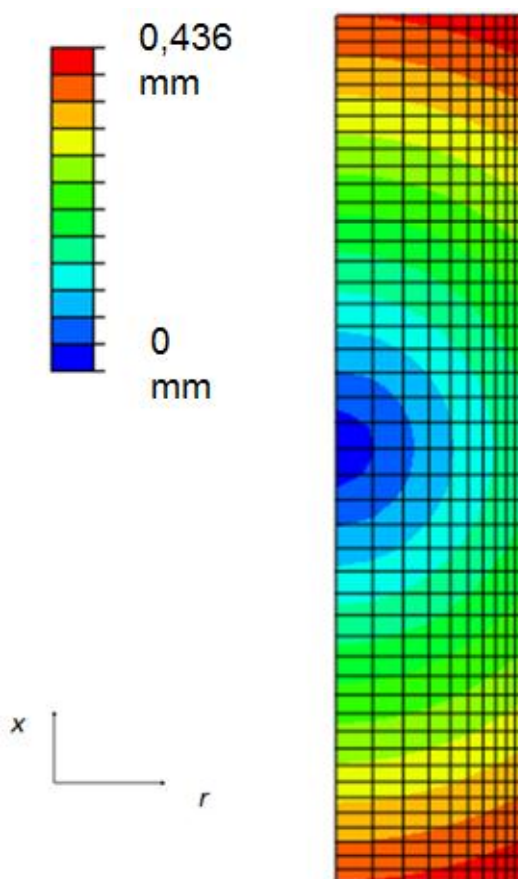


Figura 5.10 - Campo de deformações do cilindro de teste no final do aquecimento mais rápido e mais lento

A evolução das deformações ao longo dos aquecimentos mais rápido e mais lento é semelhante à evolução das deformações do disco de teste, sendo o valor máximo da deformação neste caso bem menor, i.e., 0.436 mm. Como se pode observar na Figura 5.11 o valor máximo da deformação é também igual nos dois aquecimentos mais rápido e mais lento.

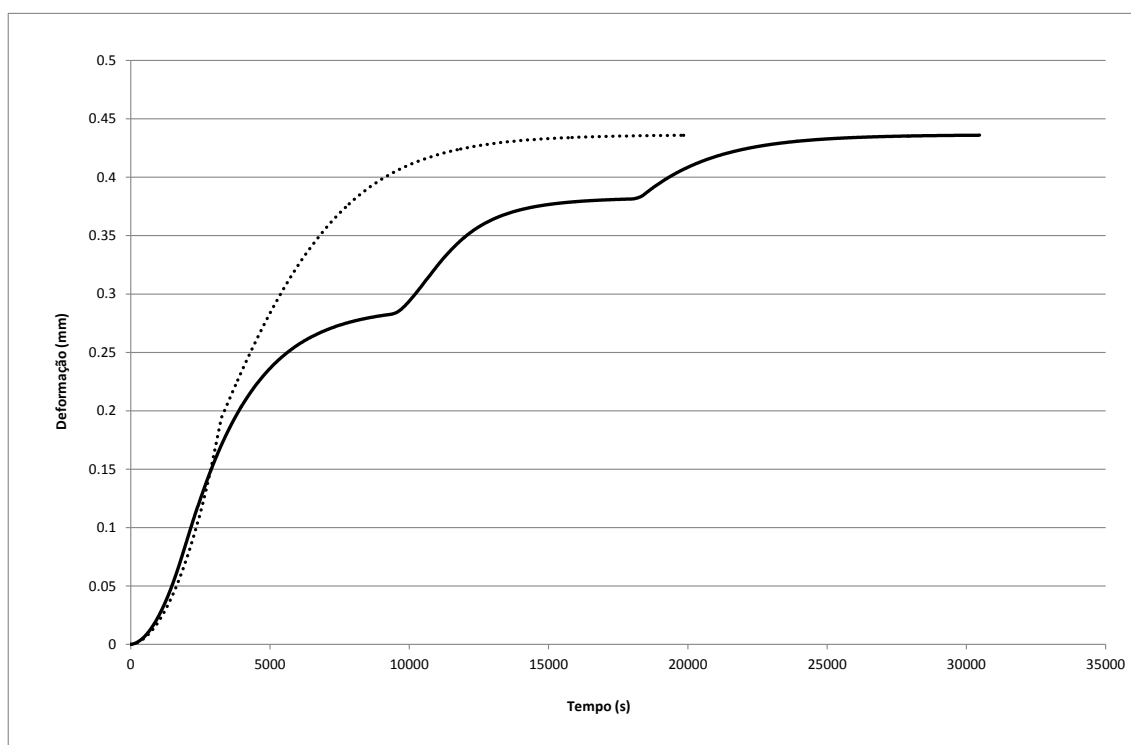


Figura 5.11 - Evolução da deformação ao longo do tempo no ponto B do cilindro de teste no aquecimento mais rápido e no aquecimento mais lento. Linha, — Deformação no aquecimento mais lento, ... Deformação no aquecimento mais rápido

5.3 Análise do campo de tensões nas peças de maior dimensão

Relativamente às peças de diferentes dimensões, o caso do disco 3 e do disco 4, o comportamento destes em termos de tensões espera-se que seja idêntico ao do disco de teste. Apesar dos valores máximos das tensões durante os aquecimentos serem diferentes, espera-se que o caso mais crítico seja também durante o aquecimento mais rápido, dados os maiores gradientes de temperatura neste último. Assim, apresentam-se na Figura 5.12 e na Figura 5.13 as evoluções da tensão, para o disco 3 e para o disco 4 no local correspondente ao ensaio 1, i.e., junto à porta do forno. Da mesma forma, nestes casos, o ponto crítico da secção de cada peça é o ponto B.

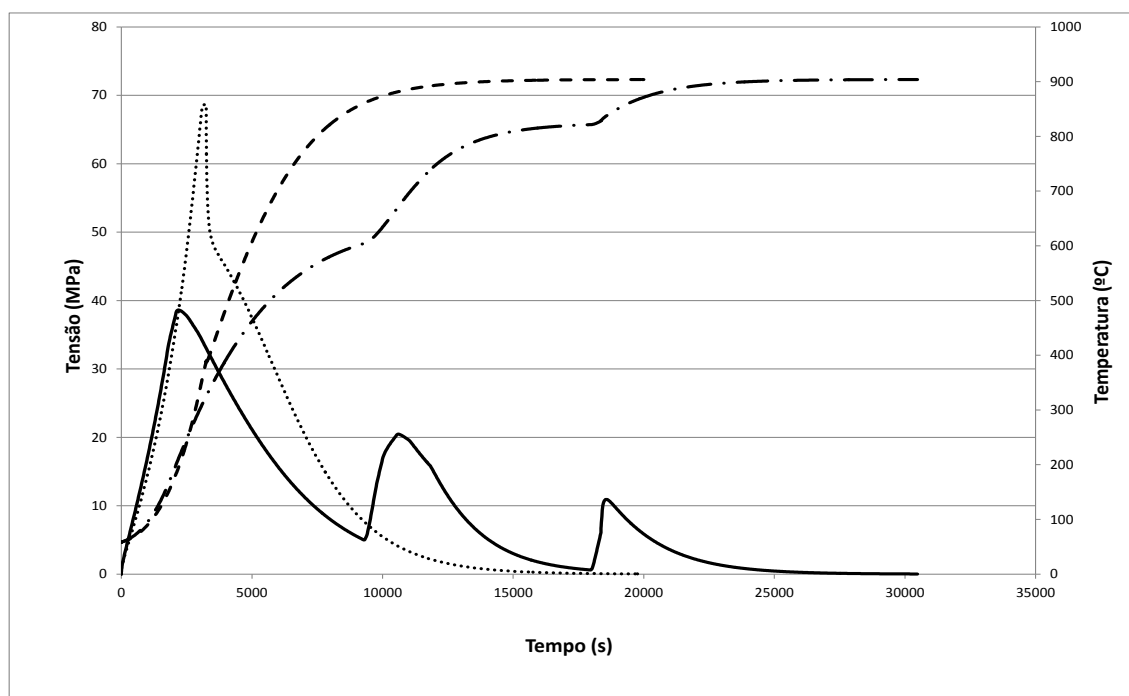


Figura 5.12 - Curva de tensão e de temperatura em função do tempo obtida numericamente no ponto B do disco 3 para o aquecimento mais lento e para o aquecimento mais rápido no local correspondente ao ensaio 1. Linha, — Curva de tensão do aquecimento mais lento, ... Curva de tensão do aquecimento mais rápido, — · — T_{d3-B} no aquecimento mais lento, - - - T_{d3-B} no aquecimento mais rápido

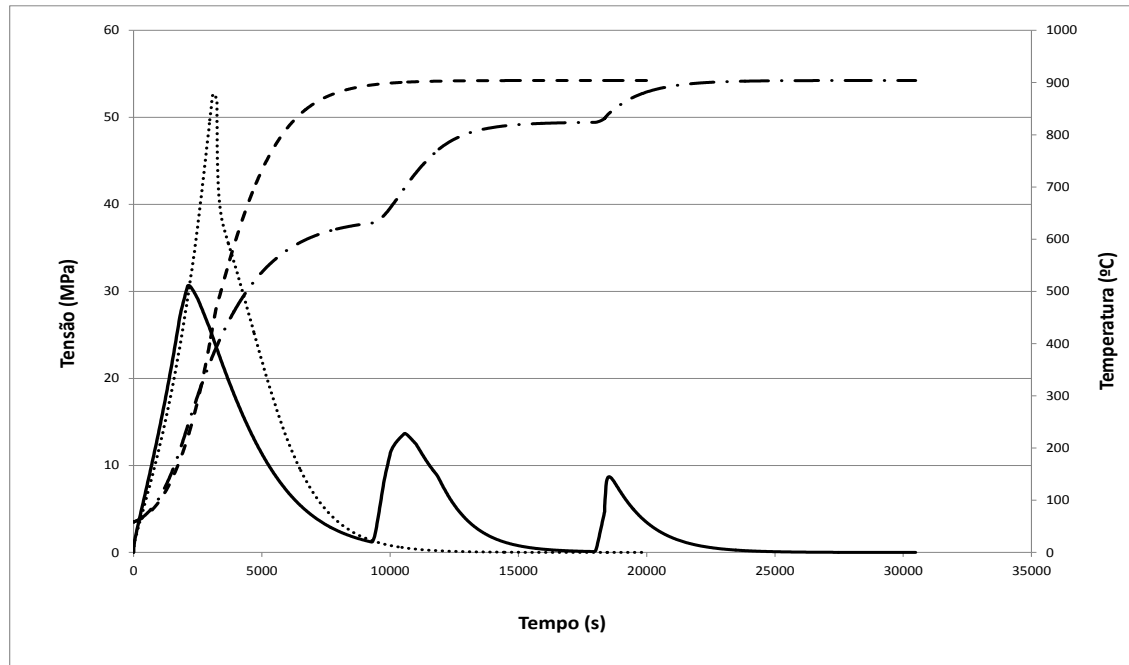


Figura 5.13 - Curva de tensão e de temperatura em função do tempo obtida numericamente no ponto B do disco 4 para o aquecimento mais lento e para o aquecimento mais rápido no local correspondente ao ensaio 1. Linha, — Curva de tensão do aquecimento mais lento, ... Curva de tensão do aquecimento mais rápido, — · — T_{d4-B} no aquecimento mais lento, - - - T_{d4-B} no aquecimento mais rápido

A Figura 5.12 e a Figura 5.13 mostram os resultados obtidos para o local 1 correspondente ao ensaio 1, sendo que nos restantes locais o comportamento dos dois discos é também semelhante, apresentando até o valor máximo da tensão inferior ao obtido para o local 1.

Os valores das tensões obtidos nestas simulações nunca ultrapassaram 13% da tensão limite de elasticidade a 500°C, do aço em questão, o que, na ausência de melhor informação, é um indicativo de que as deformações se irão manter dentro do limite elástico para qualquer temperatura da peça. Estes resultados permitem pois encarar com optimismo os próximos trabalhos experimentais onde se irá implementar na prática esta metodologia de aquecimento rápido, uma vez que não é previsível que o aquecimento rápido introduza tensões extra que possam danificar as peças.

6 Análises diversas

Neste capítulo serão apresentadas três análises distintas, tendo estas surgido na continuidade do estudo já apresentado. Estas três análises dizem também respeito à fase de aquecimento do tratamento térmico, sendo que serão alteradas algumas características relativamente ao que já foi estudado e apresentado anteriormente, com o intuito de se verificar o seu efeito ou influência. Assim, a primeira análise dirá respeito ao aquecimento de peças isoladas no forno de tratamento, a fim de se verificar a influência de peças vizinhas num tratamento que se realize com a carga completa a tratar, como foi considerado no caso estudado.

A segunda análise dirá respeito ao efeito que a propriedade condutibilidade térmica do material terá no seu aquecimento, podendo analisar-se a sua influência sobre a evolução da temperatura ao longo do tempo e também sobre a evolução ao longo do tempo das tensões instaladas na peça sujeita ao aquecimento.

Outro factor importante neste processo é a presença vantajosa ou desvantajosa do funcionamento da ventoinha na porta do forno de tratamento. Como se verificou, o processo de aquecimento é essencialmente baseado na transferência de calor por radiação, o que sugere uma avaliação e comparação da fase de aquecimento com a ventoinha em funcionamento e da fase de aquecimento sem o funcionamento da ventoinha. As duas situações referidas podem apresentar diferenças em termos do consumo energético sem impacto significativo no processo de tratamento de têmpera. Esta avaliação e comparação farão parte da terceira análise do presente capítulo.

6.1 Análise do aquecimento de peças isoladas

Dados os resultados obtidos e apresentados, anteriormente, terem sido determinados na condição de que o forno de tratamento estaria completo com a carga a tratar, realizaram-se em oposição três simulações de aquecimento de apenas uma única peça isolada relativas ao aquecimento do cilindro, do disco e do disco 3, sendo estas, respectivamente, as peças de menor dimensão, dimensão intermédia, e maior dimensão. O objectivo destas simulações é verificar, realmente, que existe uma influência enorme das peças vizinhas no aquecimento de cada peça e que, com carga completa, o comportamento de todas as peças tende para o comportamento médio.

Neste caso e não sendo necessário alterar o valor da emissividade real do material, pois já não existem peças vizinhas a causar obstrução à radiação e a trocar calor entre si, utilizou-se um valor da emissividade do material mais próximo do esperado ($\varepsilon = 0.7$). Desta forma ir-se-ão apresentar os resultados para as peças isoladas, em termos de evolução de temperatura e também em termos de evolução de tensões no ponto mais crítico das secções.

Na Figura 6.1 mostram-se as evoluções da temperatura em função do tempo do cilindro - T_{c-A} , do disco - T_{d-A} , e do disco 3 - T_{d3-A} . Os pontos referidos estão apresentados na Figura 3.2 e Figura 3.6.

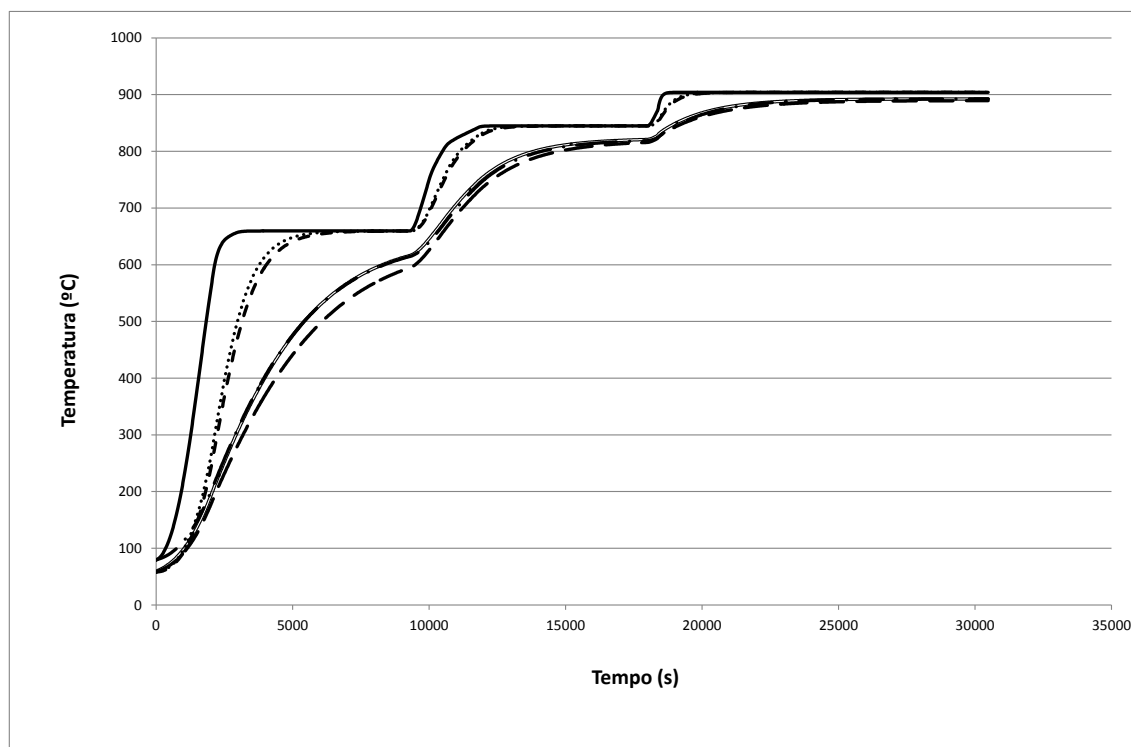


Figura 6.1 - Curva de temperatura em função do tempo obtida numericamente no ponto A do cilindro, do disco e do disco 3 para o aquecimento com a carga completa e para o aquecimento da peça isolada. Linha, — T_{C-A}, ... T_{d-A}, ---- T_{d3-A}, no aquecimento da peça isolada, — . T_{C-A}, ===== T_{d-A}, — — T_{d3-A}, no aquecimento com a carga completa

Na Tabela 6.1 mostra-se um resumo dos tempos de aquecimento das peças isoladas para o aquecimento lento e para o aquecimento rápido. Comparando estes valores com os valores obtidos para os aquecimentos com a carga completa, presentes na secção 4.2, pode notar-se que há uma diminuição grande dos tempos de aquecimento devido ao facto de cada peça ser aquecida isoladamente, não havendo assim trocas de calor com outras peças no interior do forno.

Tabela 6.1 - Tempos de aquecimento das peças isoladamente

	Disco	Cilindro	Disco 3
Aquecimento Lento $t_{99\%}$ (horas)	5.32	5.14	5.36
Aquecimento Rápido $t_{99\%}$ (horas)	1.28	0.93	1.36
Diferença entre os tempos de aquecimento (horas)	4.04	4.21	4

Na Figura 6.2 apresentam-se as evoluções das tensões ao longo do tempo do aquecimento lento nos pontos críticos das secções. No caso do cilindro, o ponto crítico situa-se a meio da sua geratriz e para o caso do disco e do disco 3 o ponto crítico é o ponto B das secções.

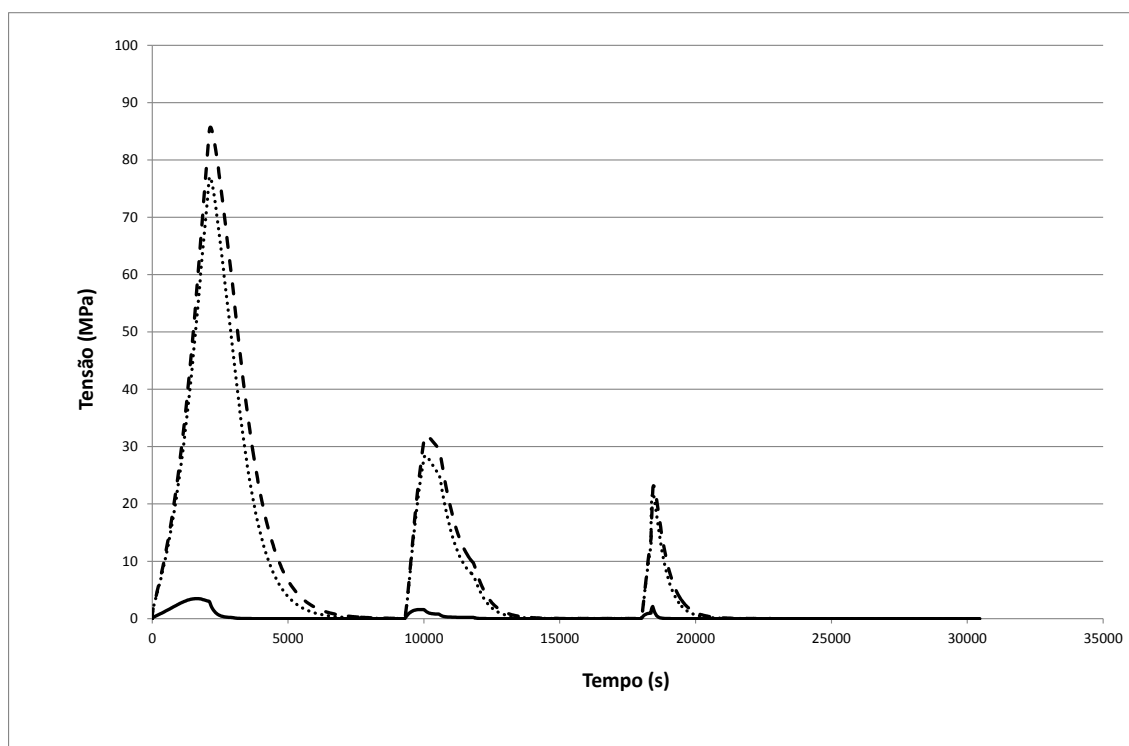


Figura 6.2 - Curva de tensão em função do tempo obtida numericamente para os pontos críticos do cilindro, do disco e do disco 3 para o aquecimento mais lento. Linha, — Tensão do cilindro, ... Tensão do disco, ---- Tensão do disco 3

Pode observar-se na Figura 6.2 uma grande diferença relativamente aos valores máximos das tensões do cilindro, do disco e do disco 3. A maior semelhança de dimensões entre o disco e o disco 3 aproxima os respectivos valores da tensão máxima.

Na situação do aquecimento mais rápido o que sucede é idêntico, quando se comparam as três peças em questão.

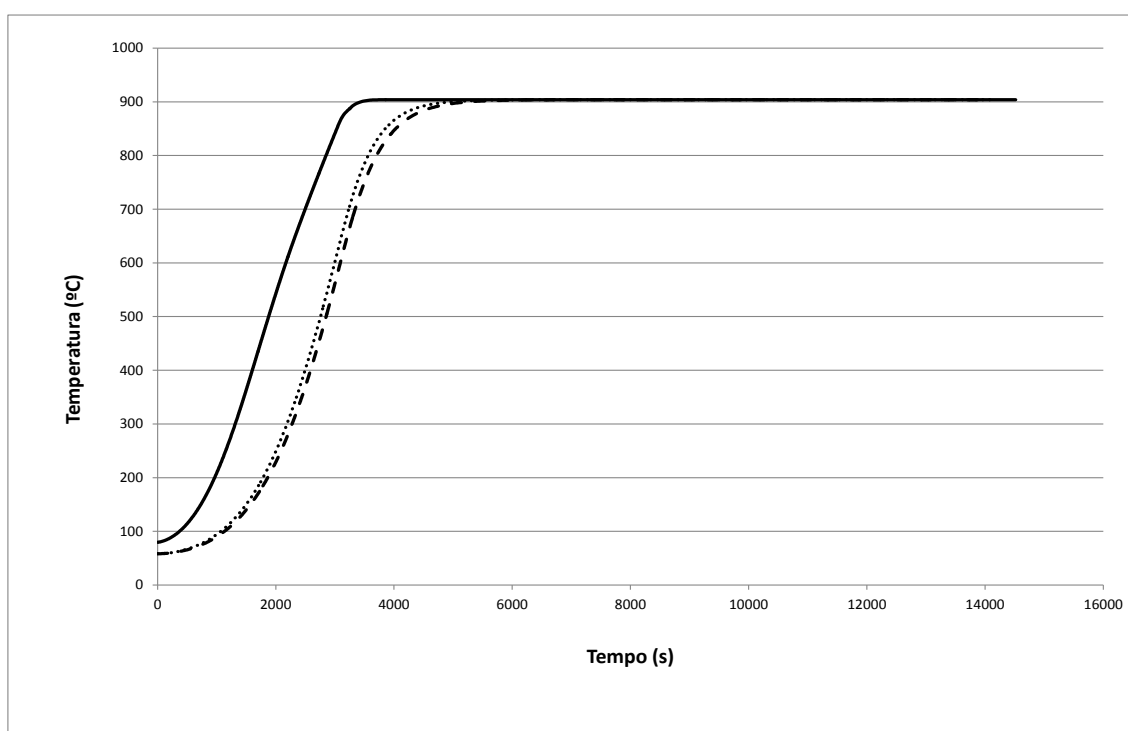


Figura 6.3 - Curva de temperatura em função do tempo obtida numericamente no ponto A do cilindro, do disco e do disco 3 para o aquecimento rápido. Linha, — T_{c-A}, ... T_{d-A}, ---- T_{d3-A}

Na Figura 6.3 e Figura 6.4 pode observar-se o comportamento das três peças, em termos de evolução de temperatura, Figura 6.3, e de tensões em função do tempo, Figura 6.4, para o aquecimento rápido.

Pode notar-se nas Figuras 6.2 e 6.4 que o valor da tensão máxima no aquecimento mais rápido é muito superior ao valor da tensão máxima no aquecimento mais lento, sendo cerca de 50% menor neste último caso. Relativamente às tensões máximas com a carga completa no forno os valores actuais são praticamente o dobro dos anteriores.

Face aos resultados aqui obtidos é importante realçar que o estudo subjacente a esta tese, e respectivas conclusões, aplicam-se a um forno com carga completa. O aquecimento de uma peça isolada deverá ser objecto de um estudo específico, dada a diferença de comportamento espectável.

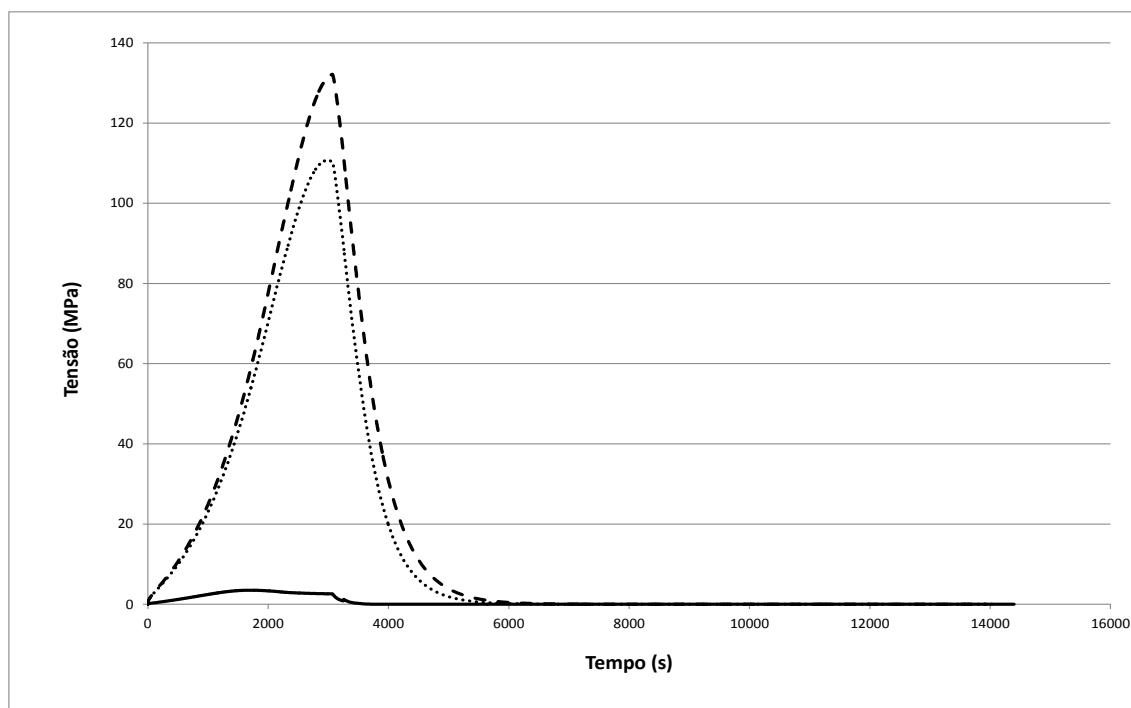


Figura 6.4 - Curva de tensão em função do tempo obtida numericamente nos pontos críticos do cilindro, do disco e do disco 3 para o aquecimento mais rápido. Linha, — Tensão do cilindro, ... Tensão do disco, ---- Tensão do disco 3

6.2 Condutibilidade térmica

Relativamente à condutibilidade térmica, apresentar-se-ão os resultados numéricos obtidos tanto no aquecimento mais lento como no aquecimento mais rápido para o disco, comparando o valor da condutibilidade do aço ALVAR 14 com a condutibilidade de um aço inoxidável, que tem um valor aproximadamente de 15 W/mK. Com isto, serão avaliadas as evoluções da temperatura ao longo do tempo de aquecimento e também as tensões instaladas na peça durante o aquecimento. Dada a condutibilidade ser próxima de metade do valor da condutibilidade do material estudado, espera-se que os gradientes de temperatura dentro da peça sejam mais elevados e, conseqüentemente, o valor das tensões sejam também mais desfavoráveis, podendo assim haver problemas indesejados ao nível estrutural da peça, podendo esta deformar-se plasticamente. No caso de um material com a condutibilidade mais baixa, é de prever que este aqueça mais lentamente pois a condução do calor no seu interior é realizada mais lentamente. Na Figura 6.5 pode observar-se a evolução da temperatura ao longo do tempo relativa ao aquecimento mais lento, para o disco constituído por um material com uma condutibilidade térmica de 36.8 W/mK, material estudado, e também para um material com uma condutibilidade térmica de 15 W/mK, no ponto A - T_{d-A} e no ponto B - T_{d-B} .

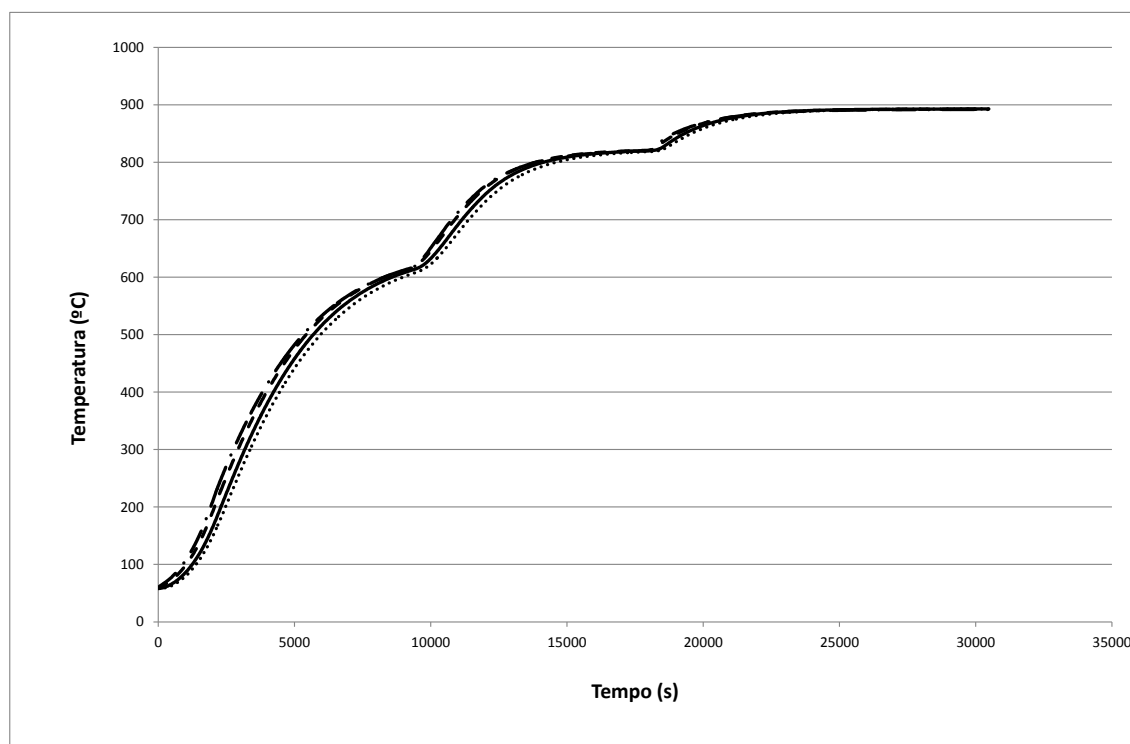


Figura 6.5 - Curva de temperatura em função do tempo obtida numericamente no ponto A do disco para uma condutibilidade térmica de 36.8 W/mK e para uma condutibilidade térmica de 15 W/mK no aquecimento lento. Linha, — T_{d-A} , --- T_{d-B} , para uma condutibilidade térmica de 36.8 W/mK, ... T_{d-A} , - . T_{d-B} , para uma condutibilidade térmica de 15 W/mK

Da análise dos dados obtidos verificou-se que a diferença do tempo de aquecimento para os dois aços é de cerca de 0.8 horas (48 minutos).

Um dado importante a apresentar é também a diferença entre a temperatura dos pontos extremos A e B, ou seja, a diferença entre a temperatura do ponto mais afastado do centro da peça, T_{d-B} , e a temperatura do centro da peça, T_{d-A} . Como comprova a Figura 6.6, esta diferença é mais elevada no caso de um material com a condutibilidade térmica menor, pois como já foi referido, a condução do calor no interior da peça realiza-se mais lentamente.

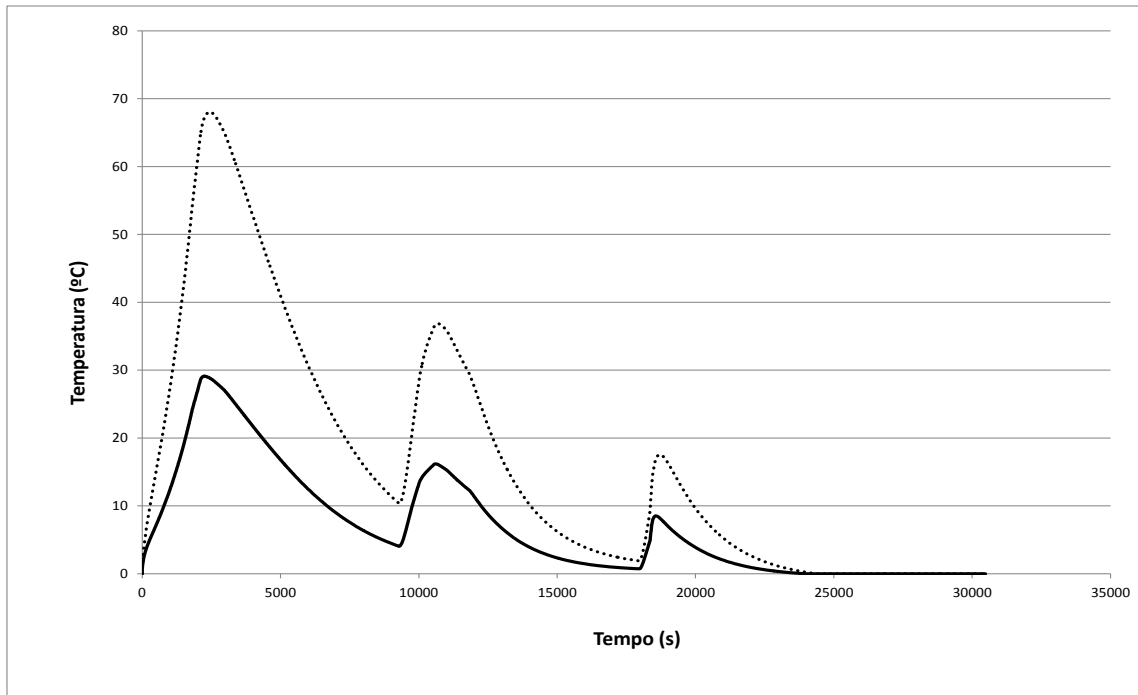


Figura 6.6 - Diferença entre a temperatura do ponto B e a temperatura do ponto A do disco para uma condutibilidade térmica de 36.8 W/mK e para uma condutibilidade térmica de 15 W/mK no aquecimento mais lento. Linha, — $T_{d-B} - T_{d-A}$ para uma condutibilidade térmica de 36.8 W/mK, ... $T_{d-B} - T_{d-A}$ para uma condutibilidade térmica de 15 W/mK

Ainda relativamente ao aquecimento mais lento, e como seria de esperar, a diferença em relação às tensões na peça é mais significativa. Na Figura 6.7 mostra-se a evolução temporal das tensões durante o aquecimento, sendo que se verifica um aumento de mais de 50% nas tensões no ponto mais crítico da peça, ponto B, para o aço de menor condutibilidade térmica.

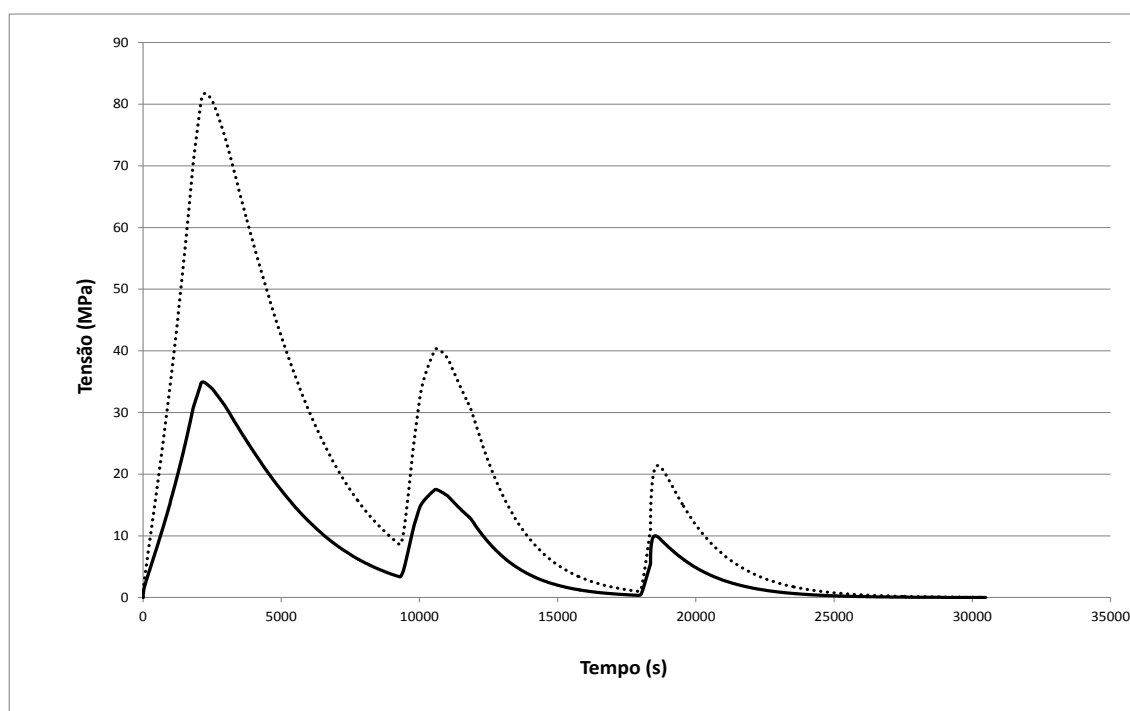


Figura 6.7 - Curva de tensão em função do tempo obtida numericamente no ponto B do disco para uma condutibilidade térmica de 36.8 W/mK e para uma condutibilidade térmica de 15 W/mK no aquecimento mais lento. Linha, — Tensão do disco para uma condutibilidade térmica de 36.8 W/mK, ... Tensão do disco para uma condutibilidade térmica de 15 W/mK

No caso do aquecimento mais rápido, o que se passa durante o aquecimento é semelhante, sendo em termos de tempo de aquecimento uma situação mais favorável e, em termos de tensões uma situação menos favorável, o que não significa que haja problemas a nível estrutural da peça.

Na Figura 6.8 mostra-se a evolução da temperatura em função do tempo do ponto A do disco - T_{d-A} , no aquecimento rápido com as condutibilidades térmicas de 36.8 e 15 W/mK.

Em termos do tempo de aquecimento, pode notar-se na Figura 6.8 que também neste caso, para o material com menor condutibilidade térmica, este é também mais elevado, sendo mais elevado em cerca de 10 minutos.

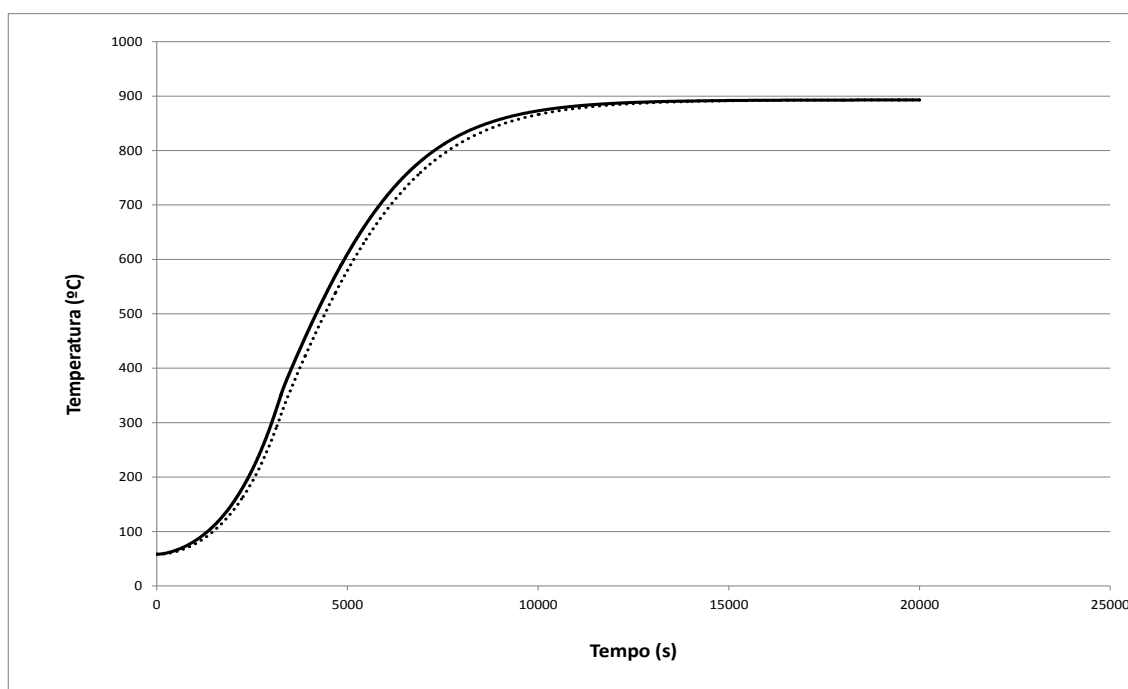


Figura 6.8 - Curva de temperatura em função do tempo obtida numericamente no ponto A do disco para uma condutibilidade térmica de 36.8 W/mK e para uma condutibilidade térmica de 15 W/mK no aquecimento rápido. Linha, — T_{d-A} para uma condutibilidade térmica de 36.8 W/mK, ... T_{d-A} para uma condutibilidade térmica de 15 W/mK

Na Figura 6.9 apresenta-se a diferença entre a temperatura do ponto B e a temperatura do ponto A do disco, onde se pode notar, como seria de esperar, que esta é mais elevada do que no caso do aquecimento mais lento. Nesta situação, o facto da condutibilidade térmica ser menor, provoca um aumento da resistência térmica de condução o que induz um aumento da diferença de temperatura $T_{d-B}-T_{d-A}$.

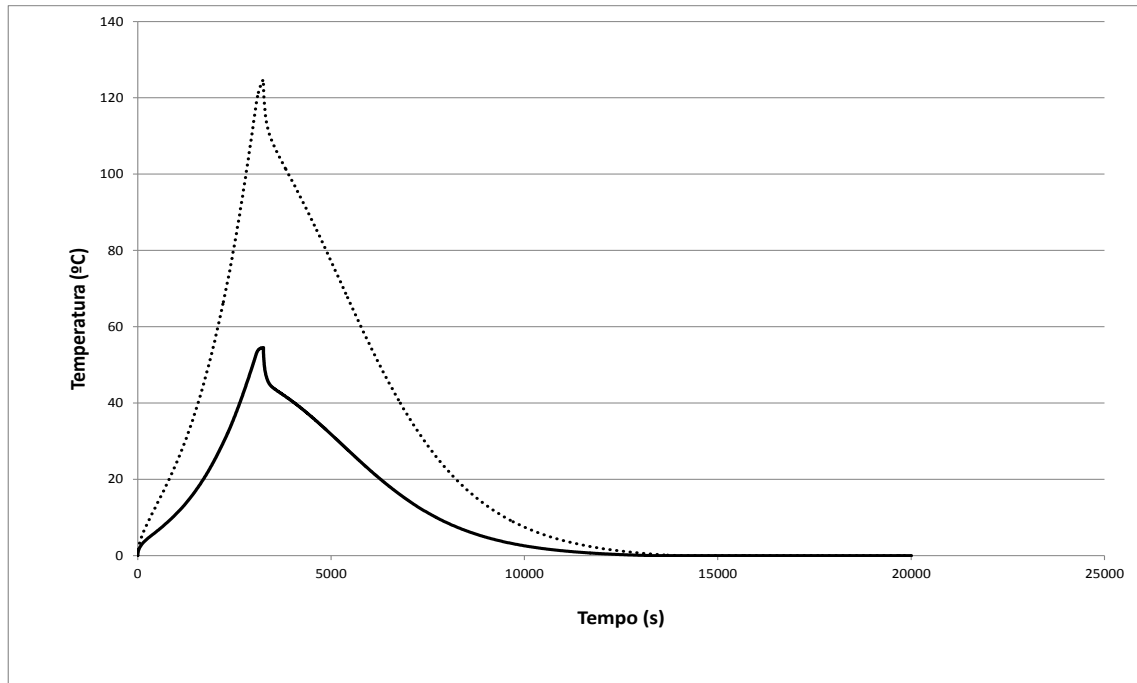


Figura 6.9 - Diferença entre a temperatura do ponto B e a temperatura do ponto A do disco para uma condutibilidade térmica de 36.8 W/mK e para uma condutibilidade térmica de 15 W/mK no aquecimento mais rápido. Linha, — $T_{d-B} - T_{d-A}$ para uma condutibilidade térmica de 36.8 W/mK, ... $T_{d-B} - T_{d-A}$ para uma condutibilidade térmica de 15 W/mK

O caso do aquecimento mais rápido para um material com uma condutibilidade térmica mais baixa torna-se o caso mais desfavorável em termos de tensões na peça, como se pode ver na Figura 6.10. Apesar de esta ser a situação menos favorável a nível de tensões, não haverá problemas estruturais, caso se tratasse de uma peça constituída pelo aço ALVAR 14, pois o valor máximo da tensão no ponto mais crítico é cerca de 25% do valor da tensão limite de elasticidade utilizado, neste trabalho, como referência (Ravne 2012), i.e., 550 MPa.

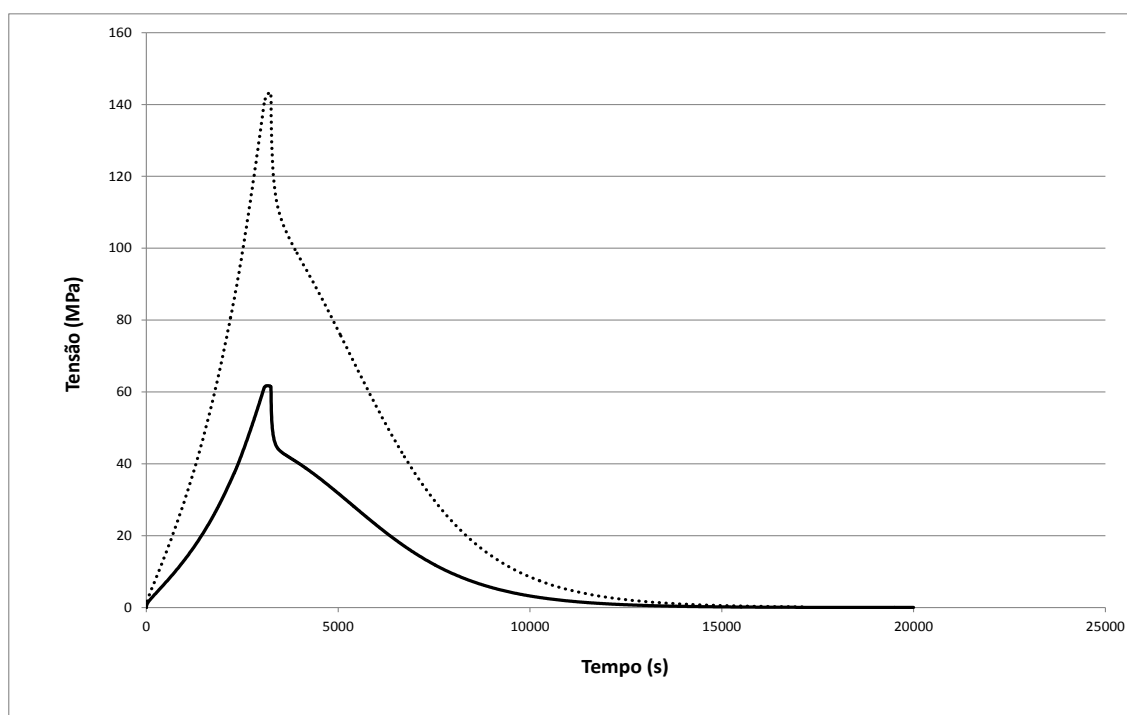


Figura 6.10 - Curva de tensão em função do tempo obtida numericamente no ponto B do disco para uma condutibilidade térmica de 36.8 W/mK e para uma condutibilidade térmica de 15 W/mK no aquecimento mais rápido. Linha, — Tensão do disco para uma condutibilidade térmica de 36.8 W/mK, ... Tensão do disco para uma condutibilidade térmica de 15 W/mK

De salientar também, é a semelhança notável entre a curva da diferença da temperatura, $T_{d-B} - T_{d-A}$, e a curva das tensões, geradas pelo gradiente térmico no interior do disco, no ponto B, Figuras 6.6 e 6.7 e Figuras 6.9 e 6.10. De forma a tornar-se mais perceptível esta semelhança mostra-se na Figura 6.11 a evolução da tensão no ponto B e a evolução da diferença de temperatura entre o ponto B e o ponto A do disco, $T_{d-B} - T_{d-A}$, para o caso do aquecimento lento com a condutibilidade térmica de 36.8 W/mK. Nas restantes situações o comportamento é idêntico à verificada na Figura 6.11.

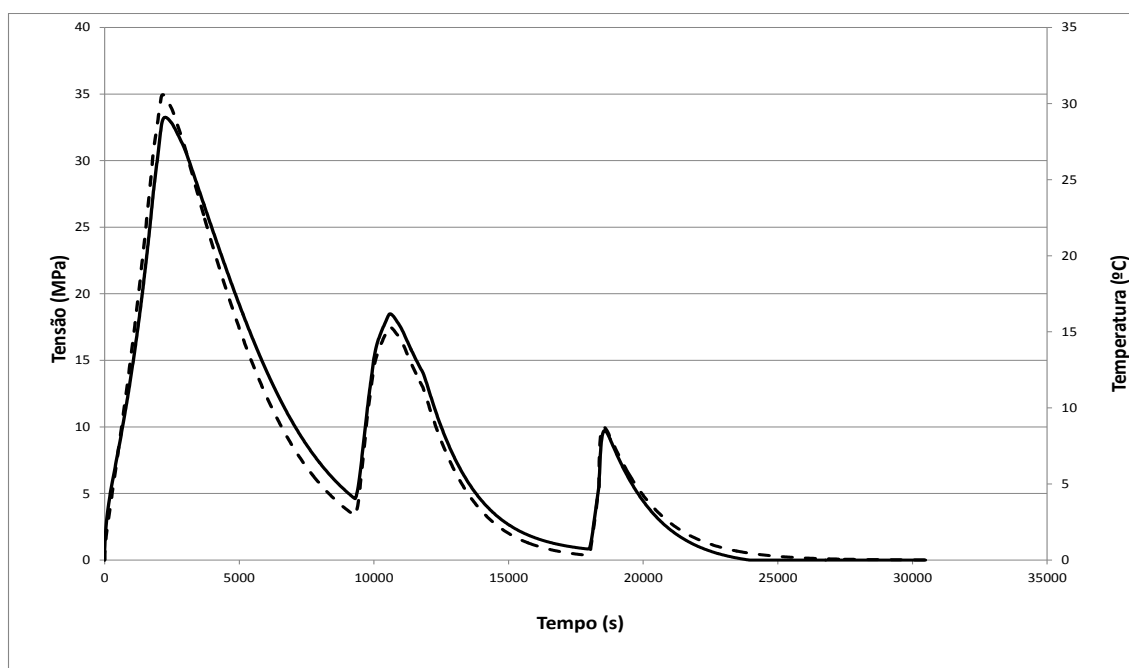


Figura 6.11 - Evolução da tensão do ponto B do disco e evolução da diferença entre a temperatura do ponto B e do ponto A do disco ao longo do tempo no aquecimento mais lento para uma condutibilidade térmica de 36.8 W/mK. Linha, — $T_{d-B}-T_{d-A}$, - - - Tensão no ponto B do disco

6.3 Funcionamento da ventoinha

Como já foi referido, o fenómeno de transferência de calor mais relevante neste processo de aquecimento é o fenómeno da transferência de calor por radiação. Como se sabe, numa gama de temperaturas mais baixa o peso da radiação é menor, apresentando um aumento drástico com o aumento da temperatura. Por este facto, nesta secção serão comparados os processos de aquecimento estando presente a convecção, como foi considerado no caso estudado, e na ausência da convecção, i.e., considerando o aquecimento com convecção natural, implicando isto um menor coeficiente de transferência de calor por convecção.

Na Figura 6.12 apresenta-se a evolução da temperatura da parede do forno - T_{pf} , do gás - $T_{gás}$ e do ponto A do disco - T_{d-A} , para o aquecimento com convecção forçada e também para o aquecimento com convecção natural, estando a peça colocada junto à porta, situação escolhida para efectuar a análise, dado neste caso, o efeito da ventoinha ser mais notório.

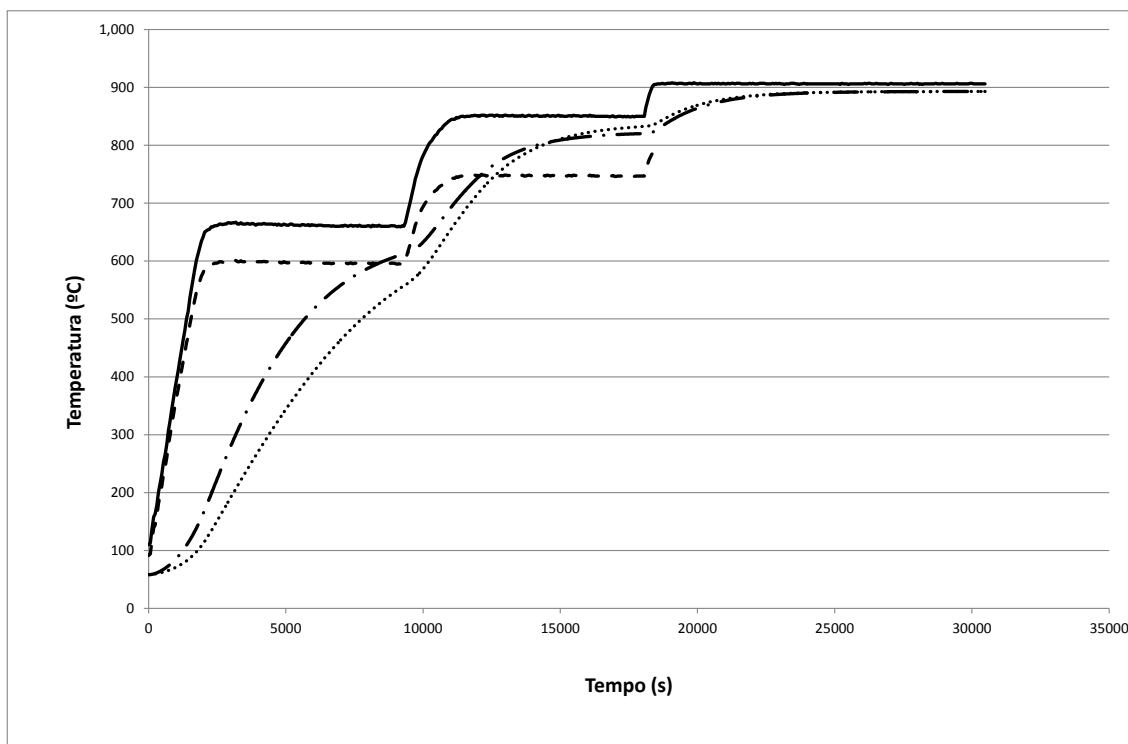


Figura 6.12 - Curva de temperatura em função do tempo da parede do forno e do gás e temperatura no ponto A do disco obtida numericamente para o aquecimento lento com convecção forçada e para o aquecimento lento com convecção natural. Linha, — T_{pf} , --- $T_{gás}$, — • T_{d-A} no aquecimento com convecção forçada, ... T_{d-A} no aquecimento com convecção natural

Pode verificar-se na Figura 6.12, que a diferença entre a transferência de calor por convecção forçada e por convecção natural é mais notória na gama de temperaturas mais baixa. Pode também verificar-se que no último estágio, em que o gás está presente, a curva relativa ao aquecimento com convecção natural encontra-se acima da curva do aquecimento com convecção forçada. Isto acontece, pois nesse estágio a temperatura do gás é inferior à temperatura da peça, o que faz com que a peça ceda menor quantidade de calor ao gás no caso do aquecimento com convecção natural.

Na Figura 6.13 apresentam-se as evoluções da temperatura ao longo do tempo da parede do forno - T_{pf} , do gás - $T_{gás}$ e do ponto A do disco - T_{d-A} , para o caso do aquecimento rápido com convecção forçada e também para o aquecimento rápido com convecção natural. Pode notar-se que, nesta situação, o tempo de aquecimento até à temperatura de têmpera é cerca de 10 minutos menor no caso do aquecimento com convecção forçada, já que em nenhum momento do aquecimento a temperatura do gás é inferior à temperatura da peça, o que não provoca uma perda de calor por parte da peça para o gás.

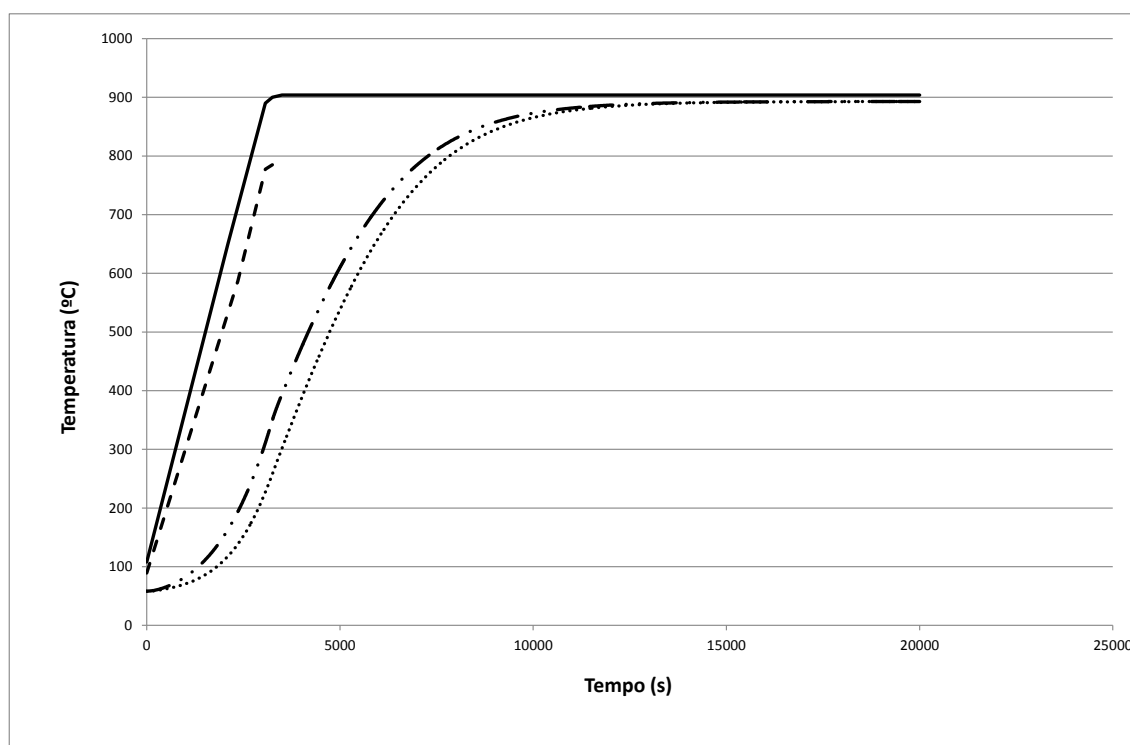


Figura 6.13 - Curva de temperatura em função do tempo da parede do forno e do gás e temperatura no ponto A do disco obtida numericamente para o aquecimento rápido com convecção forçada e para o aquecimento rápido com convecção natural. Linha, — T_{pf} , --- $T_{gás}$, — • T_{d-A} no aquecimento com convecção forçada, ... T_{d-A} no aquecimento com convecção natural

Na Tabela 6.2 apresentam-se os tempos de aquecimento relativos ao aquecimento lento e ao aquecimento rápido com convecção forçada – ventoinha ligada – e com convecção natural – ventoinha desligada.

Tabela 6.2 - Tempos de aquecimento do processo com convecção forçada e convecção natural

	Convecção forçada	Convecção natural
Aquecimento Lento $t_{99\%}$ (horas)	6.11	6.02
Aquecimento Rápido $t_{99\%}$ (horas)	3.16	3.31

Analisando os valores obtidos, pode comprovar-se que a maior diferença entre os tempos de aquecimento ocorre no processo de aquecimento rápido, sendo nesta situação o aquecimento rápido com convecção natural cerca de 10 minutos mais demorado, como já referido. Daqui se pode concluir, que o funcionamento da ventoinha pode ser dispensado, sendo seguramente esta situação mais vantajosa em termos do consumo energético inerente ao tratamento térmico

de têmpera. Eventualmente, o azoto pode ser removido logo no início do tratamento sem diferença significativa na curva de aquecimento.

7 Conclusões e perspectivas de trabalhos futuros

7.1 Conclusões

Os coeficientes de transferência de calor experimentais foram obtidos recorrendo-se aos dados experimentais do disco e do cilindro nos locais correspondentes aos ensaios 1, 2 e 3. Para o caso do disco obtiveram-se os valores de 12.6, 2.4 e 2.4 W/m²°C para os ensaios 1, 2 e 3, respectivamente. No que respeita ao cilindro, foram obtidos os valores de 11.5 e 5.6 W/m²°C para os ensaios 1 e 3, respectivamente. Desta forma, se conclui que o peso do fenómeno da transferência de calor por convecção é mais importante na gama de temperaturas mais baixa, sendo que à medida que aumenta a temperatura o peso do fenómeno da transferência de calor por radiação se torna muito mais relevante. No caso dos locais correspondentes aos ensaios 2 e 3 o efeito da convecção ainda é menor, podendo mesmo ser desprezada nestes locais.

Os ajustamentos das curvas numéricas às curvas experimentais foram obtidos de forma a traduzirem razoavelmente a realidade, tendo sido para isto obtidos os parâmetros que permitiram o melhor ajuste possível. Desta forma, obtiveram-se, para o modelo de radiação em cavidade, três ajustes do disco para o caso dos três ensaios realizados, tendo sido obtidos os valores da emissividade de 0.23, 0.2 e 0.28 para os ensaios 1, 2 e 3, respectivamente, e considerando o número de discos no forno de 7 discos afastados de 2,5 cm. Também para este modelo, no caso do cilindro o valor da emissividade obtido foi de 0.22 para os ensaios 1 e 3 tendo-se usado 7 cilindros afastados de 2.5 cm.

Os três locais do forno estudados, correspondentes aos três ensaios realizados na firma F. Ramada, mostram que a fase de aquecimento é ligeiramente diferente em cada um deles. No caso do disco, o tempo de aquecimento é de 6.11 horas, 6.18 horas e 5.93 horas nos locais correspondentes aos ensaios 1, 2 e 3, respectivamente. As diferenças verificadas de local para local, são mínimas e têm a ver com a maior ou menor obstrução/sombreamento à radiação das peças vizinhas e, também, à circulação do gás que se torna maior no local correspondente ao ensaio 1, realizado junto da porta do forno onde se encontra a ventoinha. É também conveniente colocar as peças no forno de maneira a que a radiação incida nestas da forma mais homogénea possível, de forma a evitar criar gradientes de temperatura desnecessários no interior das peças.

As peças que fazem parte da carga a tratar influenciam-se umas às outras, em termos de trocas de calor, e o comportamento de uma peça pequena é idêntico ao de uma peça de maior dimensão, seguindo ambas um comportamento médio que é ditado pela quantidade de peças a tratar. A redução do tempo de aquecimento estimada, em virtude da utilização do aquecimento rápido e para os aquecimentos com dois patamares intermédios estudados, é pois igual para todas as peças e é de cerca de 2.5 horas.

A determinação do campo de tensões nas peças estudadas foi realizada recorrendo-se ao modelo de radiação entre dois corpos, pois o modelo de radiação em cavidade não permite a obtenção do campo de tensões no final do aquecimento. Desta forma, e estando do lado da segurança, pois o aquecimento simulado era ligeiramente mais rápido que o real, para os casos estudados a tensão máxima durante o aquecimento é sempre menor que o valor de

referência da tensão limite de elasticidade considerado neste trabalho. O valor máximo da tensão obtida durante o aquecimento ocorreu no aquecimento mais rápido no disco 3, tendo este um valor de 68.7 MPa, o que representa cerca de 12.5% do valor da tensão limite de elasticidade de 550 MPa a uma temperatura de 500 °C. Concluiu-se, também, através dos resultados obtidos, que os pontos críticos do disco (locais de tensões máximas), do disco 3 e do disco 4 são os pontos B, Figura 3.6, de cada secção sendo no caso do cilindro de teste o ponto situado a meio da sua geratriz.

No que respeita ao aquecimento das peças isoladamente, concluiu-se que este se trata de um processo bem diferente do aquecimento com a carga completa, tanto ao nível do tempo de aquecimento, mais reduzido, como também ao nível das tensões instaladas nas peças testadas, mais elevadas, embora continuem abaixo do limite de elasticidade do aço.

A condutibilidade térmica do material a ser tratado é uma propriedade que influencia bastante o processo de transferência de calor no seu interior. Foi possível concluir que, para a mesma geometria, um material com uma condutibilidade térmica de 15 W/mK é mais lento a aquecer do que um material com uma condutibilidade térmica de 36.8 W/mK, na ordem dos 40 minutos no caso do aquecimento mais lento e cerca de 10 minutos no caso do aquecimento mais rápido. No caso das tensões instaladas, foi possível comprovar que estas são mais elevadas em cerca de 130%, para a situação de um material com a menor condutibilidade térmica, como é o caso do aço inoxidável.

Da última análise realizada, relativa ao funcionamento da ventoinha existente na porta do forno, foi possível concluir que a fase inicial do aquecimento é a altura onde se verifica a maior diferença entre o aquecimento com convecção forçada e o aquecimento com convecção natural. Tal facto é de esperar, pois o valor do coeficiente de convecção é maior na situação do aquecimento com convecção forçada. Relativamente ao tempo total de aquecimento, a maior diferença foi verificada para o aquecimento mais rápido, tendo sido o aquecimento com convecção natural mais demorado em cerca de 10 minutos. Desta forma, pode concluir-se que é possível prescindir da utilização da ventoinha durante o processo de aquecimento.

Os dados disponíveis, indicam que é possível implementar o modelo de aquecimento rápido da carga no forno sem prejuízo das próprias peças e com vantagens em termos de ganho de produtividade, dada a redução do tempo de tratamento, e também de energia consumida, dado num tratamento mais curto as perdas do forno para o exterior serem menores.

No aquecimento rápido, dada a previsível dificuldade em retirar instantaneamente o azoto quando a temperatura do forno atingir 850°C, pode-se ponderar retirar este no início do aquecimento, uma vez que o efeito da convecção no aquecimento é desprezável.

De salientar que as conclusões apresentadas são válidas para o aço ALVAR 14 (DIN 56 NiCrMoV7) utilizando peças com dimensões semelhantes às estudadas e para o aquecimento das peças com a presença da carga completa no forno de tratamento. Com peças de grande dimensão, ou aços diferentes do estudado, a utilização de um aquecimento rápido pode não ser exequível.

7.2 Perspectivas de trabalhos futuros

Dando continuidade ao presente trabalho seria interessante e importante realizarem-se outros ensaios experimentais para peças de maiores dimensões. O estudo do aquecimento de uma peça única de grande dimensão, que também são tratadas nos fornos da F. Ramada, seria outra proposta de trabalho futuro.

Uma vez que o calor específico c_p do material varia bastante com a temperatura, seria também interessante realizar as simulações numéricas considerando esta variação, com o intuito de se verificar a alteração dos resultados finais.

Do ponto de vista estrutural, seria interessante realizar um estudo relativo às deformações das peças no final, pois este é um ponto relevante na fase seguinte ao aquecimento, o arrefecimento, que se torna a fase mais exigente para as peças, pois é realizado de forma brusca e rápida.

Anexo A: Resultados experimentais e resultados analíticos – Ensaio 1, Ensaio 2 e Ensaio 3

Neste anexo serão apresentados os restantes resultados relativos ao ensaio 1 (cilindro), ao ensaio 2 e ao ensaio 3. O processo de cálculo descrito no capítulo 2 foi utilizado para todos os casos em estudo.

Serão apresentadas as figuras relativas ao local do forno onde foram ensaiadas as peças de teste, os dados experimentais dos ensaios 1 e 2, os estágios utilizados para a determinação do coeficiente global de transferência de calor e respectivas soluções analíticas e ainda os coeficientes globais e os erros em função da temperatura aparente, para cada caso em estudo.

A.1 Ensaio 1 – Peças de teste colocadas junto à porta do forno - caso apresentado no capítulo 2 (disco)

Na Figura A.0.1 mostra-se a evolução da curva analítica e da curva experimental ao longo do tempo para o caso do cilindro colocada junto à porta do forno – local 1.

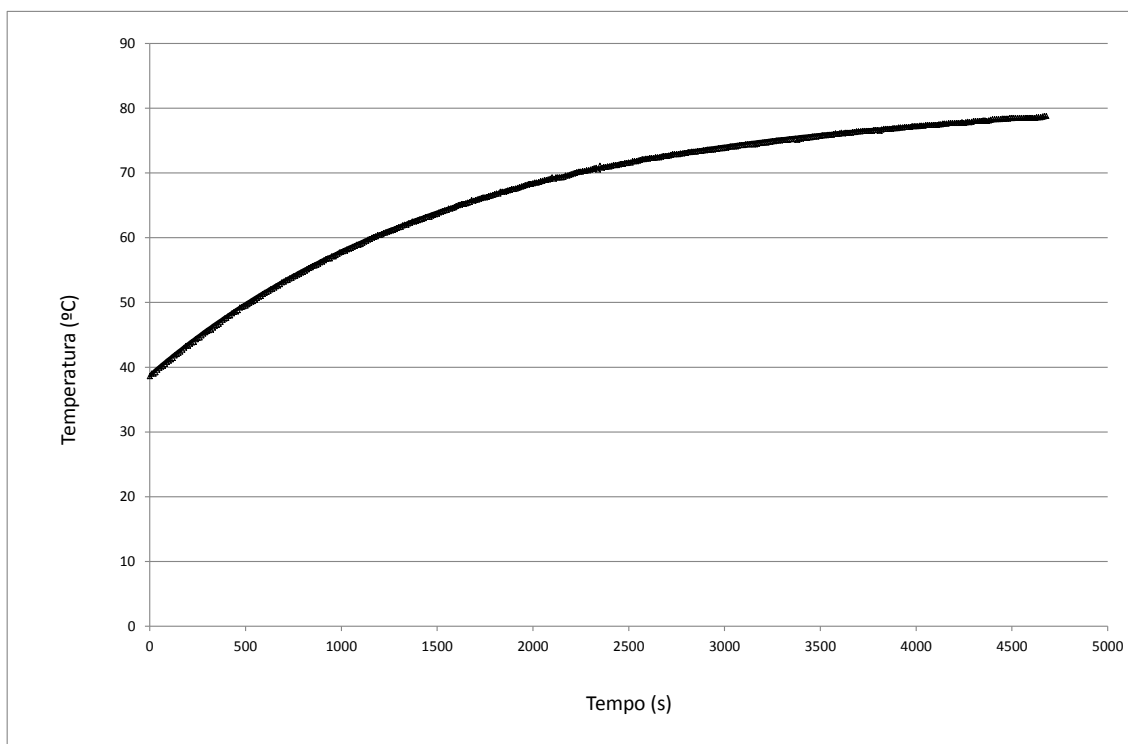


Figura A.0.1 - Evolução da curva analítica e da curva experimental, Símbolo, Δ Pontos experimentais.
Linha, — Curva analítica

Na Figura A.0.2 estão patentes o coeficiente global de transferência de calor e o erro em função da temperatura aparente para o cilindro no ensaio 1.

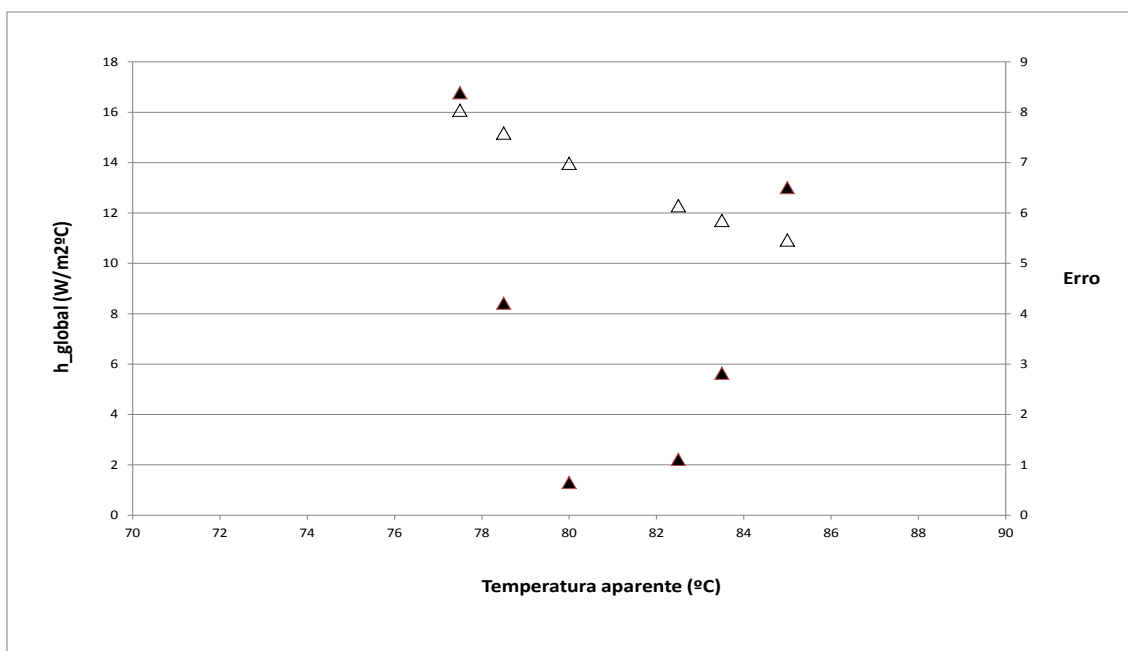


Figura A.0.2 - Coeficiente global de transferência de calor e erro em função da temperatura aparente. Símbolos, $\triangle$ h_g , $\blacktriangle$ erro

A.2 Ensaio 2 - Peças de teste colocadas no meio da carga a tratar

Na Figura A.0.3 mostra-se o posicionamento das peças de teste no ensaio 2.

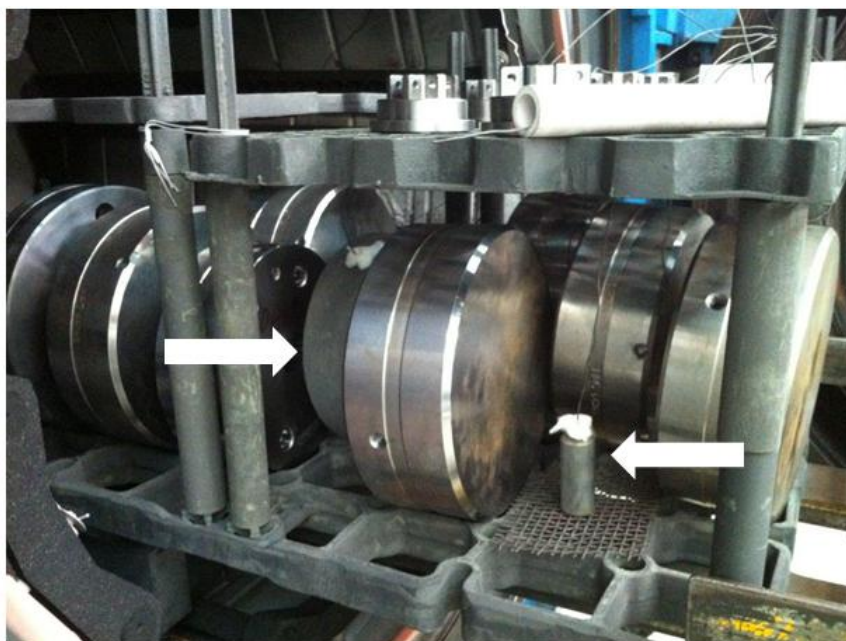


Figura A.0.3 - Carga a tratar no ensaio 2, as setas assinalam as peças de teste

Na Figura A.0.4 apresentam-se as curvas obtidas experimentalmente em função do tempo da parede do forno, do termopar no escudo de radiação, do disco e do cilindro.

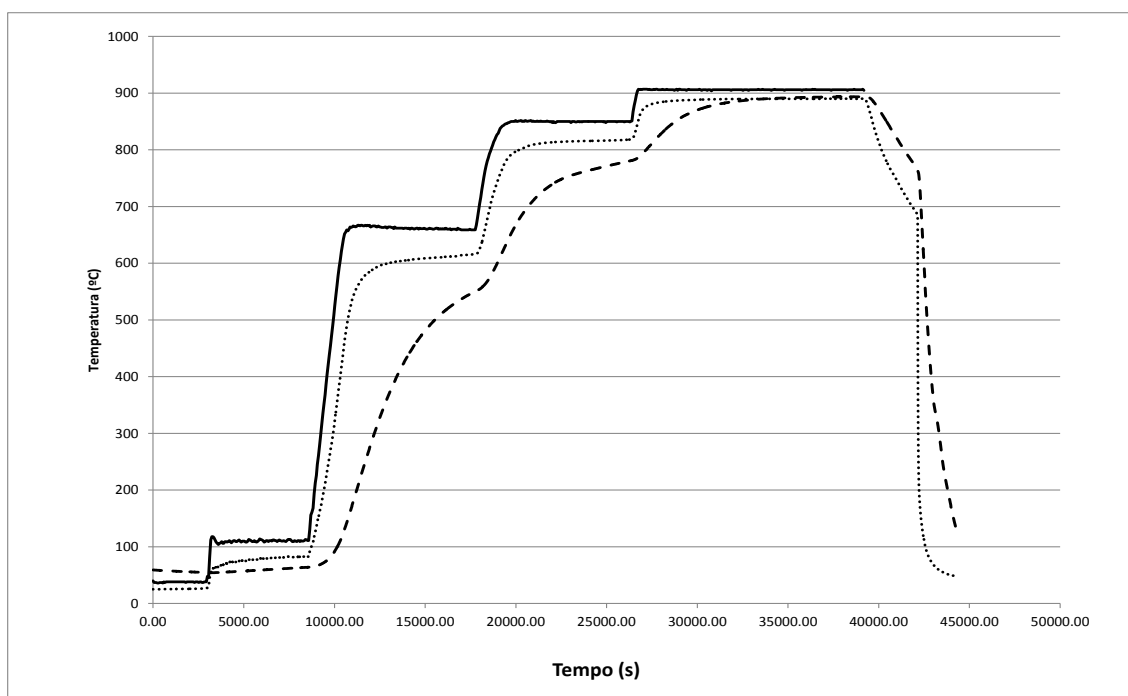


Figura A.0.4 - Curvas experimentais do ensaio 2 da temperatura versus tempo. Linha, — Temperatura da parede do forno, ... Temperatura do termopar no escudo, - - - Temperatura do disco de teste

Na Figura A.0.5 mostra-se o estágio utilizado para a determinação do coeficiente global de transferência de calor no local 2 correspondente ao ensaio 2, estando patentes a temperatura da parede do forno, a temperatura do termopar no escudo de radiação, a temperatura experimental do disco e do cilindro, e a temperatura obtida analiticamente do disco e do cilindro em função do tempo.

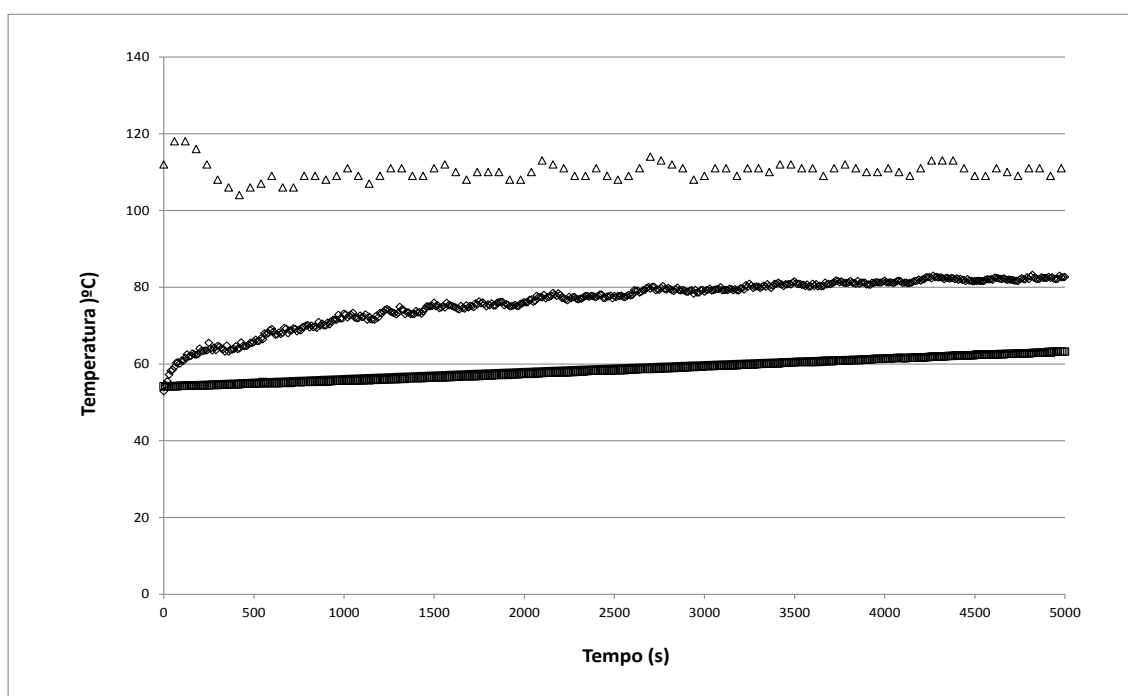


Figura A.0.5 - Estágio utilizado para a determinação do coeficiente global para o furo mais profundo do disco (65 mm). Símbolos, Δ Temperatura da parede do forno, $\diamond$ Temperatura do termopar no escudo de radiação, $\square$ Temperatura do disco de teste, — Temperatura obtida analiticamente do disco

Na Figura A.0.6 estão representados os valores obtidos do coeficiente global de transferência de calor e do erro em função da temperatura aparente para o disco no ensaio 2. Não foram calculados valores para o caso do cilindro dado que o termopar avariou.

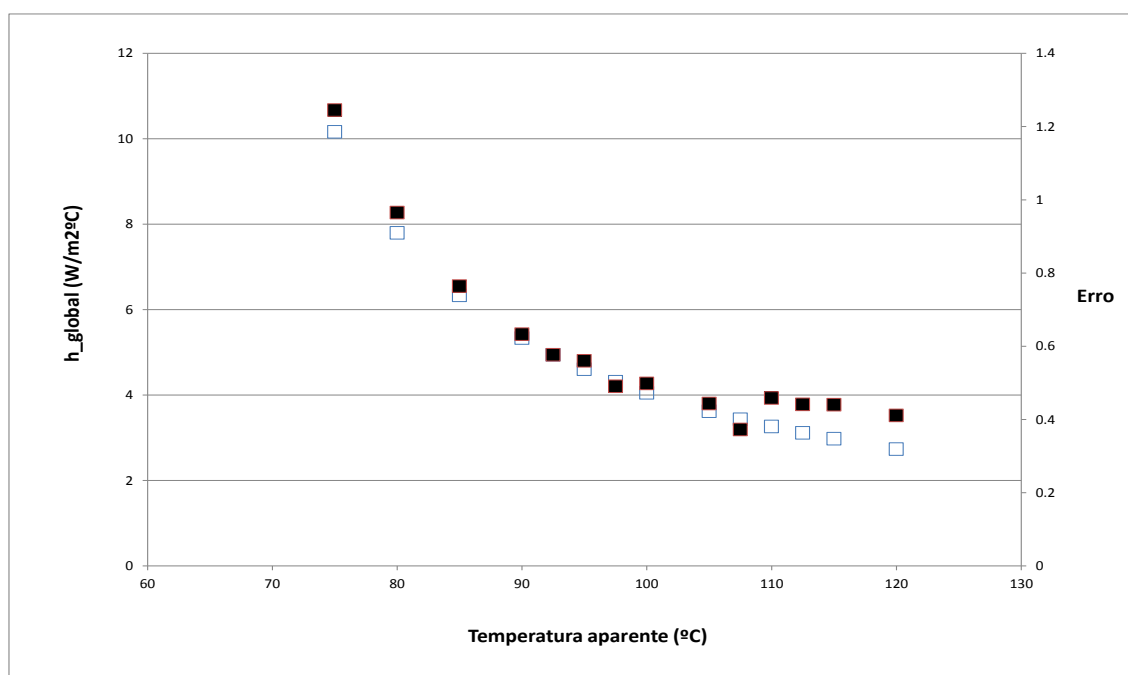


Figura A.0.6 - Coeficiente global de transferência de calor e erro em função da temperatura aparente. Símbolos, $\square$ h_{g} , $\blacksquare$ erro

A.3 Ensaio 3 – Peças de teste colocadas do lado oposto à porta do forno

Na Figura A.0.7 pode observar-se o posicionamento das peças de teste no ensaio 3.



Figura A.0.7 - Carga a tratar no ensaio 3, as setas assinalam as peças de teste

Na Figura A.0.8 mostra-se a evolução da temperatura da parede do forno, do termopar no escudo de radiação, do disco e do cilindro ao longo do tempo para o ensaio 3.

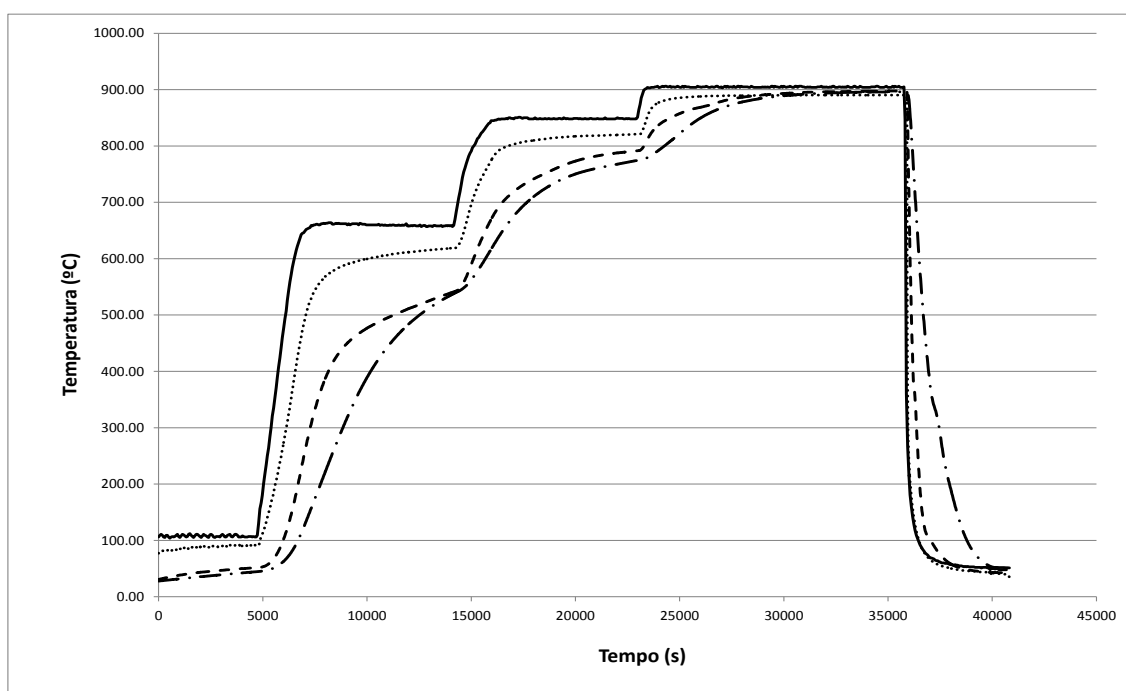


Figura A.0.8 - Curvas experimentais do ensaio 3 da temperatura versus tempo. Linha, — Temperatura da parede do forno, ... Temperatura do termopar no escudo, — . Temperatura do disco de teste, - - - - Temperatura do cilindro de teste

Na Figura A.0.9 é apresentado o estágio utilizado para a determinação do coeficiente global de transferência de calor no ensaio 3, onde estão representadas a temperatura da parede do forno, do termopar no escudo de radiação, do disco e do cilindro em função do tempo e também as curvas obtidas analiticamente do disco e do cilindro.

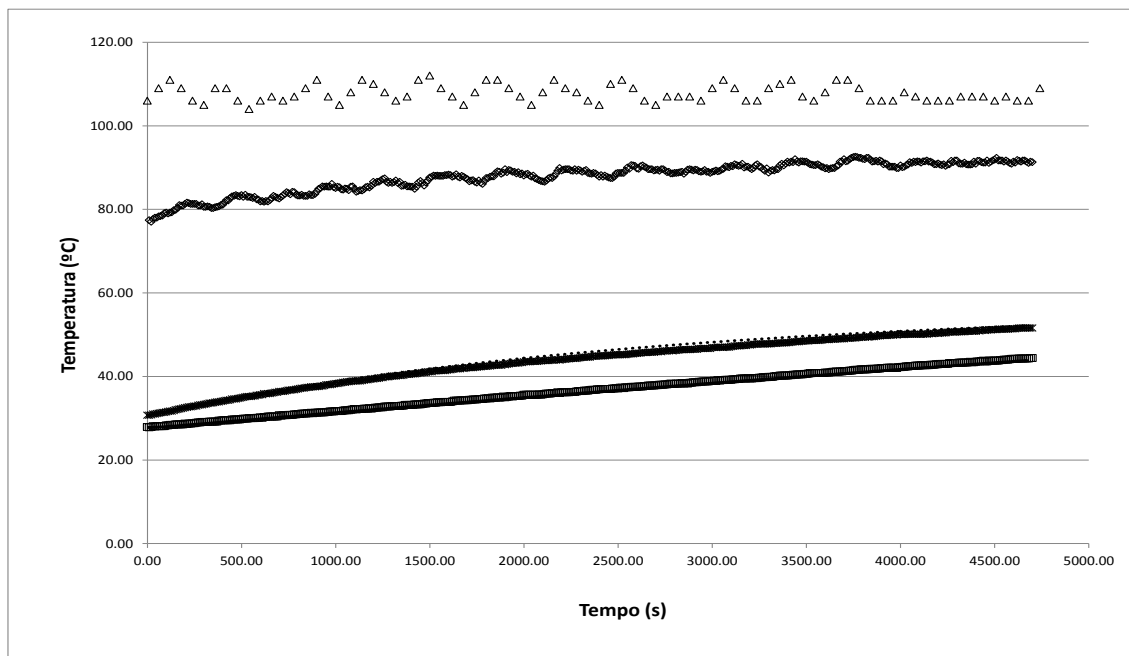


Figura A.0.9 - Estágio utilizado para a determinação do coeficiente global para o furo mais profundo do disco (65 mm). Símbolos. $\triangle$ Temperatura da parede do forno, $\diamond$ Temperatura do termopar no escudo de radiação, $\square$ Temperatura experimental do disco de teste, $\times$ Temperatura experimental do cilindro de teste. Símbolos. Linha, — Temperatura obtida analiticamente do disco, ... Temperatura obtida analiticamente do cilindro

Na Figura A.0.10 mostra-se o coeficiente global de transferência de calor e o erro em função da temperatura aparente para o caso do disco no ensaio 3.

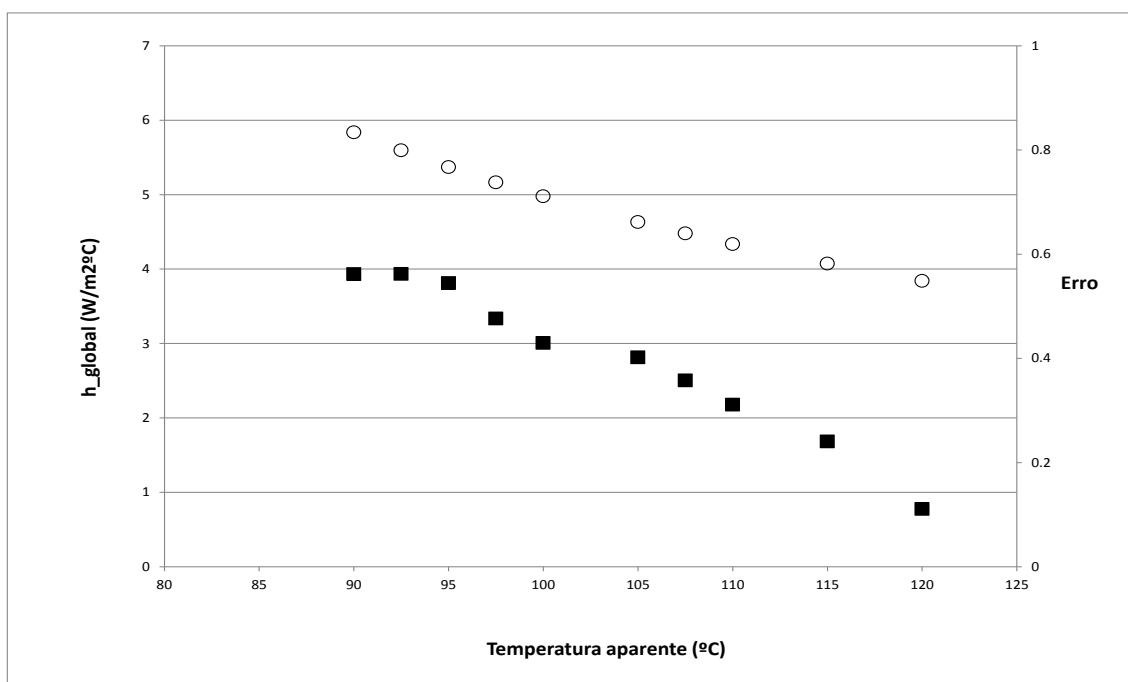


Figura A.0.10 - Coeficiente global de transferência de calor e erro em função da temperatura aparente.
Símbolos, $\square$ h_g , $\blacksquare$ erro

Na Figura A.0.11 apresenta-se, do mesmo modo, o coeficiente global de transferência de calor e o erro em função da temperatura aparente para o cilindro no ensaio 3.

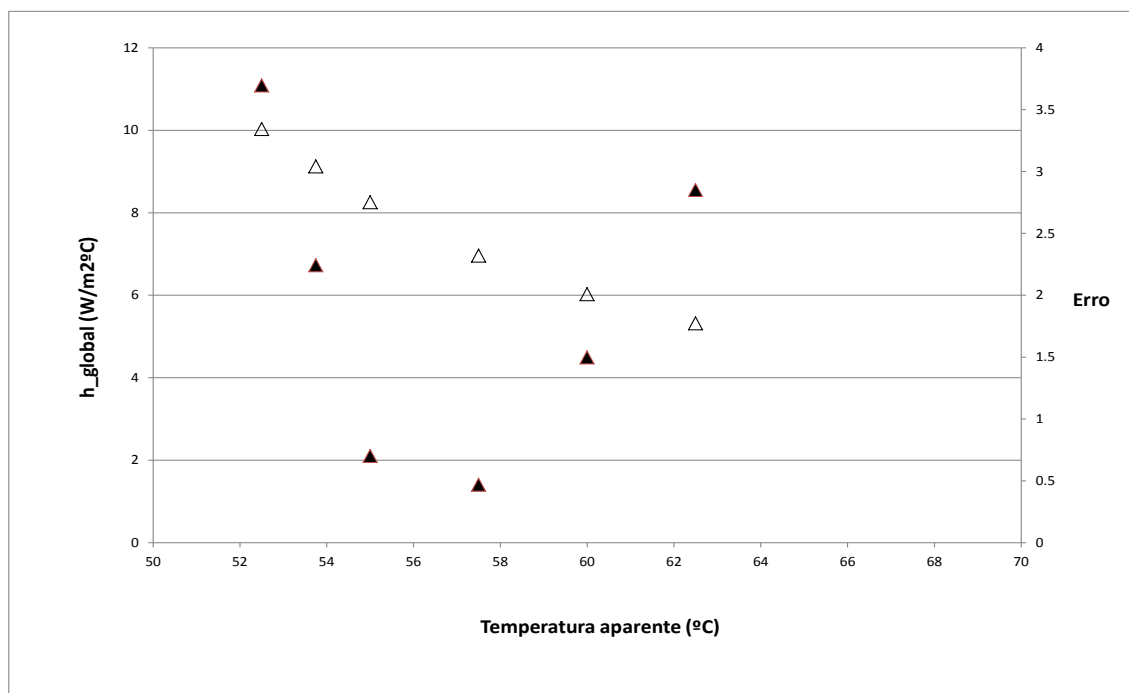


Figura A.0.11 - Coeficiente global de transferência de calor e erro em função da temperatura aparente.
Símbolos, $\triangle$ h_g , $\blacktriangle$ erro

Anexo B – Resultados intermédios obtidos para uma emissividade de 0.35 e um factor de forma de 0.5 – pontos 1 e 2 do disco no ensaio 1

Neste anexo mostram-se as curvas de temperatura em função do tempo dos pontos 1 e 2 do disco, Figura B.0.1 e Figura B.0.2, respectivamente, obtidas numericamente para os valores de emissividade e factor de forma utilizados por Oliveira (2011), distância entre os discos de 1 cm.

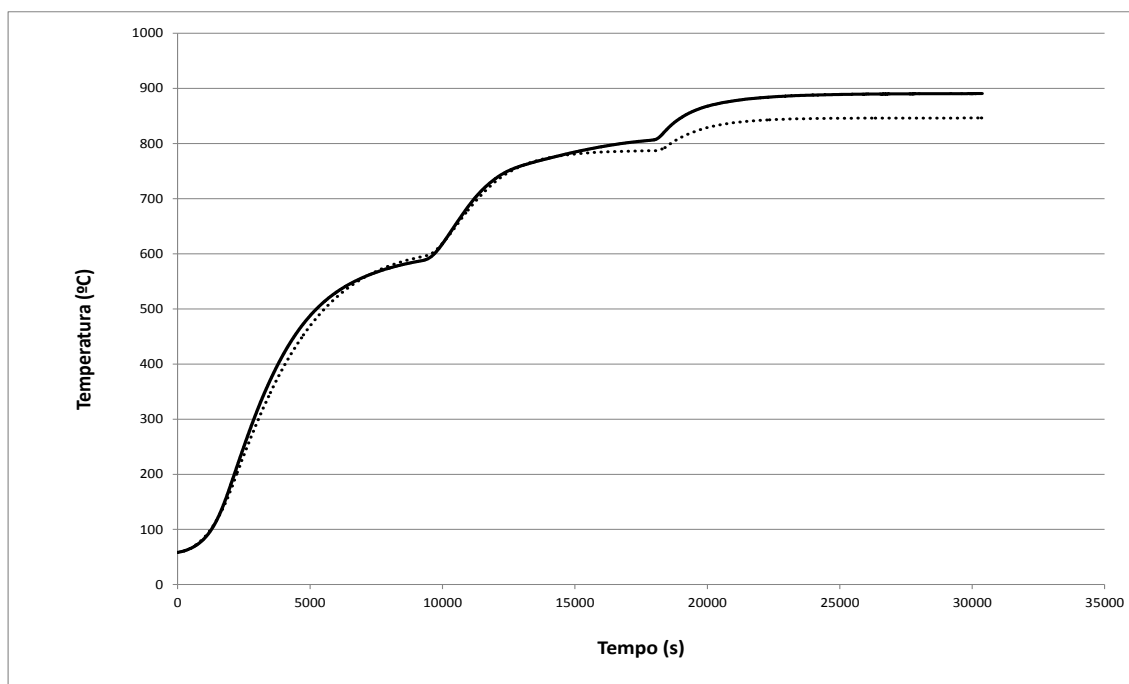


Figura B.0.1 - Curvas de temperatura em função do tempo do ponto 1 obtidas experimentalmente e numericamente. Linha, — Curva experimental, ... Curva numérica

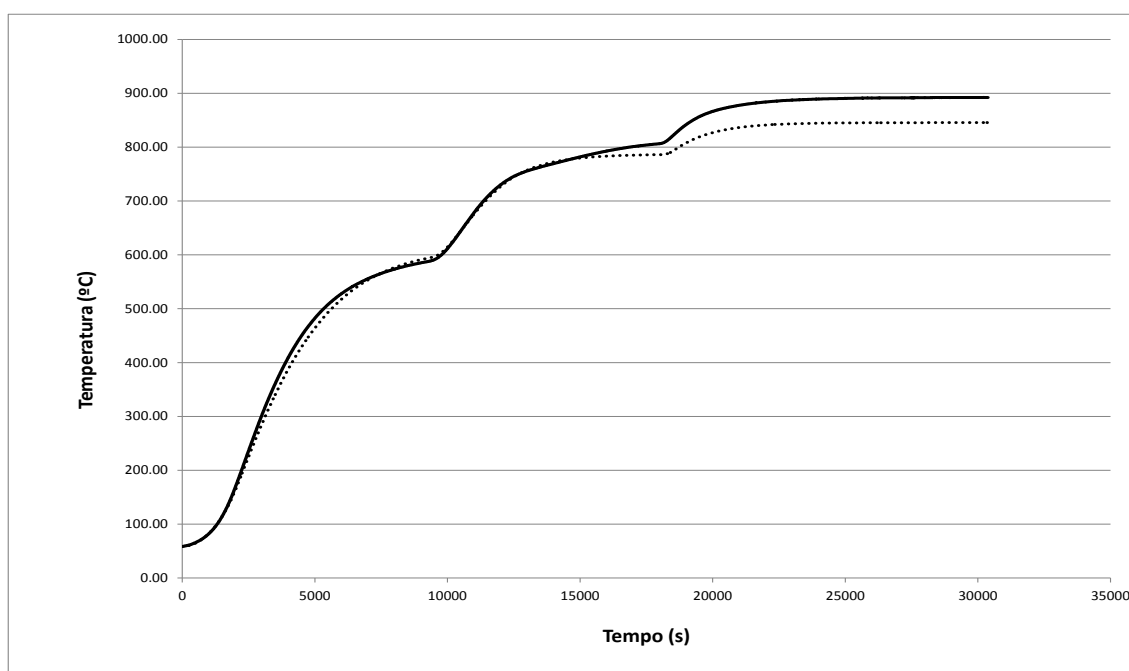


Figura B.0.2 - Curvas de temperatura em função do tempo do ponto 2 obtidas experimentalmente e numericamente. Linha, — Curva experimental, ... Curva numérica

Anexo C – Validação do método numérico – disco 3 e disco 4

Da mesma forma que no cilindro de teste, os parâmetros utilizados na simulação do comportamento do disco 3 e do disco 4 foram baseados nos parâmetros determinados por Oliveira (2011) para o caso do disco de teste. O teste ao desempenho do método numérico para os dois casos foi contudo realizado comparando as soluções numéricas obtidas com as soluções analíticas. De salientar que estas comparações foram efectuadas para a situação mais exigente, i.e., para uma temperatura do forno de 900 °C e para um coeficiente de convecção de 350 W/m²°C. Assim na Figura C.0.1 mostra-se a comparação entre a evolução da temperatura obtida analiticamente e obtida numericamente para o disco 3.

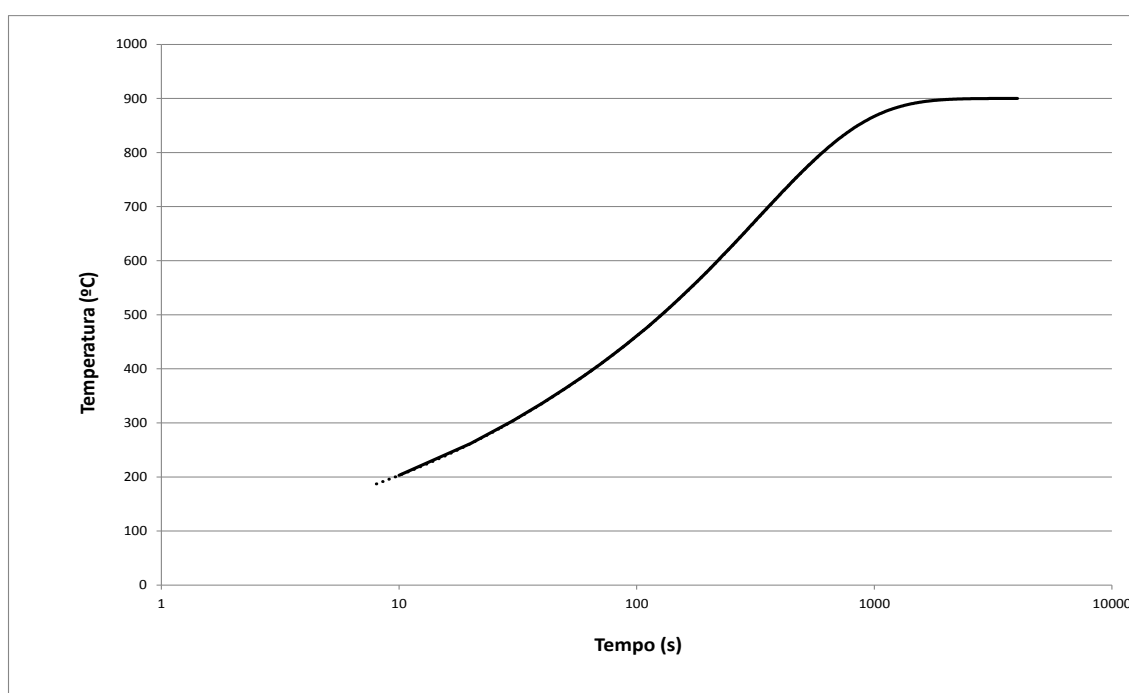


Figura C.0.1 - Curva de temperatura em função do tempo obtida analiticamente e numericamente no ponto B do disco 3 para uma temperatura aparente de 900 °C e um coeficiente de convecção de 350 W/m²°C. Linha, — Curva analítica, ... Curva numérica

De forma idêntica, na Figura C.0.2 apresentam-se as evoluções da temperatura obtidas analiticamente e numericamente para o caso do disco 4.

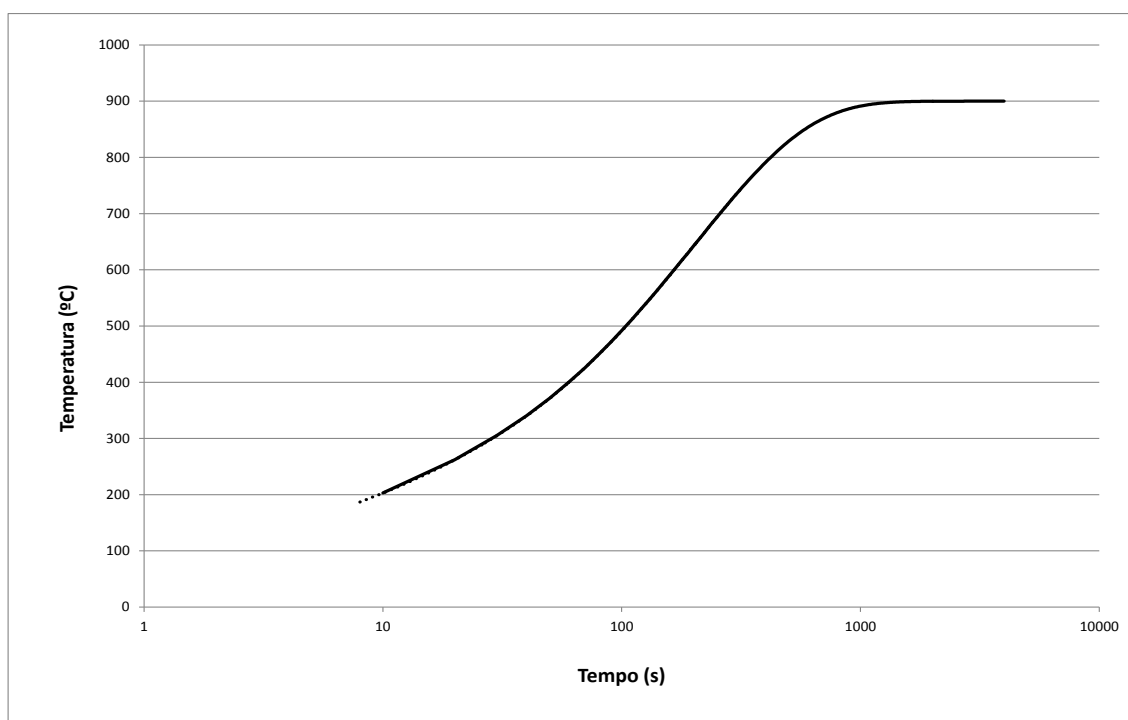


Figura C.0.2 - Curva de temperatura em função do tempo obtida analiticamente e numericamente no ponto B do disco 4 para uma temperatura aparente de 900 °C e um coeficiente de convecção de 350 W/m²°C. Linha, — Curva analítica, ... Curva numérica

Na Tabela C.1 mostram-se os valores dos erros médios, equação 3.1, determinados para os primeiros 100 segundos correspondentes ao disco 3 e ao disco 4. O número de nós utilizado nas malhas que efectuaram a simulação e a máxima variação espacial de temperatura por incremento de tempo, também estão indicadas na Tabela C.1.

Tabela C.1 - Erro médio nos primeiros 100 segundos para o disco 3 e disco 4

	Máxima variação espacial de temperatura por incremento de tempo	Número de nós	Erro médio (%)
Disco 3	1 °C	82 X 69	0.07
Disco 4		82 X 40	0.06

Anexo D – Tempos de aquecimento para os locais 1 e 3 correspondentes aos ensaios 1 e 3, respectivamente

Na Tabela D.1 e Tabela D.2 seguintes apresentam-se os resultados obtidos relativamente aos tempos de aquecimento para o local 1 e para o local 3, correspondentes aos ensaios 1 e 3, respectivamente.

Tabela D.1 - Tempos de aquecimento do local 1 correspondente ao ensaio 1

	Local 1			
	Disco	Cilindro	Disco 3	Disco 4
Aquecimento Lento $t_{99\%}$ (horas)	6.11	6.12	6.26	5.81
Aquecimento Rápido $t_{99\%}$ (horas)	3.16	3.19	3.5	2.41
Diferença entre os tempos de aquecimento (horas)	2.95	2.93	2.76	3.40

Tabela D.2 - Tempos de aquecimento do local 3 correspondente ao ensaio 3

	Local 3			
	Disco	Cilindro	Disco 3	Disco 4
Aquecimento Lento $t_{99\%}$ (horas)	5.93	6.03	6.06	5.89
Aquecimento Rápido $t_{99\%}$ (horas)	2.86	3.36	3.16	2.71
Diferença entre os tempos de aquecimento (horas)	3.07	2.88	2.9	3.18

Referências Bibliográficas

Oliveira, Miguel Martinho Pacheco, Tratamento Térmico de matrizes em aço, estudo do seu aquecimento por convecção/radiação, Dissertação do Projecto Final do MIEM, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Julho de 2011

Elkhatatny, I.; Morsi, Y.; Blicblau, A. S.; Das, S.; Doyle, E.D., Numerical analysis and experimental validation of high pressure gas quenching, International Journal of the Thermal Sciences 42 (2003) 417-423

Incropera, Frank P.; DeWitt, David P., Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 4th edition, Danvers: John Wiley & Sons, cop. 1996

Oliveira Fernandes, E.; Alexandre, José Luís; Leal, Vitor, Texto de Apoio às Aulas Práticas da unidade curricular de Transferência de Calor, 4º ano do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, 1º Semestre, 2011/2012

Coelho, Paulo; Acetatos das Aulas Teóricas da unidade curricular de Métodos Experimentais em Engenharia Térmica, 5º ano do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica (Ramo de Energia Térmica), 1º semestre 2011/2012

Mackerle, J., Finite element analysis and simulation of quenching and other heat treatment processes bibliography (1976–2001), Journal of Materials Processing Technology 27 (2003) 313-332

Lijun, Cheng, Calculation of the coupled thermal stress of a cylinder with non-linear surface heat-transfer coefficient and phase transformation during the quenching with various quenching media, International Conference on Applied Mathematics, Istanbul, Turkey, May 27-29 .2006 592-598

Soares, Pinto, Aços - Características Tratamentos, 5ª Edição, Porto, Livraria Livroluz, 1992

<http://www.ramada.pt> em 03/05/2012

<http://www.metalravne.com/selector/steels/utopex2>, Metal Ravne, Steels Selector em 15/06/2012

