



Tiago Filipe Mira Tavares

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

**Simulação de ensaios não destrutivos por
termografia de componentes obtidos por fabrico
aditivo**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientadora: Professora Doutora Marta Isabel Pimenta Verdete da Silva Carvalho, Professora Auxiliar, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Co-orientadora: Mestre Ana Patrícia Cardoso Martins, Investigadora, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

setembro, 2018

Simulação de ensaios não destrutivos por termografia de componentes obtidos por fabrico aditivo

Copyright © Tiago Filipe Mira Tavares, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

À minha família

AGRADECIMENTOS

Começo por agradecer à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, em especial ao Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial e o seu corpo docente, pelas condições de aprendizagem que proporcionaram durante o meu percurso académico, assim como todo o apoio disponibilizado para a realização desta dissertação.

Esta dissertação foi desenvolvida no âmbito do projeto com a referência POCI-01-0145-FEDER-016414, cofinanciado pelo Programa Operacional Competitividade e Internacionalização e pelo Programa Operacional Regional de Lisboa, através do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) e por Fundos Nacionais Através da FCT – Fundação para a Ciência e Tecnologia. Agradeço o financiamento por parte destas entidades e a oportunidade de poder ter feito parte deste projeto.

Agradeço imenso a oportunidade que a minha orientadora, Professora Doutora Marta Carvalho, me deu para poder continuar os estudos na minha área de interesse, confiando em mim desde o primeiro dia, mantendo-me no rumo certo e motivado. Foram muitas reuniões, muitas conversas e, acima de tudo, uma grande cumplicidade que permitiu o desenvolvimento desta dissertação.

À minha co-orientadora, Mestre Patrícia Martins, por ter feito o esforço extra de me ajudar sempre que podia, acudindo-me nos dias de maior aflição com o ANSYS.

Ao Professor Doutor Telmo Santos, e ao grupo do NOVA NDT LAB, agradeço toda a ajuda e o espaço disponibilizado.

Aos meus colegas do laboratório estrutural, pois foram nove longos meses passados com vocês.

Agradeço ao meu colega Rui Santos pela ajuda na realização dos ensaios experimentais, ficando até mais tarde sempre que necessário.

Ao Mestre Valdemar Duarte, um muito obrigado por ter sempre a porta aberta para me tirar dúvidas e ajudar quando precisei, ao longos destes anos.

Muito obrigado a todos os que pude conhecer e fizeram parte da minha vida académica, em especial a dois grupos, a Geração'10 por terem sempre uma palavra de motivação e à Geração'13 por me terem acolhido, ajudado com os estudos e puxarem por mim quando mais precisei.

À minha família académica que me obrigou a tentar ser um exemplo desde o primeiro dia.

Ao meu grande amigo de longa data, André Teixeira, agradeço por ter sido aquele

chato que me fez estudar só para não ter de o aturar e ter sempre a palavra certa para me dar. Um grande obrigado pela tua amizade, conversas e influência na minha vida.

Aos meus pais por me terem moldado na pessoa que sou hoje, por todo o apoio e motivação, acreditando sempre que eu era capaz de aqui chegar, dando-me as melhores condições para isso.

Por fim, agradeço à minha irmã, Anita, por ter sido a razão principal de eu estar nesta fase final. Lutei para aqui chegar, por mim, mas porque tu estiveste sempre aqui para me apoiar, aturar e levantar sempre que precisei.

RESUMO

Esta dissertação insere-se no projeto FIBR3D, que tem como objetivo principal desenvolver um processo híbrido em fabrico aditivo de compósitos de matriz termoplástica reforçados com fibras longas ou contínuas.

Neste processo de manufatura, por vezes ocorrem defeitos, como vazios e delaminação entre as camadas de deposição, sendo necessárias inspeções para a deteção destes. Dos vários ensaios não destrutivos existentes, a técnica da termografia ativa produz bons resultados e é de fácil aplicação.

A simulação apresenta-se como uma ferramenta de grande importância e customização, pois permite analisar outros fenómenos físicos que não são possíveis obter por experimentação. Nesta dissertação, é realizado o desenvolvimento de modelos numéricos em ANSYS, utilizando a matriz de radiação, método ainda não muito utilizado no estado da arte, para a simulação dos ensaios não destrutivos de termografia ativa, apresentando os resultados numéricos e a respetiva discussão da sua validação. Os modelos desenvolvidos permitem acompanhar a customização existente, podendo realizar simulações para geometrias mais complexas sem necessidade de novos ensaios experimentais.

O recurso à simulação numérica provou ser de grande importância pois não foram necessários novos ensaios experimentais para analisar novas situações, como variação da profundidade do defeito e apresenta tempos computacionais reduzidos: cerca de cinco minutos para os modelos bidimensionais.

A utilização da matriz de radiação produziu boas aproximações e, comparativamente aos modelos de fluxo de calor existentes, permite um maior controlo de valores de temperatura e imposição de convecção em todas as superfícies. Também é possível concluir que o modo de reflexão produz melhores resultados.

Palavras-chave: ANSYS, Fabrico aditivo, Radiação, Simulação, Termografia ativa

ABSTRACT

This dissertation is part of the project FIBR3D, which has the main goal of developing a hybrid process in additive manufacturing using long or continuous fibre reinforcement thermoplastics.

In this process, defects like voids and delamination between deposition layers might happen, which lead to the necessity to detect them. Of the various non-destructive testing, the active thermography produces good results and is easy to apply.

The simulation is a tool of great importance and customization, as it allows to analyze other physical phenomena that are not possible to obtain by experimentation. In this dissertation, numerical models in ANSYS are developed using the radiation matrix, a method not yet widely used in the state of art, for non destructive tests of active thermography, presenting the numerical results and the respective discussion validation. The developed models allow to keep up with the existing customization, allowing to perform simulations for more complex geometries without the need of new experimental tests.

The use of numerical simulation proved to be of great importance since no new experimental tests were necessary to analyze new situations, such as variation of defect depth and presented reduced computational times: five minutes for the two-dimensional models.

The application of the radiation matrix produced good approximations and, when compared to the existing heat flow models, allows a greater control of temperature values and allows the imposition of convection on all surfaces. It is also possible to conclude that the mode of reflection produces better results.

Keywords: ANSYS, Additive manufacturing, Radiation, Simulation, Active Thermography

ÍNDICE

Lista de Figuras	xv
Lista de Tabelas	xix
Acrónimos	xxi
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento e objetivos	2
1.2 Estrutura da dissertação	4
2 Enquadramento científico	5
2.1 Termografia	5
2.1.1 Estado da arte da utilização de simulação para Termografia Ativa em materiais compósitos	7
2.2 Transmissão de calor	9
2.2.1 Condução	9
2.2.2 Condutividade térmica – materiais anisotrópicos	11
2.2.3 Convecção	12
2.2.4 Radiação	14
3 Desenvolvimento experimental	25
3.1 Ensaio de termografia	25
3.1.1 Equipamento e provete de ensaio	25
3.2 Estação de ensaios	27
3.3 Procedimento, montagem e apresentação de resultados	29
3.3.1 Transmissão - Uma fonte de calor	29
3.3.2 Reflexão - Duas fontes de calor	35
3.3.3 Transmissão e Reflexão - Duas fontes de calor	39
3.3.4 Conclusões	41
4 Validação dos modelos numéricos	45
4.1 Estudo de convergência de malha	47
4.1.1 Variação do número de elementos ao longo do comprimento	48
4.1.2 Variação do número de elementos ao longo da espessura	49

4.2	Modelo numérico bidimensional com fluxo de calor	50
4.3	Modelo numérico bidimensional com radiação - Uma fonte de calor . . .	55
4.4	Modelo numérico bidimensional com radiação - Duas fontes de calor . .	67
4.5	Modelos numéricos tridimensionais	71
5	Conclusões e desenvolvimentos futuros	77
	Bibliografia	79
I	Modelo com fluxo de calor	83
II	Modelo com uma fonte de calor	91
III	Modelo com duas fontes de calor	101
IV	Modelo tridimensional com fluxo	111
V	Modelo tridimensional com radiação	123

LISTA DE FIGURAS

1.1 Impressora 3D, marca <i>Ultimaker</i> , usada na produção do provete	3
2.1 Modos de ensaios: a) reflexão; b) transmissão	6
2.2 Tipos de imagem obtidas: a) escalas de cinzentos; b) escalas de azuis e vermelhos.	7
2.3 Representação da condução térmica em materiais cristalinos	11
2.4 Representação do gradiente de temperatura em materiais cristalinos	11
2.5 Distribuição dos materiais segundo a sua condutividade	12
2.6 Camada limite para transferência de calor em convecção	13
2.7 Representação do tipo de radiação segundo o seu comprimento de onda eletromagnética ou frequência	15
2.8 a) Emissão de radiação de uma área dA_1 , com um ângulo sólido, $d\omega$, que advém dA_n em um ponto em dA_1 ; b) Sistema de coordenadas esféricas	16
2.9 Definição de a) plano e b) ângulos sólidos	17
2.10 Representação do ângulo sólido, $d\omega$, que advém da área dA_n num ponto em dA_1 num sistema de coordenadas esférico	17
2.11 Representação da projeção de dA_1 , normal à direção normal da radiação	18
2.12 Representação da emissão numa hemisféria hipotética	19
2.13 Representação da radiação e irradiação numa superfície	20
2.14 Representação da radiação e irradiação numa superfície e radiosidade	21
2.15 Distribuição espectral de a) Absortividade espectral numa superfície e b) Irradiação espectral numa superfície	23
3.1 Provete utilizado no caso de estudo a) Provete ensaiado b) Geometria	26
3.2 Montagem da lâmpada: a) Vista exterior; b) Vista interior	26
3.3 Filtro	27
3.4 Estação de ensaios	28
3.5 Estação de ensaios. Vista frontal e superior	28
3.6 Montagem por transmissão	29
3.7 Exemplo de imagens retiradas do <i>software SmartView</i> . a) Sem tratamento; b) Sem apresentação de dados; c) Com os dados pretendidos.	31
3.8 Valores de temperatura (°C) ao longo do tempo (s) no centro do defeito, por transmissão	32

3.9	Valores de temperatura (°C) ao longo do tempo (s) fora do defeito, por transmissão	32
3.10	Diferenças entre curvas de cada ensaio em modo de transmissão	33
3.11	Representação das curvas do centro e fora do defeito do ensaio <i>IR4</i>	34
3.12	Representação da diferença das curvas do centro e fora do defeito do ensaio <i>IR4</i>	34
3.13	Imagem captada no instante de 53 segundos	34
3.14	Montagem por transmissão	35
3.15	Goniometro	36
3.16	Valores de temperatura (°C) ao longo do tempo (s) no centro do defeito, por reflexão	37
3.17	Valores de temperatura (°C) ao longo do tempo (s) fora do defeito, por reflexão	37
3.18	Diferenças entre curvas de cada ensaio no modo de reflexão	38
3.19	Representação das curvas do centro e fora do defeito do ensaio <i>IR11</i>	39
3.20	Representação da diferença das curvas do centro e fora do defeito do ensaio <i>IR11</i>	39
3.21	Imagem captada no instante de 53 segundos	40
3.22	Diferença entre curvas do Par 1	41
3.23	Diferença entre curvas do Par 2	41
3.24	Diferença entre curvas do Par 3	42
3.25	Diferença entre curvas do Par 4	42
3.26	Proteção da FC	43
3.27	Demonstração da radiação lateral: a) Chapa perpendicular à FC; b) Imagem retirada do ensaio; c) Chapa de cobre pintada	43
4.1	Malha criada com recurso ao comando <i>free</i>	47
4.2	Malha do tipo <i>mapped</i>	47
4.3	Elementos para análise térmica: a) <i>Plane55</i> ; b) <i>Plane77</i>	48
4.4	Gráfico de convergência da temperatura com o aumento de elementos ao longo do comprimento	49
4.5	Gráfico de convergência da temperatura com o aumento de elementos ao longo da espessura	50
4.6	Elemento superficial 2D <i>Surf151</i>	51
4.7	Exemplificação de imposição do elemento <i>SURF151</i>	51
4.8	Condições fronteira	52
4.9	Fluxo de calor constante	52
4.10	Comparação de curvas experimentais do ensaio <i>IR4</i> com as curvas numéricas	53
4.11	Comparação da diferença experimental do ensaio <i>IR4</i> com a diferença numérica	54
4.12	Representação da temperatura no modelo	54
4.13	Perfil de temperatura na superfície inferior	54
4.14	Elemento <i>LINK33</i> utilizado para a radiação	55

4.15	Representação do eixo de coordenadas da FC e da superfície aquecida (face superior)	56
4.16	Numeração dos elementos	56
4.17	Representação gráfica da distribuição da temperatura da lâmpada	58
4.18	Representação das curvas numéricas por modo de transmissão com uma FC e radiação	59
4.19	Diferença entre curvas numéricas	59
4.20	Comparação de curvas experimentais do ensaio <i>IR4</i> com as curvas numéricas por modo de transmissão com uma FC e radiação	60
4.21	Comparação da diferença experimental do ensaio <i>IR4</i> com a diferença numérica por modo de transmissão com uma FC e radiação	60
4.22	Representação da diferença entre curvas experimentais e numéricas fora do defeito e valor da soma das diferenças associado	61
4.23	Representação da diferença entre curvas experimentais e numéricas no centro do defeito e valor da soma das diferenças associado	61
4.24	Representação da diferença entre curvas experimentais e numéricas e valor da soma das diferenças associado	62
4.25	Representação da temperatura no modelo	63
4.26	Perfil de temperatura na superfície inferior com radiação	63
4.27	Variação do coeficiente de convecção na superfície inferior	63
4.28	Temperatura vs Variação da distância da FC ao provete	64
4.29	Diferença de temperatura vs Variação da distância da FC	64
4.30	Diferença de temperatura vs Variação da profundidade do defeito	65
4.31	Representação de curvas numéricas variando a profundidade do defeito (à esquerda) e diferença de temperaturas (à direita)	66
4.32	Numeração dos elementos para duas FC	67
4.33	Comparação das curvas experimentais do modo de transmissão do ensaio <i>IR12</i> com as curvas numéricas	67
4.34	Comparação das curvas experimentais do modo de reflexão do ensaio <i>IR13</i> com as curvas numéricas	68
4.35	Diferença entre curvas no modo de transmissão	68
4.36	Diferença entre curvas no modo de reflexão	69
4.37	Representação de curvas numéricas para um ângulo das FC de 30° e diferença de temperaturas	70
4.38	Representação de curvas numéricas para um ângulo das FC de 45° e diferença de temperaturas	70
4.39	Representação de curvas numéricas para um ângulo das FC de 55° e diferença de temperaturas	70
4.40	Representação de curvas numéricas para um ângulo das FC de 75° e diferença de temperaturas	71
4.41	Elementos para análise tridimensional térmica: a) <i>Solid70</i> ; b) <i>Solid90</i>	71

4.42	Elemento superficial 3D <i>Surf152</i>	72
4.43	Representação do volume do provete dimensionado em <i>ANSYS</i>	73
4.44	Representação das curvas do centro e fora do defeito do ensaio <i>IR4</i> e das curvas do modelo numérico	73
4.45	Representação da diferença das curvas do centro e fora do defeito do ensaio <i>IR4</i>	74
4.46	Comparação de imagens obtidas: a) <i>Frame</i> adquirido aos 55 segundos b) Imagem retirada do modelo numérico aos 55 segundos	74
4.47	Elemento superficial 3D <i>Shell131</i>	75
4.48	Representação do volume do provete e da fonte de calor	75

LISTA DE TABELAS

2.1	Vantagens e desvantagens da Termografia Ativa	6
2.2	Valores típicos de convecção	14
3.1	Propriedades materiais do provete PA-12	25
3.2	Valores de temperatura ambiente (T_{amb}) e temperatura do provete (T_p) . . .	31
3.3	Valores de temperatura ambiente (T_{amb}) e temperatura do provete (T_p) por modo de reflexão	36
3.4	Valores de diferença de temperatura (Dif_{max}) e intervalo de tempo (s) por modo de reflexão	38
3.5	Valores de temperatura ambiente (T_{amb}) e temperatura do provete (T_p) por modo de reflexão (R) e transmissão (T)	40
3.6	Valores de diferença de temperatura (Dif_{max}) e intervalo de tempo (s) por modo de reflexão e transmissão	40
3.7	Valores da diferença máxima (Dif_{max}) de temperaturas entre curvas para os pares observados	43
4.1	Valores de Nusselt para placa vertical e fluxo de calor uniforme	46
4.2	Valores de convecção	46
4.3	Valores de temperatura e tempo de análise necessários para cada malha (comprimento)	49
4.4	Valores de temperatura e tempo de análise necessários para cada malha (espessura)	50
4.5	Propriedades físicas do ar	53
4.6	Comparação de modos	57
4.7	Valores de temperatura ao longo do tempo para a lâmpada	58
4.8	Soma das diferenças ao quadrado entre respostas experimentais e respostas numéricas	61
4.9	Valores da diferença de temperatura máxima (Dif_{max}) e o instante em que ocorre	69

ACRÓNIMOS

Simbologia

$\alpha_{\lambda,\delta}$ Absorcividade

$d\omega$ Ângulo sólido

C_p Calor específico

h Coeficiente de convecção

λ Comprimento de onda

k Condutividade térmica

σ Constante de Stefan-Boltzmann

ρ Densidade

ϵ Emissividade

L Espessura da placa

F_{ij} Fator forma entre superfície i e superfície j

q''_x Fluxo de calor em x

q''_y Fluxo de calor em y

q''_z Fluxo de calor em z

q'' Fluxo de calor

ν Frequência de onda

$I_{\lambda,e}$ Intensidade espectral da radiação emitida

I_e Intensidade total da radiação emitida

$I_{\lambda,b}$ Intensidade espectral da radiação emitida de um corpo negro

I_b Intensidade total de um corpo negro

ACRÓNIMOS

G_λ Irradiação espectral

G Irradiação total

Nu Número de Nusselts

Pr Número de Prandlt

Ra Número de Rayleigh

r Raio da esfera

q_x Taxa de transferência de calor em x

$k_{x,y,z}$ Tensor de condutividade térmica

E_λ Poder emissivo espectral

E Poder emissivo total

$E_{\lambda,b}$ Poder emissivo espectral de um corpo negro

E_b Poder emissivo total de um corpo negro

J_λ Radiosidade espectral

$\rho_{\lambda,\delta}$ Refletividade

T_{amb} Temperatura ambiente

T_∞ Temperatura do fluido

T_p Temperatura do provete

T_s Temperatura da superfície

τ_λ Transmissividade

c Velocidade da luz

c_0 Velocidade da luz no vácuo

Abreviaturas

ABS Acrilonitrila Butadieno Estireno

APDL Ansys Parametric Design Language

CFRP *Carbon Fiber-Reinforced Polymer*

DAC *Digital-to-Analog Converter*

END Ensaios Não destrutivos

FA Fabrico Aditivo

FC Fonte de Calor

FD Fora do Defeito

FDM *Fused Deposition Modeling*

FLIPT *Flying Laser Inner-Probing Termography*

GDL Grau de liberdade

LOM *Laminated Object Manufacturing*

MA Manufatura Aditiva

MEF Método de Elementos Finitos

Ni-Ti Liga metálica composta por níquel e titânio

PEEK Poliéter-eter-cetona

PLA Poliacido Láctico

SLA *Stereolithograpgy*

SLM *Selective Laser Melting*

TA Termografia Ativa

TPFR Termoplásticos Reforçados com Fibra

WAAM *Wire Arc Additive Manufacturing*

INTRODUÇÃO

A necessidade de conhecimento sobre materiais compósitos está em constante crescimento. Estes estão a tornar-se muito importantes devido à sua relação densidade/resistência e custo de produção inferior quando comparado com os materiais existentes no mercado, pelo que começam a ser muito requisitados em áreas como a indústria automóvel, aeronáutica e aeroespacial.

Com o crescente interesse e a necessidade em utilizar estes tipos de materiais é de extrema importância conhecer e desenvolver métodos que garantam a produção destes materiais. O projeto intitulado "*Processos híbridos baseados em Fabrico Aditivo de compósitos de matriz termoplástica reforçados com fibras longas ou contínuas*", conhecido por *FIBR3D*¹, tem como objetivo inovar e melhorar os processos de fabrico aditivo (FA) desenvolvendo um processo híbrido e integrado (*all-in-one*) baseado em FA combinado com fabrico subtrativo para produção de geometrias 3D complexas em compósitos de matriz termoplástica reforçados com fibras longas ou contínuas. O projeto *FIBR3D* apresenta um modo de produção ecológica, que juntamente com suas vantagens de ponta em torno da engenharia de produto e aspetos de produtividade realça o impacto deste projeto a nível científico, tecnológico, económico e social.

No desenvolvimento deste processo é natural que ocorram defeitos nas peças criadas tais como vazios, fissuras superficiais ou internas, delaminação, entre outros, defeitos estes que podem ser reduzidos e detetados com a otimização dos processos e técnicas de deteção de defeitos. Existem várias técnicas que permitem a deteção de defeitos. Para o caso em que não se pretende comprometer a integridade do material, existem as técnicas

¹Projeto com a referência POCI-01-0145-FEDER-016414 é cofinanciado pelo Programa Operacional Competitividade e Internacionalização e pelo Programa Operacional Regional de Lisboa, através do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) e por fundos nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e Tecnologia. Este é realizado em consórcio com o INEGI, IDMEC, UM, UA e com o UNIDEMI da FCT NOVA.

de ensaios não destrutivos (END). Logo é importante para o projeto *FIBR3D* melhorar e desenvolver novas técnicas que melhorem a qualidade do processo híbrido. Existem vários métodos, sendo os mais utilizados a radiografia, ultra-som, correntes induzidas e termografia.

Simão [1] elaborou um estudo sobre vários métodos de END e a sua aplicabilidade devido às propriedades dos materiais obtidos por FA (PLA, ABS, NYLON), alguns com fibras Ni-Ti introduzidas e defeitos de delaminação. Concluiu que as correntes induzidas não produzem resultados a não ser que a fibra seja um material metálico, enquanto que a radiografia revelou-se um método de difícil aplicação. No caso dos ultra-som, devido ao elevado coeficiente de atenuação das ondas em materiais poliméricos, os resultados podem não ser os melhores e a caracterização de sondas pode ter custos acrescidos, existindo a necessidade de um acopolante (água, gel). Assim, o método que produziu melhores resultados foi a termografia pois não necessita de contacto, permite análises em grandes áreas e é fácil de se interpretar.

Como alternativa à realização de vários END surge a opção de fazer simulações. Em vez de um procedimento por tentativa e erro na realização de ensaios experimentais para melhor conhecimentos dos END em materiais compósitos, a simulação é uma opção que possibilita a diminuição de custos para além de possibilitar a compreensão de fenómenos físicos na totalidade.

Assim, com o desenvolvimento de um modelo numérico validado para uma resposta medida experimentalmente, é possível avaliar variações de parâmetros como distância da fonte de calor, profundidade do defeito, densidade do material, previamente à realização dos END permitindo assim reduzir os custos inerentes à realização dos ensaios.

1.1 Enquadramento e objetivos

Como mencionado, este tema está enquadrado no projeto *FIBR3D*. Este projeto prende-se com o estudo da recente tecnologia de FA, a fim de melhorar o estado da arte existente em termoplásticos reforçados com fibras (TPRF) e parametrização de processos.

A manufatura aditiva (MA) é uma tecnologia que permite a criação de geometrias 3D através da deposição de material por camada. Esta tecnologia tem como recurso o uso de *softwares* de desenho gráfico para a criação de peças, que, após serem convertidas, podem ser impressas. Este processo é denominado de fabrico aditivo, devido ao facto de a deposição de material ser feita camada a camada, permitindo criar geometrias tridimensionais complexas. O FA pode ser aplicado de várias formas: *Fused Deposition Modeling* (FDM), *Selective Laser Melting* (SLM), *Wire Arc Additive Manufacturing* (WAAM), *Stereolithography* (SLA), *Selective Laser Sintering* (SLS) e *Laminated Object Manufacturing* (LOM).

A figura 1.1 representa a impressora utilizada na impressão do provete. As impressoras 3D são atualmente vendidas em estabelecimentos físicos, o que leva a uma fácil comercialização, demonstrando que o crescimento da tecnologia de FA não tem sido só a nível científico como também a nível tecnológico. Este método permite o uso de uma

vasta gama de materiais, sendo os mais conhecidos o PLA, ABS, NYLON e recentemente o PEEK. Este último método também faz parte do projeto FIBR3D, em que um processo híbrido, que permita a criação de camada a camada da geometria pretendida exista a par com a adição de fibras de reforço, melhorando as propriedades do material final, que é o objetivo principal.

O recurso à simulação tem um grande peso em tecnologia e engenharia. Desenvolver modelos numéricos, e com recurso a *solvers* comerciais, como *ANSYS*, *LS-Dyna*, *ABAQUS*, para realizar as simulações de modelos validados, é possível estimar resultados sem que para isso seja necessário a realização de novos ensaios experimentais. A simulação ganha uma importância cada vez maior devido aos avanços tecnológicos, levando à existência de *hardware* com especificações cada vez melhores e que promovem uma redução do tempo computacional.

Esta dissertação tem como objetivo principal o desenvolvimento de modelos numéricos que simulam o END de termografia. O levantamento do estado da arte apresenta estudos com base na utilização do fluxo de calor, utilização que apresenta algumas limitações para o caso do uso do *solver ANSYS*. Estes modelos não permitem a imposição de convecção e fluxo de calor na mesma superfície. Assim, para apresentar modelos numéricos que permitam uma melhor representação das trocas de calor existentes durante o END, foi utilizada uma abordagem pouco usada no estado da arte. Para a simulação da troca de calor é implementado o fenómeno físico da radiação que permite a utilização da convecção na superfície aquecida e um controlo maior da temperatura e a respetiva validação dos modelos com ensaios experimentais realizados no NOVA NDT LAB, no DEMI da FCT-NOVA.

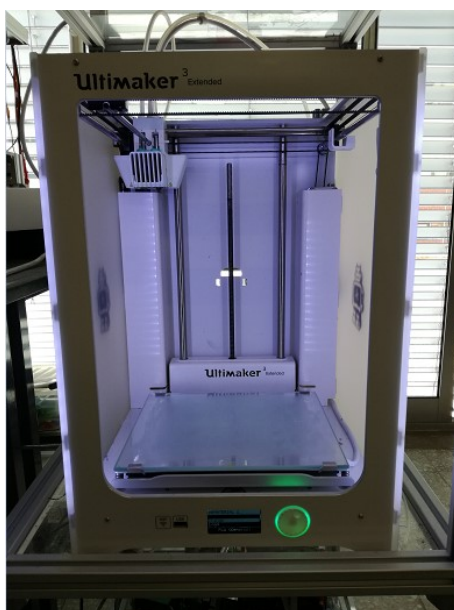


Figura 1.1: Impressora 3D, marca *Ultimaker*, usada na produção do provete

1.2 Estrutura da dissertação

A presente dissertação é composta por cinco capítulos. O capítulo atual tem como propósito uma introdução ao tema, apresentando os temas importantes para o seu enquadramento e qual o objetivo da dissertação.

No capítulo 2 será apresentado o estado da arte da simulação numérica para os END e o conteúdo teórico necessário para o desenvolvimento da dissertação abordando o END de termografia e transmissão do calor.

O capítulo 3 apresenta uma breve explicação da mesa de ensaios, resultados experimentais obtidos para validação numérica e conclusões sobre o END por TA.

No capítulo 4 é apresentado o desenvolvimento dos modelos numéricos bidimensionais e tridimensionais, explicando as escolhas de malhas, elementos, criação da matriz de radiação, apresentando comparações com os resultados experimentais. Neste capítulo também são feitas simulações com variações de parâmetros sem que para isso tivesse sido necessário a realização de mais procedimentos experimentais.

O capítulo 5 é o capítulo final, onde são apresentadas as conclusões finais sobre os modelos numéricos, discutindo a sua validação e bem como apresentando ideias para desenvolvimentos futuros.

ENQUADRAMENTO CIENTÍFICO

Neste capítulo é apresentado o conteúdo teórico necessário para um melhor entendimento dos temas apresentados na realização do desenvolvimento experimental e da validação dos modelos numéricos. Será apresentada uma breve introdução aos infravermelhos e a sua origem, o enquadramento da técnica de Termografia Ativa, apresentando subcapítulos que mencionam a comparação com outras técnicas, e o estado de arte da utilização de modelos numéricos para a aplicação desta técnica. Por fim, são introduzidos os conceitos teóricos de transmissão de calor: condução, convecção e radiação.

2.1 Termografia

Os ensaios não destrutivos (END) são ensaios de grande importância, pois permitem a inspeção dos mais variados tipos de materiais sem afetar a sua integridade. Estes surgiram da necessidade da inspeção de materiais a fim de garantir o seu funcionamento e ciclo de vida sem colocar em risco a integridade humana. Os END permitem assim a deteção de defeitos como vazios, poros, fissuras, entre outros seja na sua produção ou já quando se encontram em funcionamento.

A presente dissertação terá como foco o END da termografia ativa, sendo este método um dos pretendidos a ser usados no projeto *FIBR3D*, sendo os outros métodos ultra-som, correntes induzidas e radiografia.

A termografia pode ser passiva ou ativa. Na termografia passiva, o material a inspeccionar encontra-se a uma temperatura diferente da temperatura ambiente. Esta é mais utilizada no acompanhamento de processos industriais, onde é necessário o controlo de temperatura. Na termografia ativa (TA), o material é estimulado por uma fonte externa. Esta estimulação pode ser realizada por dispositivos mecânicos (vibrotermografia), elétricos (correntes induzidas) ou térmicos (pulsado ou transitório).

A TA pode ser feita por reflexão, representada na figura 2.1a, onde a fonte de calor se encontra no mesmo lado em que se encontra a câmara, ou por transmissão, representada na figura 2.1b, onde a fonte de calor e a câmara se encontram em faces opostas. Assim, por transmissão os defeitos são detetados em zonas onde a temperatura é inferior à zona sem defeito e por reflexão ocorre o contrário.

Com recurso a *softwares* próprios, a imagem final pode sofrer tratamento. Esta situação está demonstrada nas figuras 2.2a e 2.2b. A figura 2.2a apresenta uma captura de imagem em escala de cinzento e a figura 2.2b a mesma imagem mas em escala de vermelho/azul. Este tipo de ensaio apresenta as suas vantagens e desvantagens, mencionadas na tabela 2.1. A TA é um ensaio bastante usado, pois, quando comparado com os restantes - correntes induzidas e ultra-som - tem um custo de aplicação menor, bem como é de muito fácil aplicação. As câmaras podem apresentar custos elevados, mas devido ao coeficiente de atenuação de ondas em materiais poliméricos na aplicação dos ultra-som, apresentam uma maior facilidade em obter resultados.

Tabela 2.1: Vantagens e desvantagens da Termografia Ativa. Retirado de [1]

Vantagens	Desvantagens
· Baixo custo da técnica	· Dificuldade na obtenção de uma excitação térmica rápida, uniforme e de alta energia em superfícies de grandes dimensões
· Facilidade de operação	· As perdas térmicas produzem contrastes térmicos com efeitos prejudiciais sobre a fiabilidade dos resultados
· Rápida capacidade de deteção	· Custo do equipamento
· Elevada área inspecionada	· Limitado à deteção de defeitos resultantes de variações térmicas consideráveis
· Sem contacto	· Problemas na emissividade de alguns materiais



(a)



(b)

Figura 2.1: Modos de ensaios: a) reflexão; b) transmissão

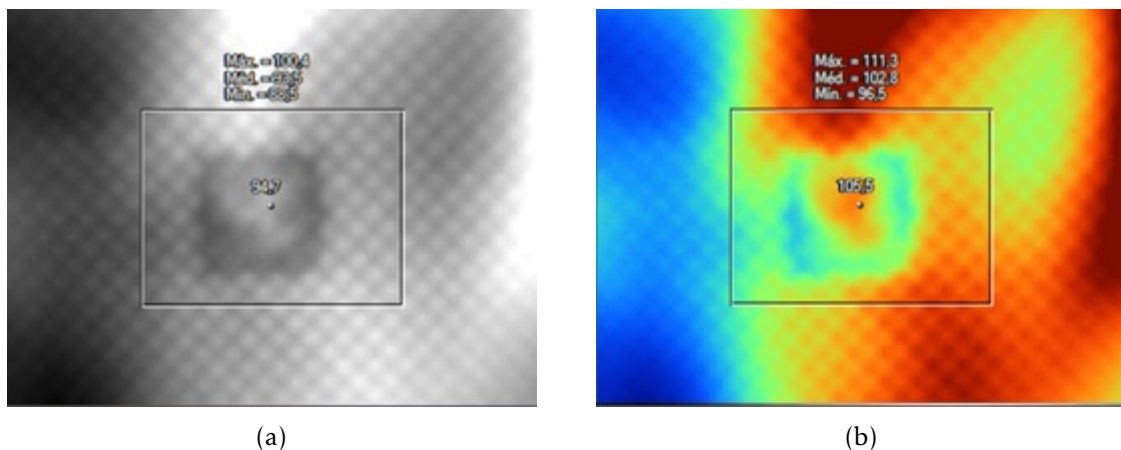


Figura 2.2: Tipos de imagem obtidas: a) escalas de cinzentos; b) escalas de azuis e vermelhos. Retirado de [1]

2.1.1 Estado da arte da utilização de simulação para Termografia Ativa em materiais compósitos

Com o atual crescimento da utilização de materiais compósitos na indústria aeronáutica, automóvel e aeroespacial, devido à possibilidade de se usar materiais mais leves que suportam grandes esforços, torna-se importante garantir métodos atualizados que permitam a detecção de defeitos.

A fim de estudar os defeitos em fibra de carbono (CFRP), Avdelidis et al [2] investigaram a utilização de termografia pulsada para a detecção de defeitos de diferentes dimensões a diferentes profundidades. Para realizar o ensaio em regime transiente, foi necessário o uso do *software TermoCALc3D*, usado para o método de diferenças finitas, concluindo que os modelos numéricos produziram bons resultados. Apesar disso, o método de diferenças finitas não é próprio para o estudo de geometrias complexas.

Krishnapillai et al [3] utilizaram os métodos dos elementos finitos (MEF), utilizando o *software NE-NASTRAN*, que permite, ao contrário de outros *softwares* comerciais como *ANSYS*, *MSC-NASTRAN* ou *ABAQUS*, a utilização de elementos hexaedros de 21 nós. Segundo os autores, estes elementos são mais estáveis e flexíveis, podendo ser utilizados em formulações 3D.

Mabrouki et al [4] realizaram ensaios em placas de aço por vibrotermografia para detectar fissuras até 0,1 mm. Este método caracteriza-se por impôr periodicamente vibrações no material. Estas vibrações são impostas por piezoelétricos. As vibrações impostas como energia mecânica, levam à libertação de calor, o que eleva a temperatura do material, permitindo detectar os defeitos. Os autores usaram o *software MSC-MARC* que permite realizar análises termomecânicas acopladas e foram usados elementos sólidos 3D hexaedros, a fim de saber quais seriam as frequências naturais do material, os seus modos de vibração e a temperatura. Este modelo apresentou um erro máximo de 2,13 % de temperatura e permitiu verificar que a distribuição de tensões de *Von Mises* gerada devido às

vibrações não afeta o material.

Num outro estudo, Mabrouki et al [5] aplicaram o mesmo método de vibrotermografia, em alumínio. O modelo numérico apresentou um erro de 0,46 % nos valores de temperatura e foi possível concluir que a temperatura no extremo do defeito depende da frequência aplicada.

Pieczonka et al [6] desenvolveram um modelo numérico para simulação da detecção de defeitos por impacto em compósitos pelo método de vibrotermografia. Os autores utilizam o *software LS-Dyna* e concluíram que o modelo apresentou bons resultados, mas que existe uma dificuldade em saber as características térmicas de materiais compósitos e que o modelo apresentado tem custos computacionais elevados.

Em 2006, Krishnapillai et al [7] apresentaram um modelo numérico 2D para a termografia em compósitos. Os autores simularam um defeito por delaminação e não conseguiram obter resultados satisfatórios aconselhando, um melhoramento nos processos de detecção por TA.

Com o avanço da tecnologia, o processo de TA melhorou e, em 2014, Waugh et al [8] criaram um modelo 2D por MEF, com recurso ao *software ANSYS* para alumínio e CFRP, em que os resultados obtidos das simulações numéricas foram comparados com os resultados obtidos experimentalmente, tendo sido já obtida uma boa correlação com os modelos numéricos.

A simulação da anisotropia dos materiais compósitos é uma das dificuldades no desenvolvimento de modelos numéricos. Peeters et al [9] apresenta um modelo com recurso ao *software COMSOL Multiphysics* para CFRP, considerando a condutividade térmica para cada camada, estando estas a 0° e 90° em relação ao eixo do X e considerando que entre camadas existe uma camada muito fina de *epoxy*. Os autores realizaram primeiro uma otimização dos valores da condutividade térmica até atingir um erro de $2,5 \times 10^{-3}$. Estes valores são introduzidos num novo modelo para simular, o que permitiu uma melhor detecção de defeitos a profundidades maiores que 0,403 mm do que outros modelos numéricos apresentados, mas que, em contrapartida, exige um custo computacional muito elevado.

Previamente a este trabalho, Peeters et al [10] utilizaram o mesmo *software* com o objetivo de comparar os valores obtidos pelo processo experimental com os obtidos numericamente, a fim de otimizar as propriedades físicas do material no modelo até que o erro entre valores seja o esperado ou menor, sendo que 11670 segundos (≈ 3 horas) foi o maior tempo computacional de otimização.

Os autores Grosso et al [11] realizaram simulações e validações de um compósito em que a detecção de defeitos foi conseguida a uma profundidade de 6-12mm e fizeram uma relação do diâmetro com a profundidade do defeito.

Uma relação entre parâmetros é apresentada por Inagaki et al [12]. Estes apresentam resultados na detecção de defeitos, variando a profundidade (2-8 mm) e com uma largura de 10 mm e relacionando a diferença da temperatura com a difusividade do material para cada caso, concluíram que a diferença de temperaturas aumenta com o aumento

do tamanho do defeito e a sua profundidade e diminui com o aumento da difusividade. Foi também possível concluir que os defeitos apresentam uma melhor resolução para diferenças de temperaturas superiores a 0,2 K.

Como novos métodos de aplicação do método de TA, Barus et al [13] apresentam uma nova ideia. Os autores identificaram que um dos problemas associados ao ensaio são as lâmpadas usadas e a dispersão da radiação. As lâmpadas não possibilitam um aquecimento uniforme na superfície, o que afeta a comparação com modelos numéricos. Como solução, apresentam uma estação de ensaios em que a lâmpada está envolta por um aço mais resistente, pintado de preto, diminuindo o raio de propagação da radiação. Uma lente convergente é colocada no seguimento da lâmpada, focando o calor na superfície. Os autores também desenvolveram um modelo numérico tridimensional com recurso ao *software ABAQUS* que apresenta uma boa relação entre valores experimentais e numéricos.

A utilização de laser como fonte de aquecimento, em vez das típicas lâmpadas de halógeno, tem aumentado. O comprimento de onda de funcionamento permite o aquecimento da superfície e, como esta se pode encontrar fora do comprimento de onda detetado pela câmara térmica, é possível realizar ensaios por reflexão ao mesmo tempo que o laser está em funcionamento [14].

Os autores Montinaro et al [15] apresentam um novo método de TA com recurso a um laser, denominado de *Flying Laser Inner-Probing Thermography* (FLIPT), para uma análise de desconexões interlaminares em laminados de fibra de metal. Neste método, o laser executa um varrimento na superfície, aquecendo-a, permitindo detetar fissuras paralelas à superfície durante o arrefecimento. Um modelo numérico tridimensional foi desenvolvido tendo os autores obtido valores aceitáveis, existindo diferenças na zona dos defeitos, sendo necessário um melhoramento na criação do defeito no procedimento experimental.

2.2 Transmissão de calor

O estudo da transmissão de calor permite quantificar o tempo necessário para levar dois sistemas entre estados diferentes, ou seja, permite quantificar o tempo em que decorre a transferência de energia térmica numa dada situação. Existem três modos de transmissão: condução, convecção e radiação.

2.2.1 Condução

Condução é o modo de transmissão de calor de zonas de temperaturas mais elevadas para zonas de temperaturas mais baixas, devido à interação entre partículas elementares. Esta interação pode ser em fluidos (moléculas), sólidos não condutores (vibrações de átomos na estrutura cristalina) e sólidos condutores (eletrões livres).

Esta condução do calor é descrita pela expressão 2.1:

$$q_x = kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2.1)$$

Em que q_x é a taxa de transferência de calor (W), k a condutividade térmica ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), A a área de secção (m^2), ΔT a diferença de temperatura (K) e Δx o comprimento (m) em x . A condutividade térmica k pode ser descrita como a propriedade do material em difundir o calor [16].

A figura 2.3 representa a transferência de calor por condução em materiais cristalinos em que as moléculas são sujeitas a uma onda de calor e transmitem a energia para a sua vizinhança através de vibrações.

Se a taxa de transferência de calor for dividida pela área, é obtida expressão 2.2

$$q_x'' = \frac{q_x}{A} = -k \frac{dT}{dx} \quad (2.2)$$

Em que q_x'' é o fluxo de calor ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$). Esta expressão é conhecida como a *Lei de Fourier*. Esta lei é a base da transferência de calor por condução e é aplicada em qualquer matéria em qualquer estado - sólido, líquido ou gasoso. A relação $\frac{dT}{dx}$ representa o gradiente da temperatura, por vezes representado como ∇T , e tem sinal negativo pois representa o calor transmitido no sentido das temperaturas, sendo da mais elevada para a menos quente. Esta expressão representa o fluxo na direção x . O fluxo de calor pode ser descrito de uma forma mais genérica pela equação 2.3:

$$q'' = -k\nabla T = -k \left(i \frac{\delta T}{\delta x} + j \frac{\delta T}{\delta y} + k \frac{\delta T}{\delta z} \right) \quad (2.3)$$

É de mencionar que a equação 2.3 tem em consideração que o meio onde ocorre a condução é isotrópico. Devido a esta condição, a condutividade térmica é independente da direção. Decompondo a equação 2.3 em coordenadas cartesianas, obtém-se a equação 2.4:

$$q_x'' = -k \frac{\delta T}{\delta x} \quad q_y'' = -k \frac{\delta T}{\delta y} \quad q_z'' = -k \frac{\delta T}{\delta z} \quad (2.4)$$

Cada componente da equação 2.4 relaciona o fluxo de calor numa superfície com o gradiente de temperatura, numa direção perpendicular à superfície.

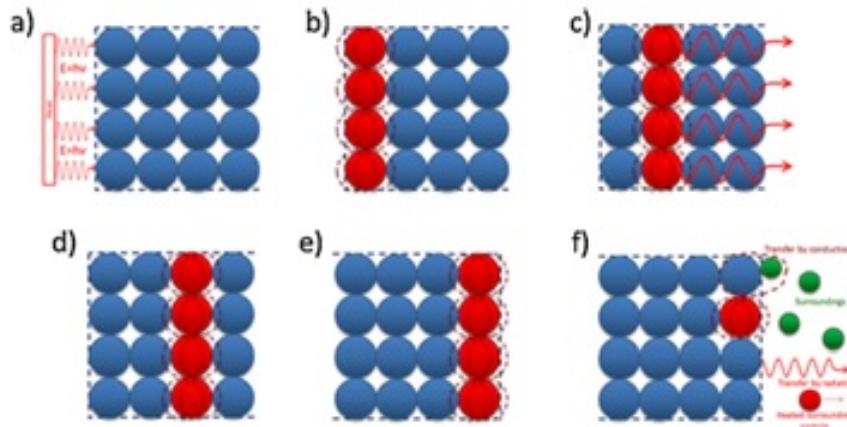


Figura 2.3: Representação da condução térmica em materiais cristalinos [16]

A figura 2.4 demonstra a transferência de calor entre moléculas pelo gradiente. A diferença entre esta figura e a figura 2.3 é que o gradiente representa o sentido em que a temperatura se transfere entre moléculas.

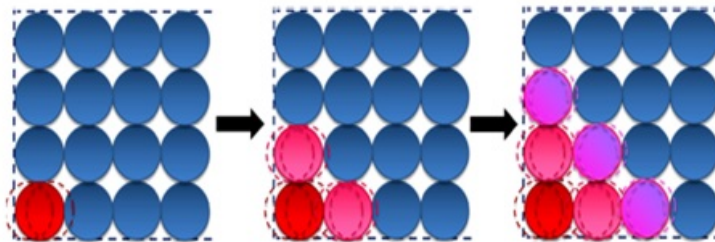


Figura 2.4: Representação do gradiente de temperatura em materiais cristalinos [16]

2.2.2 Condutividade térmica – materiais anisotrópicos

Quando se considera um comportamento isotrópico, está-se a assumir que as propriedades do material são uniformes em todas as direções. Num material composto, composto por várias camadas laminares, o comportamento passa a ser anisotrópico, as propriedades variam com as direções, logo a condutividade térmica varia também. Segundo Burger et al [16], quando é considerado o comportamento anisotrópico, a condutividade térmica passa a ser um tensor que varia segundo a posição e a orientação das camadas como representado na equação 2.5:

$$k_{x,y,z,T} = \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_{yy} & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

A condutividade é uma propriedade do material que está sujeita às características deste. Numa vasta gama de materiais os valores de condutividades mais altas estão associados aos materiais metálicos - por exemplo, alumínio e cobre - e os valores mais baixos estão associados a materiais isolantes e líquidos - como polímeros, compósitos ou óleo. A figura 2.5 representa a distribuição simples da condutividade segundo as características dos materiais.

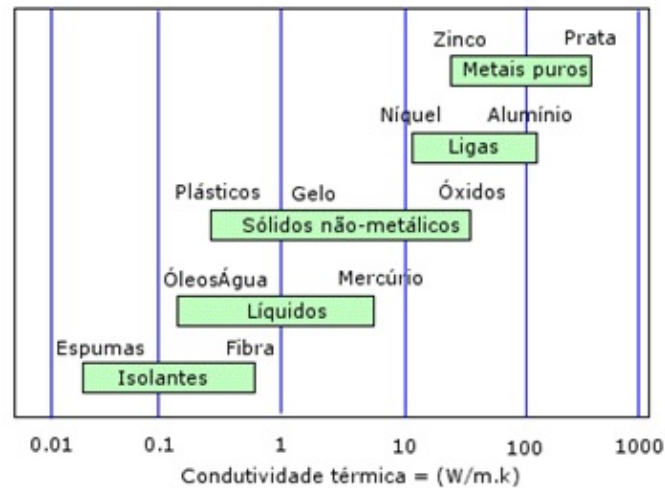


Figura 2.5: Distribuição dos materiais segundo a sua condutividade

Os autores Peeters et al [9] criaram um modelo numérico de otimização para descobrir a difusividade térmica em materiais anisotrópicos, de modo a melhorar a deteção de defeitos, considerando que o material era composto por camadas com 0° e 90°. No seu trabalho, enunciam duas outras publicações, Pilling et al [17] e Mirmira et al [18]. Estes autores apresentam nos seus trabalhos duas equações: a equação 2.6, e a equação 2.7. Estas equações relacionam a condutividade térmica nas camadas longitudinalmente (*long*), transversalmente (*trans*) e tendo em consideração a condutividade térmica da camada entre a fibra e a matriz (*eps*). Assim, o tensor é respetivamente:

$$k_{0^\circ} = \begin{bmatrix} k_{long} & 0 & 0 \\ 0 & k_{trans} & 0 \\ 0 & 0 & k_{trans} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$$k_{90^\circ} = \begin{bmatrix} k_{trans} & 0 & 0 \\ 0 & k_{long} & 0 \\ 0 & 0 & k_{trans} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

2.2.3 Convecção

Convecção é o modo de transmissão de calor entre um fluido e a superfície de um sólido, que ocorre como consequência do movimento relativo entre estes, criando uma camada

limite térmica (figura 2.6), devido à existência de diferença de temperaturas entre o fluido e a superfície do sólido.

A convecção pode ser natural ou forçada. A convecção natural dá-se quando o escoamento é devido a forças de impulsão, resultantes da diferença de densidades causadas por variações de temperatura no fluido. A convecção forçada, como o nome indica, ocorre quando o escoamento é induzido artificialmente ou devido ao vento atmosférico.

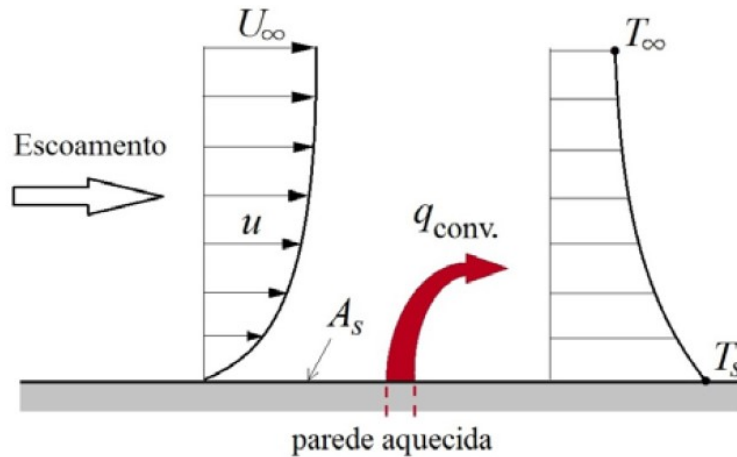


Figura 2.6: Camada limite para transferência de calor em convecção

Independentemente do tipo de convecção, o fluxo de calor pode ser descrito pela equação 2.8, a que se dá o nome de *Lei do Arrefecimento de Newton*:

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \quad (2.8)$$

Em que q'' é o fluxo de calor convectivo (W.m^{-2}), h é o coeficiente de convecção ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$), T_s a temperatura de superfície (K) e T_∞ a temperatura do fluido (K).

Se a transferência de calor está a ocorrer da superfície para o fluido, diz-se que o fluxo de calor convectivo é positivo (equação 2.8); caso a transferência esteja a ocorrer para a superfície é negativo, sendo descrito pela equação 2.9:

$$q'' = h(T_\infty - T_s) \quad (2.9)$$

A tabela 2.2 representa a gama de valores da convecção para vários casos. Para o provete da presente dissertação, o caso é o da existência de convecção natural quando envolvida num fluido, representado na tabela como gás.

Churchill et al [19] deduziram várias fórmulas que permitem o cálculo do número de *Nusselt*, Nu . O número de *Nusselt* é um valor adimensional que relaciona as trocas de calor por convecção e as trocas de calor por condução entre um sólido e um fluido, sendo descrito como:

$$Nu = \frac{\text{Transf. de calor por conv}}{\text{Transf. de calor por cond}} = \frac{h}{\frac{k}{L}} = \frac{hL}{k} \quad (2.10)$$

Churchill et al [19] apresentam algumas expressões, das quais as mais importantes para o estudo desta dissertação são as 2.11 e 2.12.

Tabela 2.2: Valores típicos de convecção

Caso	Valores tipo de h (W.m ⁻² .K ⁻¹)
Natural em gases	2 - 25
Natural em líquidos	10 - 1000
Forçada em gases	25 - 250
Forçada em líquidos	50 - 20000
Ebulição e condensação	2500 - 100000

$$Nu^{1/2} = 0,825 + \frac{(0,387Ra^{(1/6)})}{[1 + (0,492/Pr)^{(9/16)}]^{(8/27)}} \quad (2.11)$$

$$Nu^{1/2} = 0,825 + \frac{0,387Ra^{(1/6)}}{[1 + (0,437/Pr)^{(9/16)}]^{(8/27)}} \quad (2.12)$$

Em que Ra é o número de *Rayleigh* e Pr o número de *Prandtl*.

A expressão 2.11 permite calcular o número de *Nusselt* para uma placa vertical e a expressão 2.12 permite calcular o número de *Nusselt* para o caso de um fluxo de calor uniforme.

Nesta dissertação, o estudo elaborado será de uma placa vertical sujeita a uma fonte de calor (uniforme) durante um instante de tempo, realizando ensaios experimentais e a sua simulação. O coeficiente de convecção é, então, um dado importante na simulação e pode ser calculado pelas expressões apresentadas, sendo que o coeficiente de convecção surge pela disposição da expressão 2.10 em ordem a esta, originado a expressão 2.13:

$$h = \frac{Nu.L}{k} \quad (2.13)$$

Em que L é a espessura da placa (m) e k a condutividade do fluido (W.m⁻¹.K⁻¹).

2.2.4 Radiação

Radiação é descrita como o modo de transmissão de energia entre superfícies. Conforme mencionado, a transmissão de calor por condução e convecção necessita de um meio físico para a transmissão de calor. Por sua vez, a transmissão por radiação também pode ocorrer nesse modo, no entanto também pode ser transmitida no vácuo.

A radiação pode ser classificada segundo as suas fontes (ex: solar), elementos de condução de energia (ex: eletromagnética), pelos seus efeitos (ex: ionizante e não-ionizante) ou pelos seus tipos (ex: alfa, beta, gama).

Para o caso de transmissão de calor, a radiação é chamada de radiação térmica. A radiação térmica é a taxa de energia emitida pela superfície de uma matéria a uma temperatura finita. Esta radiação não é limitada a superfícies sólidas, podendo também ocorrer a partir de gases ou líquidos. A radiação térmica é transmitida por ondas eletromagnéticas que

são caracterizadas por ter como propriedades a frequência, ν (Hz), e o comprimento de onda, λ (m). A propagação da radiação pode ser descrita pela equação 2.14, que relaciona as duas propriedades mencionadas:

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (2.14)$$

Em que c é a velocidade da luz no meio (m/s) e, para um caso de propagação no vácuo, tem como valor $c_0 = 2,998 \times 10^8$ m/s.

A gama de valores que este comprimento de onda e frequência podem ter estão representados na figura 2.7. Esta distribuição é denominada de espectro eletromagnético. Para comprimentos de onda curtos (inferiores a 1 μm), encontram-se as ondas gama, raio-x e ultra violeta, que são de grande interesse para as áreas de estudo de engenharia nuclear. Para comprimentos de onda compridos, encontram-se as microondas e ondas de rádio, que são de grande interesse para áreas de engenharia elétrica. Para comprimentos de onda intermédios existem os infravermelhos. Este foram descobertos no início do século XIX por William Herschel. Este realizou uma experiência que visou associar temperaturas a cada cor com o auxílio de um prisma e três termómetros, medindo, no sentido da cor violeta para a vermelha, as temperaturas das cores chegando à conclusão que a temperatura aumentava neste sentido. Quando terminou a medição da temperatura na cor vermelha, Herschel reparou que também existia calor após esta cor, apesar de não haver luz visível. Herschel estudou este fenómeno, o que levou à descoberta das ondas infravermelhas [20].

Sendo que todas as matérias emitem radiação térmica, exceto quando se encontram na temperatura de zero absoluto, é então possível detetar as ondas de infravermelhos e medir valores de temperaturas com câmaras de leitura de infravermelhos. A radiação infravermelha é emitida num comprimento de onda dos 10^{-6} m até 10^{-3} m (figura 2.7) do espectro eletromagnético.

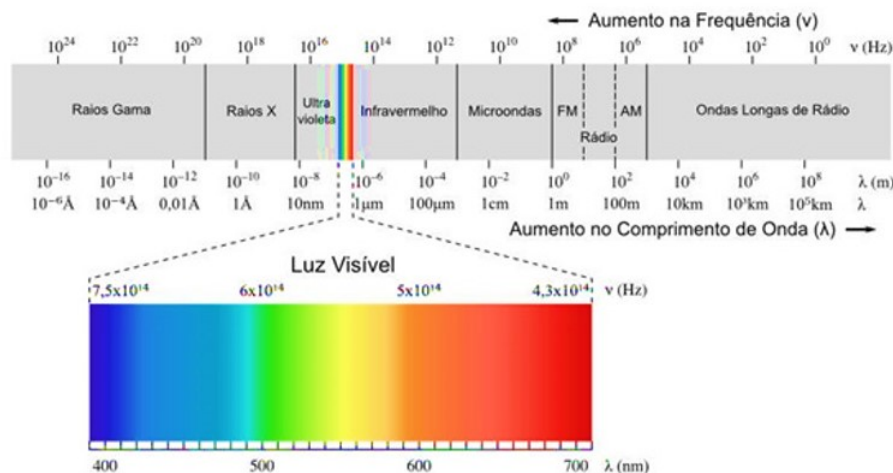


Figura 2.7: Representação do tipo de radiação segundo o seu comprimento de onda eletromagnética ou frequência

2.2.4.1 Emissão

Para melhor entender o fenômeno de radiação, é importante entender como é que esta se dispersa. Consideremos uma parte infinitesimal duma superfície dA_1 , como representado na figura 2.8a.

A radiação propaga-se em todas as direções possíveis, logo é possível descrever a propagação segundo uma direção (θ, ϕ) num sistema de coordenadas esféricas, representado na figura 2.8b.

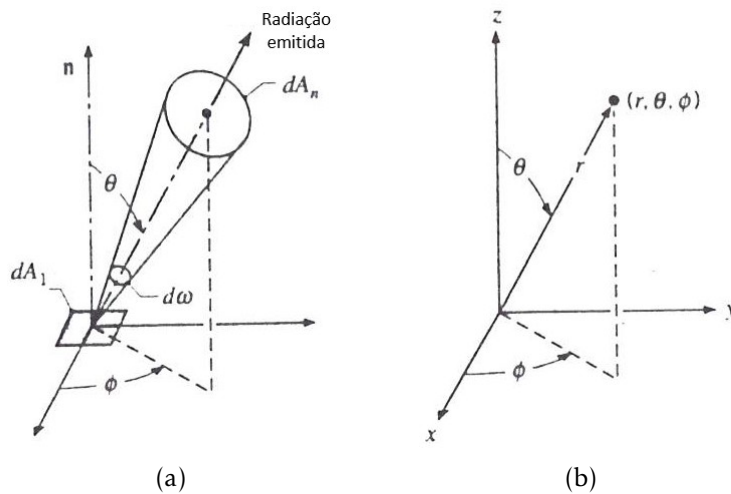


Figura 2.8: a) Emissão de radiação de uma área dA_1 , com um ângulo sólido, $d\omega$, que advém dA_n em um ponto em dA_1 ; b) Sistema de coordenadas esféricas. [21]

A figura 2.9a representa o plano $d\alpha$, que é definido pela região entre os raios de um círculo e é medido como o rácio do comprimento do arco do elemento, dl , no círculo com o raio, r , do círculo. A figura 2.9b demonstra o ângulo sólido. O ângulo sólido é descrito como a região entre os raios de uma esfera e é medido como o rácio entre a área dA_n na esfera e o quadrado do raio da esfera, indicado pela expressão 2.15 de unidades sr (estero-radianos).

$$d\omega \equiv \frac{dA_n}{r^2} \tag{2.15}$$

A área dA_n é uma área normal à direção (θ, α) , que é demonstrado na figura 2.10, e para uma superfície esférica pode ser representada como $dA_n = r^2 \sin\theta d\theta d\phi$. Do mesmo modo:

$$d\omega = \sin\theta d\theta d\phi \tag{2.16}$$

A área dA_n é uma área perceptível do ponto de vista de dA_1 , que é atravessada pela radiação emitida a um certo ângulo sólido, $d\omega$. A figura 2.8a pode ser simplificada, representando somente a área dA_n numa direção (θ, α) , ficando como demonstrado na figura 2.10.

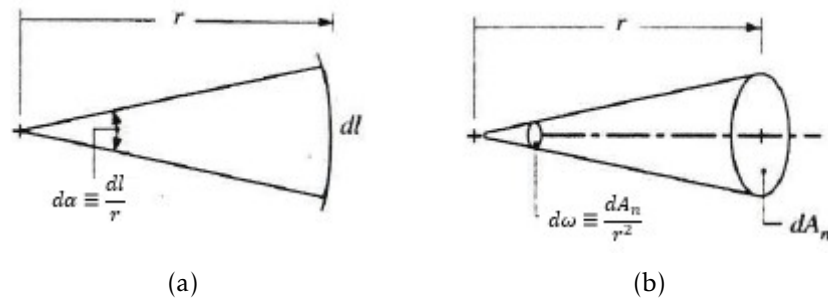


Figura 2.9: Definição de a) plano e b) ângulos sólidos. [21]

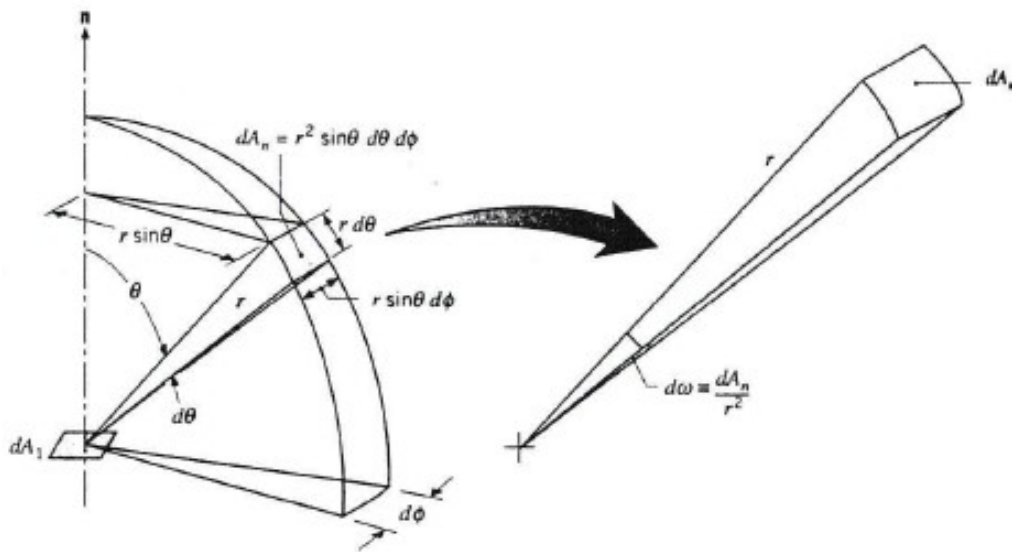


Figura 2.10: Representação do ângulo sólido, $d\omega$, que advém da área dA_n num ponto em dA_1 num sistema de coordenadas esférico. [21]

Para alguém a visualizar a área dA_1 , esta é vista de forma projetada segundo o ângulo θ (ver figura 2.11). A pessoa a visualizar a área verá então, na realidade, a área dA_n , sendo que $dA_n = dA_1 \cos\theta$.

A figura 2.8a) permite demonstrar que existe uma taxa de emissão que passa por uma área dA_n . Esta emissão é possível de ser quantificada e é chamada de intensidade espectral da radiação emitida, I_λ ($\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}.\mu\text{m}^{-1}$). A intensidade espectral da radiação emitida é descrita pela equação 2.17,

$$I_{\lambda,e}(\lambda, \theta, \phi) = \frac{dq}{dA_1 \cos\theta d\omega d\lambda} \quad (2.17)$$

A intensidade espectral é descrita como a taxa de emissão de energia no comprimento de onda λ na direção (θ, ϕ) , por unidade de área da superfície emissora normal à direção de propagação, por unidade de ângulo sólido e por unidade de comprimento de onda. Da equação 2.17 é referido que $(dq/d\lambda) \equiv dq_\lambda$ ($\text{W}.\mu\text{m}^{-1}$), que é descrito como a taxa a que a radiação de comprimento de onda λ sai de dA_1 e atravessa dA_n . Assim, reorganizando a

equação 2.17 temos:

$$dq_\lambda = I_{\lambda,e}(\lambda, \theta, \phi) dA_1 \cos\theta d\omega \quad (2.18)$$

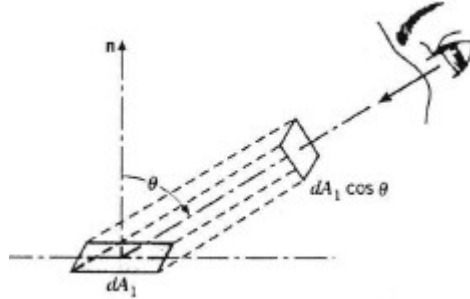


Figura 2.11: Representação da projeção de dA_1 , normal à direção normal da radiação. [21]

Esta equação é importante, pois permite calcular a taxa a que a radiação é emitida por uma superfície que se propaga para uma região no espaço definida pelo ângulo sólido $d\omega$ na direção (θ, ϕ) , sendo para isso necessário saber o valor da intensidade espectral.

É possível exprimir a equação 2.18 substituindo $d\omega$ referido na equação 2.16, resultando na equação 2.19:

$$dq'_\lambda = I_{\lambda,e}(\lambda, \theta, \phi) dA_1 \cos\theta \sin\theta d\theta d\phi \quad (2.19)$$

Com a equação 2.19, sabendo $I_{\lambda,e}(\lambda, \theta, \phi)$, ou seja, sabendo o intensidade espectral emitida numa direção, é possível calcular o fluxo de calor associado a qualquer ângulo sólido finito ou a qualquer intervalo de comprimento de onda, bastando para isso integrar a equação 2.19. Sabendo a direção da radiação emitida, a intensidade total da radiação emitida na direção (θ, ϕ) é então calculada pelo integral da equação 2.20,

$$I_e = \int_0^\infty I_{(\lambda,e)} d\lambda \quad (2.20)$$

Relembrando que a emissão ocorre a partir de qualquer superfície que se encontre a uma temperatura finita, e tendo em conta uma hemisfera hipotética centrada em dA_1 representada na figura 2.12, é também possível quantificar a radiação emitida por uma superfície. A esta quantificação é chamado de poder emissivo. Este conceito é introduzido para que seja possível quantificar a radiação emitida por unidade de área de uma superfície.

O poder emissivo espectral, E_λ ($\text{W.m}^{-2}.\mu\text{ m}^{-1}$), é definido como a taxa a que o comprimento de onda de radiação, λ , é emitido em todas as direções de uma superfície por unidade de comprimento de onda, $d\lambda$, sobre λ e por unidade de superfície de área. Adequadamente, o poder emissivo é relacionado com a intensidade espectral da radiação emitida e expressa por:

$$E_\lambda(\lambda) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_{\lambda,e}(\lambda, \theta, \phi) dA_1 \cos\theta \sin\theta d\theta d\phi \quad (2.21)$$

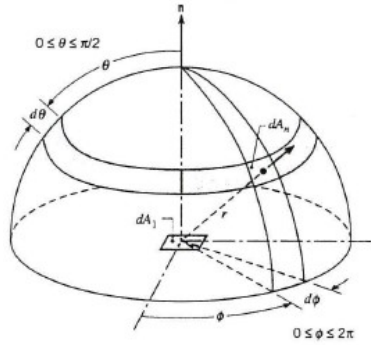


Figura 2.12: Representação da emissão numa hemisféria hipotética. [21]

A partir desta equação, é possível descrever o poder emissivo hemisférico total, E ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$). O poder emissivo total é a taxa a que a radiação é emitida por unidade de área em todos os comprimentos de onda possíveis e em todas as direções possíveis e é dado pela equação 2.22:

$$E = \int_0^{\infty} E_{(\lambda,e)} d\lambda \quad (2.22)$$

ou alternativamente pela equação 2.23:

$$E = \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_{\lambda,e}(\lambda, \theta, \phi) dA_1 \cos\theta \sin\theta d\theta d\phi \quad (2.23)$$

Como o conceito de poder emissivo implica a emissão em todas as direções, o termo hemisférico não é utilizado devido à sua redundância, sendo que o poder emissivo é mencionado como poder emissivo espectral, E_λ , ou poder emissivo total, E .

A diferença entre os conceitos de intensidade espectral e poder emissivo é que a intensidade espectral é baseada numa área projetada e o poder emissivo é o fluxo baseado numa área de superfície real.

Considerando uma superfície difusa, que é uma superfície em que a intensidade da radiação emitida é independente da direção, simplifica-se a equação 2.21, removendo $I_{\lambda,e}$:

$$E_\lambda(\lambda) = \pi I_{\lambda,e}(\lambda) \quad (2.24)$$

Do mesmo modo, simplificando a equação 2.23,

$$E = \pi I_e \quad (2.25)$$

Em que I_e é a intensidade total da radiação emitida.

2.2.4.2 Irradiação

Trata-se por irradiação à radiação emitida por outra superfície que incide na superfície em estudo, ou seja, é a radiação incidente numa superfície (figura 2.13). A irradiação espectral, $G_\lambda(\lambda)$, é a taxa à qual a energia de comprimento de onda λ incide numa superfície, por

unidade de área de superfície e por unidade de comprimento de onda e é descrita pela equação 2.26:

$$G_{\lambda}(\lambda) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_{\lambda,i}(\lambda, \theta, \phi) \cos\theta \sin\theta \, d\theta \, d\phi \quad (2.26)$$

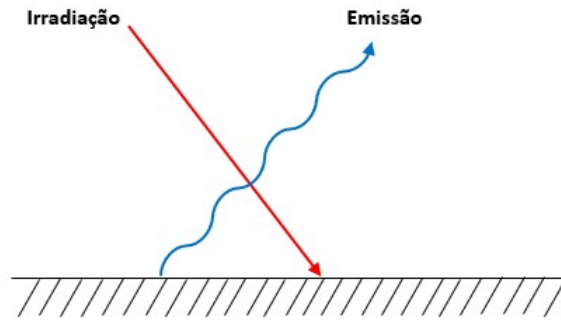


Figura 2.13: Representação da radiação e irradiação numa superfície. Adaptado de [21]

Por sua vez, a irradiação total é descrita pela equação 2.27:

$$G = \int_0^{\infty} G_{\lambda}(\lambda) d\lambda \quad (2.27)$$

Sendo que para uma radiação incidente difusa, a equação 2.28 fica:

$$G = \pi I_i \quad (2.28)$$

2.2.4.3 Radiosidade

Trata-se por radiosidade toda a radiação que sai de uma superfície. A figura 2.14 demonstra a radiosidade numa superfície. A radiosidade não só tem em conta a radiação emitida pela superfície, como também tem em consideração parte da radiação refletida pela irradiação que ocorre nesta.

A radiosidade espectral, J_{λ} ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\mu\text{m}^{-1}$), representa a taxa à qual a energia de comprimento de onda λ sai de uma superfície, por unidade de área da superfície e por unidade de comprimento de onda, sendo descrita por:

$$J_{\lambda}(\lambda) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} II_{\lambda,e+r}(\lambda, \theta, \phi) \cos\theta \sin\theta \, d\theta \, d\phi \quad (2.29)$$

2.2.4.4 Corpo Negro

Um corpo negro é uma superfície ideal, pois atua como um emissor e absorvedor ideal. Um corpo negro é descrito por pelas seguintes características [21]:

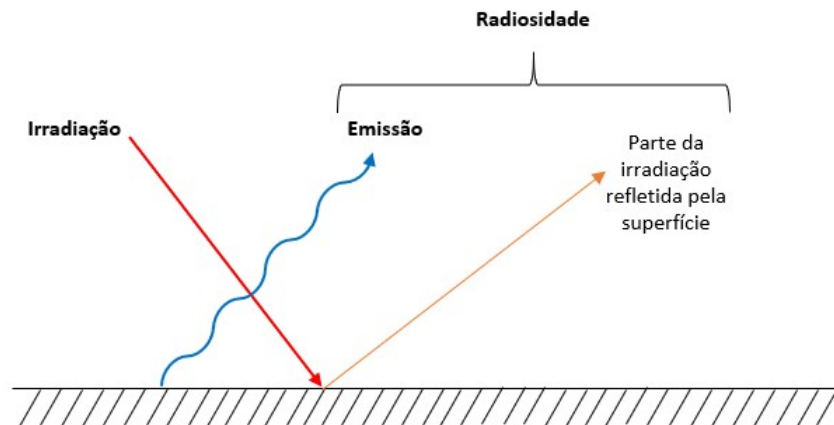


Figura 2.14: Representação da radiação e irradiação numa superfície e radiosidade. Adaptado de [21]

1. Um corpo negro absorve toda a radiação incidente, independentemente do comprimento de onda e direção;
2. Para uma temperatura e comprimento de onda, nenhuma superfície consegue emitir mais energia que um corpo negro;
3. Apesar da radiação emitida por um corpo negro ser uma função do comprimento de onda e temperatura, esta é independente da direção. Um corpo negro é um difusor-emissor.

Como indicado no ponto 1, um corpo negro absorve toda a radiação. Um corpo negro é um material ideal que não existe, sendo um conceito criado a fim de permitir descrever materiais existentes consoante a sua capacidade de absorver e emitir radiação. Estas propriedades são descritas como a emissividade e absorptividade.

Emissividade, ϵ , é uma medida adimensional e é a propriedade radioativa que permite a medição da eficiência de uma superfície emitir energia em relação a um corpo negro. Esta propriedade pode ser melhorada com acabamentos superficiais no material.

$$0 \leq \epsilon \leq 1$$

Absortividade, α , é a propriedade que permite a medição da capacidade do material absorver a irradiação. De acordo com a absorptividade do material, este é capaz de aumentar a sua energia térmica quanto maior for o seu valor. De realçar que a absorptividade depende do tipo de irradiação. Por exemplo, a radiação de uma parede é diferente da radiação do sol.

$$0 \leq \alpha \leq 1$$

2.2.4.5 Lei de Stefan-Boltzmann

O poder emissivo total de um corpo negro E_b pode ser expresso como:

$$E_b = \sigma T^4 \quad (2.30)$$

Em que $\sigma = 5,670 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ e é denominada de constante de *Stefan-Boltzmann*. A equação 2.30 é a *Lei de Stefan-Boltzmann*. Esta lei permite o cálculo do poder emissivo de um corpo negro em todas as direções, simplesmente sabendo a sua temperatura. Como o corpo negro é um difusor emissor, a equação 2.25 fica,

$$I_b = \frac{E_b}{\pi} \quad (2.31)$$

2.2.4.6 Absorcividade, Refletividade e Transmissividade

Com os conceitos de irradiação, emissividade, absorptividade e radiosidade explicados, é possível perceber que a maior troca de calor ocorre nas superfícies e a quantidade de energia transmitida por radiação vai depender das propriedades de emissividade e da absorptividade da superfície do material.

Continuando a concentrar as atenções na superfície, que é sujeita a irradiação, esta vai ter parte da irradiação absorvida, emitida ou refletida. Estas percentagens dependem do material e dos seus acabamentos de fabrico e do meio. Este meio pode ser, por exemplo, opaco ou semi-transparente. Fazendo o balanço da radiação do meio fica:

$$G_\lambda = G_{\lambda,ref} + G_{\lambda,abs} + G_{\lambda,t} \quad (2.32)$$

Simplificando a equação 2.32, considerando o meio opaco, fica que $G_{\lambda,t} = 0$. Assim, a absorção e reflexão podem ser tratadas como fenómenos, pois são processos que ocorrem em frações de segundos num micrómetro da superfície, podendo ser tratadas como uma porção de irradiação. O processo de reflexão não afeta o meio, enquanto que o da absorção afeta o meio, aumentando a energia térmica deste.

Resumindo, a absorcividade α é a propriedade que determina a fração de irradiação que é absorvida por uma superfície e é descrita pelas equações 2.33 a 2.35

- Absorcividade na direção (δ, ϕ) :

$$\alpha_{\lambda,\delta}(\lambda, \delta, \phi) = \frac{I_{\lambda,i,abs}(\lambda, \delta, \phi)}{I_{\lambda,i}(\lambda, \delta, \phi)} \quad (2.33)$$

- Absorcividade espectral hemisférica:

$$\alpha_\lambda(\lambda) = \frac{G_{\lambda,abs}(\lambda)}{G_\lambda(\lambda)} \quad (2.34)$$

- Absorcividade total hemisférica:

$$\alpha = \frac{G_{abs}}{G} \quad (2.35)$$

A refletividade é a propriedade que determina a fração de radiação que é refletida por uma superfície. No caso da refletividade, ρ , existem dois termos: reflexão especular e difusa.

A reflexão especular ocorre quando toda a radiação é refletida segundo um ângulo igual ao ângulo da incidência. A reflexão difusa é a aproximação mais razoável para a maior parte de aplicações de engenharia. Esta reflexão é independente da direção da radiação incidente e a intensidade da radiação refletida não depende do ângulo de reflexão.

2.2.4.7 Superfícies cinzentas

A determinação do calor trocado entre superfícies simplifica-se, podendo ser possível descrever a emissividade e absortividade em superfícies cinzentas através de:

$$\epsilon_\lambda = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \epsilon_{\lambda,e}(\lambda, \theta, \phi) \cos\theta \sin\theta d\theta d\phi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \cos\theta \sin\theta d\theta d\phi} \quad (2.36)$$

$$\alpha_\lambda = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \alpha_{\lambda,\theta} I_{\lambda,i}(\lambda, \theta, \phi) \cos\theta \sin\theta d\theta d\phi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_{\lambda,i}(\lambda, \theta, \phi) \cos\theta \sin\theta d\theta d\phi} \quad (2.37)$$

Estas equações só se verificam quando:

1. A irradiação é difusa, ou seja, $I_{\lambda,i}$ é independente da direção;
2. A superfície é difusa, ou seja, $\epsilon_{\lambda,\theta}$ e $\alpha_{\lambda,\theta}$ são independentes da direção.

Uma superfície cinzenta é uma superfície para a qual α_λ e ϵ_λ são independentes do comprimento de onda λ . Apesar disto, a absortividade depende de $G_\lambda(\lambda)$, logo não é correto dizer-se que α é sempre igual a ϵ . Esta afirmação é comprovado pela figura 2.15.

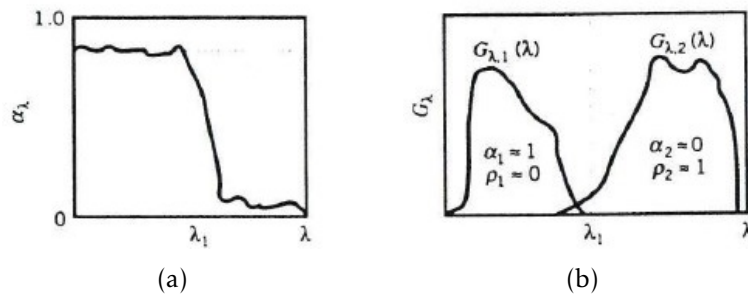


Figura 2.15: Distribuição espectral de a) Absortividade espectral numa superfície e b) Irradiação espectral numa superfície. [21]

2.2.4.8 Fator de forma

O fator de forma F_{ij} é descrito como a fração da radiação que deixa uma superfície i que é interceptada por uma superfície j ([21]), e é descrito por:

$$F_{ij} = \frac{1}{A_j} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos\theta_i \cos\theta_j}{\pi R^2} dA_i dA_j \quad (2.38)$$

Este fator é afetado pelo recinto, sendo que este pode ser fechado ou aberto. Para o caso de um recinto fechado, o somatório de todos os fatores forma é igual a um. Para um recinto com N superfícies há um total de N^2 fatores de forma, sendo descrito pelo tensor:

$$\begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} & \cdots & F_{1N} \\ F_{21} & F_{22} & \cdots & F_{2N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ F_{N1} & F_{N2} & \cdots & F_{NN} \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

Se a troca de radiação for entre N superfícies for entre:

- Superfícies negras:

$$q_{ij} = \sum_{j=1}^N A_i F_{ij} \sigma (T_i^4 - T_j^4) \quad (2.40)$$

- Superfícies cinzentas:

$$q_i = \frac{A_i \epsilon_i}{\rho_i} (\epsilon_{b_i} - J_i) \quad (2.41)$$

Em que J corresponde ao poder emissivo ($J=E_b$).

DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

No capítulo 3 são apresentadas as montagens que foram usadas para os END por termografia, indicando o procedimento para cada caso, de modo a garantir a validade das medições feitas com a câmara de termografia.

Serão apresentados os resultados obtidos e conclusões sobre a estação de ensaios disponível.

3.1 Ensaios de termografia

3.1.1 Equipamento e provete de ensaio

Para a realização dos ensaios foi necessário o uso de uma câmara termográfica, duas fontes de calor (lâmpadas de características iguais), *software LabView* e *software SmartView*.

O provete a ser analisado tem dimensões 100×100×5 mm (figura 3.1a) com um defeito ao centro, de dimensões 10×10×0,5 mm, localizado ao centro da espessura, representado na figura 3.1b. O material do provete é *Nylon 12*, também denominado por PA-12. Outros materiais foram analisados (PA-6, PEEK, PLA), no entanto, foi usado o PA-12 devido ao custo e à fácil produção de peças, quando comparado com os restantes. Este material apresenta as propriedades apresentadas na tabela 3.1.

Tabela 3.1: Propriedades materiais do provete PA-12

Densidade, ρ (kg.m ⁻³)	1100
Condutividade térmica, k (W.m ⁻² .K ⁻¹)	0,22
Calor específico, Cp (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	1590

Para a captação e visualização da radiação infravermelha foi utilizada uma câmara termográfica *Fluke Ti400*. A câmara apresenta uma gama de medição de temperatura de

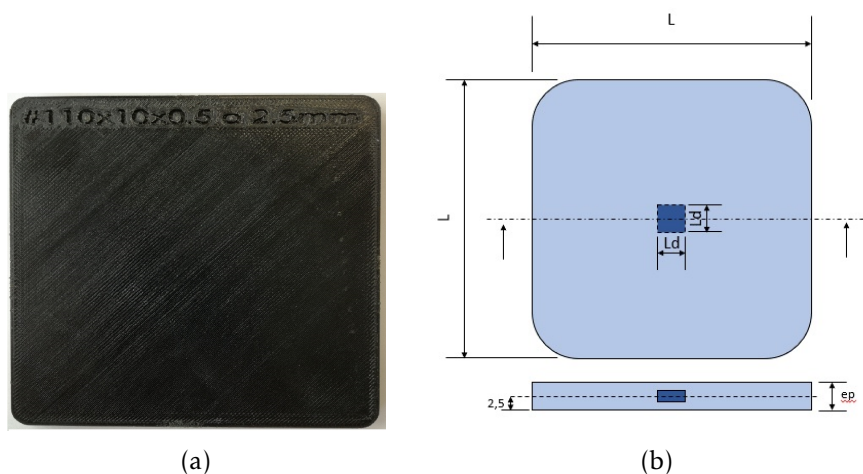


Figura 3.1: Provete utilizado no caso de estudo a) Provete ensaiado b) Geometria

-20°C até 1200°C. A câmara consegue medir com uma precisão entre *pixeis* de 50 mK e a precisão da temperatura que apresenta é de $\pm 2^\circ\text{C}$. A banda espectral da câmara é de $7,5\mu\text{m}$ a $14\mu\text{m}$, com uma frequência de 9 Hz.

Para garantir que a fonte de calor está ativa exatamente durante o intervalo de tempo pretendido, é usado o *software LabView* que permite controlar a passagem de corrente, acionando assim a fonte pelo tempo necessário.

As fontes de calor usadas foram duas lâmpadas da marca *PhillipsIR300CH*, com uma potência de 300 W. Estas estão inseridas numa proteção (figura 3.2), a fim de evitar que a radiação se espalhe em todas as direções, com um filtro na extremidade (figura 3.3). A necessidade deste filtro é devido à intensidade da fonte de calor. Sem este filtro, durante a realização dos ensaios, os filamentos das fontes apareciam nos vídeos. Após adição do filtro, os filamentos deixaram de se notar nos vídeos, melhorando as imagens. Este filtro também existe como proteção ao provete, sendo que, como a radiação é filtrada, o fluxo não é tão grande.

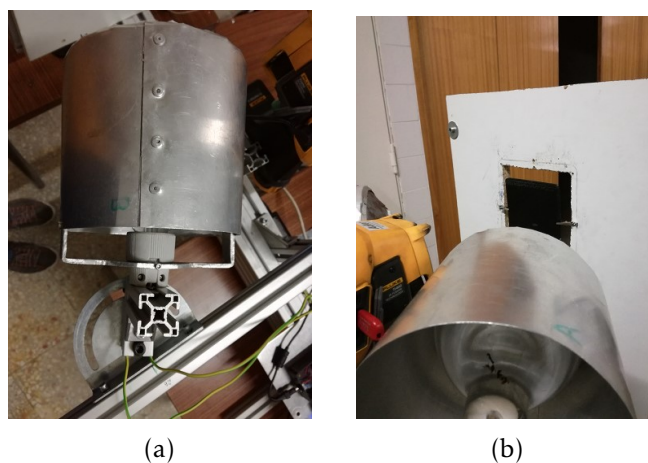


Figura 3.2: Montagem da lâmpada: a) Vista exterior; b) Vista interior



Figura 3.3: Filtro

3.2 Estação de ensaios

A estação de ensaios apresentada na figura 3.4 está instalada no NOVA NDT LAB, no DEMI da FCT-NOVA. A figura 3.5 permite uma melhor explicação e representação da estação de ensaios. A estação foi concebida sob um perfil *bosh*, representado pelo número 1, de base de dimensões maiores que os restantes, de modo a não existir oscilações na montagem. Sob este perfil, foram inseridos perpendicularmente um perfil *bosh*, representado pelo número 2, e uma placa onde é colocado o provete, ambos com possibilidade de serem deslocados no eixo x , com deslocamento h , no entanto, devido ao peso que está sob o perfil 2, é preferível mover a placa.

No perfil 2 está inserido outro perfil *bosh*, representado com o número 3. O perfil 3 tem movimento sob o eixo y , sendo assim possível regular a altura segundo uma distância v . Este movimento é importante, pois, no perfil 3, estão inseridos dois apoios com as fontes de calor (FC). A posição das fontes de calor pode ser regulada segundo uma distância d , no eixo z , e conforme o ângulo α pretendido.

Relativamente à câmara térmica, existe um apoio para a fixação da mesma, permitindo que esta não se mova, por isso, a captação das imagens não é afetada. O apoio da câmara pode deslocar-se no perfil 1 e pode ser removido, a fim de possibilitar a realização dos ensaios por transmissão e reflexão.

A estação de ensaios tem espaço para um computador com o *software LabView* ligado a um DAC, que permite ativar as fontes de calor, e para um monitor, que permite ligar a câmara térmica. Assim, é possível ver as imagens apresentadas pela câmara sem que seja necessário o contacto com as mesma.

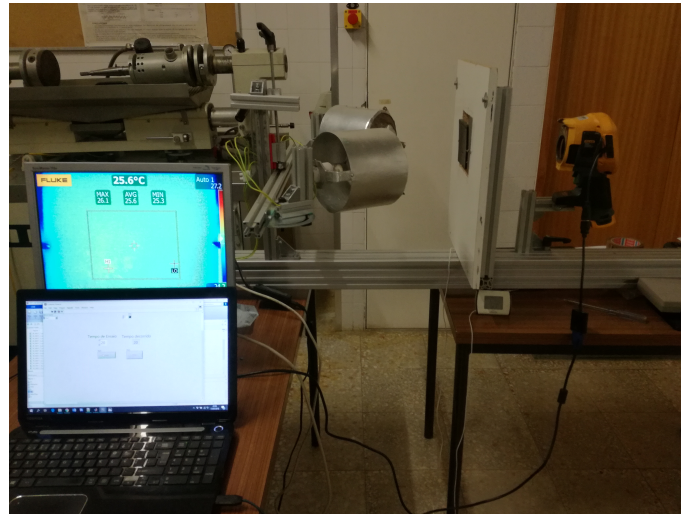


Figura 3.4: Estação de ensaios

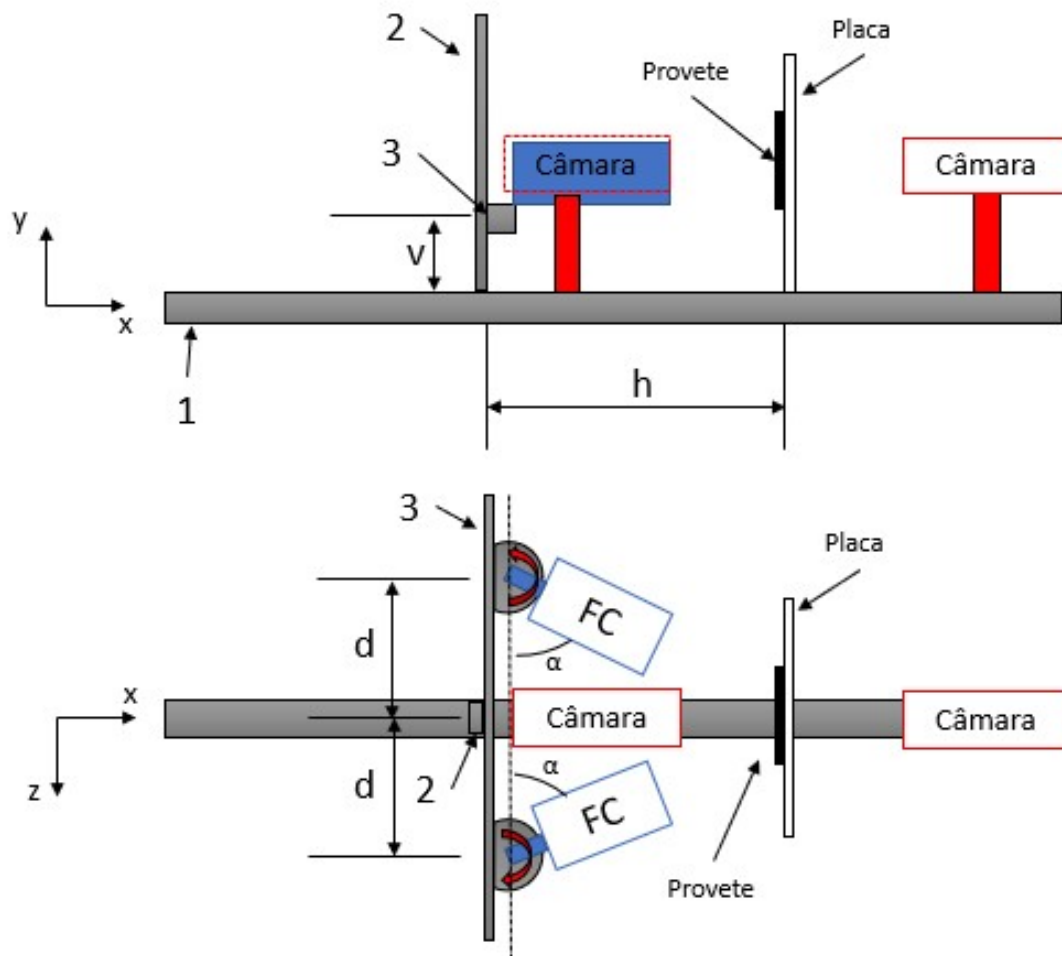


Figura 3.5: Estação de ensaios. Vista frontal e superior

3.3 Procedimento, montagem e apresentação de resultados

Para a realização dos ensaios foi seguido um procedimento para garantir que a aquisição de valores não é afetada. Em qualquer dos casos de ensaios apresentados, é necessário o maior controlo possível do ambiente em redor do ensaio. Esta necessidade advém de que nesta fase, para validar os modelos numéricos, é extremamente importante garantir que os ensaios são realizados nas mesmas condições, pois se existir a variação de algum parâmetro passamos a estar na presença de outras condições e a necessidade de criar um novo modelo que replique esse ensaio. Estes ensaios foram realizados nas seguintes condições:

1. Sem a presença de pessoas e com as janelas fechadas no ambiente a fim de evitar correntes de ar;
2. A iluminação do ambiente desligada para evitar a leitura da radiação emitida por esta;
3. Evitar estar a menos de 50 cm da zona da lâmpada e provete durante o ensaio pois a radiação emitida pelo corpo é refletida e afeta a captação das imagens;

3.3.1 Transmissão - Uma fonte de calor

O modo de transmissão é característico devido ao facto de a leitura ser feita na face oposta ao aquecimento. Nesta primeira montagem foi usada uma fonte de calor a $\alpha = 90^\circ$, ficando perpendicular com a superfície do provete. A montagem elaborada está representada na figura 3.6.

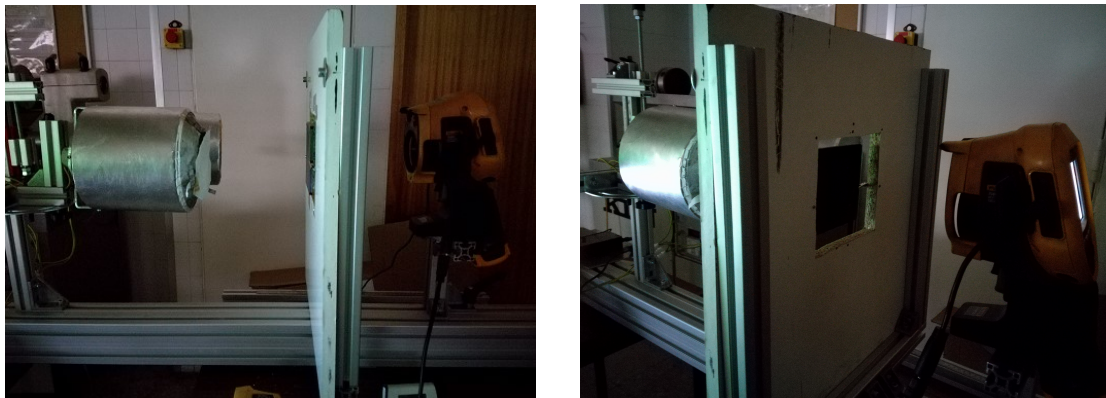


Figura 3.6: Montagem por transmissão

Como procedimento foram seguidos os seguinte passos:

1. Montar provete;
2. Montar fonte de calor;
3. Garantir posicionamento e orientação da fonte de calor ($\alpha = 90^\circ$);

4. Garantir que a proteção (filtro) da fonte de calor está centrada com o provete;
5. Garantir que o provete não está inclinado;
6. Montar a câmara (a distância a que se encontra não é importante);
7. Verificar a amplitude de temperaturas que a câmara vai ler (colocar na escala menor de -20°C a 80°C) e o local onde serão gravados os vídeos (cartão *ssd* ou *pen USB*);
8. Ler a distância a que o provete se encontra da fonte de calor (filtro);
9. Centrar a câmara com o defeito do provete;
10. Apertar o gatilho verde da câmara para obter a distância a que se encontra o provete. Ajustar a ótica da câmara, focando assim a imagem;
11. No *software LabView*, indicar o tempo de aquecimento pretendido;
12. Registrar o valor de temperatura ambiente e de temperatura apresentada na superfície do provete;
13. Antes de iniciar o vídeo, é aconselhável fazer uma auto-calibração da câmara. Para isso, basta premir o gatilho verde durante 1 segundo, sendo que a câmara emite um som e o ajuste da imagem;
14. Estando os passos anteriores verificados, deve-se entrar na função de gravação de vídeo da câmara;
15. Iniciar o vídeo premindo o gatilho preto;
16. Iniciar aquecimento com o *software LabView*;
17. Terminar o vídeo premindo novamente o gatilho preto;
18. Esperar que o provete arrefeça de modo natural (dependendo da temperatura ambiente, entre 20 minutos a 30 minutos);
19. Assim que a câmara apresente a temperatura pretendida para novo ensaio, repetir os passos 12 a 19;

Tendo em consideração os passos apresentados, foram realizados dez ensaios. Destes dez ensaios, sete estavam aptos para análise, não contendo saltos devido a auto-calibração da câmara durante a gravação do vídeo. As condições de cada ensaio estão apresentadas na tabela 3.2.

Os ensaios permitem saber a temperatura na superfície oposta à superfície sujeita à fonte de calor. Os vídeos são analisados retirando informações dessa superfície. Inicialmente, o *software* apresenta dados variados, estando estes representados na figura 3.7a. Estas informações são: temperaturas máxima, mínima, caixa de precisão de medição e

3.3. PROCEDIMENTO, MONTAGEM E APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS

Tabela 3.2: Valores de temperatura ambiente (T_{amb}) e temperatura do provete (T_p)

T_{amb} (°C)	20,8	20,9	20,9	20,9	20,9	21	21,1
T_p (°C)	21,3	21,3	21,3	21,3	21,3	21,4	21,4
Ensaio	IR1	IR2	IR3	IR4	IR5	IR6	IR7

ponto central da caixa. Por sua vez, é possível ocultar todos os dados (figura 3.7b) ou ver unicamente os pontos de interesse, como é demonstrado na figura 3.7c onde é possível identificar e adquirir informação sobre os pontos pretendidos, um ponto no centro do defeito e um ponto fora da zona do defeito. É importante manter a caixa de precisão visível, pois, além facilitar o posicionamento dos pontos, indica a área de melhor precisão da câmara.

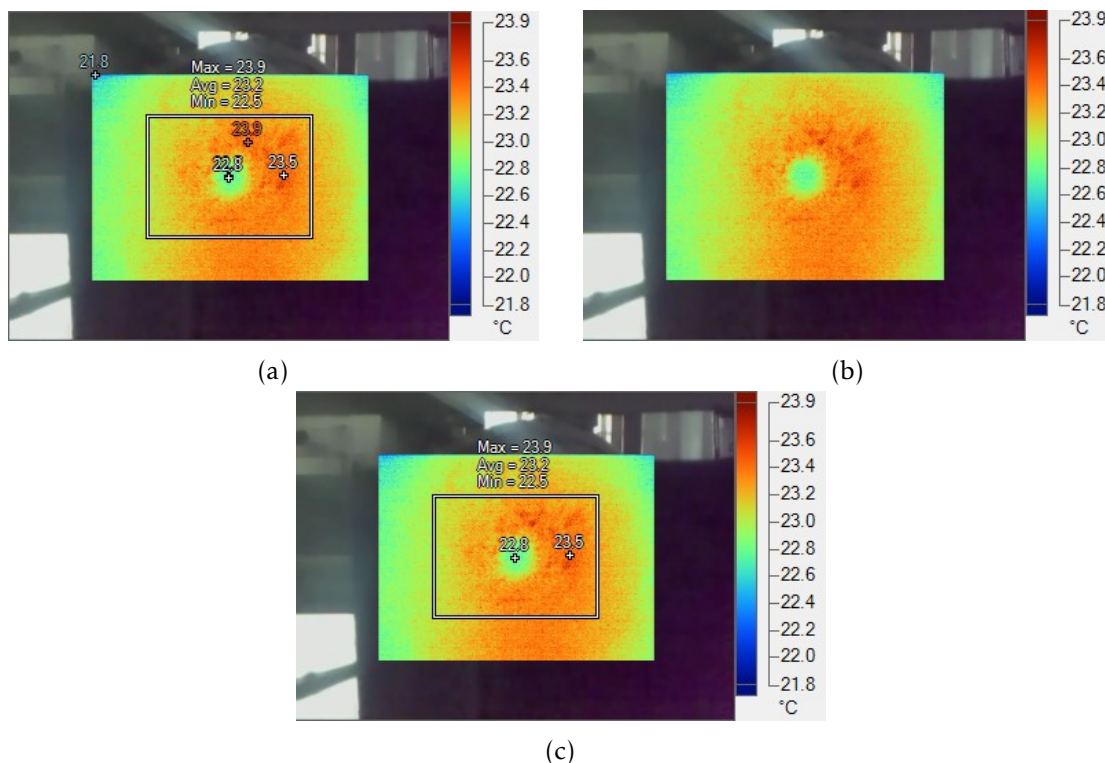


Figura 3.7: Exemplo de imagens retiradas do *software SmartView*. a) Sem tratamento; b) Sem apresentação de dados; c) Com os dados pretendidos.

Apresentando de seguida uma análise de valores, o gráfico da figura 3.8 representa a distribuição da temperatura no ponto no centro do defeito ao longo do tempo de todos os ensaios realizados, apresentados na tabela 3.2, enquanto que o gráfico da figura 3.9 representa a distribuição da temperatura ao longo do tempo no ponto fora do defeito, para os mesmos ensaios.

Estes gráficos permitem demonstrar que os ensaios foram bem executados, não havendo dispersão entre eles, sendo que o que varia entre alguns ensaios é a temperatura ambiente a que foram executados e a temperatura do provete, como já apresentado na

tabela 3.2. A vermelho está representada a curva da média dos valores dos ensaios realizados.

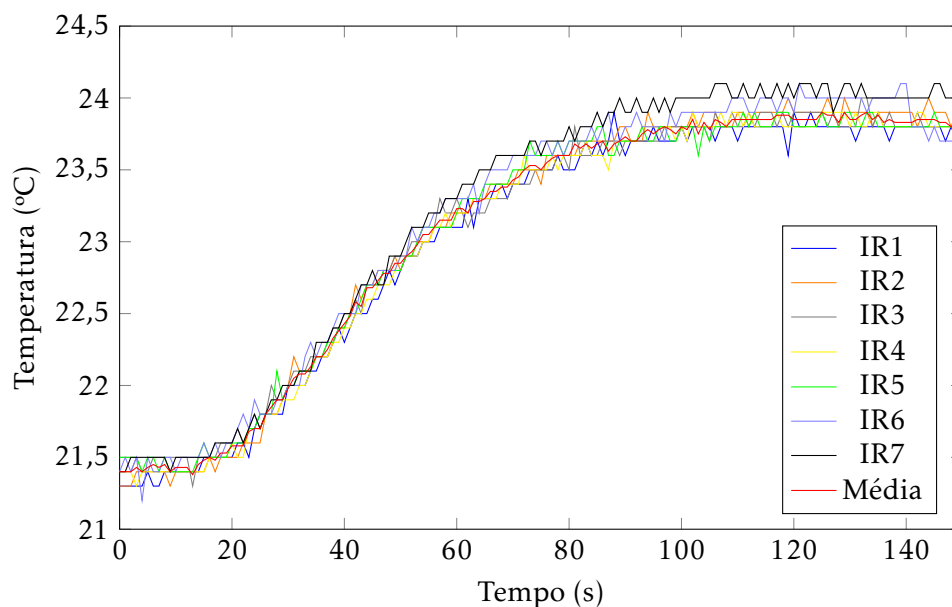


Figura 3.8: Valores de temperatura (°C) ao longo do tempo (s) no centro do defeito, por transmissão

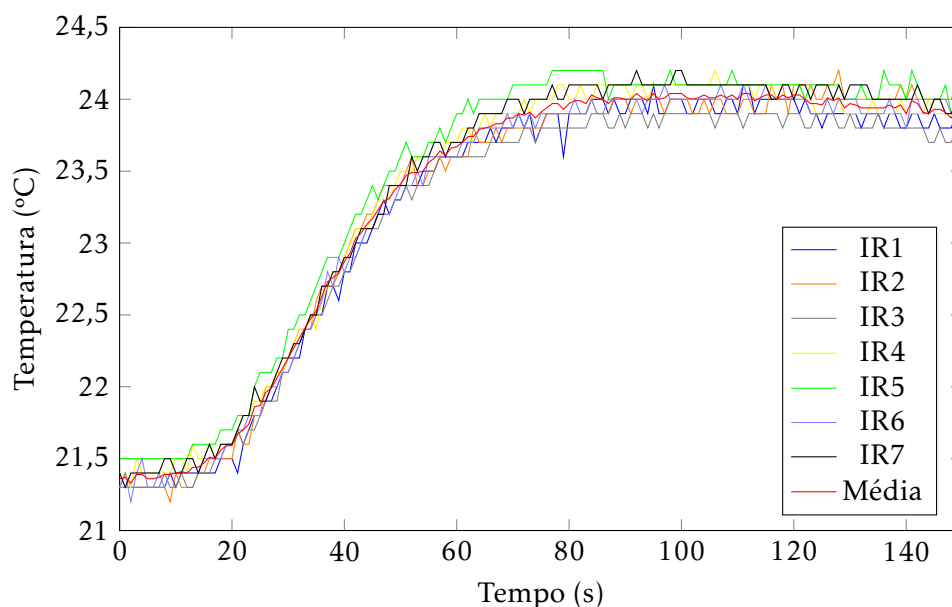


Figura 3.9: Valores de temperatura (°C) ao longo do tempo (s) fora do defeito, por transmissão

Fazendo a diferença entre curvas respetivas, é obtida a dispersão ao longo do tempo. A figura 3.10 demonstra esta dispersão, permitindo detetar qual o instante ou intervalo de tempo em que a diferença entre curvas é maior, o que equivale ao instante ou intervalo de tempo em que a deteção do defeito é mais perceptível.

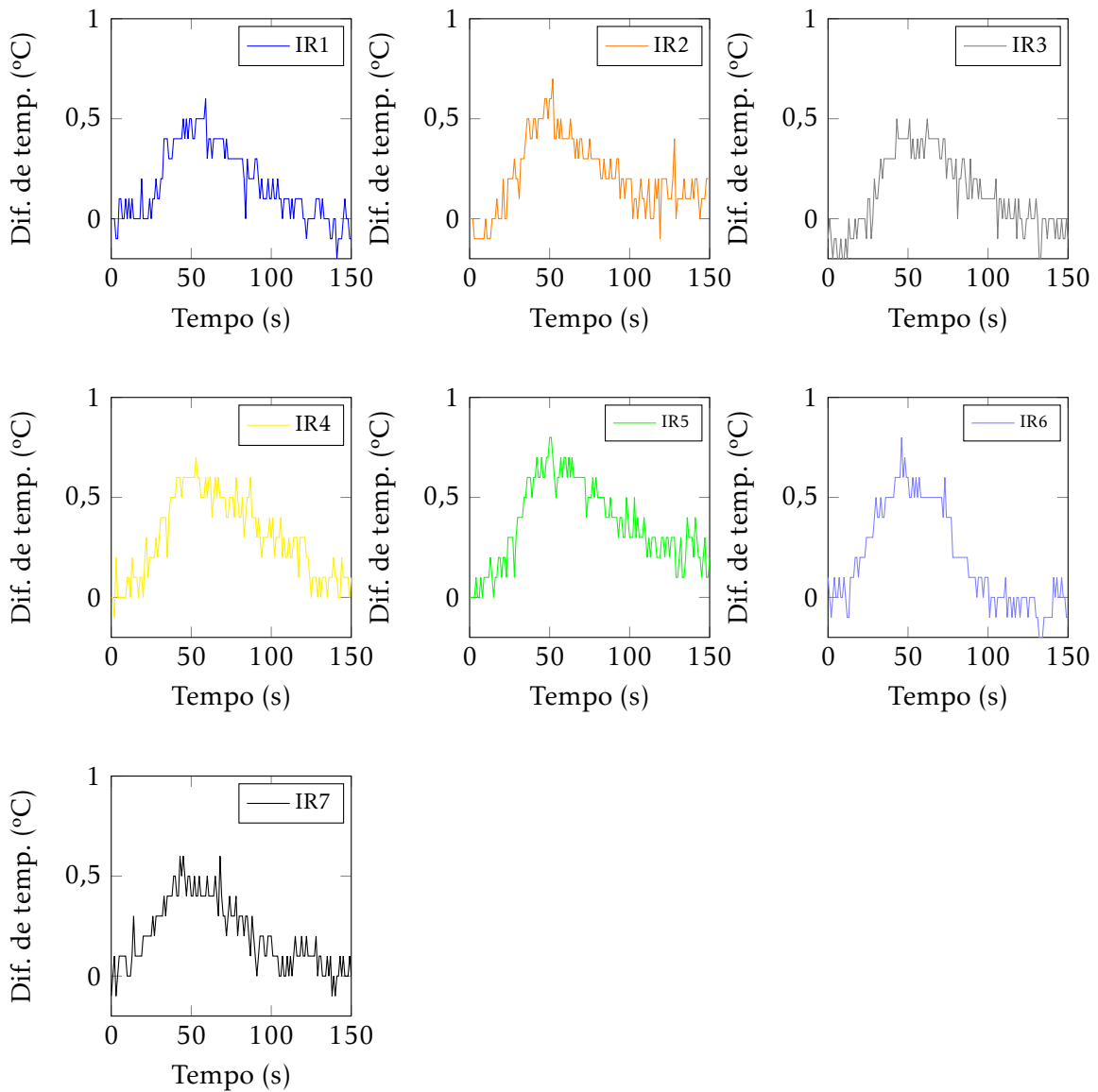


Figura 3.10: Diferenças entre curvas de cada ensaio em modo de transmissão

Para melhor demonstrar esta análise, é apresentada a análise ao ensaio *IR4*, sendo que na figura 3.11 são representadas as curvas de cada ponto e o instante de diferença máxima. A escolha deste ensaio foi aleatória.

Fazendo a diferença entre as duas curvas, é obtida a diferença entre estes pontos sabendo assim qual é a diferença de temperaturas máxima, diferença esta representada na figura 3.12. Nesta figura também está representado o instante em que ocorreu a diferença máxima entre curvas, podendo indicar qual o melhor instante para o técnico fazer a captação de imagens. Para o caso apresentado, o instante de diferença máxima dá-se aos 53 segundos, com uma diferença de $0,7^{\circ}\text{C}$, sendo que este instante está representado na figura 3.13.

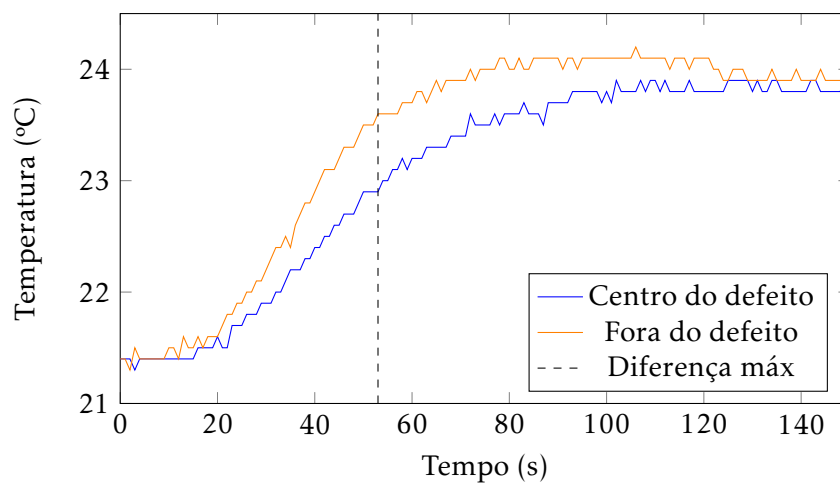


Figura 3.11: Representação das curvas do centro e fora do defeito do ensaio *IR4*

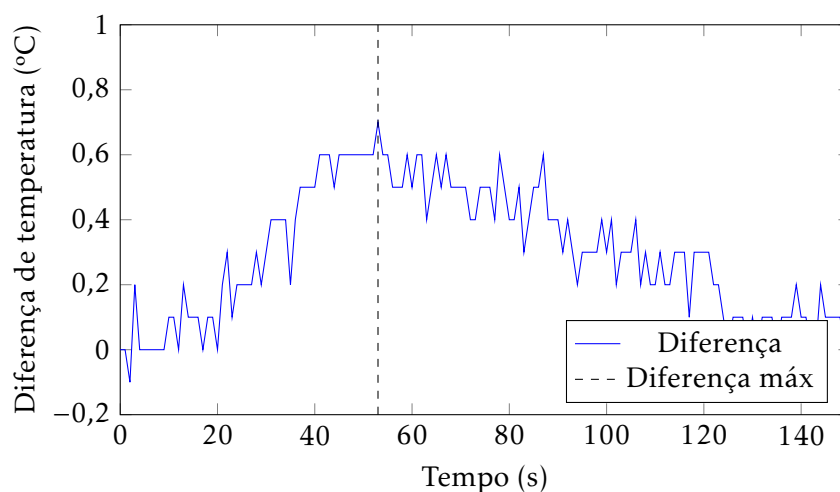


Figura 3.12: Representação da diferença das curvas do centro e fora do defeito do ensaio *IR4*

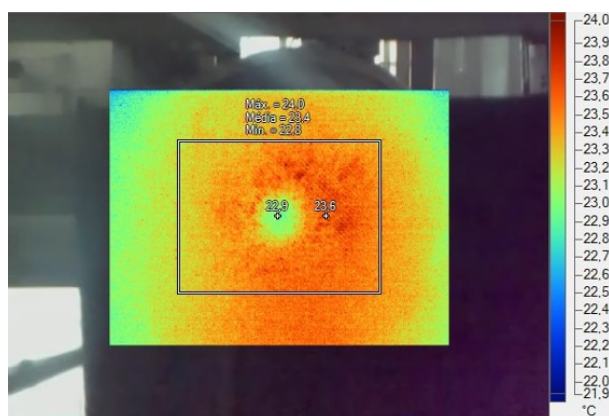


Figura 3.13: Imagem captada no instante de 53 segundos

3.3. PROCEDIMENTO, MONTAGEM E APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS

Recorrendo à figura 3.10, o valor do instante ou intervalos de tempos para cada ensaio foi encontrado. Todos apresentam valores semelhantes, sendo que o que apresenta o instante mais cedo, aos 45 segundos, é o ensaio *IR7* e o que apresenta o instante mais tarde é o ensaio *IR7*, aos 59 segundos. Com esta informação é possível indicar ao técnico que pode iniciar a aquisição de imagens cinco segundos antes do instante mais cedo registado e terminar após cinco segundos após o instante mais tarde recordado, dando uma boa margem para obter uma boa deteção do defeito.

3.3.2 Reflexão - Duas fontes de calor

A montagem com duas fontes de calor permite realizar ensaios em modo de transmissão e em modo de reflexão. O modo de reflexão é característico devido ao facto de a leitura ser feita na face que está sujeita ao aquecimento. Esta montagem tem duas fontes de calor, com α a 55° . A montagem elaborada está representada na figura 3.14.



Figura 3.14: Montagem por transmissão

Os procedimentos são semelhantes aos usados no ensaio com uma fonte de calor, com a diferença do ângulo que é alterado para 55° , e a posição da câmara termográfica está do lado do aquecimento. O ângulo de 55° foi garantido com recurso a um goniómetro, também denominado de suta, e está representado na figura 3.15. O ângulo é medido com uma lupa (círculo amarelo) comparando duas superfícies, uma fixa e outra que pode ser ajustável (caso do apoio da FC). Do mesmo modo que foi apresentado no subcapítulo anterior, foram realizados cinco ensaios. Destes cinco ensaios, quatro estão aptos a análise, não contendo saltos, devido à auto-calibração da câmara, durante a gravação do vídeo. As condições de cada ensaio estão apresentadas na tabela 3.3.

Os ensaios permitem saber a temperatura na superfície sujeita à fonte de calor. Os vídeos são analisados, retirando informações dessa superfície.

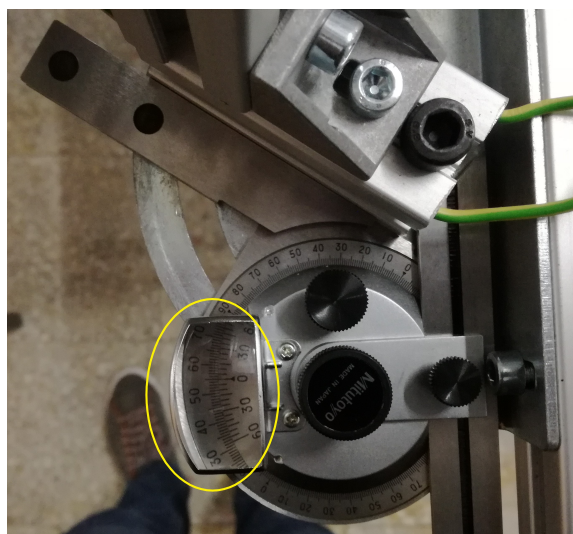


Figura 3.15: Goniometro

Apresentando de seguida uma análise de valores, o gráfico da figura 3.16 representa a distribuição da temperatura no ponto no centro do defeito ao longo do tempo de todos os vídeos realizados, apresentados na tabela 3.3, enquanto que o gráfico da figura 3.17 representa a distribuição da temperatura ao longo do tempo no ponto fora do defeito para os mesmos vídeos.

Estes gráficos permitem demonstrar que os ensaios foram bem executados, não havendo dispersão entre eles, sendo que o que varia entre alguns ensaios é a temperatura ambiente a que foram executados e a temperatura do provete, como já apresentado na tabela 3.3. A vermelho está representada a curva da média dos valores dos vídeos realizados.

Tabela 3.3: Valores de temperatura ambiente (T_{amb}) e temperatura do provete (T_p) por modo de reflexão

T_{amb} (°C)	23,9	23,9	23,9	24,0
T_p (°C)	24,3	24,3	24,4	24,4
Ensaio	IR8	IR9	IR10	IR11

Fazendo a diferença entre curvas respetivas, é obtida a dispersão ao longo do tempo. A figura 3.18 demonstra esta dispersão, permitindo detetar qual o instante ou intervalo de tempo em que a diferença entre curvas é maior, o que equivale ao instante ou intervalo de tempo em que a deteção do defeito é mais perceptível.

Para melhor demonstrar esta análise, é apresentada a análise ao ensaio IR11, sendo que na figura 3.19 são representadas as curvas de cada ponto e o instante de diferença máxima. A escolha deste ensaio foi aleatória.

Fazendo a diferença entre as duas curvas, é obtida a diferença entre estes pontos, sabendo assim qual é a diferença de temperaturas máxima, diferença esta representada na figura 3.20. Nesta figura também está representado o instante em que ocorreu a diferença

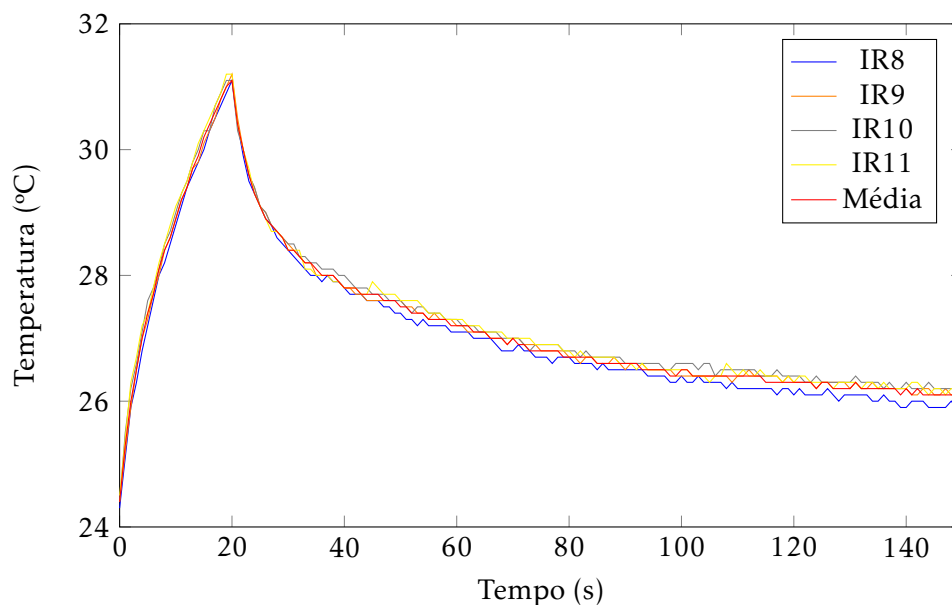


Figura 3.16: Valores de temperatura (°C) ao longo do tempo (s) no centro do defeito, por reflexão

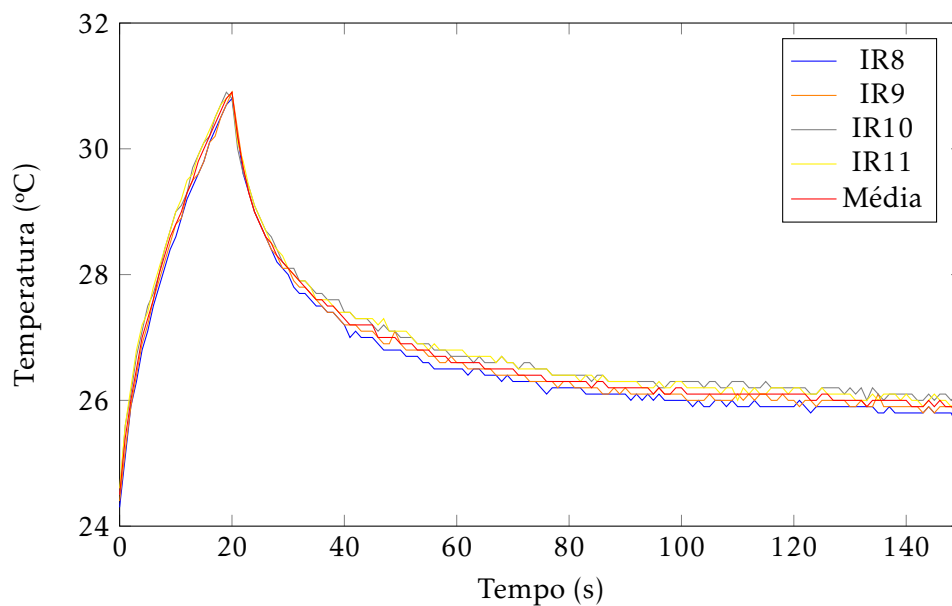


Figura 3.17: Valores de temperatura (°C) ao longo do tempo (s) fora do defeito, por reflexão

máxima entre curvas, podendo indicar qual o melhor instante para o técnico fazer a captação de imagens. Para o caso apresentado, o instante de diferença máxima dá-se aos 53 segundos, com uma diferença de $0,7^{\circ}\text{C}$, sendo que este instante está representado na figura 3.21.

Recorrendo à figura 3.18, os valores do instante ou intervalos de tempo de contraste máximo para cada ensaio foram encontrados.

Todos apresentam valores semelhantes, sendo que o que apresenta o instante mais

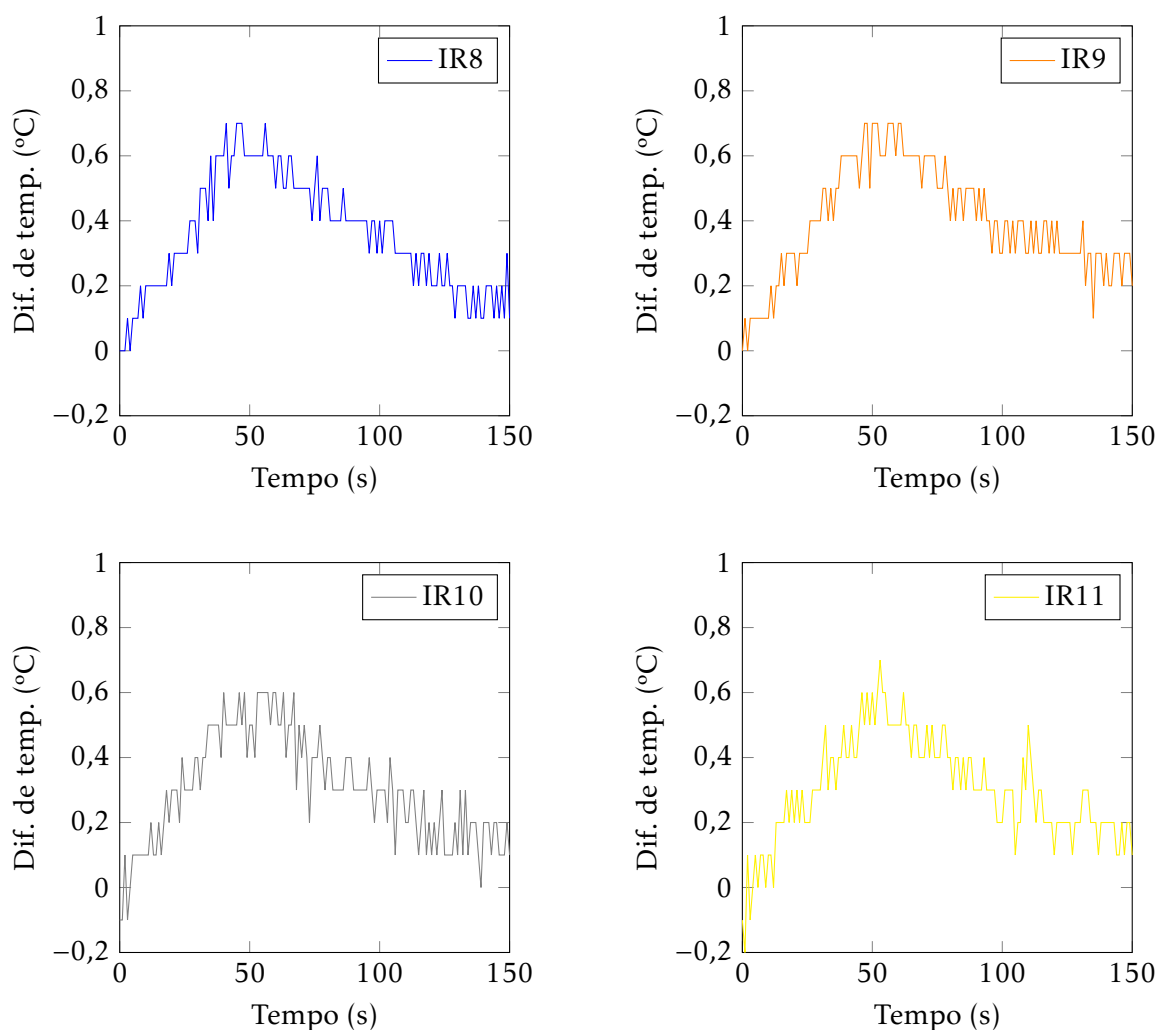


Figura 3.18: Diferenças entre curvas de cada ensaio no modo de reflexão

cedo, aos 40 segundos, é o ensaio *IR10* e o que apresenta o instante mais tarde também é o ensaio *IR10*, aos 67 segundos. Com esta informação, é possível então indicar ao técnico que pode iniciar a aquisição de imagens cinco segundos antes do instante mais cedo gravado e terminar cinco segundos após o instante mais tarde gravado, dando uma boa margem para obter uma boa deteção do defeito.

O resumo do instante ou intervalo de tempo dos vídeos é apresentado na tabela 3.4:

Tabela 3.4: Valores de diferença de temperatura (Dif_{max}) e intervalo de tempo (s) por modo de reflexão

Intervalo de tempo (s)	[45,56]	[47,61]	[40,67]	53
Dif_{max} (°C)	0,7	0,7	0,6	0,7
Ensaio	IR8	IR9	IR10	IR11

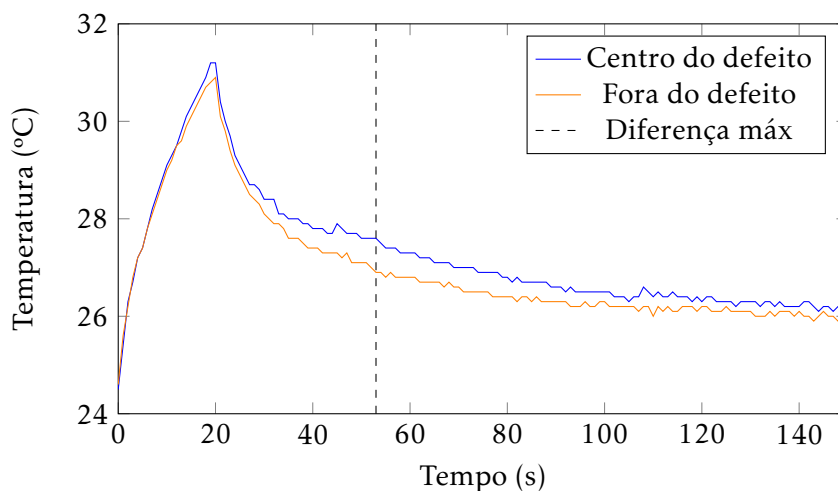


Figura 3.19: Representação das curvas do centro e fora do defeito do ensaio IR11

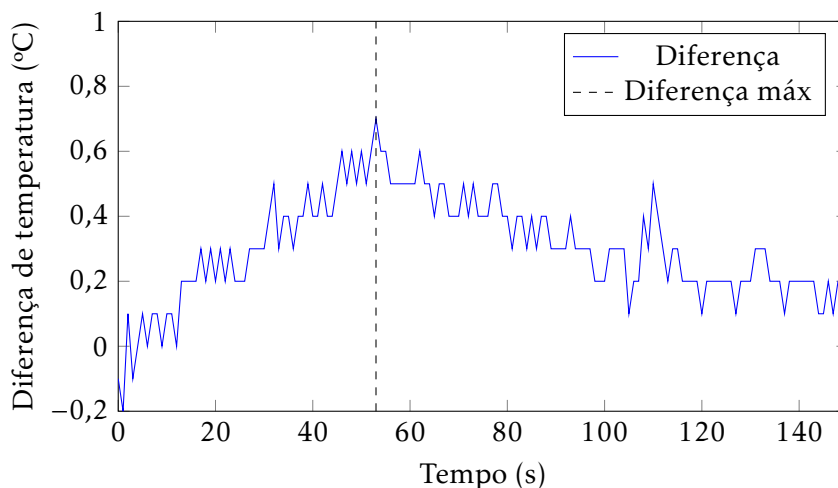


Figura 3.20: Representação da diferença das curvas do centro e fora do defeito do ensaio IR11

3.3.3 Transmissão e Reflexão - Duas fontes de calor

No subcapítulo anterior, foi mencionado que a montagem com duas FC permite realizar ensaios por modo de transmissão e reflexão, mas só foram apresentados os casos utilizando o modo de reflexão. Com estes, foi possível realizar uma análise inicial demonstrando que os ensaios apresentavam valores credíveis.

Após essa análise, é possível avançar para a apresentação de resultados dos ensaios por modo de transmissão e reflexão com duas FC. Estes ensaios foram realizados executando um dos modos e de seguida o modo par a este, ou seja, se fosse realizado um ensaio em modo de transmissão, o ensaio seguinte seria o ensaio em modo de reflexão. Este conjunto de ensaios foi executado deste modo, a fim de tentar garantir que as condições eram o mais aproximadas entre ensaios possível.

Os procedimentos são, então, semelhantes aos usados no ensaio com duas FC por

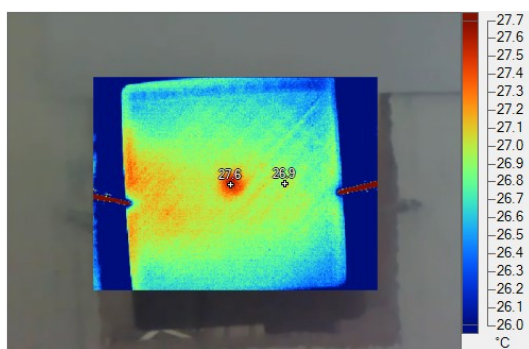


Figura 3.21: Imagem captada no instante de 53 segundos

reflexão, sendo que a diferença é que, após o passo 17, é necessário trocar a posição da câmara termográfica para fazer o ensaio par. A ordem com que se inicia os ensaios não é importante, sendo importante não fazer ensaios seguidos do mesmo modo de ensaio, pois as condições do ambiente podem-se alterar durante o tempo de espera de arrefecimento, não produzindo valores de condições muito semelhantes.

Foram realizados seis pares de ensaios, dos quais quatro pares estão aptos a análise, não contendo saltos que ocorrem devido a auto-calibração da câmara durante a gravação do ensaio. As condições de cada ensaio estão apresentadas na tabela 3.5.

Tabela 3.5: Valores de temperatura ambiente (T_{amb}) e temperatura do provete (T_p) por modo de reflexão (R) e transmissão (T)

Combinação	Par 1		Par 2		Par 3		Par 4	
Ensaio	IR12	IR13	IR14	IR15	IR16	IR17	IR18	IR19
Modo de ensaio	T	R	T	R	R	T	R	T
T_{amb} (°C)	24,5	24,5	26	24,7	24,3	24,0	24,0	23,9
T_p (°C)	24,7	24,7	24,9	24,4	23,9	23,9	24,4	24,3

Conforme já mencionado, a diferença entre curvas permite saber o instante ou intervalo de tempo em que a diferença de temperatura é máxima, permitindo saber o instante que produz a melhor resolução do defeito. Estes valores estão apresentados na tabela 3.6. Com a realização dos ensaios em pares, é possível saber qual é o modo que produz uma diferença maior para as condições de ensaio semelhantes, diferença esta representada na figuras 3.22 a 3.25, onde se conclui que por modo de reflexão, a diferença entre temperaturas é maior.

Tabela 3.6: Valores de diferença de temperatura (Dif_{max}) e intervalo de tempo (s) por modo de reflexão e transmissão

Intervalo de tempo (s)	[37;57]	[48;57]	[41;59]	[39;64]	[49;59]	51	58	[42;65]
Dif_{max} (°C)	0,4	0,7	0,4	0,6	0,7	0,4	0,9	0,6
Ensaio	IR12	IR13	IR14	IR15	IR16	IR17	IR18	IR19

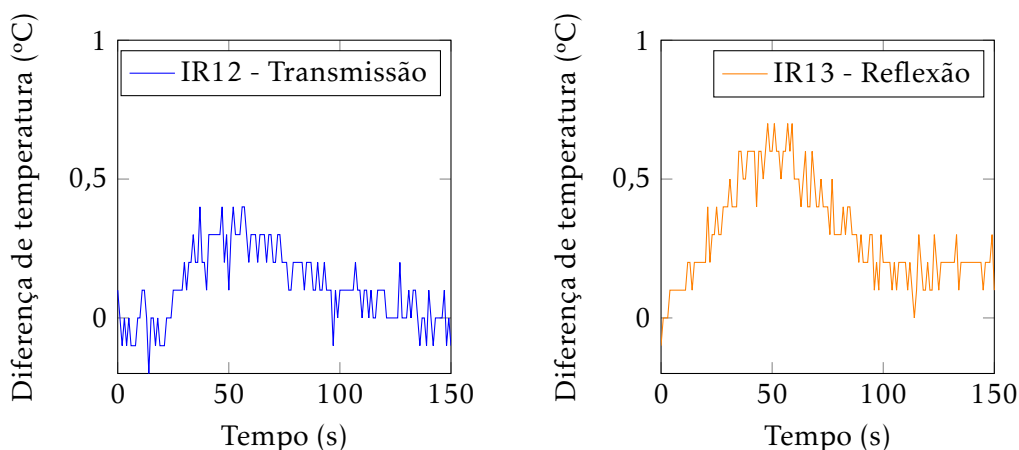


Figura 3.22: Diferença entre curvas do Par 1

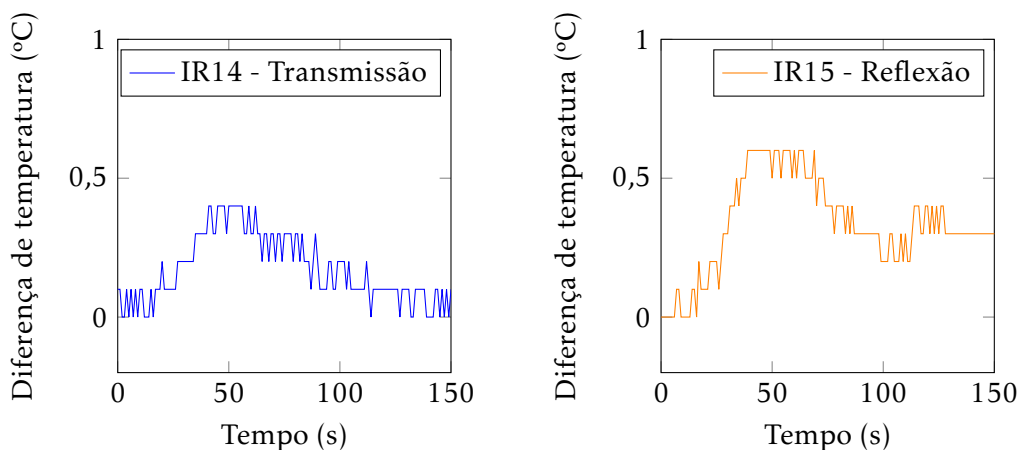


Figura 3.23: Diferença entre curvas do Par 2

3.3.4 Conclusões

A estação de ensaios permitiu uma boa realização dos ensaios pretendidos. O recurso a esta foi de fácil aprendizagem e uso, no entanto, após a realização de todos os ensaios necessários, têm de ser mencionadas algumas situações.

A estação está bem assente, não tendo vibrações, mas os restantes elementos já se encontram com algumas folgas. O perfil *bosh* 3 oscila em torno de y e x com facilidade, sendo difícil garantir a posição das fontes de calor. Na montagem com duas FC, um simples toque pode alterar a posição destas podendo uma fonte ficar numa posição diferente em relação à outra.

O filtro usado fez a sua função, permitindo melhores ensaios, mas, caso não estivesse bem esticado, produzia alguma refração da radiação o que alterava os valores medidos.

Relativamente às FC e aos seus componentes auxiliares, o casquilho das FC tinha uma posição fixa, no entanto, o mesmo não se pode concluir das proteções. Estas proteções, por

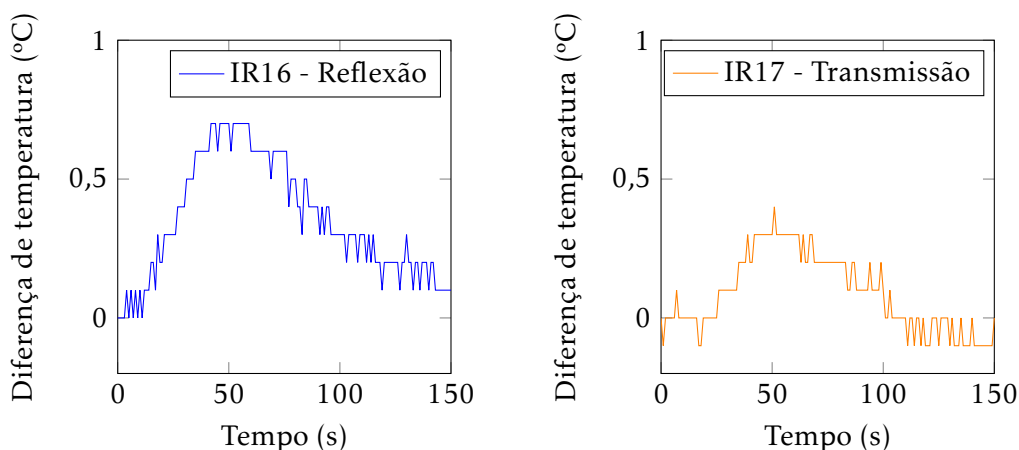


Figura 3.24: Diferença entre curvas do Par 3

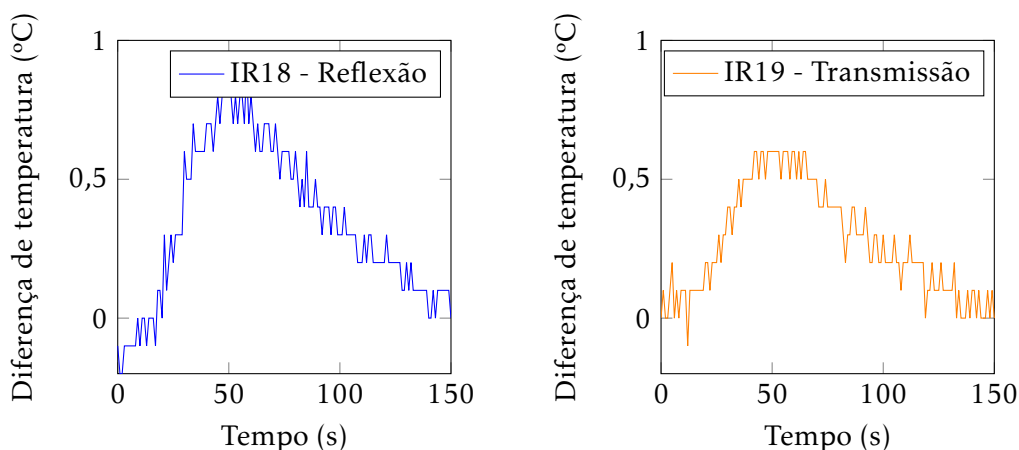


Figura 3.25: Diferença entre curvas do Par 4

vezes ganham folga, e tombam, levando à deslocação do foco do calor, sendo necessário o aperto dos parafusos laterais (ver figura 3.26). Como as proteções são independentes, podia ocorrer o desajuste de só uma ou por vezes ambas. Para os ensaios com duas FC, foi também detetado que existia mais aquecimento nas zonas laterais do provete. Após análises, chegou-se à conclusão que existe radiação a ser emitida para as laterais, logo as proteções estão a produzir reflexão não intencional, o que leva a perdas de calor que não estão a ser focadas na superfície pretendida a ser analisada. Esta deteção foi realizada com recurso a uma chapa de cobre pintada de preto (figura 3.27c) e foi realizado um ensaio normal, onde se detetaram as zonas aquecidas laterais (figuras 3.27a e 3.27b).

Os gráficos obtidos permitiram demonstrar as capacidades do END de TA. Das muitas captações de imagens, praticamente todas apresentavam curvas sem saltos. Os ensaios que continham estes saltos ocorriam devido à auto-calibração da câmara térmica. Esta

3.3. PROCEDIMENTO, MONTAGEM E APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS

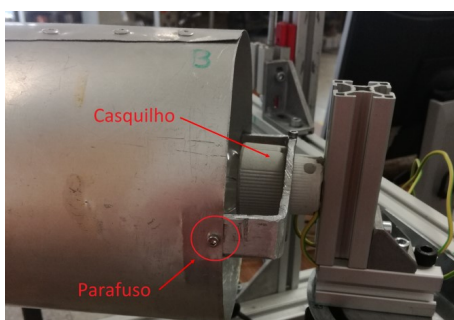


Figura 3.26: Proteção da FC

situação não pode ser evitada, pois não existe nenhuma opção que desligue esta funcionalidade da câmara.

Como conclusão final, com a realização dos ensaios em pares é possível concluir que o modo de reflexão produz melhores resultados que o modo de transmissão, pois a diferença de temperaturas é maior, estando os valores representados na tabela 3.7. Esta conclusão é ideal, pois, na maior parte das ocasiões, um técnico no terreno não tem acesso para a realização do ensaio por modo de transmissão, estando assim confirmado que o modo de reflexão irá produzir melhores captações de imagens.

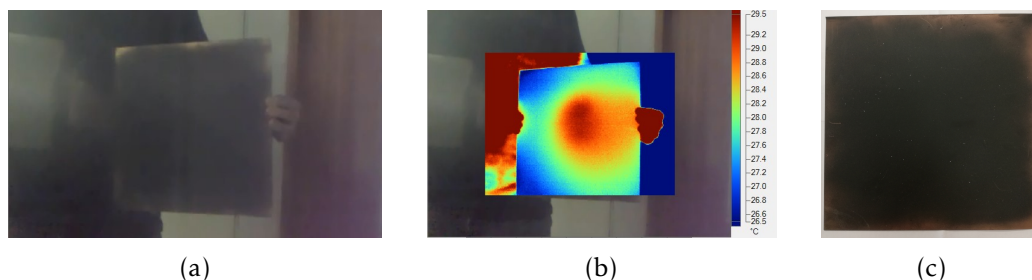


Figura 3.27: Demonstração da radiação lateral: a) Chapa perpendicular à FC; b) Imagem retirada do ensaio; c) Chapa de cobre pintada

Tabela 3.7: Valores da diferença máxima (Dif_{max}) de temperaturas entre curvas para os pares observados

Combinação	Par 1		Par 2		Par 3		Par 4	
Ensaio	IR12	IR13	IR14	IR15	IR16	IR17	IR18	IR19
Modo de ensaio	R	T	T	R	R	T	R	T
Dif_{max}	0,4	0,7	0,4	0,6	0,7	0,4	0,9	0,6

VALIDAÇÃO DOS MODELOS NUMÉRICOS

Neste capítulo, serão explicados os modelos numéricos bidimensionais e tridimensionais criados para os casos apresentados no capítulo três. Os modelos numéricos, desenvolvidos em linguagem *APDL*, foram simulados com recurso ao *software* comercial *ANSYS*. Foram criados cinco modelos numéricos diferentes:

1. Modelo numérico bidimensional com fluxo de calor (código *APDL* apresentado no Anexo I);
2. Modelo numérico bidimensional com radiação com recurso a uma fonte de calor (FC) (código *APDL* apresentado no Anexo II);
3. Modelo numérico bidimensional com radiação com recurso a duas FC (código *APDL* apresentado no Anexo III);
4. Modelo numérico tridimensional com fluxo de calor (código *APDL* apresentado no Anexo IV);
5. Modelo numérico tridimensional com radiação com recurso a uma FC (código *APDL* apresentado no Anexo V).

Numa primeira fase, aproveitando o modelo mais simples com fluxo de calor, foi elaborado um refinamento da malha e comparados valores com informações do estado de arte de Martins et al [22].

Numa segunda fase, foram desenvolvidos dois modelos, onde a condição fronteira de fluxo de calor é removida e é introduzido o método de matriz de radiação, para o caso de existir só uma FC e para o caso de existirem duas FC. Nestes dois modelos é elaborado um refinamento de malha, comparações de curvas com as informações obtidas

experimentalmente e uma análise de sensibilidades com variação de parâmetros - profundidade defeito, distância das FC, entre outros - permitindo assim um estudo sem custos associados aos procedimentos experimentais.

Por último, foram criados dois modelos tridimensionais para comparar com os resultados obtidos dos modelos bidimensionais.

Compreendendo os aspetos físicos do END da Termografia Ativa, foi possível avançar para a criação de modelos numéricos, que permitiram a simulação, tendo em consideração os fenómenos de convecção e radiação.

Relativamente às propriedades do provete, estas foram obtidas através do fornecedor do material. Os valores típicos para o PA-12 estão apresentados na tabela 3.1, presente no capítulo três.

Uma das situações iniciais é descobrir qual a gama de valores a utilizar para o fenómeno da convecção. Esta gama de valores pode ser descoberta com recurso às equações 2.11 e 2.12 apresentadas no capítulo dois, no subcapítulo de convecção. Para este cálculo, é necessário saber a espessura da placa, condutividade do fluido e o seu número de *Prandtl*.

O provete tem como espessura de placa 5 mm e o fluido é o ar, que tem uma condutividade de $0,03 \text{ (W.m}^{-1}.\text{K}^{-1})$. O número de *Prandtl* usado para o ar é de $0,70$. Os valores mencionados do ar foram retirados de [23].

Como limite para o número de Rayleigh, este encontra-se entre 10^5 e 10^9 . Estes limites são os descritos como o valor mínimo para leitura de resultados sem erros em regime laminar e o valor máximo do regime laminar, respetivamente. Os valores obtidos são apresentados da tabela 4.1.

Tabela 4.1: Valores de Nusselt para placa vertical e fluxo de calor uniforme

Valor de Nu para $Ra=10^5$	Valor de Nu para $Ra=10^9$
9,26	122,84
9,32	124,62

Estes valores permitem, então, fazer uma aproximação dos valores da convecção substituindo os valores do número de *Nusselt* na equação 2.13, obtendo os valores na tabela 4.2.

Tabela 4.2: Valores de convecção

Valor de h para $Ra 10^5$	Valor de h para $Ra 10^9$
2,01	26,70
2,03	27,09

Assim, para os valores de coeficiente de convecção, é iniciado o estudo com o valor mínimo $2 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ na superfície oposta à superfície aquecida, pois é esta a que tem menos trocas de energias. Na superfície aquecida é usado como valor máximo $27 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$

devido ao facto de ser a superfície que tem uma troca de energia maior com o ambiente.

Como mencionado, os modelos estão desenvolvidos em linguagem *APDL*, linguagem esta necessária para ser lida no *solver* comercial *ANSYS*. Para isso, os comandos são escritos num ficheiro de texto, conseguindo o *solver* resolver os sistemas de equações necessários.

4.1 Estudo de convergência de malha

O estudo de convergência de malha é de extrema importância na criação de um modelo numérico. Este estudo é realizado comparando os valores obtidos segundo um certo número de elementos. Com o aumento do número de elementos, a precisão dos resultados também aumenta, bem como o custo computacional. Apesar de não existir um limite máximo no número de elementos, após um certo valor de elementos a precisão dos resultados não varia, logo pode existir um aumento do custo computacional desnecessário. Com isto em mente, procedeu-se a um estudo com recurso ao modelo numérico bidimensional com fluxo de calor.

O *ANSYS* permite criar dois tipos de malhas: *free* e *mapped*. No tipo de malha *free*, os critérios de escolha da forma - triangular, quadrangular ou hexaédrica - e do número de elementos é escolhido pelo *software*, criando uma malha automática, como demonstrado na figura 4.1.

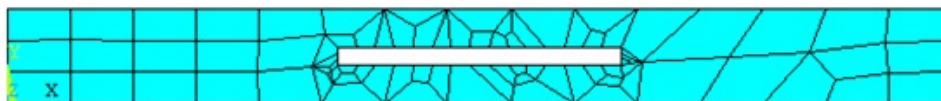


Figura 4.1: Malha criada com recurso ao comando *free*

Uma malha do tipo *mapped* é criada pelo utilizador numa área ou volume. Para uma malha numa área, os tipos de elementos podem ser triangulares ou quadriláteros. Para uma malha num volume, os elementos são hexaedros. A indicação da forma do elemento permite criar uma malha regular com um maior controlo do número ou tamanho de elementos ao longo de uma linha como demonstrado na figura 4.2.



Figura 4.2: Malha do tipo *mapped*

Recorrendo então ao modelo mais simples, procedeu-se a uma análise de sensibilidade quanto ao número de elementos a usar, para obter os melhores resultados possíveis sempre com o objetivo de saber qual o limite de elementos que deverá ser implementado.

Uma malha diz-se grosseira quando o número de elementos presente não irá permitir uma boa análise e conseqüente precisão de valores pretendidos. Uma malha pode apresentar um bom aspeto, mas os valores apresentados terem uma margem de erro que não permite uma boa análise, comprometendo resultados.

A simulação pretendida tem como grau de liberdade (GDL) a temperatura e é em regime transiente. Assim, recorrendo ao manual do ANSYS [24–26], as opções para a simulação destes casos são os elementos *Plane55* e *Plane77*. O elemento *Plane55* tem a característica de ser um elemento sólido de 4 nós, em que em cada nó só existe um GDL - temperatura - e está representado na figura 4.3a. O *Plane77* (figura 4.3b) tem a característica de ter nós intermédios, sendo um elemento composto por 8 nós. Assim, utilizando elementos *Plane55* tem-se um número mais reduzido de nós, e conseqüente menos tempo de processamento. Utilizando o *Plane77*, o número de nós aumenta, aumentando o grau da função forma (melhor aproximação), que apesar de aumentar o tempo computacional, pode ser benéfico para a simulação do modelo.

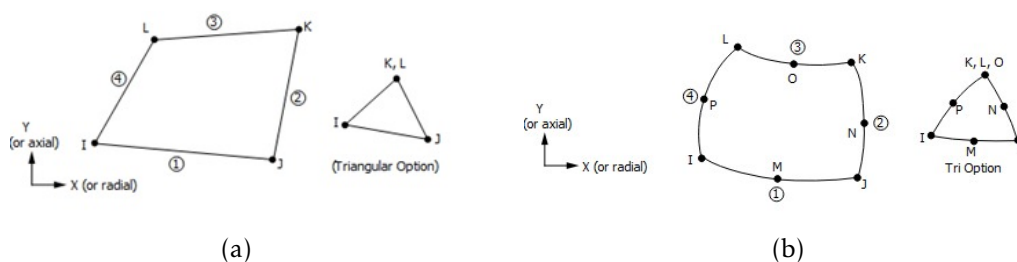


Figura 4.3: Elementos para análise térmica: a) *Plane55*; b) *Plane77*. [25]

Com isto em mente, utilizando os elementos *Plane55*, foi elaborado um estudo variando o número de elementos ao longo do comprimento e depois ao longo da espessura. Em cada fase é apresentado um gráfico e o tempo de análise necessário para realizar a simulação numérica. A variação ao longo do comprimento iniciou-se com uma malha 10×10 e foi realizada em duas fases: variação do número de elementos no comprimento e variação do número de elementos na espessura.

4.1.1 Variação do número de elementos ao longo do comprimento

Nesta fase, foi variado o número de elementos ao longo do comprimento. Para cada variação foi analisado o instante de 20 segundos, instante este que representa o momento em que a temperatura é máxima na superfície aquecida.

Analisando o gráfico da figura 4.4, juntamente com as informações dos tempos de análise da tabela 4.3, é possível concluir que a convergência estabiliza a partir da malha 400×10 e que os tempos de análise são muito curtos. Assim, pode ser concluído que utilizar uma malha acima desta variação não afeta os valores obtidos. Ainda sobre a convergência, pode-se verificar que a variação da temperatura ocorre na casa das milésimas, o que a nível prático não é de todo relevante, pois a câmara não tem sensibilidade suficiente para detetar variações. Apesar disso, a nível de cálculo do *solver* estas casas são

necessárias para possibilitar uma boa aproximação de valores.

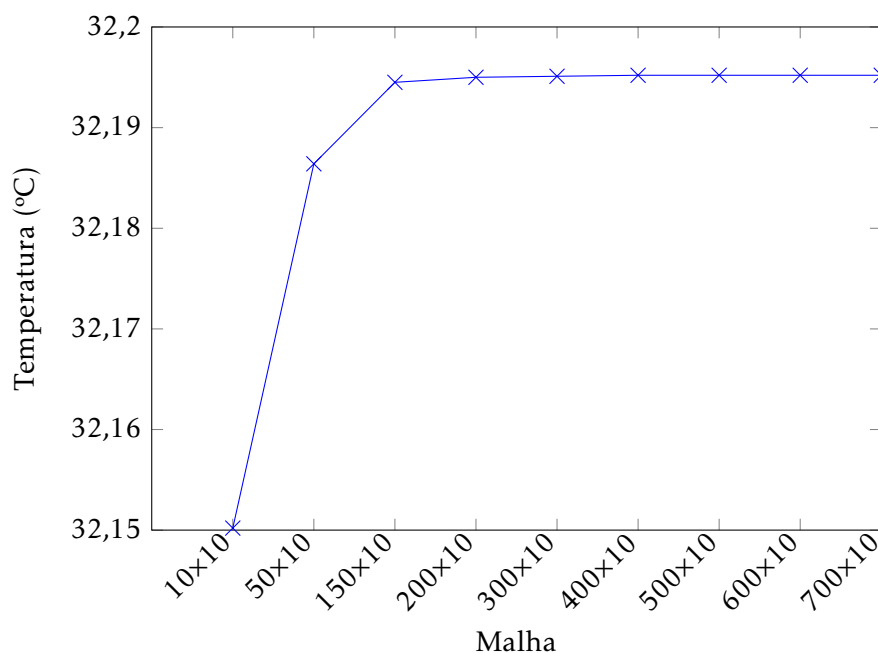


Figura 4.4: Gráfico de convergência da temperatura com o aumento de elementos ao longo do comprimento

Tabela 4.3: Valores de temperatura e tempo de análise necessários para cada malha (comprimento)

Malha	Temperatura (°C)	Tempo de análise (s)
10x10	32,1502	6
50x10	32,1864	9
150x10	32,1945	10
200x10	32,1950	11
300x10	32,1951	14
400x10	32,1952	18
500x10	32,1952	21
600x10	32,1952	23
700x10	32,1952	26

4.1.2 Variação do número de elementos ao longo da espessura

De seguida, foi feita uma variação do número de elementos ao longo da espessura, partindo da malha 400x10.

Procedendo a uma análise igual à anterior, analisando o gráfico da figura 4.5 juntamente com as informações dos tempos de análise da tabela 4.4, é possível concluir que uma malha 400x40 é suficiente para simulações futuras.

Quanto ao tempo necessário para realizar a simulação, os valores apresentados são do modelo mais simples e pode ser concluído que o tempo necessário não é relevante quando comparado com outros tipos de análises dinâmicas em que os tempos são horas ou dias. De realçar que estes tempos variam consoante o processador usado. Um processador com melhores capacidades de processamento tem tempos menores. Estes valores são representativos do processador *Intel(R) Core(TM) i7-4700MQ CPU @ 2,40GHZ*.

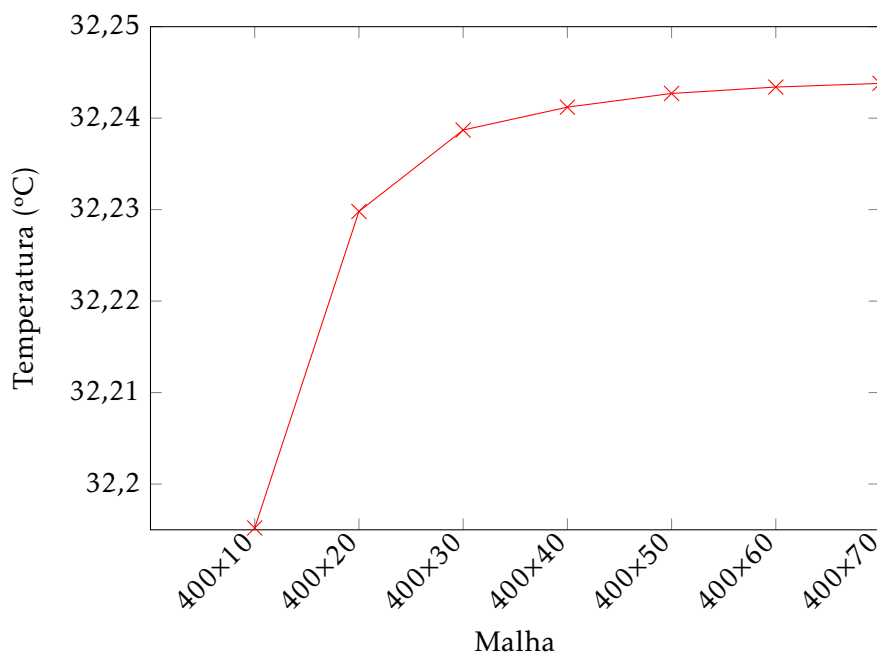


Figura 4.5: Gráfico de convergência da temperatura com o aumento de elementos ao longo da espessura

Tabela 4.4: Valores de temperatura e tempo de análise necessários para cada malha (espessura)

Malha	Temperatura (°C)	Tempo de análise (s)
400x10	32,1952	18
400x20	32,2298	26
400x30	32,2387	35
400x40	32,2412	46
400x50	32,2427	52
400x60	32,2434	65
400x70	32,2438	72

4.2 Modelo numérico bidimensional com fluxo de calor

O objetivo é simular a montagem com uma FC no modo de transmissão com recurso a um fluxo de calor na superfície.

A condição de fluxo de calor é um efeito simulado numa superfície, logo é necessário recorrer a um elemento que possibilite a troca entre elementos sólidos (*Plane55*) e elementos de superfície. Para este fim, é utilizado o elemento *SURF151*, representado na figura 4.6. O elemento *SURF151* tem a característica de ser um elemento de superfície de dois nós. É utilizado nas faces superiores e inferiores e é um tipo de elemento próprio para análises térmicas, que só pode ser utilizado quando sobreposto a um elemento do tipo sólido - figura 4.7. Estes elementos são criados com recurso ao comando *ESURF*. Este comando permite criar elementos sobrepostos aos nós selecionados, sendo assim possível criar elementos *SURF151* nas superfícies superior e inferior, ficando coincidentes com os elementos *Plane55*.

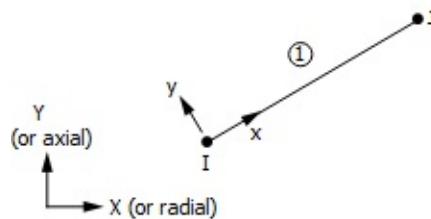


Figura 4.6: Elemento superficial 2D *Surf151*

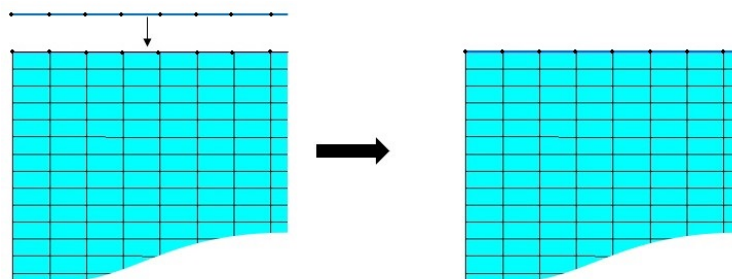


Figura 4.7: Exemplificação de imposição do elemento *SURF151*

O modelo apresentado encontra-se parametrizado, ou seja, basta alterar valores no início do código, tais como espessura, largura, profundidade do defeito ou fluxo de calor, sem que seja necessário percorrer o código.

Para a superfície inferior, superfície oposta ao aquecimento, foi utilizado um valor de coeficiente de convecção de $5 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$. Este valor foi obtido por tentativa e erro, apresentando a curva mais aproximada. Na superfície superior, superfície que sofre o aquecimento, é utilizado um valor de fluxo de calor e nenhum valor de convecção. Esta situação deve-se às duas condições, fluxo e convecção, serem condições semelhantes, em que ambas são fluxos e o *solver* usado não permite esta simulação.

A figura 4.8 demonstra as condições fronteiras mencionadas. As setas a vermelho na face superior representam a face onde foi simulado o fluxo de calor e as setas a azul

representam a face onde foi imposta a convecção.

Martins et al [22] apresentaram um estudo que permite saber qual a melhor dispersão do fluxo ao longo do tempo, tendo concluído que o que produziu resultados mais próximos foi quando se simulou o fluxo de calor constante, como é demonstrado na figura 4.9. Sabendo então o modo que melhor aproxima a curva do fluxo, foi elaborada uma aproximação do valor do fluxo por tentativa e erro chegando ao valor de 1300 W.m^{-2} .

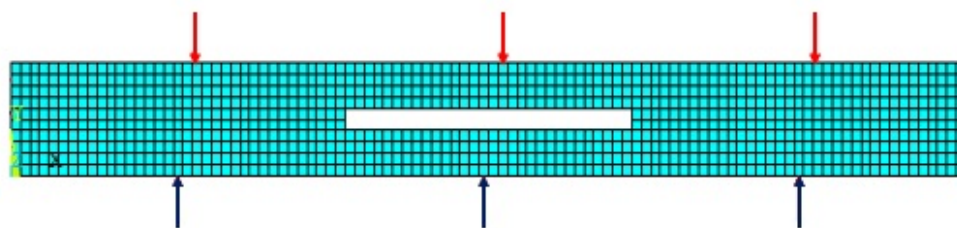


Figura 4.8: Condições fronteira

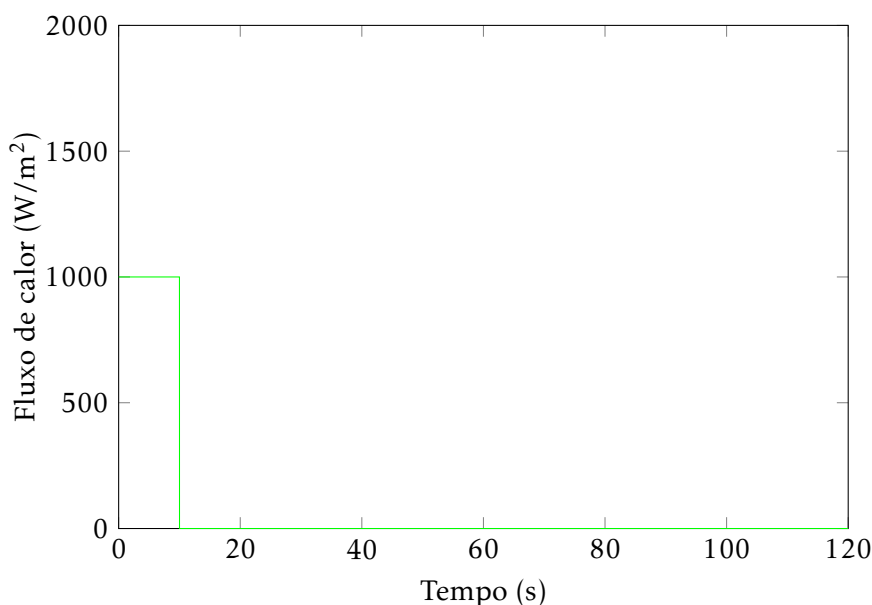


Figura 4.9: Fluxo de calor constante, adaptado de [22]

Inicialmente, o defeito foi criado como uma área sem elementos. Este criou problemas na aproximação da curva na zona do defeito e foram então adicionados elementos *Plane55* com as propriedades físicas do ar, apresentadas na tabela 4.5.

Comparando com as curvas obtidas do ensaio experimental, considerando um dos ensaios (*IR4*), é apresentado o resultado na figura 4.10, concluindo que existe uma boa aproximação das curvas na maior parte do tempo do ensaio.

Na zona do defeito, representado como Centro na legenda do gráfico, verifica-se um desvio grande aproximadamente a partir do instante 100 segundos, verificando-se até um cruzamento com a curva dos valores fora do defeito no instante 140 segundos. Este

Tabela 4.5: Propriedades físicas do ar

Densidade, ρ (kg.m^{-3})	1,2
Condutividade térmica, k ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$)	0,03
Calor específico, C_p ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)	1012

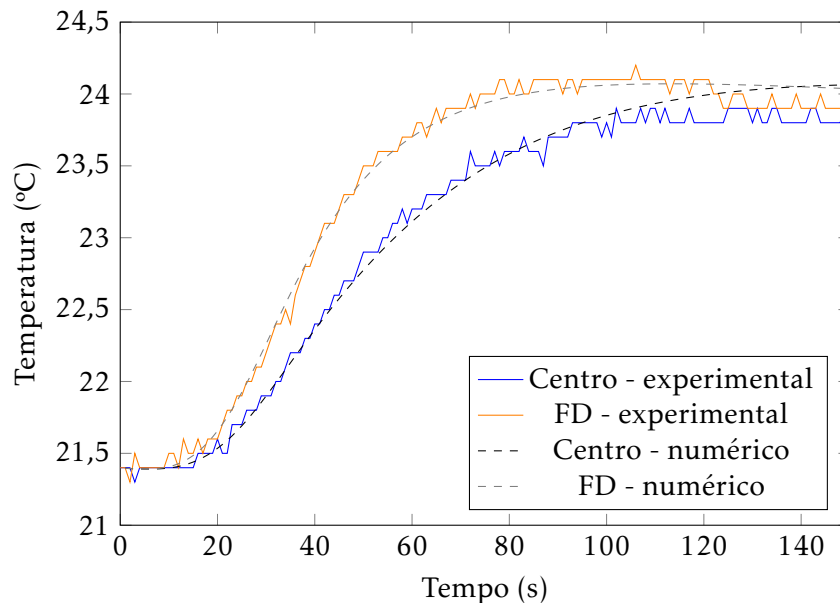


Figura 4.10: Comparação de curvas experimentais do ensaio IR4 com as curvas numéricas

acontecimento não afeta o propósito da simulação, pois as informações críticas encontram-se entre os 0 e os 80 segundos que, para um tempo de exposição de 20 segundos à fonte, é o intervalo onde ocorre a diferença máxima entre as curvas, conforme mostrado na figura 3.11, apresentada no capítulo três.

Comparando a curva experimental da diferença das curvas com a obtida numericamente, que se encontra na figura 4.11, é possível concluir que são muito semelhantes. As curvas experimentais representadas têm uma diferença máxima no instante 53 segundos de 0,7 °C e as curvas numéricas têm uma diferença máxima no instante 50 segundos de 0,629 °C. Mais uma vez, é de mencionar a importância destes instantes, pois permite indicar ao técnico qual o melhor momento para iniciar a aquisição de imagens.

A figura 4.12 representa as temperaturas no modelo bidimensional para o instante de 50 segundos. Também é possível visualizar o perfil de temperaturas na superfície analisada, que, por modo de transmissão, é a oposta à superfície do aquecimento, para o instante de 50 segundos. Este perfil, representado na figura 4.13, permite verificar que é na zona do defeito que existe uma alteração de temperatura na superfície, sendo que, neste caso, com o modo de transmissão, na zona do defeito, a temperatura é menor.

Comparando com os valores obtidos experimentalmente, é possível verificar que na zona do defeito existe uma aproximação de valores, mas que no restante comprimento

isto não acontece. Pelos valores experimentais é esperado que a temperatura seja menor nas extremidades. O fluxo é imposto em toda a superfície, o que provoca um aquecimento uniforme na superfície o que produz a diferença entre valores experimentais e numéricos.

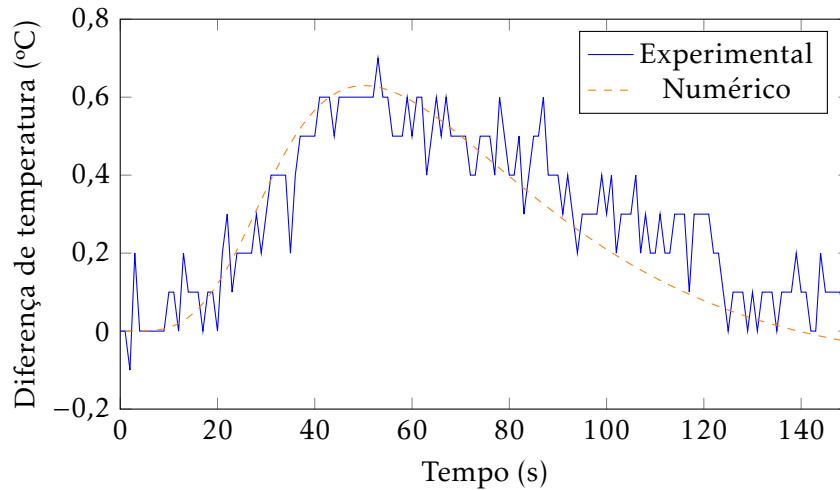


Figura 4.11: Comparação da diferença experimental do ensaio IR4 com a diferença numérica

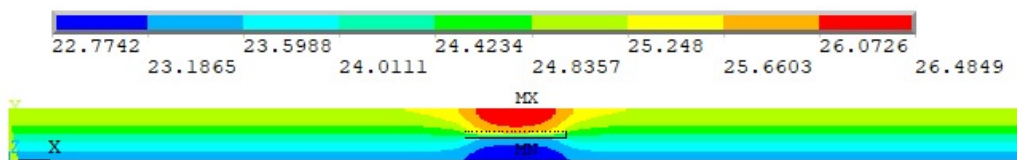


Figura 4.12: Representação da temperatura no modelo

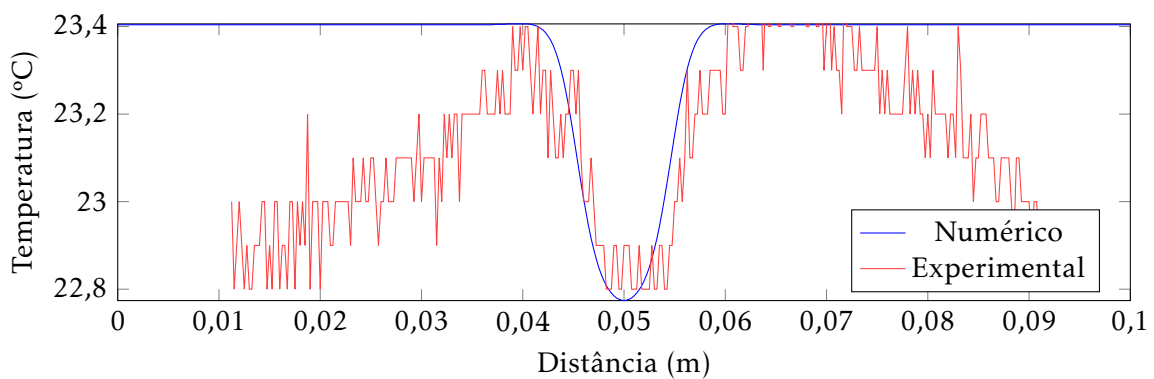


Figura 4.13: Perfil de temperatura na superfície inferior

4.3 Modelo numérico bidimensional com radiação - Uma fonte de calor

O modelo anterior apresenta aproximações com os ensaios realizados, no entanto, está limitado nas condições que podem ser impostas ao sistema, sendo que o maior problema detetado foi a não possibilidade de simular convecção e fluxo na mesma superfície. Uma das situações detetadas no estado da arte foi a não utilização do fenómeno de radiação nos modelos desenvolvidos. Assim, foi criado um modelo numérico, em código *APDL*, para simular a montagem com uma FC em modo de transmissão com recurso à matriz de radiação, permitindo uma simulação com valores com melhor correlação com os ensaios experimentais realizados.

Para este modelo, os elementos sólidos a utilizar passam a ser o *Plane77* por ter oito nós, aumentando o número de funções de forma, elevando a precisão de valores obtidos. Para uma análise nas mesmas condições, mas utilizando os elementos *Plane55*, verificou-se que o tempo computacional é de 50 segundos, ligeiramente inferior ao tempo computacional de 80 segundos verificado com o uso de elementos *Plane77*, mas com menor precisão quando comparado com as análises em que se usaram elementos *Plane77*.

Este modelo numérico conta com a implementação da aplicação da matriz radiação, que calcula os fatores de forma entre superfícies. Para a aplicação desta matriz, foram utilizadas as recomendações apresentadas no manual do *ANSYS*. Como tal, foram utilizados os elementos *Link33* (figura 4.14) para os elementos de superfície e também a FC.

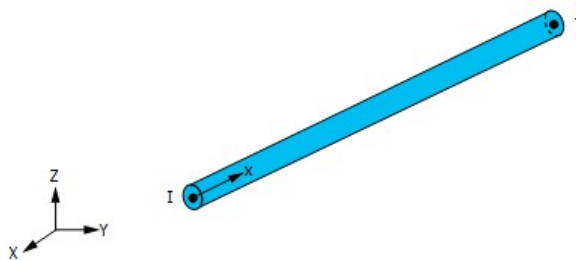


Figura 4.14: Elemento *LINK33* utilizado para a radiação [25]

Este modelo numérico é semelhante ao primeiro modelo apresentado, com a diferença de que não é imposto um fluxo de calor, sendo em vez disso simulada a radiação emitida pela FC. A este método chama-se "matriz radiação"[25]. Este método é, usualmente, usado para problemas de radiação que envolvam duas ou mais superfícies que estejam a radiar e a irradiar calor. Este método cria uma matriz com os fatores de forma que ocorrem entre as superfícies. A informação destas matrizes é guardada num ficheiro para, posteriormente, ser atribuída a um super elemento para a análise térmica pretendida.

Para a aplicação desta matriz é necessário utilizar o comando *AUX12* no código *APDL*. Como pontos a ter em consideração na criação do código à priori da introdução deste comando, deve-se ter atenção aos seguintes pontos:

1. Para simulações bidimensionais, o sentido da radiação é definido como $Y+$. Assim, deve ser verificado se as coordenadas dos elementos da lâmpada e superfície se encontram com sentidos opostos (figura 4.15);
2. Enumerar os elementos pelo sentido de qual é o emissor e o recetor, ou seja, a numeração do elemento tipo da FC será inferior à do elemento tipo da superfície superior (figura 4.16). Esta numeração separada também irá facilitar a aplicação do comando *AUX12*;
3. Criar um nó que servirá como nó espacial e impôr uma temperatura - temperatura ambiente. Este nó tem como propósito absorver toda a energia que não é radiada para outros elementos e é usado principalmente em casos em que a troca de energia não se dá num ambiente fechado, podendo este ser um nó já existente ou então um novo nó criado no espaço.

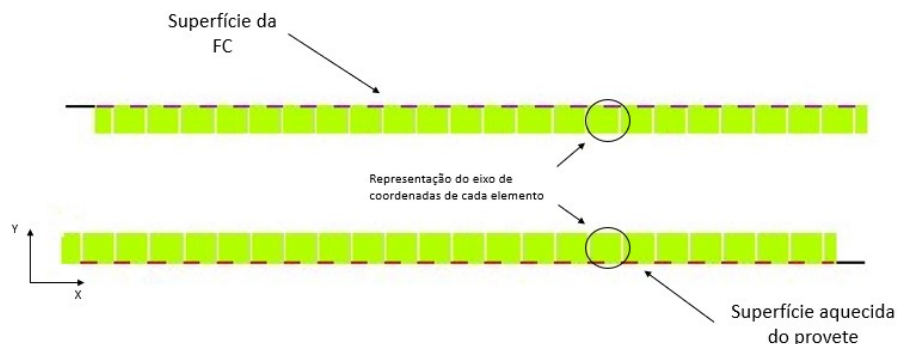


Figura 4.15: Representação do eixo de coordenadas da FC e da superfície aquecida (face superior)

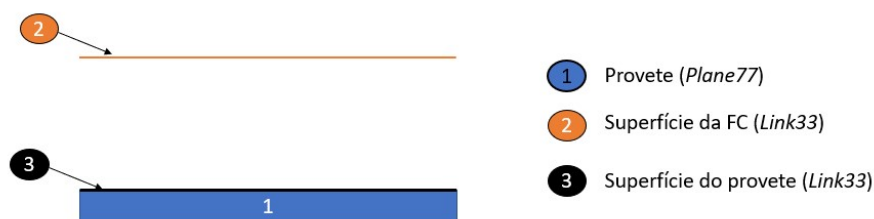


Figura 4.16: Numeração dos elementos

Após estas considerações é introduzido o comando *AUX12*. Nesta fase de desenvolvimento do código, é necessário escolher os elementos que vão trocar de energia, definir as emissividades de cada superfície, tipo de geometria, nó espacial, constante de Stefan-Boltzmann e o tipo de fator de forma pretendido - oculto ou não oculto [25].

O fator de forma oculto é descrito como o procedimento numérico em que um algoritmo é primeiro usado para determinar quais são as superfícies que são visíveis para

4.3. MODELO NUMÉRICO BIDIMENSIONAL COM RADIAÇÃO - UMA FONTE DE CALOR

outras superfícies. Após esta deteção, cada superfície (i) que radie é fechada num hemisfério de unidades radiais. Este hemisfério é orientado no sistema de coordenadas local ($x'y'z'$), em que o centro se encontra no centróide da superfície com o eixo z normal à superfície, o eixo x tem sentido do nó I para o nó J e o eixo y com a restante posição ortogonal aos eixos. As superfícies (j), relativas às superfícies que são vistas, são projetadas no hemisfério como se para um observador na superfície (i).

No modo não oculto, o *solver* calcula os fatores de forma para todas as superfícies com todas as outras superfícies, independentemente se a "vista" está bloqueada por um elemento ou não.

Devido aos procedimentos numéricos necessários, o modo oculto eleva o tempo de análise necessário. Segundo o manual do *solver*, existe uma melhoria na precisão dos resultados. Uma breve análise foi elaborada e os resultados apresentados na tabela 4.6. Para uma análise com modo oculto, o tempo de análise foi de 93 segundos, enquanto que, para o modo não oculto, foi de 80 segundos. A diferença nos resultados obtidos entre modos foi aproximadamente nula.

Tabela 4.6: Comparação de modos

	Modo oculto	Modo não-oculto
Tempo de análise (s)	93	80
Diferença máxima (°C)	16×10^{-3}	

Este processo deve ser iniciado selecionando os elementos 2 e 3 (ver figura 4.16), que são a superfície da FC e do provete, respetivamente. Como emissividade, foi atribuído aos elementos de superfície do provete e da FC o valor de 0,95. A simulação a realizar é bidimensional e o método do fator de forma escolhido foi o não-oculto, pois a diferença entre valores não justificou o uso do modo oculto, que tem um tempo de análise superior e a complexidade da geometria é mínima. Para situações de geometrias mais complexas, as diferenças máximas entre valores apresenta uma gama de valores maior. A constante de *Stefan-Boltzmann* está definida de origem pelas unidades americanas, logo é necessário alterar para o valor SI de $5,67 \times 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$. Para o nó espacial basta selecionar o nó pretendido, criado previamente e com uma temperatura já imposta, com o comando *SPACE*.

Após a indicação destes parâmetros, é introduzido o comando *WRITE*, seguido do nome (*filename*) pretendido. Este comando permite guardar a informação dos fatores de forma calculados numa matriz, chamada de "matriz radiação", num ficheiro *filename.sub*. Com este comando, fica concluída a informação necessária para a criação da matriz radiação.

Como mencionado, o comando *AUX12* permite criar uma matriz de fatores de forma que ocorrem entre as superfícies e guardar essa informação. Essa informação, guardada no ficheiro *filename.sub* é então carregada como informação para um novo tipo de elemento. Este novo elemento é denominado de *super elemento*. O super elemento usado é

chamado de *MATRIX50*. Este elemento permite comprimir toda a informação dos elementos selecionados previamente num só elemento. Estes elementos são normalmente usados para uma grande diminuição do número de elementos usados. Para o caso de a simulação presente, o seu uso tem como objetivo facilitar a leitura dos fatores de forma na matriz radiação, diminuindo o tempo de processo necessário. Para o super elemento deve ser ativada a *keyopt 1*, para o uso de radiação. Assim, para passar a informação para o super elemento é utilizado o comando *SE*, indicando o nome do ficheiro com o qual a matriz radiação foi criada. Após este passo, deve-se eliminar os elementos de superfície criados para a superfície do provete com o comando *ESURF* (elemento 3).

As condições a impor no sistema são: temperatura da FC e convecção na superfície. Para a convecção, os valores usados foram de $2 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ nas superfícies inferior e laterais e de $27 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ na superfície aquecida.

A fonte de calor tem uma distribuição ao longo do tempo constante, sendo que, após se desligar, demorará uns instantes a arrefecer. A FC encontra-se à temperatura ambiente inicialmente. Quando é ligada, esta temperatura eleva-se rapidamente à temperatura máxima, mantendo-se assim até que seja desligada. Após ser desligada a temperatura decresce rapidamente até cerca de metade da temperatura máxima, diminuindo depois de um modo mais constante ao longo do tempo até à temperatura ambiente. Os valores de temperatura estão apresentados na tabela 4.7 e representados no gráfico da figura 4.17.

Tabela 4.7: Valores de temperatura ao longo do tempo para a lâmpada

Tempo (s)	0	0,5	20	20,5	22	25	30	40	50	60	150
Temperatura (°C)	T_{amb}	97	97	80	62	48	44	41	40	37	30

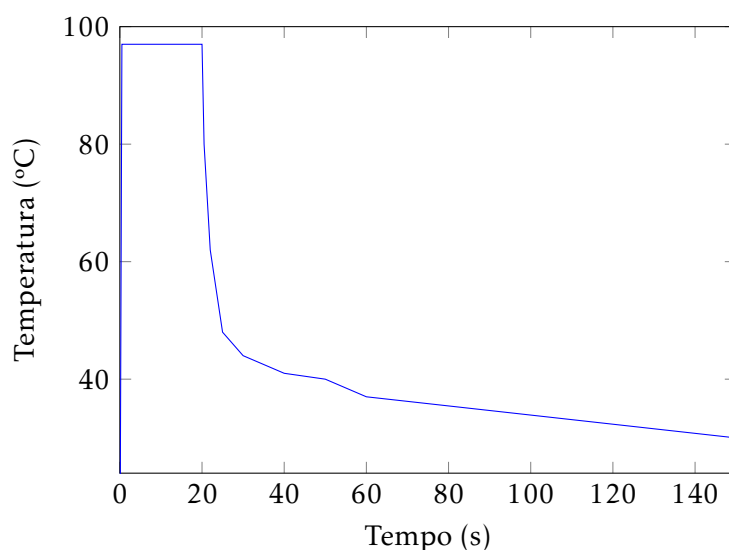


Figura 4.17: Representação gráfica da distribuição da temperatura da lâmpada

4.3. MODELO NUMÉRICO BIDIMENSIONAL COM RADIAÇÃO - UMA FONTE DE CALOR

As curvas obtidas são apresentadas no gráfico da figura 4.18 e a diferença entre estas está representada na figura 4.19. Comparando as curvas experimentais do ensaio IR4 com as obtidas com este modelo numérico, comparação esta apresentada na figura 4.20, é possível concluir que os valores obtidos são muito próximos. A comparação da diferença entre as curvas está representada na figura 4.21. As curvas numéricas têm uma diferença máxima no instante 50 segundos, com um valor de 0,570 °C, o que comparando com o modelo numérico com fluxo de calor, que apresentou um valor de 0,629°C, é inferior.

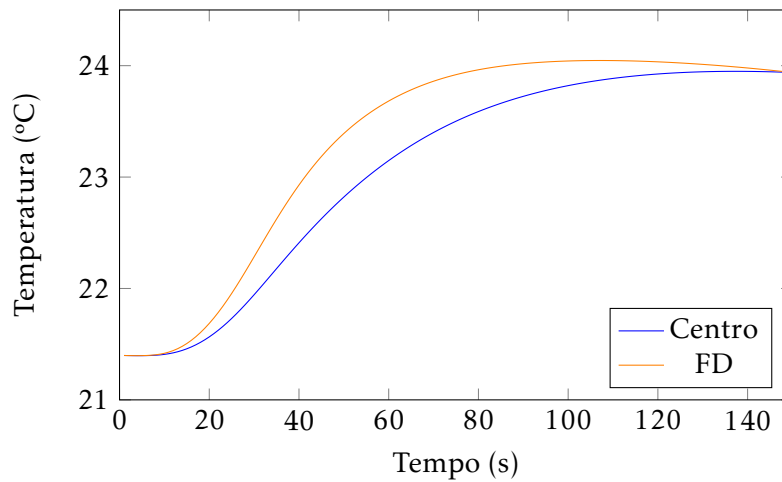


Figura 4.18: Representação das curvas numéricas por modo de transmissão com uma FC e radiação

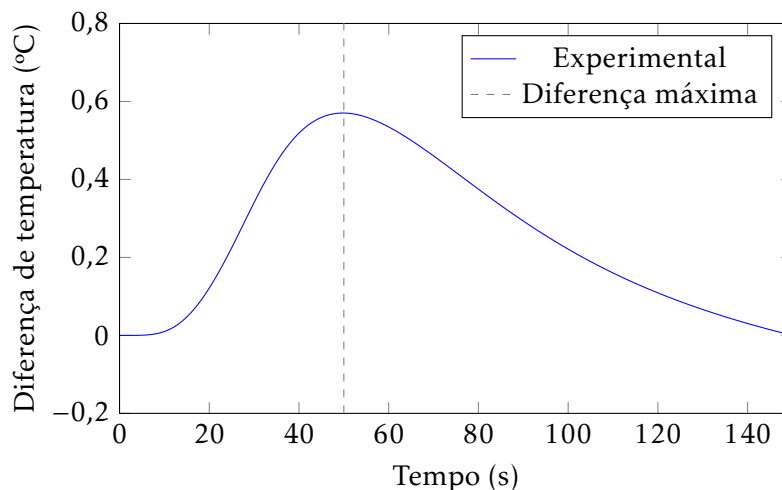


Figura 4.19: Diferença entre curvas numéricas

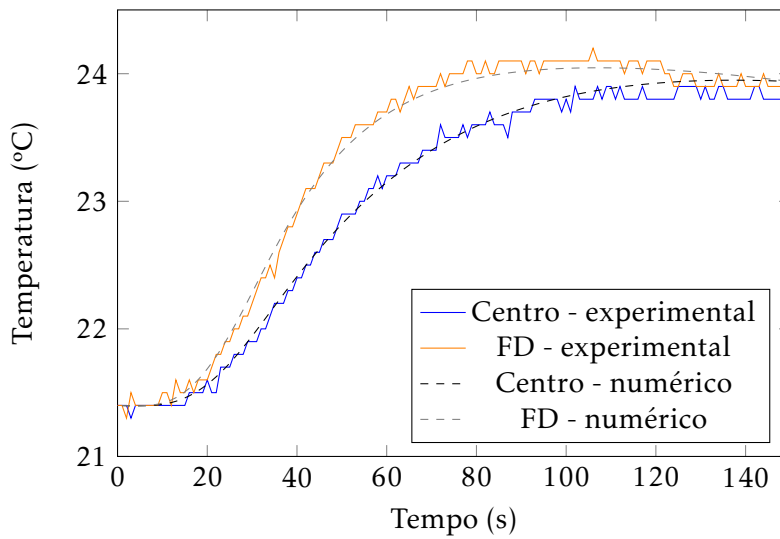


Figura 4.20: Comparação de curvas experimentais do ensaio *IR4* com as curvas numéricas por modo de transmissão com uma FC e radiação

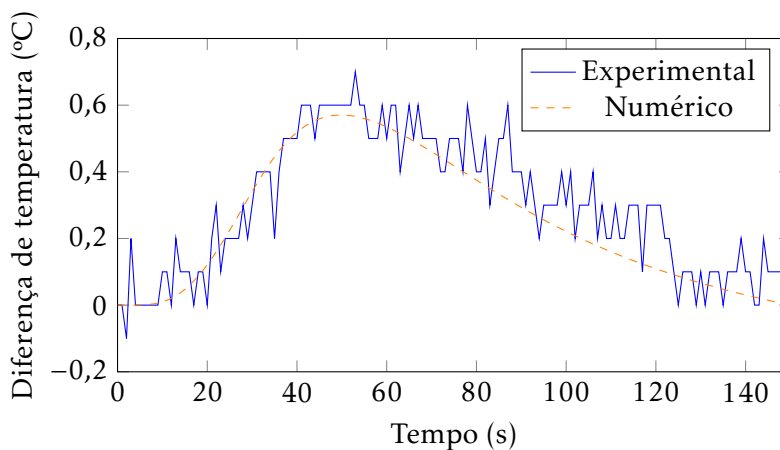


Figura 4.21: Comparação da diferença experimental do ensaio *IR4* com a diferença numérica por modo de transmissão com uma FC e radiação

Tendo-se verificado uma boa aproximação é necessário confirmar se não existem grande desvios de valores. Para esta verificação é utilizada a equação 4.1. Esta equação permite saber a soma do quadrado da diferença entre a curva experimental e numérica. Esta soma foi aplicada para as curvas fora do defeito, para o centro do defeito e para a diferença entre elas. O valor das somas obtidas estão apresentadas na tabela 4.8.

$$\sum_{j=1}^{150} (Curva_{exp_j} - Curva_{num_j})^2 \quad (4.1)$$

As figuras 4.22 a 4.24 representam os valores do desvio ao quadrado calculado pontualmente, permitindo verificação os instantes onde ocorre um desvio maior.

É possível verificar, tanto pelo valor das somas obtidos como pelas representações

4.3. MODELO NUMÉRICO BIDIMENSIONAL COM RADIAÇÃO - UMA FONTE DE CALOR

Tabela 4.8: Soma das diferenças ao quadrado entre respostas experimentais e respostas numéricas

	Equação 4.1 ($^{\circ}\text{C}^2$)
Centro	0,79
FD	0,73
Diferença entre curvas	1,26

gráficas que os valores são inferiores a $0,08\text{ }^{\circ}\text{C}^2$. Este valor é muito baixo o que permite confirmar que não existe praticamente desvio ao longo da simulação, concluindo que o modelo apresenta uma grande aproximação.

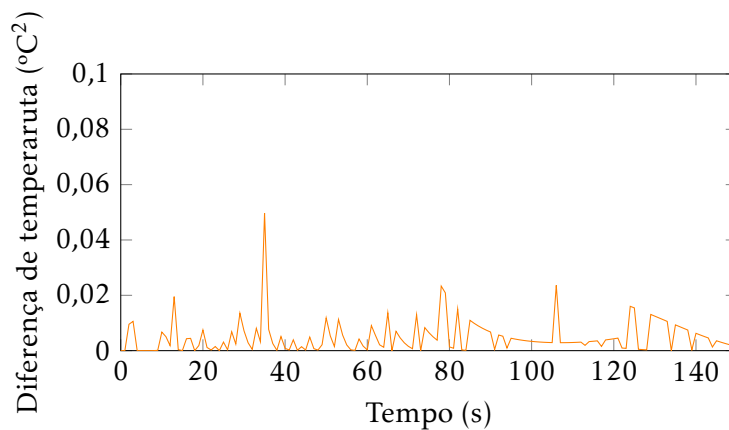


Figura 4.22: Representação da diferença entre curvas experimentais e numéricas fora do defeito e valor da soma das diferenças associado

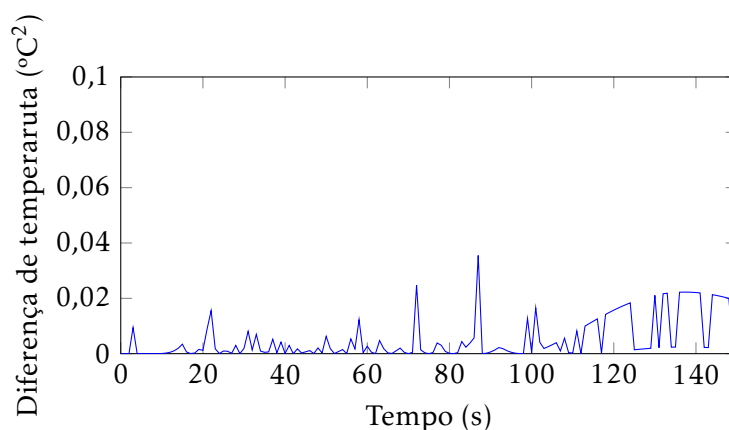


Figura 4.23: Representação da diferença entre curvas experimentais e numéricas no centro do defeito e valor da soma das diferenças associado

Estando então o modelo validado, é possível elaborar algumas análises que permitam um melhor conhecimento da técnica de Termografia Ativa.

Realizando a mesma comparação que foi realizada com o modelo do fluxo de calor

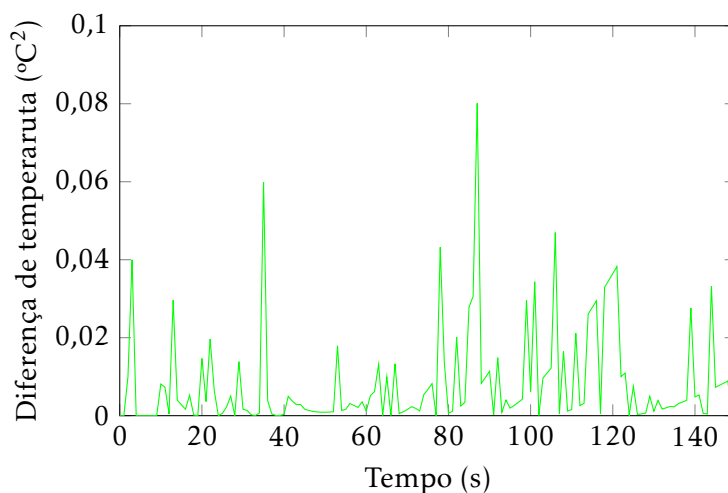


Figura 4.24: Representação da diferença entre curvas experimentais e numéricas e valor da soma das diferenças associado

para a temperatura na superfície, em que se comparou os perfis de temperatura, foram comparadas as temperatura na superfície inferior. A temperatura do modelo bidimensional com radiação e uma FC está representada na figura 4.25 e a comparação do perfil de temperaturas no gráfico da figura 4.26. Para este modelo, o perfil de temperatura tem outra distribuição. Isto deve-se à utilização da radiação, que é emitida em todas as direções, sendo que o centro do provete, que se encontra mais perto da FC é o que recebe mais calor, logo as laterais estão a receber menos energia não existindo um aquecimento inicial da superfície nesta zona, indo de encontro ao que foi obtido experimentalmente. Conclui-se então, que o recurso a este modelo produz uma aproximação mais semelhante dos valores experimentais, em que se pode identificar uma aproximação na zona do defeito, e, apesar do grande desvio, começa a existir uma distribuição semelhante.

Uma das situações que apresentou problemas foi a definição do valor do coeficiente de convecção. O valor foi aproximado por tentativa e erro dentro da gama de valores calculada de $[2;27] \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$. A gama de valores ajudou a perceber os valores a usar, mas uma pequena diferença de valores, como passar de um coeficiente de convecção de $2 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ para $5 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ produz alterações nas curvas. Nos gráficos representados na figura 4.27, a vermelho está representada a curva no centro do defeito experimental. Variando os valores do coeficiente de convecção na superfície inferior, mantendo o valor de $27 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ na superfície superior, é possível ver que as curvas não atingem as mesmas temperaturas, pois com o aumento do coeficiente de convecção aumenta a troca de calor com o ambiente, o que permite um arrefecimento mais rápido do material na superfície inferior.

Um dos parâmetros que afeta a obtenção de valores obtidos é a distância a que a FC se encontra. Se a fonte se encontrar perto do provete, por exemplo a 5 cm, as perdas que se dão no ar são menores, comparativamente a quando a FC se encontra a 100 cm, logo a distância a que se encontra a FC afeta os valores, o que também altera a diferença da

4.3. MODELO NUMÉRICO BIDIMENSIONAL COM RADIAÇÃO - UMA FONTE DE CALOR

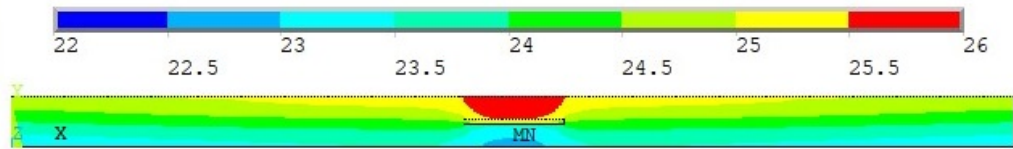


Figura 4.25: Representação da temperatura no modelo

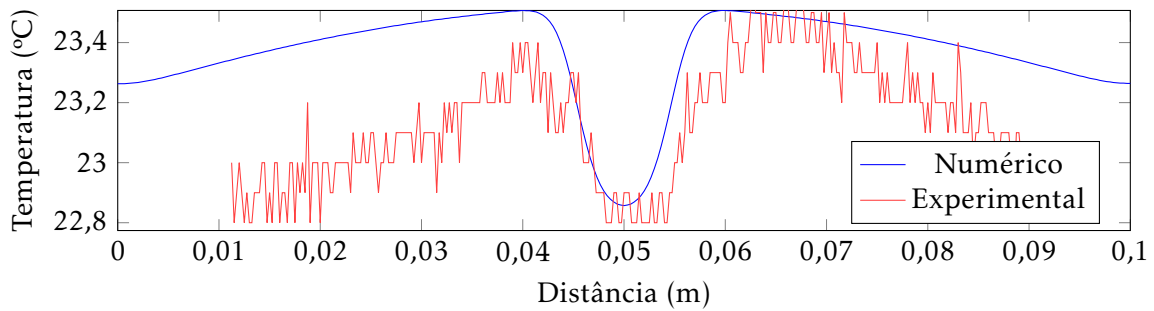


Figura 4.26: Perfil de temperatura na superfície inferior com radiação

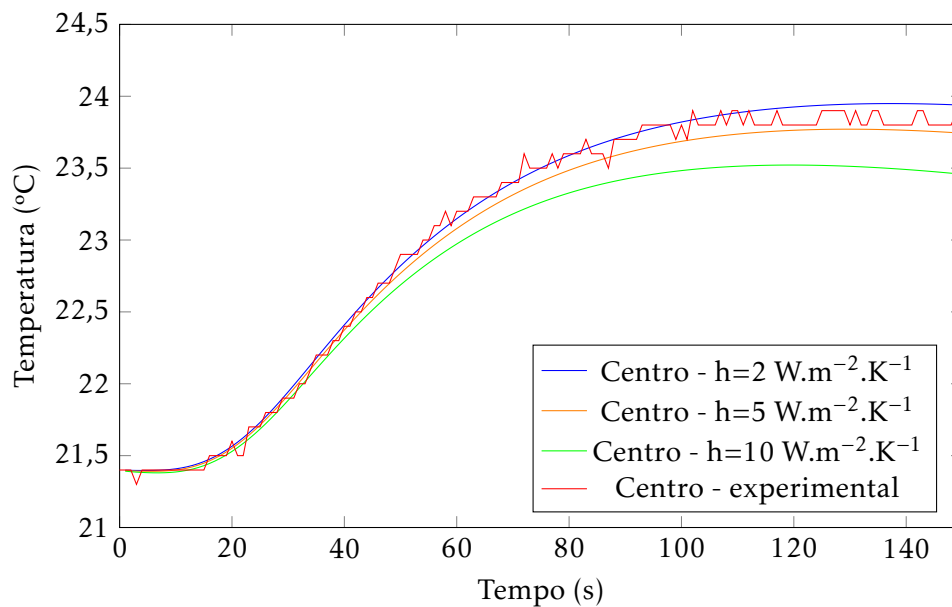


Figura 4.27: Variação do coeficiente de convecção na superfície inferior

temperatura entre as curvas. Esta afirmação pode ser verificada nas figuras 4.28 e 4.29. Os valores da diferença de temperaturas diminuem com o aumento da distância, o que é expectável, pois o provete não aquece tanto, logo não produz diferença suficiente entre a zona de defeito e a zona sem defeito, o que não permite a deteção do defeito. Quanto mais perto se encontrar a FC da superfície a analisar, melhor a diferença de temperaturas e melhor definição do defeito, mas é necessário ter em atenção a temperatura que atinge a superfície, pois pode afetar a integridade do material.

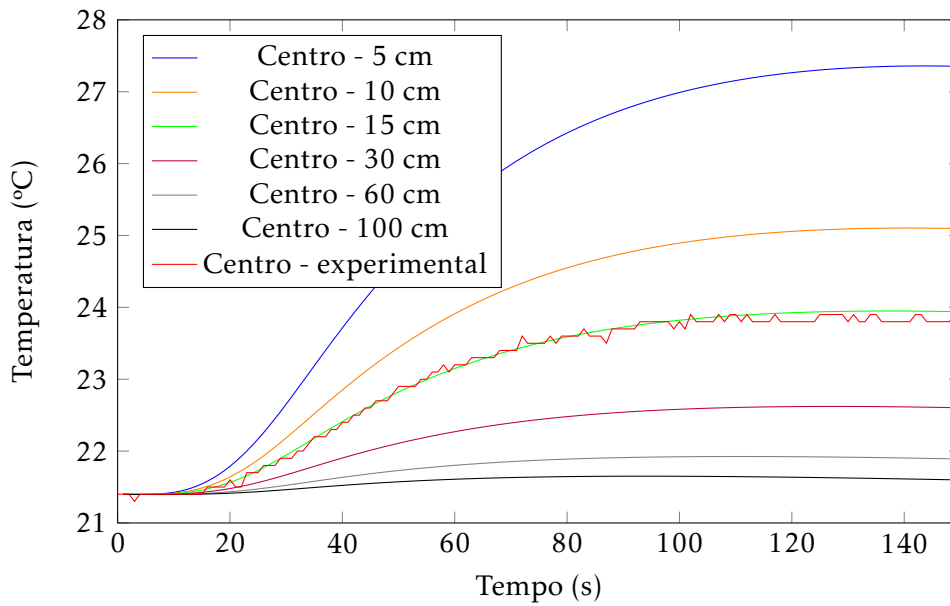


Figura 4.28: Temperatura vs Variação da distância da FC ao provete

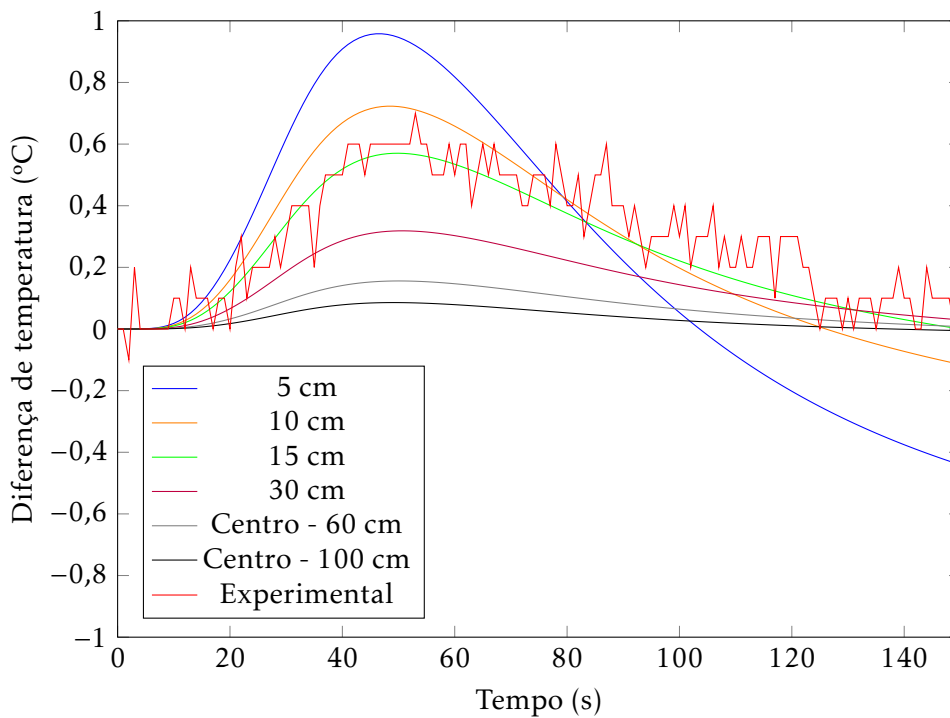


Figura 4.29: Diferença de temperatura vs Variação da distância da FC

Outra situação importante de simular é a variação da profundidade do defeito. Alguns autores apresentaram limites na detecção do defeito de acordo com a sua profundidade. Para esta variação, as dimensões do provete foram alteradas para se conseguir realizar a simulação, pois o modelo desenvolvido foi com as dimensões do provete prático. A espessura do defeito sofreu uma alteração de 5 mm para 15 mm. A posição do defeito foi

então variada segundo a sua posição na espessura. Os valores foram analisados por modo de reflexão e estão representados nos gráficos da figura 4.31.

A detecção do defeito é melhor quanto mais próximo este se encontrar da superfície aquecida, pois existe uma retenção de temperatura na zona do defeito, o que permite uma melhor detecção deste. À medida que o defeito se encontra mais profundo, a diferença entre curvas diminui, o que não permite uma boa detecção do defeito, confirmando as conclusões dos vários autores.

A figura 4.30 representa as diferenças entre as curvas no modo por reflexão, para várias profundidades, de onde se conclui que é possível detetar o defeito, mas uma diferença de 0,2 °C já é um valor baixo, o que dificulta a aquisição de valores por parte das câmaras térmicas, dependendo da resolução e especificações destas.

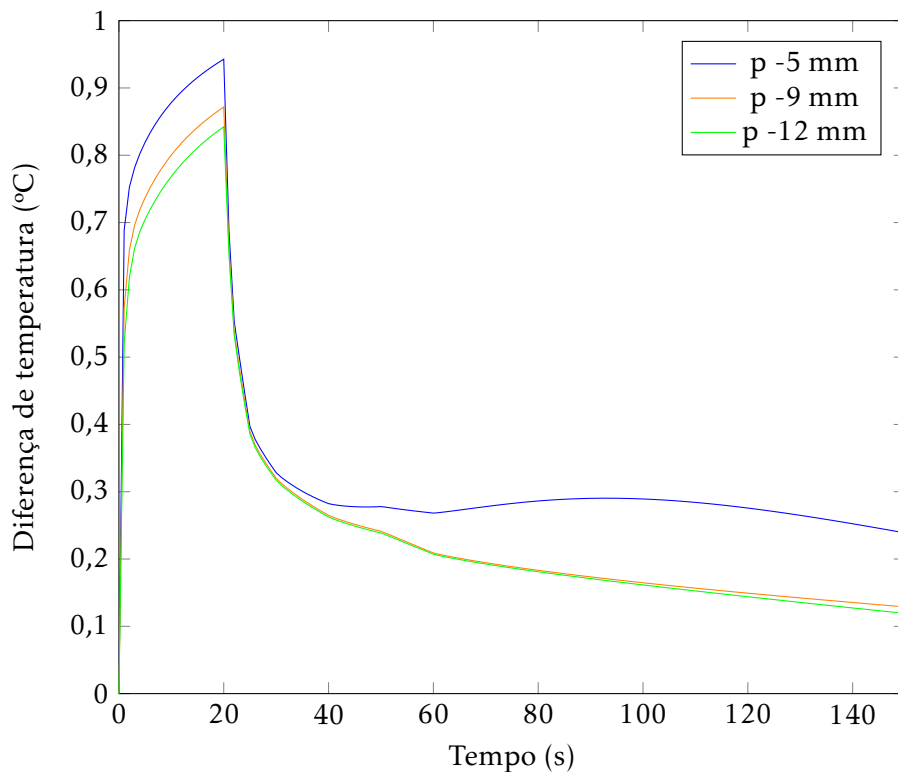


Figura 4.30: Diferença de temperatura vs Variação da profundidade do defeito

Durante o aquecimento, os valores de diferença de temperatura são semelhantes. É após os 30 segundos que as diferenças entre curvas são notadas, sendo que, para uma profundidade a partir de 9 mm não existe quase diferença entre curvas.

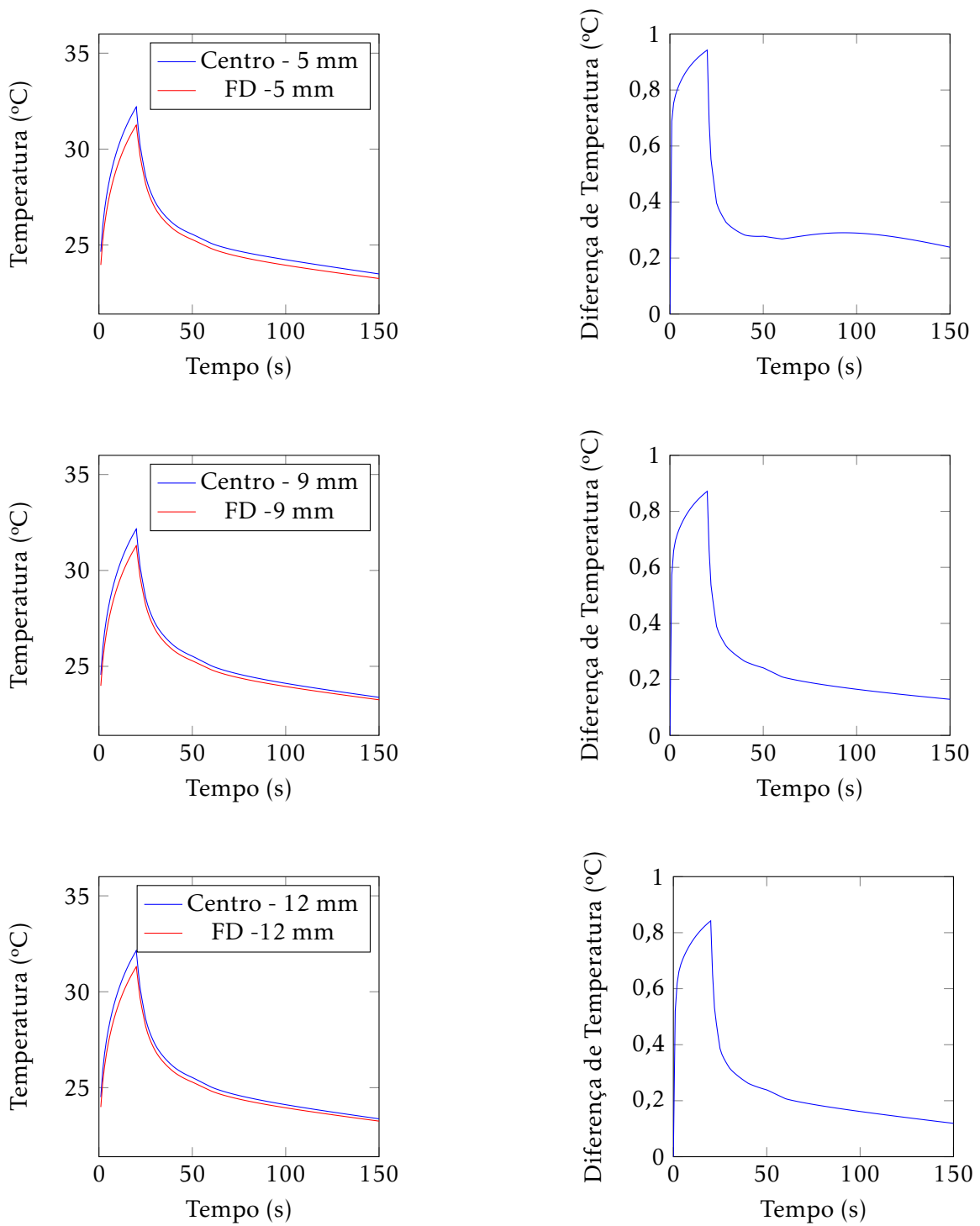


Figura 4.31: Representação de curvas numéricas variando a profundidade do defeito (à esquerda) e diferença de temperaturas (à direita)

4.4 Modelo numérico bidimensional com radiação - Duas fontes de calor

O modelo numérico bidimensional com radiação com duas FC foi desenvolvido do mesmo modo que o modelo numérico do subcapítulo anterior, sendo a diferença a adição de uma FC. Este modelo está desenvolvido de modo a que seja só necessário indicar o valor do ângulo e , lembrando que o valor usado foi de 55° , o modelo apresenta a disposição representada na figura 4.32.

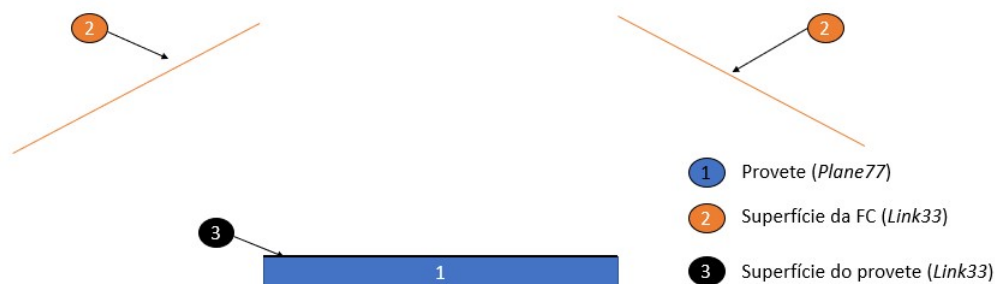


Figura 4.32: Numeração dos elementos para duas FC

Os comandos são iguais ao modelo com uma FC, mantendo-se o uso dos elementos, modo oculto e valores de variáveis.

De seguida, nas figuras 4.33 e 4.34 são apresentadas as comparações das curvas do Par 1 (ensaios IR12 e IR13), pois é o que apresenta condições iguais em ambos os modos, o que permite fazer só uma simulação e obter valores para os modos de transmissão e reflexão respetivamente.

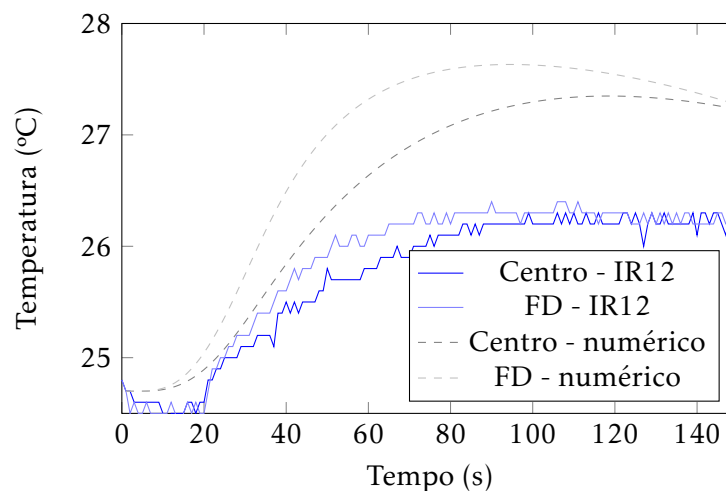


Figura 4.33: Comparação das curvas experimentais do modo de transmissão do ensaio IR12 com as curvas numéricas

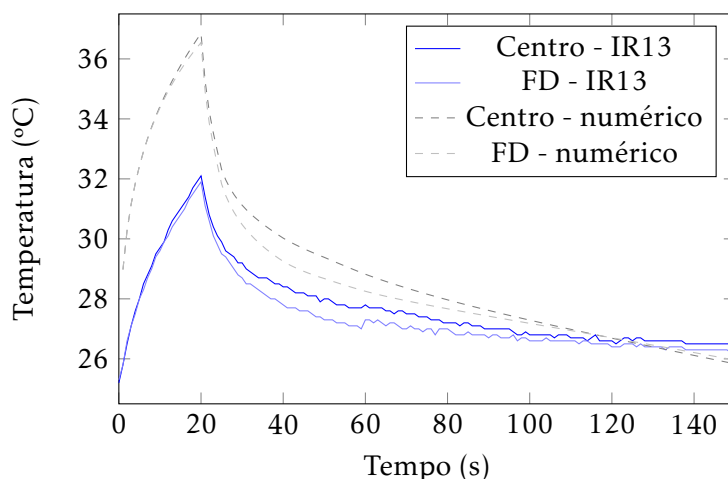


Figura 4.34: Comparação das curvas experimentais do modo de reflexão do ensaio IR13 com as curvas numéricas

As curvas numéricas apresentam valores diferentes e superiores. Este modelo utiliza os mesmos valores de variáveis do modelo anterior, logo era de esperar uma aproximação maior. A explicação para este acontecimento prende-se com os ensaios experimentais, pois estão condicionados pelas proteções das FC, como já foi referido nas conclusões do capítulo 3. Devido a isto, o provete não está a ser devidamente aquecido, existindo muito calor a ser transmitido para outras direções. Analisando os gráficos representados nas figuras 4.35 e 4.36, verifica-se que o instante de diferença máxima é semelhante para o caso do modo de transmissão, ocorrendo no instante 49 segundos com um valor de $0,720^{\circ}\text{C}$. Para o caso da curva numérica no modo de reflexão, as diferenças são semelhantes com o máximo da curva numérica a ocorrer no instante 39 segundos com um valor $0,775^{\circ}\text{C}$, sendo o valor da diferença máxima por reflexão superior, indo ao encontro do que foi concluído no capítulo 3.

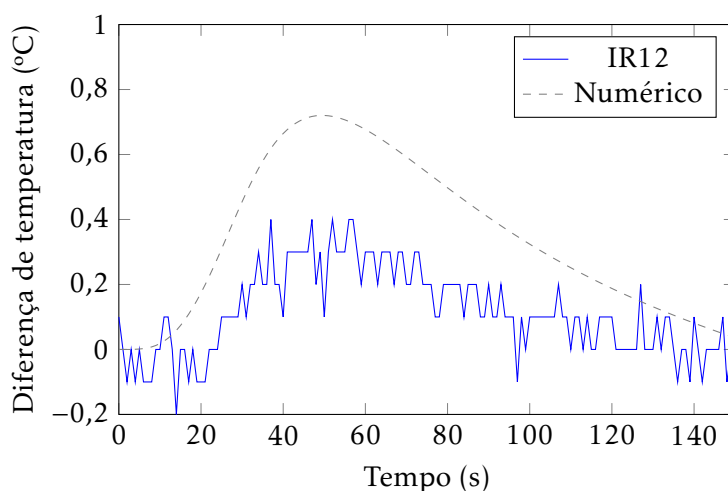


Figura 4.35: Diferença entre curvas no modo de transmissão

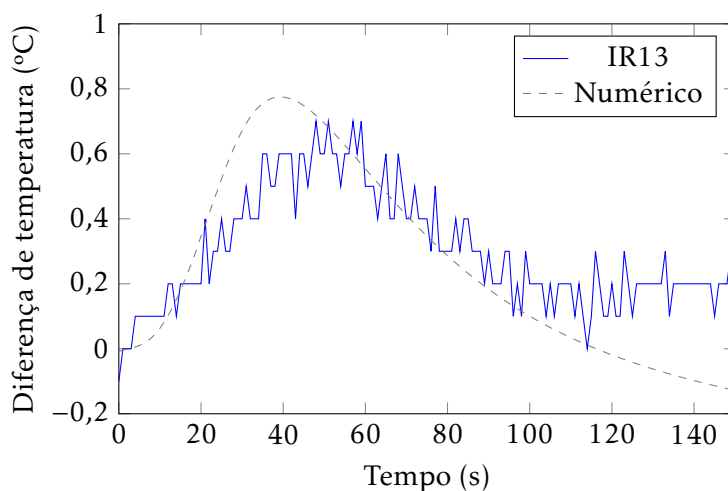


Figura 4.36: Diferença entre curvas no modo de reflexão

Uma das funcionalidades que este modelo numérico apresenta é a possibilidade de variar o ângulo das FC, permitindo analisar qual o ângulo que produz melhores resultados. Procedeu-se então à variação do ângulo e os resultados estão representados nos gráficos das figuras 4.37 a 4.40. Os valores das diferenças máximas estão apresentados na tabela 4.9, onde é possível verificar que um ângulo de 45° tinha produzido uma melhor diferença de temperaturas do que o ângulo de 55° usado, mas que são valores próximos e que ocorrem no mesmo instante. Estes valores máximos são os que ocorrem após o aquecimento. O valor de 45° para o ângulo foi pensado para ser usado inicialmente, mas

Tabela 4.9: Valores da diferença de temperatura máxima (Dif_{max}) e o instante em que ocorre

Ângulo (°)	30	45	55	75
Dif_{max} (°C)	0,529	0,840	0,775	0,274
Instante (s)	38	39	39	40

esta situação não pôde ser executada, pois nesta posição ocorriam uma de duas situações: não existia espaço de movimentação, havendo conflito entre a camara termográfica e as FC ou não aquecer o provete quando a distância ao centro do provete (distância d , no eixo z) se aumentava.

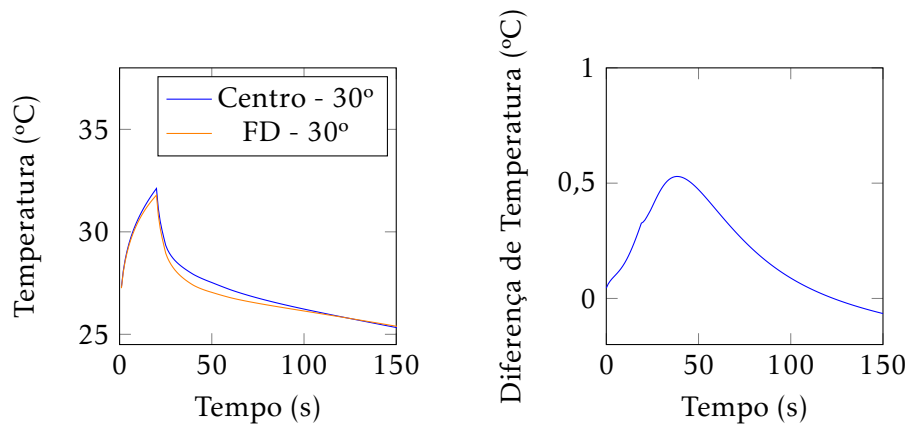


Figura 4.37: Representação de curvas numéricas para um ângulo das FC de 30° e diferença de temperaturas

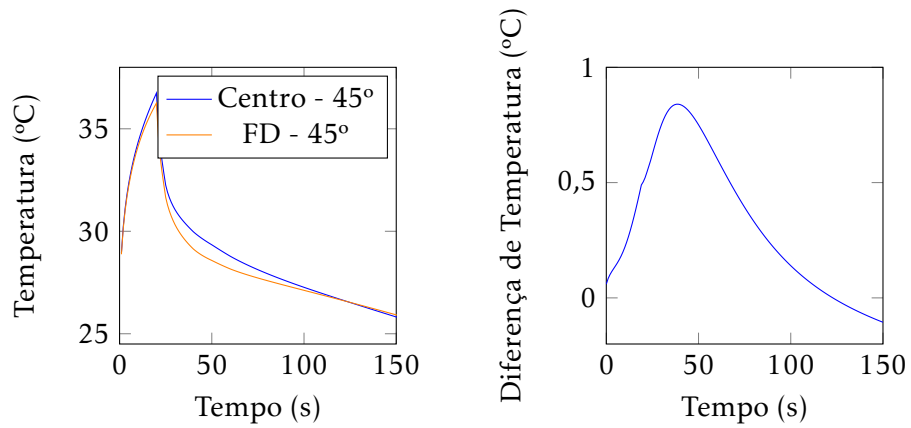


Figura 4.38: Representação de curvas numéricas para um ângulo das FC de 45° e diferença de temperaturas

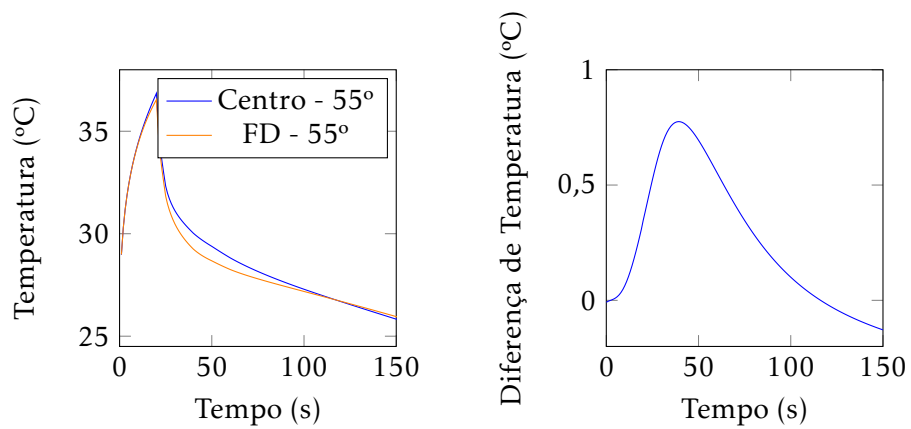


Figura 4.39: Representação de curvas numéricas para um ângulo das FC de 55° e diferença de temperaturas

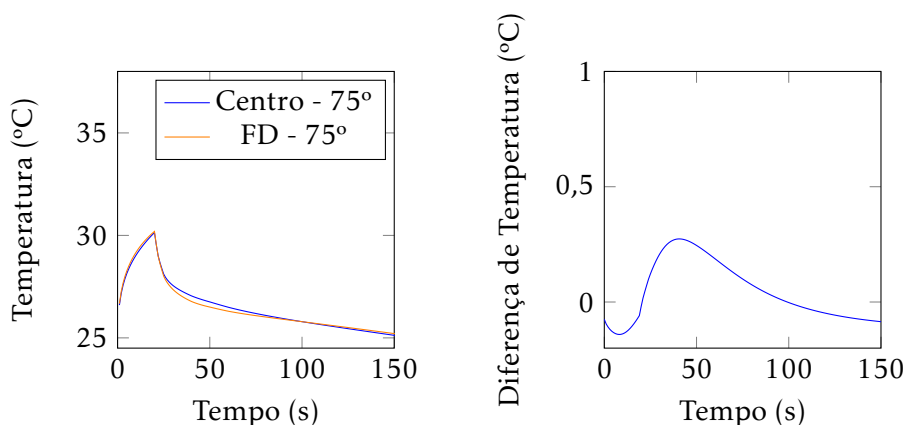


Figura 4.40: Representação de curvas numéricas para um ângulo das FC de 75° e diferença de temperaturas

4.5 Modelos numéricos tridimensionais

Dois modelos tridimensionais foram desenvolvidos com o objetivo de conseguir uma melhor perceção do que ocorre no provete. Os modelos bidimensionais permitem uma imagem do gradiente de temperatura ao longo da espessura do provete, mas, para permitir um conhecimento dos fenómenos que estão a ocorrer na superfície, o modelo tridimensional é necessário.

Com a mudança do tipo de geometria bidimensional para uma tridimensional é necessário o uso de novos elementos. Existem dois elementos que permitem a simulação tridimensional para análises térmicas [26]: *Solid70* e *Solid90*.

O elemento *Solid70* é um elemento de 8 nós em que em cada nó só existe um GDL - temperatura - e está representado na figura 4.41a. O elemento *Solid90* tem a característica de ter nós intermédios, sendo um elemento composto por 20 nós (figura 4.41b).

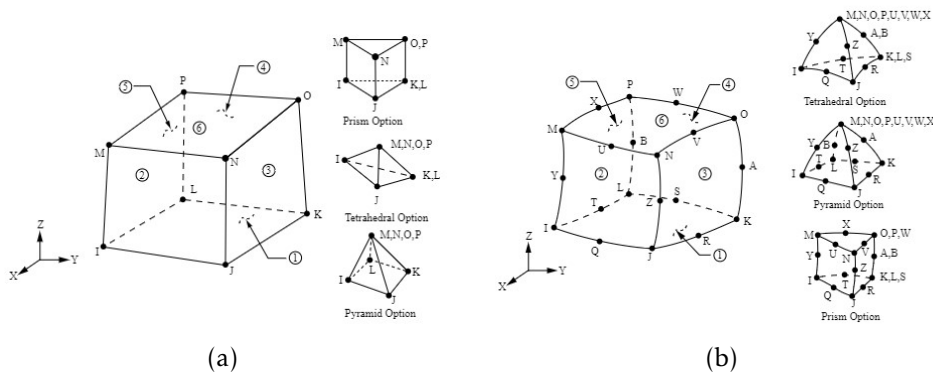


Figura 4.41: Elementos para análise tridimensional térmica: a) *Solid70*; b) *Solid90* [26]

Dois modelos foram desenvolvidos, um para a simulação do fluxo de calor e outro

com recurso à matriz de radiação com uma FC. Estes modelos usam os mesmos valores aplicados nos modelos bidimensionais.

Para o modelo tridimensional do fluxo foram usados elementos *Solid70* para o provete e para as superfícies são usados os elementos *Surf152*, representados na figura 4.42. Para o elemento *Solid70* deve ser indicada a *keyopt 2* com valor de zero. Esta *keyopt* indica como deve ser calculada a convecção. Para o elemento *Surf152*, devem ser indicadas as *keyopt 4,5 e 8*. Do mesmo modo que foi apresentado no modelo bidimensional, são criados dois elementos *Surf152*, um para cada superfície. Das *keyopt* mencionadas, a *keyopt 8* é que é diferente das outras. Esta *keyopt* indica se o elemento deve fazer uma análise para um fluxo de calor ou para uma imposição de convecção no elemento. Para a superfície com imposição de fluxo de calor, esta assume o valor de 1. Para a superfície inferior, onde é imposto um coeficiente de convecção, esta assume o valor de 2. As *keyopt 4 e 5* estão associadas ao uso de um nó intermédio e ao uso de um nó extra, respetivamente. Foram usados os valores de 1 e 0, respetivamente, indicando o não uso de um nó intermédio e a não existência de um nó extra.

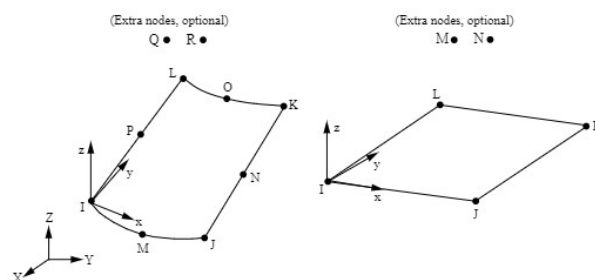


Figura 4.42: Elemento superficial 3D *Surf152* [25]

Os valores de fluxo e de coeficiente de convecção são 1300 W.m^{-2} e $5 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$, respetivamente. O modelo do provete está apresentado na figura 4.43.

Realizando a simulação, foram obtidas as curvas no centro do defeito e fora deste. Estas curvas são comparadas com as curvas experimentais do ensaio *IR4* e estão representadas na figura 4.44. As curvas apresentam valores diferentes, mesmo estando impostas às mesmas condições que são impostas no modelo bidimensional com fluxo de calor. Este acontecimento pode dever-se à alteração dos elementos para elementos tridimensionais. A figura 4.45 representa as diferenças entre curvas experimentais e numéricas, onde se conclui que a diferença entre estas curvas apresenta valores diferentes, mas os instantes da diferença de temperatura máxima são semelhantes.

Com a realização da simulação do modelo tridimensional é, então, possível obter uma imagem das superfícies. Neste caso, o modo de ensaio representado foi o de transmissão. As figuras 4.46a e 4.46b apresentam a imagem da superfície contrária à do aquecimento

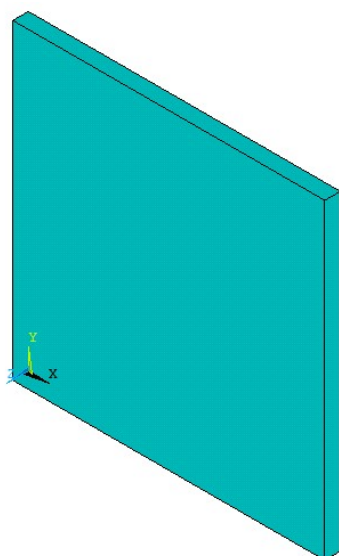


Figura 4.43: Representação do volume do provete dimensionado em ANSYS

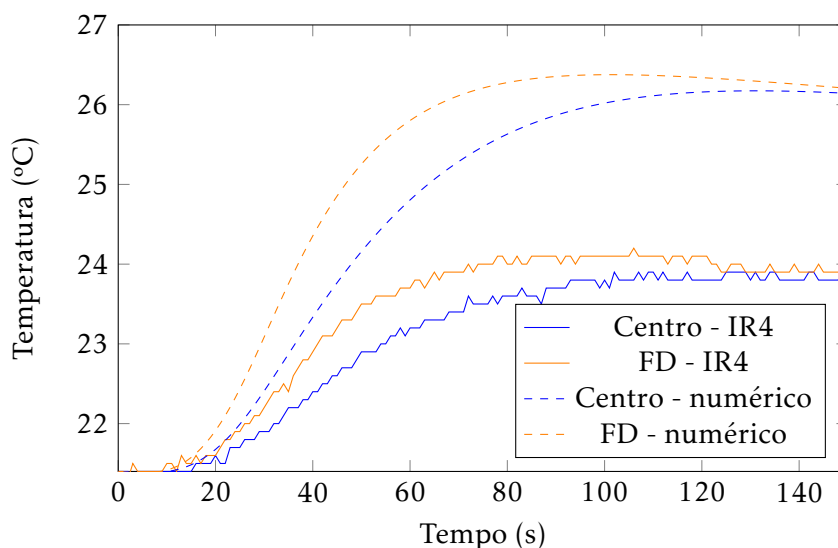


Figura 4.44: Representação das curvas do centro e fora do defeito do ensaio IR4 e das curvas do modelo numérico

para o mesmo instante em que, apesar dos valores diferentes das curvas experimentais e numéricas, a distribuição das curvas de temperaturas são semelhantes, produzindo uma imagem semelhante em que se pode detetar o defeito e uma forma aproximada. Ainda relativamente a este modelo, o tempo computacional é de 2460 segundos (\approx 41 minutos) usando um processador Intel(R) Core (TM)2 Duo CPU E8600 @ 3,33 GHz, o que representa um grande aumento comparativamente aos modelos bidimensionais.

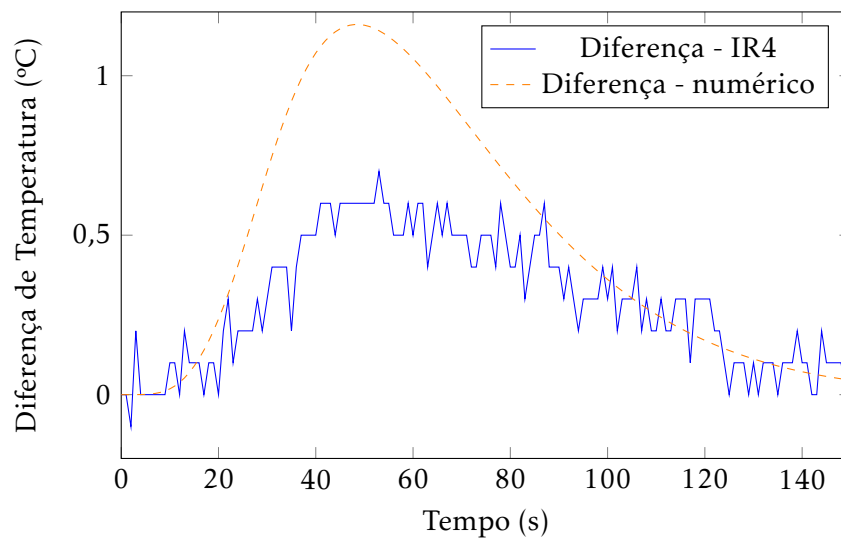


Figura 4.45: Representação da diferença das curvas do centro e fora do defeito do ensaio IR4

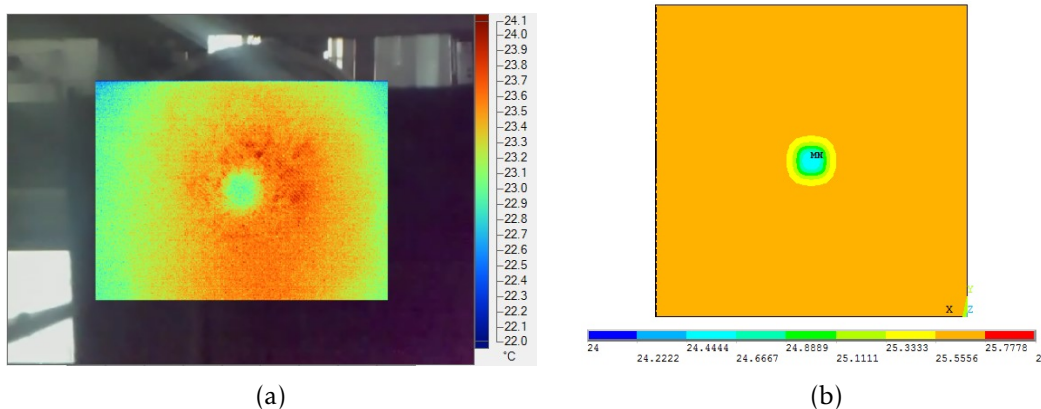


Figura 4.46: Comparação de imagens obtidas: a) *Frame* adquirido aos 55 segundos b) Imagem retirada do modelo numérico aos 55 segundos

Para o modelo tridimensional com radiação e uma FC, os elementos sólidos usados são os elementos *Solid90*. Para a superfície de aquecimento são usados os elementos *Shell131*, representados na figura 4.47, como indicado pelo manual [25]. Este é um elemento do tipo casca, pois possibilita a simulação de camadas. Neste caso, só é aplicado na superfície aquecida e na FC como se fosse composto por uma única camada. Ao criar o elemento *Shell131* devem ser indicadas as *keyopt* 2, 3 e 6. A *keyopt* 3 com o valor 2 indica que a variação da temperatura no elemento ocorre considerando que existe só uma camada. A *keyopt* 2 está associada à convecção e assume o valor de zero. A *keyopt* 6 indica qual o tipo de aplicação a ser dado ao elemento, assumindo o valor de zero que corresponde a uma aplicação de casca térmica. Como este elemento é um elemento casca, é necessário indicar qual o tipo de secção do elemento. Para isso, utiliza-se o comando *SECTYPE* no *APDL* para definir a secção como tipo *Shell* e as informações desta secção são dadas pelo

comando *SECDATA* no *APDL*. Com o comando *SECDATA* é atribuído o valor pretendido para a camada do elemento.

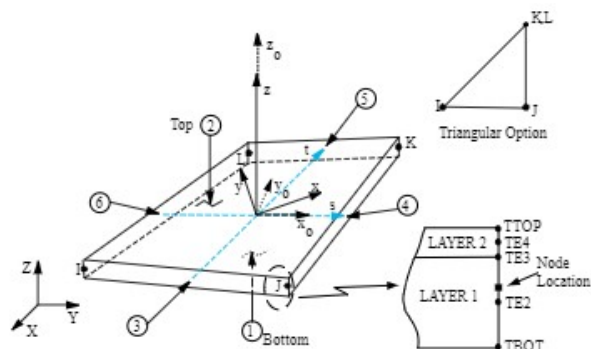


Figura 4.47: Elemento superficial 3D *Shell131* [25]

Como restantes considerações no desenvolvimento do modelo, deve-se seguir o mesmo conceito de ordem com a alteração de que o sentido agora é em $Z+$ (provete na vertical). Apesar desta informação, verificou-se que, se o provete fosse dimensionado com a espessura em $Y+$ (provete na horizontal), a simulação apresentava os mesmos resultados. Sobre os comandos relativos à matriz de radiação, *AUX12*, existe uma diferença de valores atribuídos aos comandos *GEOM* e *VTYPE*. Estes dois comandos estão relacionados com a geometria da peça, que agora é tridimensional, e devem ser alterados para zero. A representação do provete está apresentada na figura 4.48. As curvas das temperaturas obtidas apresentaram valores muito diferentes, sendo que as curvas numéricas não apresentaram aquecimento.

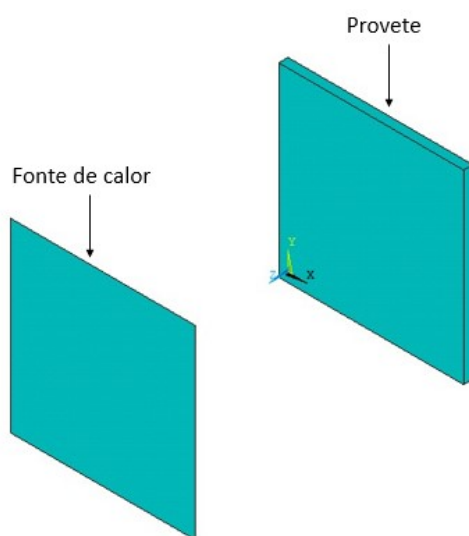


Figura 4.48: Representação do volume do provete e da fonte de calor

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Nesta dissertação foi definido como objetivo o desenvolvimento e validação de modelos numéricos de END por TA com recurso à matriz radiação. Para atingir estes objetivos foram elaborados vários modelos, descritos em três fases, sendo discutidas as principais conclusões.

Numa primeira fase foi desenvolvido e validado o modelo bidimensional com aplicação de fluxo de calor na superfície. Este modelo apresentou boas aproximações, apesar de existir uma divergência nos valores dos ensaios experimentais a partir de um instante de tempo, que não afeta a aquisição de imagens por parte do utilizador/técnico. Este modelo é de fácil aplicação, sendo que o fluxo de calor é obtido por tentativa e erro.

A segunda fase correspondeu ao desenvolvimento e validação do modelo bidimensional com radiação e uma FC. Este modelo utiliza o comando AUX12 no APDL para calcular a troca de energia entre superfícies, em vez do fluxo de calor aplicado no modelo da primeira fase. Este modelo já não apresenta o mesmo desvio nos instantes finais detetados no modelo com fluxo. Com esta validação é possível variar alguns parâmetros, indo ao encontro das informações obtidas do estado da arte, em que existe dificuldade em detetar o defeito a partir de uma profundidade de 9 mm.

A terceira fase foi o desenvolvimento e validação do modelo bidimensional com radiação e duas FC, uma extensão do modelo desenvolvido na segunda fase, a fim de se conseguir simular o END por TA desenvolvido no procedimento experimental. Este apresentou valores diferentes dos obtidos pelos procedimentos experimentais. Segundo as conclusões apresentadas no capítulo 3, a montagem com duas FC não apresentava um bom foco de calor no provete, pelo que é expectável que a diferença decorra desta situação. É de esperar que com a adição de uma FC, a superfície tenha um aquecimento superior ao demonstrado experimentalmente com uma FC, algo que não aconteceu nos ensaios. As curvas numéricas são superiores aos valores obtidos pelos procedimentos experimentais,

o que evidencia as perdas de energia que ocorrem no ensaio. Este modelo distingue-se por permitir variar o ângulo das FC. O ângulo utilizado no procedimento experimental foi de 55°, obtido por tentativa e erro. Simulações demonstram que um ângulo de 45° tinha produzido melhores resultados. Este valor foi experimentado, mas a situação detetada na estação de ensaios com as FC não proporcionava aquecimento no provete. O ângulo foi variado até se detetar que o ângulo de 55° aquecia a superfície, aparentando estar o foco no provete. Com a análise posterior dos vídeos obtidos verificou-se que o foco de calor não incidia no provete. Esta situação é gerada devido às proteções das FC, em que existe refração dentro desta, não havendo um foco no provete, o que não produz o aquecimento expectável, apesar de se conseguir detetar o defeito. Assim, é aconselhada a alteração da proteção das FC, podendo ser aplicada uma proteção semelhante à apresentada pelo autor Barus et al [13] ou até mesmo uma troca da FC por outra lâmpada ou por um laser. Uma aplicação interessante seria a realização do END de TA com o método *FLIPT* [15]. Este método é caracterizado pelo uso de um laser, fazendo um varrimento na superfície, aquecendo-a, tendo sido aplicado em laminados de metal e fibra de vidro reforçado (GLARE), onde apresentou bons resultados. O uso do laser como FC tem ganho maior aplicação e demonstrado bons resultados para materiais compósitos sendo também um método que pode ser automatizado.

Com o melhoramento da mesa de ensaios é aconselhado a atualização dos modelos bidimensionais com radiação apresentados e a introdução de modelos com placas curvas, convexas e côncavas, de modo a analisar a influência do ângulo de curvatura na deteção de defeitos. Como desenvolvimento futuro também deve ser desenvolvido um modelo com reforço de fibras pois é objetivo do FIBR3D o desenvolvimento de processos híbridos para TPRP.

Outro desenvolvimento futuro interessante é a aplicação de um algoritmo de otimização para analisar as propriedades físicas ideais do provete, pois para o mesmo material (PA-12) as propriedades alteram-se, dependendo do fornecedor, o que facilitaria a deteção dos defeitos. Outro algoritmo de otimização pode ser aplicado para averiguar qual o melhor ângulo da FC a usar, com a alteração da distância da FC ao provete e da distância da FC ao centro do provete.

Relativamente aos modelos tridimensionais, em que foram usados valores de variáveis iguais aos aplicados nos modelos bidimensionais, estes não apresentaram os valores pretendidos. A deteção do problema associado ao código deve ser uma prioridade para desenvolvimentos futuros, sendo que se prevê que a utilização de elementos 3D e o uso dos elementos *Shell131* pode ser um dos fatores destas diferenças de valores.

BIBLIOGRAFIA

- [1] C. Simão. “Avaliação de diferentes técnicas de END para materiais compósitos produzidos por manufatura aditiva”. Tese de mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2017.
- [2] N. P. Avdelidis, D. P. Almond, A. Dobbins, B. C. Hawtin, C. Ibarra-Castaneda e X. Maldague. “Aircraft composites assessment by means of transient thermal NDT”. Em: *Progress in Aerospace Sciences* 40.3 (2004), pp. 143–162. DOI: 10.1016/j.paerosci.2004.03.001.
- [3] M. Krishnapillai, R. Jones, I. H. Marshall, M. Bannister e N. Rajic. “Thermography as a tool for damage assessment”. Em: *Composite Structures* 67.2 SPEC. ISS. (2005), pp. 149–155. DOI: 10.1016/j.compstruct.2004.09.015.
- [4] F. Mabrouki, M. Thomas, M. Genest e A. Fahr. “Numerical modeling of vibrothermography based on plastic deformation”. Em: *NDT and E International* 43.6 (2010), pp. 476–483. DOI: 10.1016/j.ndteint.2010.05.002.
- [5] F. Mabrouki, M. Thomas, M. Genest e A. Fahr. “Frictional heating model for efficient use of vibrothermography”. Em: *NDT and E International* 42.5 (2009), pp. 345–352. DOI: 10.1016/j.ndteint.2009.01.012.
- [6] L. J. Pieczonka, W. J. Staszewski, F. Aymerich, T. Uhl e M. Szewdo. “Numerical simulations for impact damage detection in composites using vibrothermography”. Em: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 10 (2010), p. 012062. DOI: 10.1088/1757-899X/10/1/012062.
- [7] M. Krishnapillai, R. Jones, I. H. Marshall, M. Bannister e N. Rajic. “NDTE using pulse thermography: Numerical modeling of composite subsurface defects”. Em: *Composite Structures* 75.1-4 (2006), pp. 241–249. DOI: 10.1016/j.compstruct.2006.04.079.
- [8] R. C. Waugh, J. M. Dulieu-Barton e S. Quinn. “Modelling and evaluation of pulsed and pulse phase thermography through application of composite and metallic case studies”. Em: *NDT and E International* 66 (2014), pp. 52–66. DOI: 10.1016/j.ndteint.2014.04.002.

- [9] J. Peeters, C. Ibarra-Castanedo, S. Sfarra, X. Maldague, J. J. Dirckx e G. Steenackers. “Robust quantitative depth estimation on CFRP samples using active thermography inspection and numerical simulation updating”. Em: *NDT and E International* 87.September 2016 (2017), pp. 119–123. DOI: 10.1016/j.ndteint.2017.02.003.
- [10] J. Peeters, G. Arroud, B. Ribbens, J. J. Dirckx e G. Steenackers. “Updating a finite element model to the real experimental setup by thermographic measurements and adaptive regression optimization”. Em: *Mechanical Systems and Signal Processing* 64-65 (2015), pp. 428–440. DOI: 10.1016/j.ymsp.2015.04.010. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ymsp.2015.04.010>.
- [11] M. Grosso, J. E. Lopez, V. M. Silva, S. D. Soares, J. M. Rebello e G. R. Pereira. “Pulsed thermography inspection of adhesive composite joints: computational simulation model and experimental validation”. Em: *Composites Part B: Engineering* 106 (2016), pp. 1–9. DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.09.011.
- [12] T. Inagaki, T. Ishii e T. Iwamoto. “On the NDT and E for the diagnosis of defects using infrared thermography”. Em: *NDT and E International* 32.5 (1999), pp. 247–257. DOI: 10.1016/S0963-8695(98)00059-0.
- [13] M Barus, H Weleman, F Collombet, M. L. Pastor, A Cantarel, L Crouzeix, Y. H. Grunevald e V Nassiet. “Bonded repair issues for composites: An investigation approach based on infrared thermography”. Em: *NDT and E International* 85.October 2016 (2017), pp. 27–33. DOI: 10.1016/j.ndteint.2016.10.003. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ndteint.2016.10.003>.
- [14] E. Kuhn, E. Valot e P. Herve. “A comparison between thermosonics and thermography for delamination detection in polymer matrix laminates”. Em: *Composite Structures* 94.3 (2012), pp. 1155–1164. DOI: 10.1016/j.compstruct.2011.10.008.
- [15] N. Montinaro, D. Cerniglia e G. Pitarresi. “Flying Laser Spot Thermography technique for the NDE of Fibre Metal Laminates disbonds”. Em: *Composite Structures* 171 (2017), pp. 63–76. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.03.035. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.03.035>.
- [16] N. Burger, A. Laachachi, M. Ferriol, M. Lutz, V. Toniazzi e D. Ruch. “Review of thermal conductivity in composites: Mechanisms, parameters and theory”. Em: *Progress in Polymer Science* 61 (2016), pp. 1–28. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2016.05.001.
- [17] M. W. Pilling, B. Yates, M. A. Black e P. Tattersall. “The thermal conductivity of carbon fibre-reinforced composites”. Em: *Journal of Materials Science* 14.6 (1979), pp. 1326–1338. DOI: 10.1007/BF00549304.
- [18] S. R. Mirmira, M. C. Jackson e L. S. Fletcher. “Effective Thermal Conductivity and Thermal Contact Conductance of Graphite Fiber Composites”. Em: *Journal of Thermophysics and Heat Transfer* 15.1 (2001), pp. 18–26. DOI: 10.2514/2.6591.

-
- [19] S. W. Churchill e H. H. Chu. “Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a vertical plate”. Em: *International Journal of Heat and Mass Transfer* 18.11 (1975), pp. 1323–1329. DOI: 10.1016/0017-9310(75)90243-4.
- [20] *William Herschel*. URL: http://coolcosmos.ipac.caltech.edu/cosmic/{_}classroom/classroom/{_}activities/herschel/{_}bio.html.
- [21] D. P. DeWitt e F. P. Incropera. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 1996.
- [22] A. P. Martins, M. S. Carvalho, J. B. Cardoso e T. G. Santos. “Simulation of NDT methods for Additive Manufacturing of composites”. Em: *12th European conference on Non-Destructive Testing* (2018).
- [23] S. W. Churchill e H. H. Chu. “Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a vertical plate”. Em: *International Journal of Heat and Mass Transfer* 18.11 (1975), pp. 1323–1329.
- [24] ANSYS. “ANSYS Mechanical APDL”. Em: © ANSYS, Inc. August (2011), www.ansys.com.
- [25] ANSYS. “ANSYS Mechanical APDL Theory Reference”. Em: ANSYS Inc Release15.November (2013), pp. 1 –909.
- [26] Ansys Release. “ANSYS Mechanical APDL Thermal Analysis Guide”. Em: *Analysis* 16.1.April (2013), pp. 26–34.

MODELO COM FLUXO DE CALOR

```
/COM, Modelo com fluxo
/CLEAR, NOSTART
```

```
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!! Definir parametros
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
```

```
tempoff = 273.15      ! offset para kelvin
sbc = 5.67E-8         ! constante stefan-boltzmann
TA = 20.9             ! temperatura ambiente
TP = 21.4             ! temperatura do provete
T= 20                 ! tempo em que a lampada esta ativa
Ti= T+0.1            ! instante seguinte ao desligar a FC
Tf= 150              ! tempo total do ensaio
fx = 1300            ! fluxo de calor
```

```
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!! Dimensionamento do provete
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
```

```
l=0.1                ! comprimento do provete
e= 0.005             ! espessura do provete
ld=0.01              ! comprimento do defeito
td = 0.0005         ! espessura do provete
p = 0.00225         ! profundidade do defeito
```

```

!-----Definição da malha-----
elex=400                ! numero de elementos ao longo do comprimento
eley=40                ! numero de elementos ao longo da espessura

!-----Zona do defeito-----
!-----Comprimento-----

ND=(elex*ld)/l         ! contagem de elementos no defeito
N1=(((l/2)-(ld/2))*elex)/l  ! contagem de elementos fora do defeito

!-----Espessura-----

ND1=(eley*td)/e       ! contagem de elementos no defeito
N2=(((e-p-td))*eley)/e  ! contagem de elementos fora do defeito, zona
                        ! inferior
N3=(p*eley)/e         ! contagem de elementos fora do defeito, zona
                        ! superior

/PREP7

!ELEMENTS DO PROVETE

ET,1,PLANE55          ! Escolha do elemento
KEYOPT,1,3,3          ! Escolha da terceira opcao na keyopt 3
                        ! (espessura do plano)
R,1,0.1               ! definir o valor da espessura (keyopt 3)

!ELEMENTS DE SUPERFICIE DO PROVETE

ET,2,SURF151
R,2, , , , ,
RMORE, , , , , ,0.05
RMORE, , ,
KEYOPT,2,3,10
KEYOPT,2,4,1
KEYOPT,2,5,0
KEYOPT,2,8,2

ET,3,SURF151
R,3, , , , ,
RMORE, , , , , ,0.05
RMORE, , ,
KEYOPT,3,3,10
KEYOPT,3,4,1

```

KEYOPT,3,5,0
KEYOPT,3,8,1

!—Elementos De Ar

ET,4,PLANE55 ! Escolha do elemento
KEYOPT,4,3,3 ! Escolha da terceira opcao na keyopt 3
! (espessura do plano)
R,4,0.1 ! Definir o valor da espessura (keyopt 3)

!*****
!***** Definir as propriedades do material
!*****

!— Provete - PA-12

MP,KXX,1,0.22 ! Condutividade PA-12
MP,DENS,1,1100 ! Densidade PA-12
MP,C,1,1590 ! Calor especifico PA-12

!— Ar

MP,KXX,4,0.030 ! Condutividade
MP,C,4,1012 ! Calor especifico
MP,DENS,4,1.2 ! Densidades

!*****
!***** Criar Geometria do provete
!*****

!—Criar pontos

K,,0,0
K,,(1/2)-(1d/2),0
K,,(1/2)+(1d/2),0
K,,1,0

K,,0,(e-p-td)
K,,(1/2)-(1d/2),(e-p-td)
K,,(1/2)+(1d/2),(e-p-td)
K,,1,(e-p-td)

K,,0,(e-p)
K,,(1/2)-(1d/2),(e-p)
K,,(1/2)+(1d/2),(e-p)
K,,1,(e-p)

K,,0,e

K,,(1/2)-(ld/2),e

K,,(1/2)+(ld/2),e

K,,1,e

!—Criar areas

A,1,2,6,5

A,2,3,7,6

A,3,4,8,7

A,5,6,10,9

A,7,8,12,11

A,9,10,14,13

A,10,11,15,14

A,11,12,16,15

A,6,7,11,10

! defeito

!*****

!***** Criar malhas

!*****

!—Malha Provete

TYPE,1

! Escolher o tipo de material

REAL,1

! Definir a real constant

MAT,1

! Definir as propriedades do material

LSEL, , , 1

! Selecciona a linha 1

LESIZE,ALL, , , N1, , , , 1

! Divide a linha 1 (comprimento) em N1

LSEL, , , 5

LESIZE,ALL, , , ND, , , , 1

LSEL, , , 8

LESIZE,ALL, , , N1, , , , 1

LSEL, , , 13

LESIZE,ALL, , , ND1, , , , 1

LSEL, , , 11

LESIZE,ALL, , , ND1, , , , 1

LSEL, , , 4

LESIZE,ALL, , , N2, , , , 1

LSEL, , , 19

LESIZE,ALL, , , N3, , , , 1

LSEL, , , 16

```

LESIZE,ALL,, ,ND1, , , ,1
LSEL, , , ,14
LESIZE,ALL,, ,ND1, , , ,1
LSEL, , , ,20
LESIZE,ALL,, ,ND, , , ,1

MSHAPE,0,2D                !tipo de malha quadrangular (0) para um
                             ! elemento area (2D)
MSHKEY,1                    !tipo de mesh mapped
ASEL, , , ,1,8             !selecionar areas de 1 a 8
AMESH,All                   !criar malha nas areas selecionadas
ALLSEL

!—Malha da superficie superior(link33)
TYPE,2
REAL,2
MAT,2
NSEL,S,LOC,Y,0.005         ! Selecionar todos os nos com coordenada Y de
                             ! valor 0.005
ESURF                       ! Cria elementos sobrepostos na superficie
ALLSEL                       ! Seleciona toda a informacao

!—Malha da superficie inferior(link33)
TYPE,3
REAL,3
MAT,3
NSEL,S,LOC,Y,0
ESURF
ALLSEL

!—Malha Ar-Defeito
TYPE,4
REAL,4
MAT,4

MSHAPE,0,2D
MSHKEY,1
AMESH,9                     !criar malha na area 9
ALLSEL

!*****
!***** Condicoes fronteira

```

```

!*****

*dim,tabflux,table,5,,time      ! Criar tabela com o nome tabflux, com 5 linhas
*SET,tabflux(1),0,fx,fx,0,0     ! Indicar valores do fluxo na coluna 2
*SET,tabflux(1,0),0,0.1,T,Ti,150 ! Indicar valores do tempo na coluna 1

!—Superficie aquecida

LSEL,S, , ,18
LSEL,A, , ,22
LSEL,A, , ,24
SFL,ALL,HFLUX,                  ! Impor carregamento em linhas, do tipo fluxo
                                ! com as informacoes da tabela

ESEL,ALL

!—Superficie inferior
LSEL,S, , ,1
LSEL,A, , ,5
LSEL,A, , ,8
SFL,ALL,CONV,5, ,TA,           ! Impor carregamento em linhas, do tipo
                                ! convecção de valor 5 com bulk temp TA

ALLSEL

!*****
!***** Solucao
!*****

/SOLU
TOFFST,tempoff
ANTYPE,TRANS                    ! Tipo de analise transiente
TUNIF,TP                        ! Temperatura uniforme dos nos
TIME,150                        ! Tempo pretendido
OUTRES,ALL,ALL
AUTOTS,ON
DELTIM,1                        ! Salto do intervalo de tempo entre analise de
                                ! valores

SOLVE
FINISH

n1=node(((1/2)-(ld/2))/2,0,0)
n2=node(1/2,0,0)
n3=node(((1/2)-(ld/2))/2,e,0)
n4=node(1/2,e,0)

```

/POST26

!—Carregar informacao para ver graficos

NSOL,2,n1,TEMP,,tn1, ! FD inferior
NSOL,3,n2,TEMP,,tn2, ! Centro inferior
NSOL,4,n3,TEMP,,tn3, ! FD superior
NSOL,5,n4,TEMP,,tn4, ! Centro superior

!—Criar ficheiros .txt.

! Para correr as seguintes linhas, o codigo deve ser lido pela funcao Read Input From

STORE

*GET,SIZE,VARI,,NSETS

*DIM,TIME_T,ARRAY,SIZE

VGET,TIME_T(1),1

*DIM,tn1,ARRAY,SIZE

VGET,tn1(1),2

*DIM,tn2,ARRAY,SIZE

VGET,tn2(1),3

*DIM,tn3,ARRAY,SIZE

VGET,tn3(1),4

*DIM,tn4,ARRAY,SIZE

VGET,tn4(1),5

*CFOPEN,FD_inf,txt,,APPEND

*VWRITE,TIME_T(1),tn1(1)

%15e %15e

*CFCLOS

*CFOPEN,Centro_inf,txt,,APPEND

*VWRITE,TIME_T(1),tn2(1)

%15e %15e

*CFCLOS

*CFOPEN,FD_sup,txt,,APPEND

*VWRITE,TIME_T(1),tn3(1)

%15e %15e

*CFCLOS

*CFOPEN,Centro_sup,txt,,APPEND

*VWRITE,TIME_T(1),tn4(1)

%15e %15e

*CFCLOS

FINISH

!/POST1

ANEXO I. MODELO COM FLUXO DE CALOR

!PLNS,TEMP,

!ANTIME,20,0.65, ,1,0,0,0 ! video



MODELO COM UMA FONTE DE CALOR

```
/COM, Modelo com uma FC
/CLEAR, NOSTART
```

```
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!! Definir parametros
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
```

```
tempoff = 273.15           ! offset para kelvin
sbc = 5.67E-8             ! constante stefan-boltzmann
TA = 20.9                 ! temperatura ambiente
TP = 21.4                 ! temperatura do provete
T= 20                     ! tempo em que a lampada esta ativa
Ti= T+0.1                 ! instante seguinte ao desligar a FC
Tf= 150                   ! tempo total do ensaio
```

```
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!! Dimensionamento do provete
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
```

```
l=0.1                     ! comprimento do provete
e= 0.005                  ! espessura do provete
ld=0.01                   ! comprimento do defeito
td = 0.0005              ! espessura do provete
p = 0.00225              ! profundidade do defeito
```

```
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!! Dimensionamento da FC
```

```

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

L = 0.1                ! largura da FC
h =0.15              ! distancia desde o provete a FC

!-----Definição da malha-----
elex=300              ! numero de elementos ao longo do comprimento
eley=30               ! numero de elementos ao longo da espessura
eleL=300             ! numero de elementos na FC

!-----Zona do defeito-----
!-----Comprimento-----
ND=(elex*ld)/l        ! contagem de elementos no defeito
N1=(((l/2)-(ld/2))*elex)/l ! contagem de elementos fora do defeito

!-----Espessura-----
ND1=(eley*td)/e       ! contagem de elementos no defeito
N2=(((e-p-td)*eley)/e ! contagem de elementos fora do defeito, zona
! inferior
N3=(p*eley)/e         ! contagem de elementos fora do defeito, zona
! superior

/PREP7

!-----ELEMENTOS DO PROVETE-----
ET,1,PLANE77          ! Escolha do elemento
KEYOPT,1,1,0           ! Matriz de calor especifico consistente
KEYOPT,1,3,3           ! Escolha da terceira opcao na keyopt 3
! (espessura do plano)
R,1,0.1                ! definir o valor da espessura (keyopt 3)

!-----Elementos da FC-----
ET,2,LINK33
R,2,7.8540E-5          !Seccao da FC

!-----ELEMENTOS DE SUPERFICIE DO PROVETE-----
ET,3,LINK33
R,3,100E-4

!-----Elementos de Ar-----
ET,4,PLANE77

```

KEYOPT,4,1,0
KEYOPT,4,3,3
R,4,0.1

!*****
!***** Definir as propriedades do material
!*****

!— Provete - PA-12

MP,KXX,1,0.22 ! Condutividade PA-12
MP,DENS,1,1100 ! Densidade PA-12
MP,C,1,1590 ! Calor especifico PA-12

!— Superficie do provete

MP,KXX,3,0.22 ! Condutividade PA-12
MP,DENS,3,1100 ! Densidade PA-12
MP,C,3,1590 ! Calor especifico PA-12

!— Ar

MP,KXX,4,0.030 ! Condutividade
MP,C,4,1012 ! Calor especifico
MP,DENS,4,1.2 ! Densidades

!*****
!***** Criar Geometria do provete
!*****

!—Criar pontos

K,,0,0
K,,(1/2)-(1d/2),0
K,,(1/2)+(1d/2),0
K,,1,0

K,,0,(e-p-td)
K,,(1/2)-(1d/2),(e-p-td)
K,,(1/2)+(1d/2),(e-p-td)
K,,1,(e-p-td)

K,,0,(e-p)
K,,(1/2)-(1d/2),(e-p)
K,,(1/2)+(1d/2),(e-p)
K,,1,(e-p)

```

K,,0,e
K,,(1/2)-(ld/2),e
K,,(1/2)+(ld/2),e
K,,1,e

!—Criar areas

A,1,2,6,5
A,2,3,7,6
A,3,4,8,7
A,5,6,10,9
A,7,8,12,11
A,9,10,14,13
A,10,11,15,14
A,11,12,16,15
A,6,7,11,10                ! defeito

!*****
!***** Criar malhas
!*****

LSEL, , , ,4                ! Selecciona a linha 4
LESIZE,ALL, , ,N1, , , ,1    !divide a linha 4 (comprimento) em N1
LSEL, , , ,7
LESIZE,ALL, , ,ND, , , ,1
LSEL, , , ,10
LESIZE,ALL, , ,N1, , , ,1
LSEL, , , ,11
LESIZE,ALL, , ,ND1, , , ,1
LSEL, , , ,13
LESIZE,ALL, , ,ND1, , , ,1
LSEL, , , ,14
LESIZE,ALL, , ,ND1, , , ,1
LSEL, , , ,16
LESIZE,ALL, , ,ND1, , , ,1
LSEL, , , ,1
LESIZE,ALL, , ,N2, , , ,1
LSEL, , , ,17
LESIZE,ALL, , ,N3, , , ,1
LSEL, , , ,22
LESIZE,ALL, , ,ND, , , ,1

MSHAPE,0,2D                !tipo de malha quadrangular (0) para um

```

```

! elemento area (2D)
MSHKEY,1
ASEL,,,1,8
AMESH,All
ALLSEL
! Seleciona toda a informacao

!—LAMPADA
TYPE,2
REAL,2

K,,0,h
K,,L,h
L,18,17
LESIZE,25,,,eleL
LMESH,25
ALLSEL

!—Malha Ar_Defeito
TYPE,4
REAL,4
MAT,4

MSHAPE,0,2D
MSHKEY,1
AMESH,9
ALLSEL

!—Elementos superficie (link33)
TYPE,3
REAL,3
MAT,3
NSEL,S,LOC,Y,e
! Selecionar todos os nos com coordenada Y de
! valor e
ESURF
! Cria elementos sobrepostos na superficie
NSEL,ALL
FINISH

! Ativar coordenadas dos elementos para verificar se o sentido se encontra bem.
!/PSYMB,ESYS,1
!Ativa representação das coordenadas
!EPLT
!/PSYMB,ESYS,0
!Desativa representação das coordenadas
!EPLT

```

```

!—Extra node
/PREP7
K,19,-1,h/2          ! Criar keypoint
NKPT,,19            ! Criar no a partir de um keypoint
*GET,space_n,NODE,,NUM,MAXD ! Guardar com numero do ultimo no existente
                        ! com o nome space_n
D,space_n,TEMP,TA   ! Dar o valor de temperatura TA ao no space_n
FINISH

!*****
!***** Gerar matriz radiacao
!*****

/AUX12

!Selecionar elementos e nos das superficies a radiar
ESEL,S,TYPE,,2      ! Selecionar os elementos numero 2
ESEL,A,TYPE,,3      ! Adicionar a selecao os elementos numero 3
NSLE,S,ALL          ! Selecionar todos os nos associados a elementos
EMISS,2,0.95        ! Definir emissividade dos elementos 2
EMISS,3,0.95        ! Definir emissividade dos elementos 3
GEOM,1              ! Definir geometria (1) para 2D
SPACE,space_n       ! Indicar o no extra
STEF,sbc            ! Definir o valor da constante de stefan-bolztmann
VTYPE,1,500         ! Modo oculto (1) modo nao-oculto (0)
WRITE,radiacao      ! Escrever a informacao num ficheiro
ALLSEL

FINISH

/PREP7

!—Super elemento
ET,5,MATRIX50       ! escolha do Super elemento
KEYOPT,5,1,1        ! Subestrutura especial de radiação

TYPE,5
SE,radiacao         ! Ler o ficheiro criado e atribuir essa informacao
                        ! ao elemento superelemento

!*****
!***** Condicoes fronteira
!*****

```

```

ESEL,S,TYPE,,3
EDELE,ALL                ! Eliminar elementos selecionados
ESEL,ALL
ALLSELL

! Criar tabela, com nome Temperatura, com dimensao de 16 linhas
*dim,TEMPERATURA,table,16,,time
! Definir valores de temperatura (coluna 2)
*SET,TEMPERATURA(1),TA,97,97,80,62,48,44,41,40,37,30,TA
! Definir valores de tempo (coluna 1)
*SET,TEMPERATURA(1,0),0,0.5,T,Ti,T+2,T+5,T+10,T+20,T+30,T+40,Tf,500
NSEL,S,LOC,Y,h
D,All,TEMP,%TEMPERATURA%
ALLSEL

!—Superficie aquecida
LSEL,S, , ,18
LSEL,A, , ,20
LSEL,A, , ,23
SFL,ALL,CONV,27, ,TA,
ALLSEL

!—Superficie inferior
LSEL,S, , ,4
LSEL,A, , ,7
LSEL,A, , ,10
SFL,ALL,CONV,2, ,TA,                ! Impor carregamento em linhas, do tipo
                                     ! convecção de valor 2 com bulk temp TA

ALLSEL

LSEL,S, , ,1
LSEL,A, , ,11
LSEL,A, , ,17
LSEL,A, , ,9
LSEL,A, , ,16
LSEL,A, , ,24
SFL,ALL,CONV,2, ,TA,
ALLSEL

FINISH

!*****

```

```

!***** Solucao
!*****

/SOLU
TOFFST,tempoff
ANTYPE,TRANS                ! Tipo de analise transiente
TUNIF,TP                    ! Temperatura uniforme dos nos
TIME,150                    ! Tempo pretendido
OUTRES,ALL,ALL
AUTOTS,ON
DELTIM,1                    ! Salto do intervalo de tempo entre analise de
                             ! valores

SOLVE
FINISH

n1=node(((1/2)-(1d/2))/2,0,0)
n2=node(1/2,0,0)
n3=node(((1/2)-(1d/2))/2,e,0)
n4=node(1/2,e,0)

/POST26

!—Carregar informacao para ver graficos
NSOL,2,n1,TEMP,,tn1,        ! FD inferior
NSOL,3,n2,TEMP,,tn2,        ! Centro inferior
NSOL,4,n3,TEMP,,tn3,        ! FD superior
NSOL,5,n4,TEMP,,tn4,        ! Centro superior

!—Criar ficheiros .txt.
! Para correr as seguintes linhas, o codigo deve ser lido pela funcao Read Input From

STORE
*GET,SIZE,VARI,,NSETS
*DIM,TIME_T,ARRAY,SIZE
VGET,TIME_T(1),1
*DIM,tn1,ARRAY,SIZE
VGET,tn1(1),2
*DIM,tn2,ARRAY,SIZE
VGET,tn2(1),3
*DIM,tn3,ARRAY,SIZE
VGET,tn3(1),4
*DIM,tn4,ARRAY,SIZE

```

```
VGET,tn4(1),5
*CFOPEN,FD_inf,txt,,APPEND
*VWRITE,TIME_T(1),tn1(1)
%15e %15e
*CFCLOS
*CFOPEN,Centro_inf,txt,,APPEND
*VWRITE,TIME_T(1),tn2(1)
%15e %15e
*CFCLOS
*CFOPEN,FD_sup,txt,,APPEND
*VWRITE,TIME_T(1),tn3(1)
%15e %15e
*CFCLOS
*CFOPEN,Centro_sup,txt,,APPEND
*VWRITE,TIME_T(1),tn4(1)
%15e %15e
*CFCLOS
FINISH

/POST1
PLNSOL,TEMP

!/CONTOUR,1,TP,,35
!ANTIME,35,0.5,,
```

! Definir paletes de cores e valores min e max



MODELO COM DUAS FONTES DE CALOR

```
/COM, Modelo 2D com duas FC
/CLEAR, NOSTART
```

```
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!! Definir parametros
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
```

```
tempoff = 273.15           ! offset para kelvin
sbc = 5.67E-8             ! constante stefan-boltzmann
TA = 20.9                 ! temperatura ambiente
TP = 21.4                 ! temperatura do provete
T= 20                    ! tempo em que a lampada esta ativa
Ti= T+0.1                ! instante seguinte ao desligar a FC
Tf= 150                  ! tempo total do ensaio
```

```
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!! Dimensionamento do provete
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
```

```
l=0.1                    ! comprimento do provete
e= 0.005                 ! espessura do provete
ld=0.01                  ! comprimento do defeito
td = 0.0005              ! espessura do provete
p = 0.00225              ! profundidade do defeito
```

```
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!! Dimensionamento da FC
```

```

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

PI = ACOS(-1)
L = 0.1                ! largura da FC
h = 0.41              ! distancia desde o provete ao eixo de rotacao
                    ! desde a origem
d = 0.28              ! distancia do centro do provete para as laterais
R = 0.28              ! distancia da rotaçao ate ao fim da FC
R2 = 0.28             ! distancia do eixo de rotacao ate ao limite da
                    ! FC
R3 = L/2              ! raio da FC
alfa = 55             ! angulo da lampada segundo o plano YZ
delta = (alfa*PI)/180 ! angulo da lampada segundo o plano YZ em
radianos
X1 = (l/2)-d          ! Coordenada X do eixo de rotacao da FC à esq
X2 = (l/2)+d          ! Coordenada X do eixo de rotacao da FC à dir

!-----Definição da malha-----
elex=300              ! numero de elementos ao longo do comprimento
eley=30               ! numero de elementos ao longo da espessura
eleL=300              ! numero de elementos na FC

!-----Zona do defeito-----
!-----Comprimento-----
ND=(elex*ld)/l        ! contagem de elementos no defeito
N1=(((l/2)-(ld/2))*elex)/l ! contagem de elementos fora do defeito

!-----Espessura-----
ND1=(eley*td)/e       ! contagem de elementos no defeito
N2=(((e-p-td))*eley)/e ! contagem de elementos fora do defeito, zona
! inferior
N3=(p*eley)/e         ! contagem de elementos fora do defeito, zona
! superior

/PREP7

!-----ELEMENTOS DO PROVETE-----
ET,1,PLANE77          ! Escolha do elemento
KEYOPT,1,1,0          ! Matriz de calor especifico consistente
KEYOPT,1,3,3          ! Escolha da terceira opcao na keyopt 3

```

```

! (espessura do plano)
R,1,0.1                ! definir o valor da espessura (keyopt 3)

!—Elementos da FC
ET,2,LINK33
R,2,7.8540E-5          !Seccao da FC

!—ELEMENTOS DE SUPERFICIE DO PROVETE
ET,3,LINK33
R,3,100E-4

!—Elementos de Ar
ET,4,PLANE77
KEYOPT,4,1,0
KEYOPT,4,3,3
R,4,0.1

!*****
!***** Definir as propriedades do material
!*****

!— Provete - PA-12
MP,KXX,1,0.22          ! Condutividade PA-12
MP,DENS,1,1100         ! Densidade PA-12
MP,C,1,1590            ! Calor especifico PA-12

!— Superficie do provete
MP,KXX,3,0.22          ! Condutividade PA-12
MP,DENS,3,1100         ! Densidade PA-12
MP,C,3,1590            ! Calor especifico PA-12

!— Ar
MP,KXX,4,0.030         ! Condutividade
MP,C,4,1012            ! Calor especifico
MP,DENS,4,1.2          ! Densidades

!*****
!***** Criar Geometria do provete
!*****

!—Criar pontos
K,,0,0

```

K,,(l/2)-(ld/2),0
 K,,(l/2)+(ld/2),0
 K,,l,0

K,,0,(e-p-td)
 K,,(l/2)-(ld/2),(e-p-td)
 K,,(l/2)+(ld/2),(e-p-td)
 K,,l,(e-p-td)

K,,0,(e-p)
 K,,(l/2)-(ld/2),(e-p)
 K,,(l/2)+(ld/2),(e-p)
 K,,l,(e-p)

K,,0,e
 K,,(l/2)-(ld/2),e
 K,,(l/2)+(ld/2),e
 K,,l,e

!—FC

K,,X1,h
 K,,X1+R2*COS(delta),(h-R2*SIN(delta))
 K,,(X1+R2*COS(delta))-R3*SIN(delta),(h-R2*SIN(delta))-R3*COS(delta)
 K,,(X1+R2*COS(delta))+R3*SIN(delta),(h-R2*SIN(delta))+R3*COS(delta)
 K,,X2,
 K,,X2-R2*COS(delta),(h-R2*SIN(delta))
 K,,(X2-R2*COS(delta))+R3*SIN(delta),(h-R2*SIN(delta))-R3*COS(delta)
 K,,(X2-R2*COS(delta))-R3*SIN(delta),(h-R2*SIN(delta))+R3*COS(delta)

!—Criar areas

A,1,2,6,5
 A,2,3,7,6
 A,3,4,8,7
 A,5,6,10,9
 A,7,8,12,11
 A,9,10,14,13
 A,10,11,15,14
 A,11,12,16,15
 A,6,7,11,10

! defeito

!*****

```

!***** Criar malhas
!*****
LSEL,,,1                ! Selecciona a linha 1
LESIZE,ALL,,N1,,,,1    ! divide a linha 1 (comprimento) em N1
                        ! elementos

LSEL,,,5
LESIZE,ALL,,ND,,,,1
LSEL,,,8
LESIZE,ALL,,N1,,,,1
LSEL,,,13
LESIZE,ALL,,ND1,,,,1
LSEL,,,11
LESIZE,ALL,,ND1,,,,1
LSEL,,,4
LESIZE,ALL,,N2,,,,1
LSEL,,,19
LESIZE,ALL,,N3,,,,1
LSEL,,,16
LESIZE,ALL,,ND1,,,,1
LSEL,,,14
LESIZE,ALL,,ND1,,,,1
LSEL,,,20
LESIZE,ALL,,ND,,,,1

MSHAPE,0,2D            !tipo de malha quadrangular (0) para um
                        ! elemento area (2D)

MSHKEY,1                !tipo de mesh mapped
ASEL,,,1,8              !seleccionar areas de 1 a 8
AMESH,All               !criar malha nas areas seleccionadas
ALLSEL

!LAMPADA
TYPE,2
REAL,2
L,20,19
L,23,24
LSEL,S,,25
LSEL,A,,26
LESIZE,ALL,,50,,,,1
LMESH,ALL
ALLSEL

```

```

! Malha Ar_Defeito
TYPE,4
REAL,4
MAT,4
MSHAPE,0,2D
MSHKEY,1
AMESH,9 !criar malha
ALLSEL

!Elementos superficie link33 no bloco
TYPE,3
REAL,3
MAT,3
NSEL,S,LOC,Y,e           ! Selecionar todos os nos com coordenada Y de
                           ! valor e
ESURF                     ! Cria elementos sobrepostos na superficie
ALLSEL

!—Extra node

/PREP7

K,40,-d/2,((h-R2*SIN(delta)))/2   ! Criar keypoint
NKPT,,40                          ! Criar no a partir de um keypoint
*GET,space_n,NODE,,NUM,MAXD        ! Guardar com numero do ultimo no existente
                                   ! com o nome space_n
D,space_n,TEMP,TA                ! Dar o valor de temperatura TA ao no space_n
FINISH

!!!!!!! Gerar a matrix radiacao

/AUX12

!Selecionar elementos e nos das superficies a radiar

ESEL,S,TYPE,,2                 ! Selecionar os elementos numero 2
ESEL,A,TYPE,,3                 ! Adicionar a selecao os elementos numero 3
NSLE,S,ALL                     ! Selecionar todos os nos associados a elementos
EMISS,2,0.95                   ! Definir emissividade dos elementos 2
EMISS,3,0.95                   ! Definir emissividade dos elementos 3
GEOM,1                          ! Definir geometria (1) para 2D
SPACE,space_n                  ! Indicar o no extra
STEF,sbc                       ! Definir o valor da constante de stefan-bolztmann

```

```

VTYPE,1,500                ! Modo oculto (1) modo nao-oculto (0)
WRITE,radiacao             ! Escrever a informacao num ficheiro
ALLSEL

FINISH

/PREP7

!—Super elemento
ET,5,MATRIX50              ! escolha do Super elemento
KEYOPT,5,1,1              ! Subestrutura especial de radiação

TYPE,5
SE,radiacao                ! Ler o ficheiro criado e atribuir essa informacao
                          ! ao elemento superelemento

!*****
!***** Condições fronteira
!*****

ESEL,S,TYPE,,3
EDELE,ALL                  ! Eliminar elementos selecionados
ESEL,ALL
ALLSELL

! Criar tabela, com nome Temperatura, com dimensao de 16 linhas
*dim,TEMPERATURA,table,16,,time
! Definir valores de temperatura (coluna 2)
*SET,TEMPERATURA(1),TA,97,97,80,62,48,44,41,40,37,30,TA
! Definir valores de tempo (coluna 1)
*SET,TEMPERATURA(1,0),0,0.5,T,Ti,T+2,T+5,T+10,T+20,T+30,T+40,Tf,500
LSEL,S, , ,25
LSEL,A, , ,26
DL,ALL,,TEMP,%TEMPERATURA%

ALLSEL

!—Superfície aquecida
LSEL,S, , ,18
LSEL,A, , ,22
LSEL,A, , ,24
SFL,ALL,CONV,27, ,TA,    ! Impor carregamento em linhas, do tipo
                          ! convecção de valor 2 com bulk temp TA

```

```

ALLSEL

!—Superficie inferior
LSEL,S,,1
LSEL,A,,5
LSEL,A,,8
SFL,ALL,CONV,2,TA,
ALLSEL

FINISH

!*****
!***** Solucao
!*****

/SOLU
TOFFST,tempoff
ANTYPE,TRANS           ! Tipo de analise transiente
TUNIF,TP               ! Temperatura uniforme dos nos
TIME,150               ! Tempo pretendido
OUTRES,ALL,ALL
AUTOTS,ON
DELTIM,1               ! Salto do intervalo de tempo entre analise de
                       ! valores

SOLVE
FINISH

n1=node(((1/2)-(1d/2))/2,0,0)
n2=node(1/2,0,0)
n3=node(((1/2)-(1d/2))/2,e,0)
n4=node(1/2,e,0)
n5=node(1/2,e/2,0)

/POST26

!—Carregar informacao para ver graficos
NSOL,2,n1,TEMP,,tn1,   ! FD inferior
NSOL,3,n2,TEMP,,tn2,   ! Centro inferior
NSOL,4,n3,TEMP,,tn3,   ! FD superior
NSOL,5,n4,TEMP,,tn4,   ! Centro superior
NSOL,6,n5,TEMP,,tn5,   ! Ar - ponto no centro do defeito
!—Criar ficheiros .txt.
! Para correr as seguintes linhas, o codigo deve ser lido pela funcao Read Input From

```

```

STORE
*GET,SIZE,VARI,,NSETS
*DIM,TIME_T,ARRAY,SIZE
VGET,TIME_T(1),1
*DIM,tn1,ARRAY,SIZE
VGET,tn1(1),2
*DIM,tn2,ARRAY,SIZE
VGET,tn2(1),3
*DIM,tn3,ARRAY,SIZE
VGET,tn3(1),4
*DIM,tn4,ARRAY,SIZE
VGET,tn4(1),5
*DIM,tn5,ARRAY,SIZE
VGET,tn5(1),6
*CFOPEN,FD_inferior,txt,,APPEND
*VWRITE,TIME_T(1),tn1(1)
%15e %15e
*CFCLOS
*CFOPEN,Centro_inferior,txt,,APPEND
*VWRITE,TIME_T(1),tn2(1)
%15e %15e
*CFCLOS
*CFOPEN,Centro_superior,txt,,APPEND
*VWRITE,TIME_T(1),tn3(1)
%15e %15e
*CFCLOS
*CFOPEN,FD_superior,txt,,APPEND
*VWRITE,TIME_T(1),tn4(1)
%15e %15e
*CFCLOS
*CFOPEN,Lampada_dir,txt,,APPEND
*VWRITE,TIME_T(1),tn5(1)
%15e %15e
*CFCLOS
FINISH

/POST1
PLNSOL,TEMP

!/CONTOUR,1,15,TP,,40           ! Definir paleta de cores e valores min e max
!ANTIME,35,0.5,,

```


A N E X O 

MODELO TRIDIMENSIONAL COM FLUXO

```
/COM, Modelo 3D com fluxo
/CLEAR, NOSTART
```

```
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!! Definir parametros
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
```

```
tempoff = 273.15      ! offset para kelvin
sbc = 5.67E-8         ! constante stefan-boltzmann
TA = 20.9             ! temperatura ambiente
TP = 21.4             ! temperatura do provete
T= 20                 ! tempo em que a lampada esta ativa
Ti= T+0.1            ! instante seguinte ao desligar a FC
Tf= 150               ! tempo total do ensaio
fx = 1300             ! fluxo de calor
```

```
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!! Dimensionamento do provete
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
```

```
lx=0.1                ! comprimento do provete em x
ly=0.1                ! comprimento do provete em y
e= 0.005              ! espessura (em z)
ldx=0.01              ! comprimento do defeito em x
ldy=0.01              ! comprimento do defeito em y
td = 0.0005           ! espessura do provete
p = 0.00225           ! profundidade do defeito
```

!—ELEMENTOS DO PROVETE

/PREP7

ET,1,SOLID70 ! Escolha do elemento

KEYOPT,1,2,0 ! Tipo de conveccao

!—ELEMENTOS DE SUPERFICIE DO PROVETE

ET,2,SURF152

KEYOPT,2,4,1

KEYOPT,2,5,0

KEYOPT,2,8,2

ET,3,SURF152

KEYOPT,3,4,1

KEYOPT,3,5,0

KEYOPT,3,8,1

!—Elementos de Ar

ET,4,SOLID70

KEYOPT,4,2,0

!*****

!***** Definir as propriedades do material

!*****

!— Provete - PA-12

MP,KXX,1,0.22 ! Condutividade PA-12

MP,DENS,1,1100 ! Densidade PA-12

MP,C,1,1590 ! Calor especifico PA-12

!— Ar

MP,KXX,4,0.030 ! Condutividade

MP,C,4,1012 ! Calor especifico

MP,DENS,4,1.2 ! Densidades

!*****

!***** Criar Geometria do provete

!*****

!—Criar pontos

K,,0,0

$K_{,,(lx/2)-(ldx/2),0}$
 $K_{,,(lx/2)+(ldx/2),0}$
 $K_{,,lx,0}$
 $K_{,,0,(ly/2)-(ldy/2)}$
 $K_{,,(lx/2)-(ldx/2),(ly/2)-(ldy/2)}$
 $K_{,,(lx/2)+(ldx/2),(ly/2)-(ldy/2)}$
 $K_{,,lx,(ly/2)-(ldy/2)}$
 $K_{,,0,(ly/2)+(ldy/2)}$
 $K_{,,(lx/2)-(ldx/2),(ly/2)+(ldy/2)}$
 $K_{,,(lx/2)+(ldx/2),(ly/2)+(ldy/2)}$
 $K_{,,lx,(ly/2)+(ldy/2)}$
 $K_{,,0,ly}$
 $K_{,,(lx/2)-(ldx/2),ly}$
 $K_{,,(lx/2)+(ldx/2),ly}$
 $K_{,,lx,ly}$
 $K_{,,0,0,e-p-td}$
 $K_{,,(lx/2)-(ldx/2),0,e-p-td}$
 $K_{,,(lx/2)+(ldx/2),0,e-p-td}$
 $K_{,,lx,0,e-p-td}$
 $K_{,,0,(ly/2)-(ldy/2),e-p-td}$
 $K_{,,(lx/2)-(ldx/2),(ly/2)-(ldy/2),e-p-td}$
 $K_{,,(lx/2)+(ldx/2),(ly/2)-(ldy/2),e-p-td}$
 $K_{,,lx,(ly/2)-(ldy/2),e-p-td}$
 $K_{,,0,(ly/2)+(ldy/2),e-p-td}$
 $K_{,,(lx/2)-(ldx/2),(ly/2)+(ldy/2),e-p-td}$
 $K_{,,(lx/2)+(ldx/2),(ly/2)+(ldy/2),e-p-td}$
 $K_{,,lx,(ly/2)+(ldy/2),e-p-td}$
 $K_{,,0,ly,e-p-td}$
 $K_{,,(lx/2)-(ldx/2),ly,e-p-td}$
 $K_{,,(lx/2)+(ldx/2),ly,e-p-td}$
 $K_{,,lx,ly,e-p-td}$
 $K_{,,0,0,e-p}$
 $K_{,,(lx/2)-(ldx/2),0,e-p}$
 $K_{,,(lx/2)+(ldx/2),0,e-p}$
 $K_{,,lx,0,e-p}$
 $K_{,,0,(ly/2)-(ldy/2),e-p}$
 $K_{,,(lx/2)-(ldx/2),(ly/2)-(ldy/2),e-p}$
 $K_{,,(lx/2)+(ldx/2),(ly/2)-(ldy/2),e-p}$
 $K_{,,lx,(ly/2)-(ldy/2),e-p}$
 $K_{,,0,(ly/2)+(ldy/2),e-p}$
 $K_{,,(lx/2)-(ldx/2),(ly/2)+(ldy/2),e-p}$

$K_{,,(lx/2)+(ldx/2),(ly/2)+(ldy/2),e-p}$
 $K_{,,lx,(ly/2)+(ldy/2),e-p}$
 $K_{,,0,ly,e-p}$
 $K_{,,(lx/2)-(ldx/2),ly,e-p}$
 $K_{,,(lx/2)+(ldx/2),ly,e-p}$
 $K_{,,lx,ly,e-p}$
 $K_{,,0,0,e}$
 $K_{,,(lx/2)-(ldx/2),0,e}$
 $K_{,,(lx/2)+(ldx/2),0,e}$
 $K_{,,lx,0,e}$
 $K_{,,0,(ly/2)-(ldy/2),e}$
 $K_{,,(lx/2)-(ldx/2),(ly/2)-(ldy/2),e}$
 $K_{,,(lx/2)+(ldx/2),(ly/2)-(ldy/2),e}$
 $K_{,,lx,(ly/2)-(ldy/2),e}$
 $K_{,,0,(ly/2)+(ldy/2),e}$
 $K_{,,(lx/2)-(ldx/2),(ly/2)+(ldy/2),e}$
 $K_{,,(lx/2)+(ldx/2),(ly/2)+(ldy/2),e}$
 $K_{,,lx,(ly/2)+(ldy/2),e}$
 $K_{,,0,ly,e}$
 $K_{,,(lx/2)-(ldx/2),ly,e}$
 $K_{,,(lx/2)+(ldx/2),ly,e}$
 $K_{,,lx,ly,e}$

/VIEW,1,1,1,1

!mudar vista

!—Criar volumes

V, 1, 2, 18, 17, 5, 6, 22, 21
V, 2, 3, 19, 18, 6, 7, 23, 22
V, 3, 4, 20, 19, 7, 8, 24, 23
V, 2, 3, 19, 18, 6, 7, 23, 22
V, 5, 6, 22, 21, 9, 10, 26, 25
V, 6, 7, 23, 22, 10, 11, 27, 26
V, 7, 8, 24, 23, 11, 12, 28, 27
V, 9, 10, 26, 25, 13, 14, 30, 29
V, 10, 11, 27, 26, 14, 15, 31, 30
V, 11, 12, 28, 27, 15, 16, 32, 31
V, 17, 18, 34, 33, 21, 22, 38, 37
V, 18, 19, 35, 34, 22, 23, 39, 38
V, 19, 20, 36, 35, 23, 24, 40, 39
V, 21, 22, 38, 37, 25, 26, 42, 41
V, 23, 24, 40, 39, 27, 28, 44, 43

V, 25, 26, 42, 41, 29, 30, 46, 45
V, 26, 27, 43, 42, 30, 31, 47, 46
V, 27, 28, 44, 43, 31, 32, 48, 47
V, 33, 34, 50, 49, 37, 38, 54, 53
V, 34, 35, 51, 50, 38, 39, 55, 54
V, 35, 36, 52, 51, 39, 40, 56, 55
V, 37, 38, 54, 53, 41, 42, 58, 57
V, 38, 39, 55, 54, 42, 43, 59, 58
V, 39, 40, 56, 55, 43, 44, 60, 59
V, 41, 42, 58, 57, 45, 46, 62, 61
V, 42, 43, 59, 58, 46, 47, 63, 62
V, 43, 44, 60, 59, 47, 48, 64, 63
V, 22, 23, 39, 38, 26, 27, 43, 42

!volume do defeito numero - 27

! Malha Proverte

TYPE,1
REAL,1
MAT,1

LESIZE,1, , ,20, , , ,1
LESIZE,7, , ,20, , , ,1
LESIZE,5, , ,20, , , ,1
LESIZE,6, , ,20, , , ,1
LESIZE,2, , ,20, , , ,1
LESIZE,4, , ,20, , , ,1
LESIZE,3, , ,20, , , ,1
LESIZE,9, , ,20, , , ,1
LESIZE,10, , ,20, , , ,1
LESIZE,11, , ,20, , , ,1
LESIZE,13, , ,20, , , ,1
LESIZE,16, , ,20, , , ,1
LESIZE,17, , ,20, , , ,1
LESIZE,20, , ,20, , , ,1
LESIZE,15, , ,20, , , ,1
LESIZE,14, , ,20, , , ,1
LESIZE,18, , ,20, , , ,1
LESIZE,19, , ,20, , , ,1
LESIZE,24, , ,20, , , ,1
LESIZE,27, , ,20, , , ,1
LESIZE,21, , ,20, , , ,1
LESIZE,23, , ,20, , , ,1

! divide a linha 1 em 20 elementos

LESIZE,25,,20,,,,1
LESIZE,28,,20,,,,1
LESIZE,26,,20,,,,1
LESIZE,22,,20,,,,1
LESIZE,66,,20,,,,1
LESIZE,106,,20,,,,1
LESIZE,70,,20,,,,1
LESIZE,110,,20,,,,1
LESIZE,71,,20,,,,1
LESIZE,111,,20,,,,1
LESIZE,69,,20,,,,1
LESIZE,109,,20,,,,1
LESIZE,74,,20,,,,1
LESIZE,114,,20,,,,1
LESIZE,77,,20,,,,1
LESIZE,117,,20,,,,1
LESIZE,76,,20,,,,1
LESIZE,116,,20,,,,1
LESIZE,82,,20,,,,1
LESIZE,122,,20,,,,1
LESIZE,81,,20,,,,1
LESIZE,121,,20,,,,1
LESIZE,79,,20,,,,1
LESIZE,119,,20,,,,1
LESIZE,67,,4,,,,1
LESIZE,65,,4,,,,1
LESIZE,73,,4,,,,1
LESIZE,78,,4,,,,1
LESIZE,80,,4,,,,1
LESIZE,75,,4,,,,1
LESIZE,68,,4,,,,1
LESIZE,72,,4,,,,1
LESIZE,107,,20,,,,1
LESIZE,107,,20,,,,1
LESIZE,105,,20,,,,1
LESIZE,113,,20,,,,1
LESIZE,118,,20,,,,1
LESIZE,120,,20,,,,1
LESIZE,115,,20,,,,1
LESIZE,108,,20,,,,1
LESIZE,112,,20,,,,1

LESIZE,12,,20,,,,1
LESIZE,8,,20,,,,1
LESIZE,42,,20,,,,1
LESIZE,45,,20,,,,1
LESIZE,89,,20,,,,1
LESIZE,132,,20,,,,1
LESIZE,37,,20,,,,1
LESIZE,40,,20,,,,1
LESIZE,91,,20,,,,1
LESIZE,129,,20,,,,1
LESIZE,29,,20,,,,1
LESIZE,33,,20,,,,1
LESIZE,84,,20,,,,1
LESIZE,124,,20,,,,1
LESIZE,31,,20,,,,1
LESIZE,35,,20,,,,1
LESIZE,86,,20,,,,1
LESIZE,126,,20,,,,1
LESIZE,127,,20,,,,1
LESIZE,87,,4,,,,1
LESIZE,36,,20,,,,1
LESIZE,123,,20,,,,1
LESIZE,83,,4,,,,1
LESIZE,32,,20,,,,1
LESIZE,128,,20,,,,1
LESIZE,92,,4,,,,1
LESIZE,39,,20,,,,1
LESIZE,131,,20,,,,1
LESIZE,88,,4,,,,1
LESIZE,44,,20,,,,1
LESIZE,38,,20,,,,1
LESIZE,41,,20,,,,1
LESIZE,98,,20,,,,1
LESIZE,130,,20,,,,1
LESIZE,43,,20,,,,1
LESIZE,46,,20,,,,1
LESIZE,90,,20,,,,1
LESIZE,133,,20,,,,1
LESIZE,30,,20,,,,1
LESIZE,34,,20,,,,1
LESIZE,85,,20,,,,1

LESIZE,125,,20,,,,1
LESIZE,49,,20,,,,1
LESIZE,53,,20,,,,1
LESIZE,96,,20,,,,1
LESIZE,137,,20,,,,1
LESIZE,47,,20,,,,1
LESIZE,51,,20,,,,1
LESIZE,94,,20,,,,1
LESIZE,135,,20,,,,1
LESIZE,55,,20,,,,1
LESIZE,58,,20,,,,1
LESIZE,100,,20,,,,1
LESIZE,140,,20,,,,1
LESIZE,60,,20,,,,1
LESIZE,63,,20,,,,1
LESIZE,103,,20,,,,1
LESIZE,143,,20,,,,1
LESIZE,48,,20,,,,1
LESIZE,52,,20,,,,1
LESIZE,95,,20,,,,1
LESIZE,136,,20,,,,1
LESIZE,56,,20,,,,1
LESIZE,59,,20,,,,1
LESIZE,101,,20,,,,1
LESIZE,141,,20,,,,1
LESIZE,61,,20,,,,1
LESIZE,64,,20,,,,1
LESIZE,104,,20,,,,1
LESIZE,144,,20,,,,1
LESIZE,54,,20,,,,1
LESIZE,97,,4,,,,1
LESIZE,138,,20,,,,1
LESIZE,50,,20,,,,1
LESIZE,93,,4,,,,1
LESIZE,134,,20,,,,1
LESIZE,57,,20,,,,1
LESIZE,99,,4,,,,1
LESIZE,139,,20,,,,1
LESIZE,62,,20,,,,1
LESIZE,102,,4,,,,1
LESIZE,142,,20,,,,1

```

MSHAPE,0,3D                !tipo de malha quadrangular (0) para um
                             ! elemento volume (3D)
MSHKEY,1                    !tipo de mesh mapped
VMESH,1,26,1                !criar malha do volume 1 ao 26
ALLSEL

! Malha - Ar
TYPE,4
REAL,4
MAT,4

MSHAPE,0,3D
MSHKEY,1
VMESH,27
ALLSEL

!—Superfície aquecida

TYPE,3
MAT,1
NSSEL,S,LOC,Z,0.005        ! Selecionar todos os nos com coordenada
                             ! Z de valor 0.005

ESURF
ALLSEL

!—Malha da superfície inferior(surf152)

TYPE,2
MAT,1
NSSEL,S,LOC,Z,0
ESURF
ALLSEL

!*****
!***** Condições fronteira
!*****
*dim,tabflux,table,5,,time  ! Criar tabela com o nome tabflux, com 5 linhas
*SET,tabflux(1),0,fx,fx,0,0 ! Indicar valores do fluxo na coluna 2
*SET,tabflux(1,0),0,0.1,T,Ti,150 ! Indicar valores do tempo na coluna 1

NSSEL,S,LOC,Z,e
SF,,HFLUX,%tabflux%
ALLSEL

```

```

NSEL,S,LOC,Z,0
SF,,CONV,5,TA
ALLSEL

!*****
!***** Solucao
!*****

/SOLU
TOFFST,tempoff
ANTYPE,TRANS           ! Tipo de analise transiente
TUNIF,TP               ! Temperatura uniforme dos nos
TIME,150               ! Tempo pretendido
OUTRES,ALL,ALL
AUTOTS,ON
DELTIM,1               ! Salto do intervalo de tempo entre analise de
                       ! valores

SOLVE
FINISH

n1=node((lx/2),(ly/2),e)
n2=node((lx/4),(ly/2),e)
n3=node((lx/2),(ly/2),0)
n4=node((lx/4),(ly/2),0)

/POST26

!—Carregar informacao para ver graficos
NSOL,2,n1,TEMP,,tn1,   ! Superior - defeito
NSOL,3,n2,TEMP,,tn2,   ! Superior - FD
NSOL,4,n3,TEMP,,tn3,   ! Inferior - defeito
NSOL,5,n4,TEMP,,tn4,   ! Inferior - FD
!—Criar ficheiros .txt.
! Para correr as seguintes linhas, o codigo deve ser lido pela funcao Read Input From

STORE *GET,SIZE,VARI,,NSETS
*DIM,TIME_T,ARRAY,SIZE
VGET,TIME_T(1),1
*DIM,tn1,ARRAY,SIZE
VGET,tn1(1),2
*DIM,tn2,ARRAY,SIZE
VGET,tn2(1),3

```

```
*DIM,tn3,ARRAY,SIZE
VGET,tn3(1),4
*DIM,tn4,ARRAY,SIZE
VGET,tn4(1),5
*CFOPEN,Centro_sup,txt,,APPEND
*VWRITE,TIME_T(1),tn1(1)
%15e %15e
*CFCLOS
*CFOPEN,FD_sup,txt,,APPEND
*VWRITE,TIME_T(1),tn2(1)
%15e %15e
*CFCLOS
*CFOPEN,Centro_inf,txt,,APPEND
*VWRITE,TIME_T(1),tn3(1)
%15e %15e
*CFCLOS
*CFOPEN,FD_inf,txt,,APPEND
*VWRITE,TIME_T(1),tn4(1)
%15e %15e
*CFCLOS
FINISH

/POST1
PLNSOL,TEMP

/CONTOUR,,9,TP,,30
ANTIME,70,0.5,,
```




MODELO TRIDIMENSIONAL COM RADIAÇÃO

```
/COM, Modelo 3D com radiacao  
/CLEAR, NOSTART
```

```
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!  
!!!! Definir parametros  
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
```

```
tempoff = 273.15      ! offset para kelvin  
sbc = 5.67E-8        ! constante stefan-boltzmann  
TA = 20.9            ! temperatura ambiente  
TP = 21.4            ! temperatura do provete  
T= 20                ! tempo em que a lampada esta ativa  
Ti= T+0.1           ! instante seguinte ao desligar a FC  
Tf= 150              ! tempo total do ensaio
```

```
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!  
!!!! Dimensionamento do provete  
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
```

```
lx=0.1               ! comprimento do provete em x  
ly=0.1               ! comprimento do provete em y  
e= 0.005             ! espessura (em z)  
ldx=0.01            ! comprimento do defeito em x  
ldy=0.01            ! comprimento do defeito em y  
td = 0.0005         ! espessura do provete  
p = 0.00225         ! profundidade do defeito
```

```

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!! Dimensionamento da FC
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

L = 0.1                ! largura da FC
h =0.15               ! distancia desde o provete a FC

/PREP7

!—ELEMENTOS DO PROVETE
ET,1,SOLID90          ! Escolha do elemento
KEYOPT,1,1,0

!—ELEMENTOS DA FC
ET,2,SHELL131
KEYOPT,2,2,0
KEYOPT,2,3,2
KEYOPT,2,6,0
SECTYPE,2,SHELL
SECDATA,e/10,1

!—Elementos de Ar

ET,4,SOLID90
KEYOPT,4,1,0
!*****
!***** Definir as propriedades do material
!*****

!— Provete - PA-12
MP,KXX,1,0.22         ! Condutividade PA-12
MP,DENS,1,1100        ! Densidade PA-12
MP,C,1,1590           ! Calor especifico PA-12

!— Ar

MP,KXX,4,0.030        ! Condutividade
MP,C,4,1012           ! Calor especifico
MP,DENS,4,1.2         ! Densidades

!*****
!***** Criar Geometria do provete
!*****

```

!—Criar pontos

K,,0,0
K,,(lx/2)-(ldx/2),0
K,,(lx/2)+(ldx/2),0
K,,lx,0
K,,0,(ly/2)-(ldy/2)
K,,(lx/2)-(ldx/2),(ly/2)-(ldy/2)
K,,(lx/2)+(ldx/2),(ly/2)-(ldy/2)
K,,lx,(ly/2)-(ldy/2)
K,,0,(ly/2)+(ldy/2)
K,,(lx/2)-(ldx/2),(ly/2)+(ldy/2)
K,,(lx/2)+(ldx/2),(ly/2)+(ldy/2)
K,,lx,(ly/2)+(ldy/2)
K,,0,ly
K,,(lx/2)-(ldx/2),ly
K,,(lx/2)+(ldx/2),ly
K,,lx,ly
K,,0,0,e-p-td
K,,(lx/2)-(ldx/2),0,e-p-td
K,,(lx/2)+(ldx/2),0,e-p-td
K,,lx,0,e-p-td
K,,0,(ly/2)-(ldy/2),e-p-td
K,,(lx/2)-(ldx/2),(ly/2)-(ldy/2),e-p-td
K,,(lx/2)+(ldx/2),(ly/2)-(ldy/2),e-p-td
K,,lx,(ly/2)-(ldy/2),e-p-td
K,,0,(ly/2)+(ldy/2),e-p-td
K,,(lx/2)-(ldx/2),(ly/2)+(ldy/2),e-p-td
K,,(lx/2)+(ldx/2),(ly/2)+(ldy/2),e-p-td
K,,lx,(ly/2)+(ldy/2),e-p-td
K,,0,ly,e-p-td
K,,(lx/2)-(ldx/2),ly,e-p-td
K,,(lx/2)+(ldx/2),ly,e-p-td
K,,lx,ly,e-p-td
K,,0,0,e-p
K,,(lx/2)-(ldx/2),0,e-p
K,,(lx/2)+(ldx/2),0,e-p
K,,lx,0,e-p
K,,0,(ly/2)-(ldy/2),e-p
K,,(lx/2)-(ldx/2),(ly/2)-(ldy/2),e-p
K,,(lx/2)+(ldx/2),(ly/2)-(ldy/2),e-p

$K,,lx,(ly/2)-(ldy/2),e-p$
 $K,,0,(ly/2)+(ldy/2),e-p$
 $K,,(lx/2)-(ldx/2),(ly/2)+(ldy/2),e-p$
 $K,,(lx/2)+(ldx/2),(ly/2)+(ldy/2),e-p$
 $K,,lx,(ly/2)+(ldy/2),e-p$
 $K,,0,ly,e-p$
 $K,,(lx/2)-(ldx/2),ly,e-p$
 $K,,(lx/2)+(ldx/2),ly,e-p$
 $K,,lx,ly,e-p$
 $K,,0,0,e$
 $K,,(lx/2)-(ldx/2),0,e$
 $K,,(lx/2)+(ldx/2),0,e$
 $K,,lx,0,e$
 $K,,0,(ly/2)-(ldy/2),e$
 $K,,(lx/2)-(ldx/2),(ly/2)-(ldy/2),e$
 $K,,(lx/2)+(ldx/2),(ly/2)-(ldy/2),e$
 $K,,lx,(ly/2)-(ldy/2),e$
 $K,,0,(ly/2)+(ldy/2),e$
 $K,,(lx/2)-(ldx/2),(ly/2)+(ldy/2),e$
 $K,,(lx/2)+(ldx/2),(ly/2)+(ldy/2),e$
 $K,,lx,(ly/2)+(ldy/2),e$
 $K,,0,ly,e$
 $K,,(lx/2)-(ldx/2),ly,e$
 $K,,(lx/2)+(ldx/2),ly,e$
 $K,,lx,ly,e$

GPLOT

/VIEW,1,1,1,1

!mudar vista

!—Criar volumes

V, 1, 2, 18, 17, 5, 6, 22, 21
V, 2, 3, 19, 18, 6, 7, 23, 22
V, 3, 4,20, 19, 7, 8, 24, 23
V, 2, 3, 19, 18, 6, 7, 23, 22
V, 5, 6, 22, 21, 9, 10, 26, 25
V, 6, 7, 23, 22, 10, 11, 27, 26
V, 7, 8, 24, 23, 11, 12, 28, 27
V, 9, 10, 26, 25, 13, 14, 30, 29
V, 10, 11, 27, 26, 14, 15, 31, 30
V, 11, 12, 28, 27, 15, 16, 32, 31
V, 17, 18, 34, 33, 21, 22, 38, 37

V, 18, 19, 35, 34, 22, 23, 39, 38
V, 19, 20, 36, 35, 23, 24, 40, 39
V, 21, 22, 38, 37, 25, 26, 42, 41
V, 23, 24, 40, 39, 27, 28, 44, 43
V, 25, 26, 42, 41, 29, 30, 46, 45
V, 26, 27, 43, 42, 30, 31, 47, 46
V, 27, 28, 44, 43, 31, 32, 48, 47
V, 33, 34, 50, 49, 37, 38, 54, 53
V, 34, 35, 51, 50, 38, 39, 55, 54
V, 35, 36, 52, 51, 39, 40, 56, 55
V, 37, 38, 54, 53, 41, 42, 58, 57
V, 38, 39, 55, 54, 42, 43, 59, 58
V, 39, 40, 56, 55, 43, 44, 60, 59
V, 41, 42, 58, 57, 45, 46, 62, 61
V, 42, 43, 59, 58, 46, 47, 63, 62
V, 43, 44, 60, 59, 47, 48, 64, 63
V, 22, 23, 39, 38, 26, 27, 43, 42

!volume do defeito numero - 27

!—Dimensionar fonte de calor

K,,0,0,h

K,,L,0,h

K,,L,L,h

K,,0,L,h

A,65,68,67,66

! Malha Proвете

TYPE,1

REAL,1

MAT,1

LESIZE,1, , ,20, , , ,1

LESIZE,7, , ,20, , , ,1

LESIZE,5, , ,20, , , ,1

LESIZE,6, , ,20, , , ,1

LESIZE,2, , ,20, , , ,1

LESIZE,4, , ,20, , , ,1

LESIZE,3, , ,20, , , ,1

LESIZE,9, , ,20, , , ,1

LESIZE,10, , ,20, , , ,1

LESIZE,11, , ,20, , , ,1

LESIZE,13,,20,,,,1
LESIZE,16,,20,,,,1
LESIZE,17,,20,,,,1
LESIZE,20,,20,,,,1
LESIZE,15,,20,,,,1
LESIZE,14,,20,,,,1
LESIZE,18,,20,,,,1
LESIZE,19,,20,,,,1
LESIZE,24,,20,,,,1
LESIZE,27,,20,,,,1
LESIZE,21,,20,,,,1
LESIZE,23,,20,,,,1
LESIZE,25,,20,,,,1
LESIZE,28,,20,,,,1
LESIZE,26,,20,,,,1
LESIZE,22,,20,,,,1
LESIZE,66,,20,,,,1
LESIZE,106,,20,,,,1
LESIZE,70,,20,,,,1
LESIZE,110,,20,,,,1
LESIZE,71,,20,,,,1
LESIZE,111,,20,,,,1
LESIZE,69,,20,,,,1
LESIZE,109,,20,,,,1
LESIZE,74,,20,,,,1
LESIZE,114,,20,,,,1
LESIZE,77,,20,,,,1
LESIZE,117,,20,,,,1
LESIZE,76,,20,,,,1
LESIZE,116,,20,,,,1
LESIZE,82,,20,,,,1
LESIZE,122,,20,,,,1
LESIZE,81,,20,,,,1
LESIZE,121,,20,,,,1
LESIZE,79,,20,,,,1
LESIZE,119,,20,,,,1
LESIZE,67,,4,,,,1
LESIZE,65,,4,,,,1
LESIZE,73,,4,,,,1
LESIZE,78,,4,,,,1
LESIZE,80,,4,,,,1

LESIZE,75,,4,,,,1
LESIZE,68,,4,,,,1
LESIZE,72,,4,,,,1
LESIZE,107,,20,,,,1
LESIZE,107,,20,,,,1
LESIZE,105,,20,,,,1
LESIZE,113,,20,,,,1
LESIZE,118,,20,,,,1
LESIZE,120,,20,,,,1
LESIZE,115,,20,,,,1
LESIZE,108,,20,,,,1
LESIZE,112,,20,,,,1
LESIZE,12,,20,,,,1
LESIZE,8,,20,,,,1
LESIZE,42,,20,,,,1
LESIZE,45,,20,,,,1
LESIZE,89,,20,,,,1
LESIZE,132,,20,,,,1
LESIZE,37,,20,,,,1
LESIZE,40,,20,,,,1
LESIZE,91,,20,,,,1
LESIZE,129,,20,,,,1
LESIZE,29,,20,,,,1
LESIZE,33,,20,,,,1
LESIZE,84,,20,,,,1
LESIZE,124,,20,,,,1
LESIZE,31,,20,,,,1
LESIZE,35,,20,,,,1
LESIZE,86,,20,,,,1
LESIZE,126,,20,,,,1
LESIZE,127,,20,,,,1
LESIZE,87,,4,,,,1
LESIZE,36,,20,,,,1
LESIZE,123,,20,,,,1
LESIZE,83,,4,,,,1
LESIZE,32,,20,,,,1
LESIZE,128,,20,,,,1
LESIZE,92,,4,,,,1
LESIZE,39,,20,,,,1
LESIZE,131,,20,,,,1
LESIZE,88,,4,,,,1

LESIZE,44,,20,,,,1
LESIZE,38,,20,,,,1
LESIZE,41,,20,,,,1
LESIZE,98,,20,,,,1
LESIZE,130,,20,,,,1
LESIZE,43,,20,,,,1
LESIZE,46,,20,,,,1
LESIZE,90,,20,,,,1
LESIZE,133,,20,,,,1
LESIZE,30,,20,,,,1
LESIZE,34,,20,,,,1
LESIZE,85,,20,,,,1
LESIZE,125,,20,,,,1
LESIZE,49,,20,,,,1
LESIZE,53,,20,,,,1
LESIZE,96,,20,,,,1
LESIZE,137,,20,,,,1
LESIZE,47,,20,,,,1
LESIZE,51,,20,,,,1
LESIZE,94,,20,,,,1
LESIZE,135,,20,,,,1
LESIZE,55,,20,,,,1
LESIZE,58,,20,,,,1
LESIZE,100,,20,,,,1
LESIZE,140,,20,,,,1
LESIZE,60,,20,,,,1
LESIZE,63,,20,,,,1
LESIZE,103,,20,,,,1
LESIZE,143,,20,,,,1
LESIZE,48,,20,,,,1
LESIZE,52,,20,,,,1
LESIZE,95,,20,,,,1
LESIZE,136,,20,,,,1
LESIZE,56,,20,,,,1
LESIZE,59,,20,,,,1
LESIZE,101,,20,,,,1
LESIZE,141,,20,,,,1
LESIZE,61,,20,,,,1
LESIZE,64,,20,,,,1
LESIZE,104,,20,,,,1
LESIZE,144,,20,,,,1

```

LESIZE,54,,20,,,,1
LESIZE,97,,4,,,,1
LESIZE,138,,20,,,,1
LESIZE,50,,20,,,,1
LESIZE,93,,4,,,,1
LESIZE,134,,20,,,,1
LESIZE,57,,20,,,,1
LESIZE,99,,4,,,,1
LESIZE,139,,20,,,,1
LESIZE,62,,20,,,,1
LESIZE,102,,4,,,,1
LESIZE,142,,20,,,,1

MSHAPE,0,3D                                !tipo de malha quadrangular (0) para um
                                           ! elemento volume (3D)

MSHKEY,1                                    !tipo de mesh mapped
VMESH,1,26,1                                !criar malha do volume 1 ao 26
ALLSEL

!—Malha FC
REAL,2
TYPE,2
SECNUM,2
LESIZE,145,,10,,,,1
LESIZE,148,,10,,,,1
MSHAPE,0,2D                                ! tipo de malha quadrangular (0) para um
                                           ! elemento area (2D)

MSHKEY,1                                    !tipo de mesh mapped
AMESH,109
ALLSEL

!—Malha SUPERFICIE

!ELEMENTOS DE SUPERFICIE DO PROVETE
ET,3,SHELL131
KEYOPT,3,2,0
KEYOPT,3,3,2
KEYOPT,3,6,0
SECTYPE,3,SHELL

TYPE,3
REAL,1

```

```

MAT,1
SECNUM,2

NSEL,S,LOC,Z,e           ! Selecionar todos os nos com coordenada Z de
                          ! valor e
ESURF                    ! Cria elementos sobrepostos na superficie
ALLSEL

! Malha - Ar
TYPE,4
REAL,4
MAT,4

MSHAPE,0,3D
MSHKEY,1
VMESH,27
ALLSEL

! Ativar coordenadas dos elementos para verificar se o sentido se encontra bem.
!/PSYMB,ESYS,1           !Ativa representação das coordenadas
!ELOT
!/PSYMB,ESYS,0           !Desativa representação das coordenadas

!—Extra node

/PREP7

K,,-lx/2,ly/2,h/2        ! Criar keypoint
NKPT,,69                 ! Criar no a partir de um keypoint
*GET,space_n,NODE,,NUM,MAXD ! Guardar com numero do ultimo no existente
                          ! com o nome space_n
D,space_n,TEMP,TA        ! Dar o valor de temperatura TA ao no space_n
FINISH

!*****
!***** Gerar matriz radiacao
!*****

/AUX12

!Selecionar elementos e nos das superficies a radiar

ESEL,S,TYPE,,2           ! Selecionar os elementos numero 2
ESEL,A,TYPE,,3           ! Adicionar a selecao os elementos numero 3

```

```

NSLE,S,ALL                ! Selecionar todos os nos associados a elementos
EMISS,2,0.95              ! Definir emissividade dos elementos 2
EMISS,3,0.95              ! Definir emissividade dos elementos 3
GEOM,0                    ! Definir geometria (0) para 3D
SPACE,space_n             ! Indicar o no extra
STEF,sbc                  ! Definir o valor da constante de stefan-bolztmann
VTYPE,0,100               ! Modo oculto (1) modo nao-oculto (0)
WRITE,radiacao            ! Escrever a informacao num ficheiro
ALLSEL

FINISH

/PREP7

!—Super elemento
ET,5,MATRIX50             ! escolha do Super elemento
KEYOPT,5,1,1              ! Subestrutura especial de radiação

TYPE,5
SE,radiacao               ! Ler o ficheiro criado e atribuir essa informacao
                           ! ao elemento superelemento

!*****
!***** Condiçoes fronteira
!*****

ESEL,S,TYPE,,3
EDELE,ALL                 ! Eliminar elementos selecionados
ESEL,ALL
ALLSELL

! Criar tabela, com nome Temperatura, com dimensao de 16 linhas
*dim,TEMPERATURA,table,16,,time
! Definir valores de temperatura (coluna 2)
*SET,TEMPERATURA(1),TA,97,97,80,62,48,44,41,40,37,30,TA
! Definir valores de tempo (coluna 1)
*SET,TEMPERATURA(1,0),0,0.5,T,Ti,T+2,T+5,T+10,T+20,T+30,T+40,Tf,500
NSEL,S,LOC,Z,h
D,All,TEMP,%TEMPERATURA%
ALLSEL

!—Superficie aquecida

ASEL, S,LOC, Z,e

```

```

SFA,All,,CONV,27,TP
ALLSEL

!—Superficie inferior

ASEL, S,LOC, Z,0
SFA,All,,CONV,2,TP
ALLSEL

FINISH

!*****
!***** Solucao
!*****

/SOLU
TOFFST,tempoff
ANTYPE,TRANS                ! Tipo de analise transiente
TUNIF,TP                    ! Temperatura uniforme dos nos
TIME,150                    ! Tempo pretendido
OUTRES,ALL,ALL
AUTOTS,ON
DELTIM,1                    ! Salto do intervalo de tempo entre analise de
                             ! valores

SOLVE
FINISH

n1=node((lx/2),(ly/2),e)
n2=node((lx/4),(ly/2),e)
n3=node((lx/2),(ly/2),0)
n4=node((lx/4),(ly/2),0)
n5=node((lx/2),(ly/2),h)

/POST26

NSOL,2,n1,TEMP,,tn1        !superficie -defeito
NSOL,3,n2,TEMP,,tn2        !superficie -FD
NSOL,4,n3,TEMP,,tn3        !inferior -defeito
NSOL,5,n4,TEMP,,tn4        !inferior -FD
NSOL,6,n5,TEMP,,tn5

!/POST1
!PLNSOL,TEMP

!/CONTOUR,,9,TP,,24
!ANTIME,70,0.5,,

```