

# **Conceção de um sistema de aquisição de temperatura de peças para impressão tridimensional**

*António Sá Leão Alves Martins*

**Dissertação de Mestrado**

Orientador na FEUP: Professor Doutor Fernando Gomes de Almeida

Orientadores no INEGI: Engenheiro João Paulo Pereira e Doutor Luís Miguel Pereira Pina



**Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica**  
**Secção de Automação, Instrumentação e Controlo**

Junho de 2017



*À minha família*



## Resumo

Atualmente, as tecnologias de fabrico aditivo encontram-se na vanguarda da inovação tecnológica, com aplicações no setor da saúde, na indústria e até para uso doméstico. Uma das áreas da impressão tridimensional onde atualmente existe um grande esforço de investigação, é na obtenção de impressões com polímeros termoplásticos de elevado desempenho, que permitem a construção de peças com propriedades mecânicas muito superiores aos polímeros convencionais. No entanto, para estes termoplásticos, devido às suas elevadas temperaturas de fusão, a obtenção de uma peça sem defeitos de origem térmica, necessita de uma medição e controlo de temperatura de elevada resolução.

A partir de um método de medição de temperatura sem contacto, uma câmara termográfica, a investigação desenvolvida neste trabalho propõe-se conceber algoritmos que associem a informação do ficheiro da peça para impressão tridimensional com a informação do perfil de temperatura da peça dado pela câmara. Para tal, é necessária uma vasta compreensão das malhas triangulares que constituem os modelos das peças para fabrico aditivo, conhecimentos matemáticos nas áreas de computação gráfica e visão artificial e na área da transferência de calor, particularmente na radiação de energia térmica. Espera-se que este trabalho seja uma base de investigação sólida, que possa ser utilizada e consultada para o desenvolvimento de sistemas de aquisição e controlo de temperatura da mesma natureza.

A ligação entre a informação de uma imagem térmica e o ficheiro STL de uma peça para impressão 3D, provou ser um método capaz de medir gradientes térmicos superficiais destes tipos de peça com grande exatidão, devido ao facto de ser possível escolher singularmente zonas específicas da malha para análise do seu comportamento térmico. A partir dos resultados obtidos neste trabalho, pode-se afirmar que foi dado um grande passo no objetivo final de introduzir plásticos de elevado desempenho em fabrico aditivo.



# **Development of a temperature acquisition system for 3D printed parts**

## **Abstract**

Nowadays, additive manufacturing technologies are on the edge of technological and scientific innovation, with applications on health, industry and even for domestic use. More recently, there has been a strong interest in introducing high performance thermoplastics in 3D printing, due to their better mechanical properties. However, in these type of polymers, due to their high melting points, there is a need to very precisely acquire and control temperature in order to prevent thermal deformations of the printed part.

Using a non-intrusive temperature measurement method, a thermographic camera, the research made in this project intends to develop algorithms that will ultimately associate the information of the 3D printed part file, with the information of the part's surface temperatures, which is obtained by the camera. In order to achieve such a result, there is a need to have a strong understanding of the triangular meshes that describe the model surface, mathematical methods of machine and computer vision, as well as a good understanding of heat transfer principles, particularly thermal radiation. The results obtained in this thesis are expected to significantly contribute for the development of temperature control systems of the same nature.

The connection between thermographic images and STL files for 3D printing has proven to be a successful method to measure surface thermal gradients with very high spatial resolution, since it is possible to choose specific elements of a mesh to study its thermal behaviour. From the results obtained in this work, it can be concluded that a major step has been taken in order to fulfil the greater objective, which is the introduction of high performance plastics in additive manufacturing.



## Agradecimentos

O trabalho realizado nesta dissertação nunca seria possível sem o apoio de várias pessoas, às quais deixo o meu mais sincero agradecimento.

Aos meus orientadores, Professor Fernando Gomes de Almeida, Engenheiro João Paulo Pereira e Doutor Luís Miguel Pereira Pina, agradeço a paciência, conhecimento transmitido e incondicional apoio durante o passado semestre.

A todos os meus colegas no INEGI e na FEUP, agradeço o tempo despendido comigo, o vosso contributo e o enorme espírito de entreaajuda sempre presente.

À minha família, por me proporcionarem as oportunidades que possibilitaram o sucesso do meu percurso académico.

A presente tese de mestrado integrado 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.



# Índice de conteúdos

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO</b>   | <b>1</b>  |
| 1.1      | CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROJETO E MOTIVAÇÃO   | 1         |
| 1.2      | OBJETIVOS DO PROJETO E METODOLOGIA  | 2         |
| 1.3      | ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO  | 3         |
| <b>2</b> | <b>ENQUADRAMENTO E DEFINIÇÃO DO PROBLEMA</b>  | <b>5</b>  |
| 2.1      | FABRICO ADITIVO   | 5         |
| 2.2      | DEFINIÇÃO DO PROBLEMA   | 7         |
| 2.3      | TECNOLOGIA FDM  | 9         |
| 2.3.1    | <i>Descrição do processo</i>  | 9         |
| 2.3.2    | <i>Máquina de impressão tridimensional</i>  | 10        |
| 2.3.3    | <i>Materiais correntes e utilização de termoplásticos de elevado desempenho</i>                           | 11        |
| 2.4      | CONSIDERAÇÕES SOBRE O SISTEMA DE MEDIÇÃO E DE CONTROLO DE TEMPERATURA COM FEEDBACK INTRODUZIDO POR IMAGEM | 14        |
| 2.5      | SOLUÇÕES A DESENVOLVER  | 16        |
| <b>3</b> | <b>FUNDAMENTOS TEÓRICOS</b>   | <b>17</b> |
| 3.1      | TERMOGRAFIA   | 17        |
| 3.1.1    | <i>Conceitos e terminologia</i>   | 17        |
| 3.1.2    | <i>Radiação do corpo negro</i>  | 18        |
| 3.1.3    | <i>Emissores não ideais (não negros)</i>  | 20        |
| 3.1.4    | <i>Materiais semitransparentes</i>  | 21        |
| 3.2      | CÂMARA TERMOGRÁFICA   | 21        |
| 3.2.1    | <i>FLIR Ax5</i>   | 21        |
| 3.2.2    | <i>Princípio de funcionamento e componentes</i>   | 21        |
| 3.2.3    | <i>Medição de temperatura</i>   | 24        |
| 3.2.4    | <i>Procedimento de medição</i>  | 24        |
| 3.3      | REPRESENTAÇÃO COMPUTACIONAL DE PEÇAS PARA IMPRESSÃO 3D (STL)  | 26        |
| 3.4      | MANIPULAÇÃO DE FICHEIROS STL  | 27        |
| 3.4.1    | <i>Transformação de imagem</i>  | 28        |
| 3.4.2    | <i>Projeção num plano a partir de visão tridimensional</i>  | 29        |
| 3.5      | CALIBRAÇÃO GEOMÉTRICA DA CÂMARA   | 29        |
| 3.5.1    | <i>Parâmetros na calibração da câmara</i>   | 29        |
| 3.5.2    | <i>Distorção na calibração da câmara</i>  | 30        |
| <b>4</b> | <b>PROCESSAMENTO DA IMAGEM TERMOGRÁFICA</b>   | <b>33</b> |
| 4.1      | METODOLOGIA   | 33        |
| 4.2      | AQUISIÇÃO E REPRESENTAÇÃO DA IMAGEM TERMOGRÁFICA  | 35        |
| 4.3      | REPRESENTAÇÃO DO FICHEIRO STL SOBRE A IMAGEM TERMOGRÁFICA   | 36        |
| 4.3.1    | <i>Funcionamento base do algoritmo</i>  | 36        |
| 4.3.2    | <i>Projeção do sólido</i>   | 38        |
| 4.3.3    | <i>Distinção das faces visíveis e invisíveis</i>  | 40        |
| 4.3.4    | <i>Interface gráfica</i>  | 41        |
| 4.4      | PROJEÇÃO DO MAPA DE TEMPERATURA SOBRE O OBJETO  | 43        |
| 4.5      | MODIFICAÇÃO DO STL COM SOFTWARE DE MODELAÇÃO SOBRE MALHAS TRIDIMENSIONAIS                                 | 45        |
| <b>5</b> | <b>EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DO ALGORITMO E VALIDAÇÃO</b>   | <b>47</b> |
| 5.1      | TESTE 1 (BLOCO)   | 47        |
| 5.2      | TESTE 2 (PRISMA)  | 49        |
| 5.3      | TESTE 3 (CONDUTA)   | 56        |
| 5.4      | DISCUSSÃO DE RESULTADOS   | 59        |

|                 |  |           |
|-----------------|--|-----------|
| <b>6</b>        | <b>APLICAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DESENVOLVIDO .....</b>          | <b>61</b> |
| 6.1             | DESCRIÇÃO .....  | 61        |
| 6.2             | APLICAÇÃO E RESULTADOS .....                                       | 62        |
| 6.2.1           | <i>Estudo de arrefecimento do bloco .....</i>                      | <i>62</i> |
| 6.2.2           | <i>Estudo de arrefecimento do prisma.....</i>                      | <i>64</i> |
| 6.2.3           | <i>Estudo do aquecimento e arrefecimento do bloco .....</i>        | <i>65</i> |
| 6.2.4           | <i>Avaliação sobre os requisitos de tempo-real do sistema.....</i> | <i>69</i> |
| <b>7</b>        | <b>CONCLUSÕES E PERSPETIVAS DE TRABALHOS FUTUROS.....</b>          | <b>71</b> |
| 7.1             | CONCLUSÕES FINAIS .....  | 71        |
| 7.2             | TRABALHOS FUTUROS .....  | 72        |
| <b>8</b>        | <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>                            | <b>73</b> |
| <b>ANEXO A:</b> | <b>SUMÁRIO DO PROJETO FIBR3D .....</b>                             | <b>75</b> |
| <b>ANEXO B:</b> | <b>FICHA TÉCNICA DA CÂMARA FLIR A65 F=25 MM.....</b>               | <b>77</b> |

## Índice de Figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 2.1 – Calçado produzido com recurso a tecnologias de fabrico aditivo [4].   | 5  |
| Figura 2.2 – Defeitos na primeira camada depositada numa peça em ABS (impressa na máquina de impressão tridimensional disponível).                     | 7  |
| Figura 2.3 – Defeitos de adesão entre camadas numa peça em ULTEM (impressa na máquina de impressão tridimensional disponível).                         | 8  |
| Figura 2.4 – Deformação de origem térmica de peça em ABS [5].  | 8  |
| Figura 2.5 – Sequência de funcionamento em fabrico aditivo por extrusão.   | 9  |
| Figura 2.6 – Impressora tridimensional Kühling & Kühling [6].  | 10 |
| Figura 2.7 – Ilustração da deposição de camadas no processo FFF [6].   | 11 |
| Figura 2.8 – Relação entre a temperatura de fusão de plásticos para extrusão e a respetiva gama de temperaturas de operação [2].                       | 13 |
| Figura 2.9 – Imagem termográfica de uma conduta industrial [10].   | 14 |
| Figura 2.10 – Arquitetura espacial da máquina [6].   | 15 |
| Figura 3.1 – Espectro Eletromagnético: 1- Raios X; 2- UV; 3- Visível; 4- Infravermelhos; 5- Micro-ondas; 6- Ondas rádio [11].                          | 17 |
| Figura 3.2 – Cavidade isotérmica a uma temperatura T com uma pequena abertura de área A [13].  | 18 |
| Figura 3.3 – Variação do poder emissivo espectral do corpo negro a várias temperaturas [13].   | 19 |
| Figura 3.4 – Câmara termográfica em uso, FLIR A65.   | 21 |
| Figura 3.5 – Diagrama dos elementos base que constituem a câmara termográfica (Adaptado de [8]).   | 22 |
| Figura 3.6 – Sistema ótico de aquisição de imagem [8].   | 22 |
| Figura 3.7 – Representação esquemática de uma medição por recurso a câmara termográfica 1 - Vizinhança; 2- Objeto alvo; 3- Atmosfera; 4- Câmara [11].  | 25 |
| Figura 3.8 – Conversão de ficheiro CAD em STL -Representação do mesmo sólido em Solidworks, MeshLab e Matlab (função Patch) respetivamente.            | 26 |
| Figura 3.9 – Ficheiro STL em texto ASCII que representa uma estrutura triangular piramidal [3].  | 27 |
| Figura 3.10 – Parâmetros de calibração da câmara (adaptado de [15]).   | 29 |
| Figura 3.11 – Tipos de distorção radial [15].  | 30 |
| Figura 4.1 – Objetivo do algoritmo. Cada triângulo do STL representa uma temperatura em escala de cores, baseada na informação da imagem termográfica. | 33 |
| Figura 4.2 – Estrutura do algoritmo de processamento de imagem termográfica e aquisição de temperatura.  | 34 |
| Figura 4.3 – Imagem termográfica de um bloco metálico.   | 35 |
| Figura 4.4 – Representação do STL de um bloco metálico sobre a sua respetiva representação termográfica.   | 36 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 4.5 – Ilustração do referencial para o sistema de calibração. Câmara representada por A e bloco por B.....  | 36 |
| Figura 4.6 – STL do bloco representado em Matlab (função patch).....   | 37 |
| Figura 4.7 – Sistema de eixos coordenados para a visualização do objeto pela câmara (Viewpoint), com a ilustração do significado de azimute e elevação [16].....   | 37 |
| Figura 4.8 – Recriação do sistema de medição. Câmara (ponto focal) representado por *, sólido a preto, plano de projeção a vermelho, projeção do sólido a azul e linhas de interseção representadas a traço ponto..... | 38 |
| Figura 4.9 – Ampliação da projeção do objeto.....  | 39 |
| Figura 4.10 – Transformação para os novos eixos coordenados.....   | 39 |
| Figura 4.11 – Transformação da imagem após distinção dos triângulos visíveis.....  | 40 |
| Figura 4.12 – Computação do Envoltório Visual Convexo (a vermelho) – Convex Hull – em Matlab [17].....   | 41 |
| Figura 4.13 – Interface gráfica.....   | 42 |
| Figura 4.14 – Instruções de uso da interface.....  | 42 |
| Figura 4.15 – Atribuição da temperatura superficial do sólido à malha de triângulos (STL)..  | 43 |
| Figura 4.16 – Disposição dos pontos de interesse em cada triângulo da malha STL.....   | 44 |
| Figura 4.17 – Coordenadas dos vértices referentes a cada triângulo, associados com a temperatura do seu respetivo triângulo.....   | 45 |
| Figura 4.18 – Malha STL de um cilindro.....  | 45 |
| Figura 4.19 – Remeshing da malha STL do cilindro (3 matic).....  | 46 |
| Figura 5.1 – Projeção do STL sobre diferentes posições da câmara.....  | 48 |
| Figura 5.2 – Remeshing da malha STL.....   | 49 |
| Figura 5.3 – Comparação da imagem termográfica com malhas STL distintas.....   | 49 |
| Figura 5.4 – Melhoramento da resolução espacial do sistema de medição para o bloco metálico.....   | 49 |
| Figura 5.5 – CAD do prisma em Solidworks.....  | 50 |
| Figura 5.6 – Peça com padrão de enchimento a 50% (esq.) e 99% (dir.) (Slic3r).....   | 50 |
| Figura 5.7 – Modelação virtual da peça a imprimir e aproximação do padrão de enchimento (Slic3r).....  | 51 |
| Figura 5.8 – Resultados experimentais (câmara em posições distintas em diferentes instantes).<br>.....   | 52 |
| Figura 5.9 – Imagem termográfica do prisma.....  | 52 |
| Figura 5.10 – Localização de pontos para efetuar a média de temperaturas.....  | 53 |
| Figura 5.11 – Temperatura atribuída aos triângulos em escala de cores.....   | 53 |
| Figura 5.12 – Malha reestruturada do STL do prisma (3 matic).....  | 54 |
| Figura 5.13 – Sobreposição da nova malha à imagem termográfica.....  | 55 |
| Figura 5.14 – Medição de temperatura em cada triângulo.....  | 55 |
| Figura 5.15 – CAD de conduta típica em aplicações aeroespaciais.....   | 56 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 5.16 – Resolução máxima e mínima do STL da conduta quando exportado em SolidWorks. ....   | 57 |
| Figura 5.17 – Remeshing da malha STL da conduta (Meshlab). ....  | 57 |
| Figura 5.18 – Imagem termográfica da conduta e sobreposição do objeto (STL) na imagem. ....  | 58 |
| Figura 5.19 – Malha com a distribuição das temperaturas. ....  | 58 |
| Figura 5.20 – Malha da conduta com secção de triângulos removidos (3 matic). ....  | 59 |
| Figura 6.1 – Estrutura do algoritmo de ensaios. ....   | 61 |
| Figura 6.2 – Termograma do bloco. ....   | 62 |
| Figura 6.3 – Localização dos triângulos selecionados para a medição de temperatura. ....   | 63 |
| Figura 6.4 – Evolução temporal da temperatura dos triângulos selecionados no bloco. ....   | 63 |
| Figura 6.5 – Termograma do prisma. ....  | 64 |
| Figura 6.6 – Localização dos triângulos selecionados para a medição de temperatura. ....   | 64 |
| Figura 6.7 – Evolução temporal da temperatura dos triângulos selecionados no prisma. ....  | 65 |
| Figura 6.8 – Localização dos triângulos selecionados para a medição de temperatura. ....   | 65 |
| Figura 6.9 – Evolução temporal da temperatura dos triângulos selecionados. ....  | 66 |
| Figura 6.10 – Diferença de superfícies com a representação aproximada dos triângulos utilizados (face lateral à esquerda e face de topo à direita). .... | 67 |
| Figura 6.11 – Evolução temporal da imagem termográfica do bloco. ....  | 67 |
| Figura 6.12 – Evolução temporal da temperatura dos triângulos selecionados. ....   | 68 |
| Figura 6.13 – Evolução temporal da imagem termográfica do bloco pintado. ....  | 69 |



## **Índice de tabelas**

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 – Propriedades mecânicas dos materiais que constituem os filamentos para a impressora Kühling & Kühling (adaptado de [2] )..... | 12 |
| Tabela 2 – Materiais utilizados para aplicação aeroespacial e respectivas propriedades (adaptado de [2]).....                            | 12 |
| Tabela 3 – Posicionamento da câmara e parâmetros de correção. ....   | 47 |



## 1 Introdução

### 1.1 Contextualização do projeto e motivação

Atualmente, a impressão tridimensional, para além de ser uma ferramenta de prototipagem rápida, permite fabricar peças que cumprem os requisitos funcionais para diversas aplicações de engenharia. A indústria aeroespacial é um exemplo onde esta tecnologia pode ser integrada com grande vantagem, particularmente no uso de materiais termoplásticos. Atualmente, fabricantes como a *Boeing*, *General Electric* e *NASA* utilizam a impressão tridimensional para o fabrico de peças em termoplásticos de alta performance como Polieterimida (ULTEM) ou Poliamida (Nylon) [1].

O presente trabalho nasce no seguimento de uma outra dissertação realizada no INEGI – Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, que visou a seleção de um sistema de medição de temperatura sem contato do filamento à saída do bico da cabeça extrusora de uma impressora tridimensional, na qual a solução escolhida foi a utilização de uma câmara termográfica [2]. Esta necessidade decorre da procura de incluir polímeros termoplásticos de elevado desempenho no processo de fabrico aditivo por deposição de material fundido, FDM, que necessitam de temperaturas de extrusão muito elevadas (em alguns casos, cerca de 400°C), uma vez que as temperaturas de fusão dos mesmos são também mais elevadas. Isto faz com que a temperatura do plástico extrudido e a temperatura de decomposição do material estejam em valores muito próximos o que obriga a um controlo de temperatura extremamente rigoroso de modo a evitar defeitos de origem térmica nas peças produzidas. Devido à ordem de grandeza das temperaturas do material, o uso destes termoplásticos está associado a uma maior dificuldade na adesão de camadas durante o processo de fabrico aditivo e é também mais suscetível a deformações estruturais durante o arrefecimento da peça.

O INEGI dispõe atualmente de uma impressora tridimensional, *3D FDM Kühling&Kühling RepRap* Industrial, que servirá como objeto de estudo para a introdução da câmara termográfica como instrumento de medição da temperatura da peça durante a sua impressão, disponibilizando feedback em tempo real a um sistema de controlo de temperatura que, por sua vez, aquece de forma diferencial a peça que está a ser produzida, com base na leitura da câmara.

Concretamente, o estudo e o trabalho desenvolvido nesta dissertação não estão apenas focados na impressora anteriormente referida, pois deverá ser introduzido num projeto corrente de desenvolvimento de uma impressora tridimensional de 5 eixos de fabrico aditivo híbrido, com o objetivo primário de serem impressas peças em termoplásticos de elevado desempenho (Projeto FIBR3D – Anexo A).

Apesar de o trabalho desenvolvido nesta dissertação estar contextualizado nas máquinas e tecnologias de fabrico aditivo atuais, assume-se que o estudo desenvolvido nesta dissertação é aplicável em outras tecnologias, como um transdutor de temperatura de elevada resolução espacial na medição de temperatura de superfícies de objetos de geometria conhecida.

## 1.2 Objetivos do projeto e metodologia

O objetivo principal da presente dissertação é o desenvolvimento de algoritmos e metodologias que visem integrar uma câmara termográfica como instrumento de medição de temperatura de alta resolução para peças produzidas por fabrico aditivo.

Para a conceção deste sistema de medição, é necessário desenvolver um método capaz de associar a informação obtida pela câmara com a geometria da peça impressa. Para tal, é necessário:

- Estudar a melhor forma de atribuir a temperatura lida pela câmara ao objeto;
- Adquirir a temperatura superficial da peça num ambiente computacional onde seja possível posteriormente associá-la com o objeto alvo de medição;
- Definir uma representação virtual da peça de modo a que esta apresente a mesma posição e orientação da peça real;
- Definir como exportar a informação da localização e do valor da temperatura na imagem para um ficheiro que contenha a informação geométrica da peça e a sua temperatura;
- Escrever os algoritmos de visão computacional e aquisição de temperatura;
- Testar, validar e refinar os algoritmos desenvolvidos.

Estes 6 pontos representam a sequência de passos intermédios que levam ao desenvolvimento do sistema de aquisição de temperatura pretendido.

### **1.3 Estrutura da dissertação**

Esta dissertação encontra-se dividida em 7 capítulos.

No primeiro capítulo foi realizada uma introdução que serve para contextualizar o tema e os objetivos do trabalho desenvolvido.

O segundo capítulo enquadra o tema em estudo, definindo detalhadamente o problema proposto, analisando a impressora tridimensional de teste, os materiais utilizados e as soluções de controlo e medição da temperatura. Ainda neste capítulo são referidas quais as estratégias e abordagens idealizadas para desenvolver as soluções necessárias.

Seguidamente, no terceiro capítulo, são apresentados os fundamentos teóricos que possibilitam a realização da medição de temperatura sem contacto, bem como as noções necessárias sobre visão artificial, transformação e manipulação geométrica sobre a representação computacional de objetos tridimensionais e processamento de imagem a utilizar no sistema de medição.

No quarto capítulo é feita a descrição detalhada do desenvolvimento da metodologia proposta assim como a exibição de ensaios exploratórios, explicitando como foram escritos os algoritmos que possibilitam a visão e associação da temperatura da peça à sua representação artificial.

No quinto capítulo são expostos exemplos de aplicação dos algoritmos desenvolvidos, com intuito de demonstrar e validar o seu funcionamento. É também realizada uma análise e discussão dos resultados obtidos, a fim de identificar pontos de melhoria e refinar os algoritmos desenvolvidos.

No sexto capítulo são realizadas aplicações práticas que ilustrem a utilidade dos algoritmos desenvolvidos, bem como a resolução da câmara na medição de temperatura. Para tal, é analisada e comentada a evolução de temperatura de peças ao longo do tempo.

Finalmente, o sétimo e último capítulo apresenta as conclusões e perspetivas de trabalhos futuros sobre a dissertação em causa e as eventuais novas possibilidades geradas a partir da investigação feita em diferentes aplicações de engenharia.



## 2 Enquadramento e definição do problema

### 2.1 Fabrico Aditivo

De forma a melhor enquadrar o propósito desta investigação, julga-se ser fundamental expor sucintamente o que é o fabrico aditivo e as suas aplicações atuais.

Fabrico aditivo, prototipagem rápida ou impressão tridimensional são todas designações válidas para descrever esta tecnologia.

O conceito base do fabrico aditivo é possibilitar a construção de peças geradas por *software* de modelação CAD, diretamente, sem a necessidade de planeamento do processo de fabrico. Processos de fabrico aditivo simplificam drasticamente o processo de produção de peças de geometria complexa a partir de um ficheiro CAD. Contrastando com processos de fabrico mais clássicos, onde há necessidade de uma análise minuciosa da geometria da peça a produzir para definir os tipos de ferramentas a utilizar e as características do processo, o fabrico aditivo permite produzir peças apenas com acesso à informação dimensional do objeto [3].

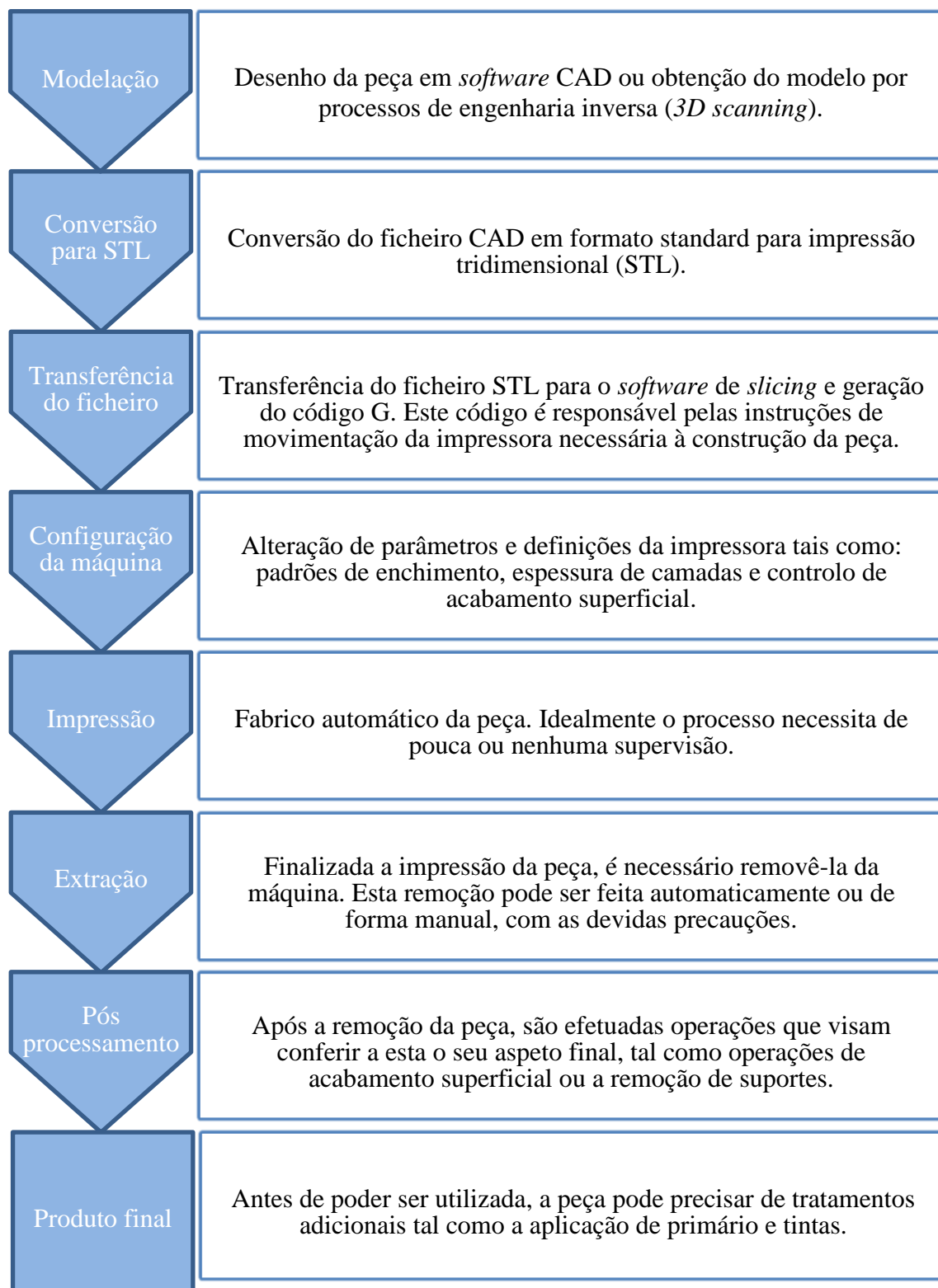
Atualmente o fabrico aditivo tem uma aplicabilidade muito abrangente e como tal está presente em vários setores:

- **Indústria:** indústria automóvel, aeroespacial, têxtil e indústria joalheira são vários exemplos de setores onde o fabrico aditivo está presente atualmente;
- **Medicina:** fabrico de próteses e cápsulas de medicamentos são exemplos de aplicações do uso de fabrico aditivo no setor da saúde;
- **Outros:** uso de impressoras tridimensionais em ambiente doméstico, para fins educativos ou para investigação científica são exemplos do uso de fabrico aditivo numa perspetiva mais multivariada.



Figura 2.1 – Calçado produzido com recurso a tecnologias de fabrico aditivo [4].

O processo de fabrico aditivo pode ser desconstruído em oito etapas [3]:



Os passos anteriores descrevem o processo genérico de fabrico aditivo. Note-se que, dentro daquilo que é esta tecnologia, existem vários tipos de impressão tridimensional e que cada um não só incorpora tecnologias e fenómenos físicos diferentes, como é destinado a operar com diferentes materiais, desde polímeros e compósitos a ligas metálicas. Tudo isto implica que alguns destes passos aqui expostos requeiram cuidados adicionais ou variações.

Os processos de fabrico aditivo baseiam-se na forma como a matéria-prima é processada e podem ser divididos em [3]:

- Sistemas de foto-polimerização;
- Sistemas baseados em processamento de pó;
- **Sistemas de processamento com material fundido;**
- Processos de laminagem.

Na presente dissertação é do mais relevante interesse focar os sistemas que processam material fundido, pois estes englobam a tecnologia FDM – *Fused Deposition Modelling* que será abordada de forma mais detalhada posteriormente.

## 2.2 Definição do problema

Apesar do crescente desenvolvimento da impressão tridimensional nos dias de hoje, existe ainda alguma dificuldade em produzir peças sem defeitos devido a diferentes fatores.

Nesta dissertação, é abordada a temática de defeitos de origem térmica em processos de fabrico aditivo por extrusão de material. Estes tornam-se mais proeminentes quando se pretende adicionar materiais que fogem do espectro dos plásticos utilizados correntemente em fabrico aditivo.

Tipicamente os defeitos de origem térmica podem ser divididos em duas categorias. A primeira trata-se da dificuldade de adesão entre camadas. Para que exista uma adesão total entre camadas de material depositado é necessário que estas se encontrem a uma temperatura superior à temperatura de transição vítrea do material. Termoplásticos com um elevado ponto de transição vítrea, requerem uma maior temperatura de extrusão. Nestas situações existe um risco acrescido de falha na aderência entre camadas uma vez que, aquando a deposição do material, a camada anteriormente depositada já arrefeceu ao ponto da próxima camada não ser capaz de aderir. Este problema é predominante no uso de filamentos de polímeros com temperaturas de fusão elevadas.

Na Figura 2.2 pode-se visualizar um caso onde a deposição de ABS sobre o tabuleiro da impressora tridimensional não aderiu totalmente devido à diferença de temperaturas do filamento e da superfície do tabuleiro, levando ao desfasamento no alinhamento das fibras de material e conferido assim o aspeto rugoso que se observa.



Figura 2.2 – Defeitos na primeira camada depositada numa peça em ABS (impressa na máquina de impressão tridimensional disponível).

Na Figura 2.3 pode-se visualizar claramente uma falha na adesão entre as camadas de material, devido ao arrefecimento da camada anterior. A peça, apesar de ter uma geometria simples, evidencia uma aderência muito débil entre camadas.

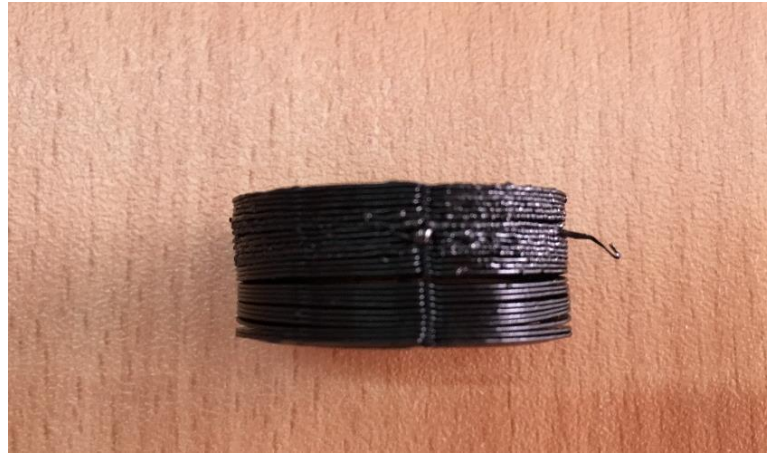


Figura 2.3 – Defeitos de adesão entre camadas numa peça em ULTEM (impressa na máquina de impressão tridimensional disponível).

Esta situação é de particular interesse, pois a peça em questão é feita de ULTEM, que é um dos termoplásticos de elevado desempenho que se pretende introduzir nos processos de fabrico aditivo FDM. Esta problemática será abordada em maior detalhe na secção 2.3.1.

Na Figura 2.4 observa-se uma deformação causada pelo problema de contração de uma região da peça devido ao arrefecimento. Inicialmente, e durante o processo de extrusão, o material dilata pouco significativamente e, conforme arrefece, contrai. Se esta contração ocorrer em demasia, leva a que a impressão se deforme. Na figura, a contração foi tal que fez com que a peça dobrasse e parcialmente se separasse do tabuleiro. Este fenómeno verifica-se mais predominantemente na impressão de peças em materiais com alto ponto de fusão e em impressões de tempo prolongado.



Figura 2.4 – Deformação de origem térmica de peça em ABS [5].

A solução proposta para a correção dos defeitos anteriormente mencionados, é o desenvolvimento de um sistema de aquecimento e de gestão de temperatura de peças com grande resolução, que permita aquecer localmente e de forma diferencial a peça durante o seu processo de impressão.

Para isso, é preciso desenvolver um sistema de aquisição fino de temperaturas da peça impressa, trabalho esse que se propõe realizar na presente dissertação. Perspetiva-se também que a investigação realizada neste trabalho não se encontre limitada a um processo de fabrico aditivo em particular, podendo ser facilmente adaptada a outras tecnologias onde exista a necessidade de medição de temperatura com elevada resolução, sem contacto, de objetos.

Naturalmente, e conforme já previamente estudado, é obrigatório que a medição de temperatura e o respetivo aquecimento destas peças seja realizado sem contacto, uma vez que, evidentemente, qualquer contacto entre estes sistemas e a deposição do material poderia comprometer a integridade da peça. De entre as alternativas disponíveis, foi selecionada uma câmara termográfica como instrumento de medição [2].

## 2.3 Tecnologia FDM

### 2.3.1 Descrição do processo

Desenvolvido e produzido pela *Stratasys*®, USA a tecnologia *Fused Deposition Modelling* (FDM) é o processo mais comum de extrusão de material em fabrico aditivo. A maior vantagem deste processo é a vasta gama de materiais com o qual se podem fabricar peças e a consequente variedade de propriedades mecânicas desejáveis atingidas. O processo FDM é descrito como relativamente lento, devido à inércia da cabeça de extrusão e dos componentes móveis associados limitar a velocidade de deposição, e pela forma como o material é depositado, uma vez que este segue padrões que requerem muitas mudanças de direção.

De uma forma sintética, o processo consiste em forçar a passagem de um filamento polimérico através de uma câmara onde este é aquecido para além da sua temperatura de fusão e posteriormente expelido por um orifício de diâmetro constante [3].

Tal como os restantes processos de extrusão de material em fabrico aditivo, o processo FDM segue a seguinte cadeia de funcionamento:

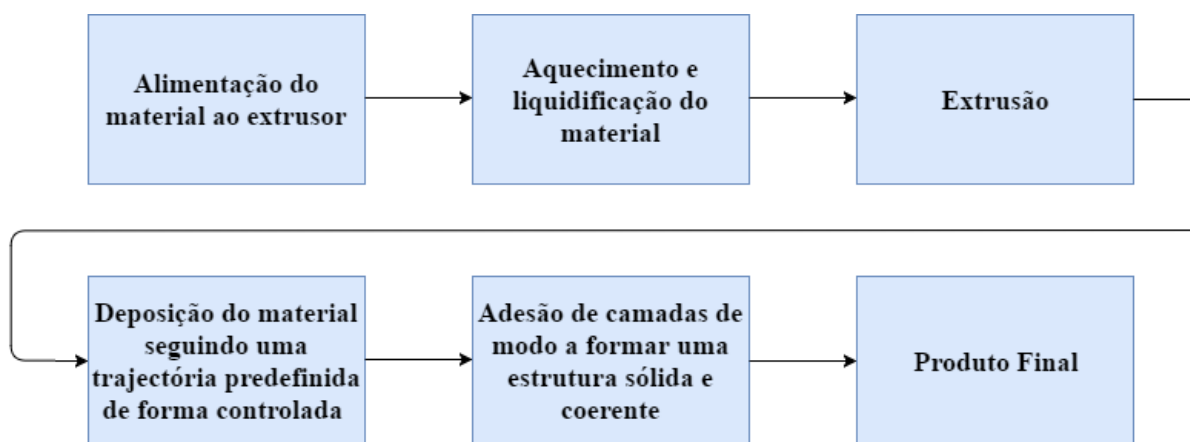


Figura 2.5 – Sequência de funcionamento em fabrico aditivo por extrusão.

A adesão entre duas camadas de material acontece quando existe energia térmica residual suficientemente capaz de ativar as duas superfícies adjacentes, provocando a sua adesão. Se a energia não for suficientemente elevada, as duas camadas podem aderir, mas com uma fronteira visível entre elas, provocando um defeito visível na peça produzida e que resulta numa zona crítica de rotura. Alternativamente, demasiada energia residual no material a ser depositado, resulta num escoamento do material em torno da camada sobre a qual este está a ser depositado, gerando socalcos sobre a mesma. Ambos os problemas de adesão podem ser visualizados na peça exposta na Figura 2.3.

### 2.3.2 Máquina de impressão tridimensional

O sistema de medição em desenvolvimento na presente dissertação tem como objeto de estudo peças produzidas pela impressora tridimensional, *Fused Filament Fabrication (FFF)* presente no INEGI: *Kühling&Kühling HT500*. Inserida no seguimento do projeto *open source RepRap*, adota um perfil de configurações em código aberto, fazendo com que a máquina seja indicada para trabalhos de investigação e desenvolvimento.



Figura 2.6 – Impressora tridimensional Kühling & Kühling [6].

Esta impressora está projetada para temperaturas de extrusão até 500°C, com uma temperatura interior ambiente de 70°C e um tabuleiro aquecido até 130°C. Estas características fazem com que a máquina seja perfeitamente adequada para operar com a gama de termoplásticos mais convencionais.

A impressora emprega a tecnologia *FFF – Fused Filament Fabrication* para a construção de objetos. O filamento de material (plástico) é introduzido continuamente por intermédio de um sistema de engrenagens de aperto binário que transporta o filamento de forma controlada até à cabeça extrusora, onde é aquecido até à temperatura de fusão e finalmente depositado pelo bico do extrusor.

No decorrer deste trabalho são descritos os processos *FDM* e *FFF*, no entanto, estes termos são designações diferentes para o mesmo processo. O termo *FFF* é a designação do projeto *open source RepRap* e surge como uma alternativa ao termo *FDM* uma vez que este último foi patenteado pela *Stratasys*®.

A impressão usando a máquina mencionada, é feita a partir da deposição sequencial de camadas com espessuras compreendidas entre 0,1 e 0,6 milímetros.

A cabeça extrusora move-se horizontalmente para se deslocar até à posição de deposição do material. Após cada deposição, o tabuleiro desce verticalmente de acordo com a espessura da camada depositada e uma nova camada é depositada.

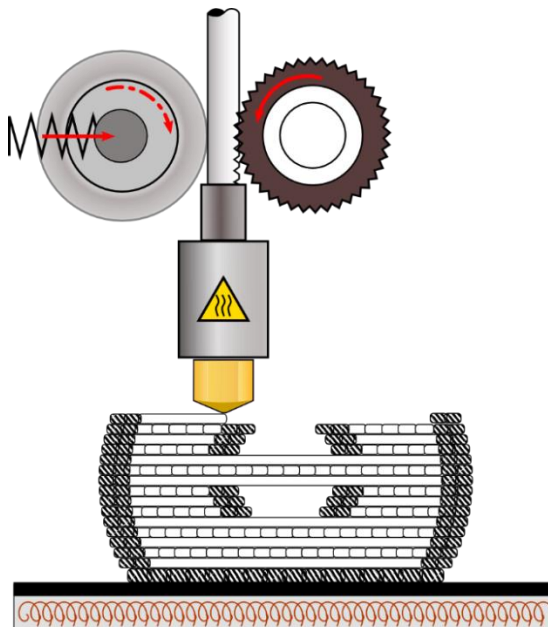


Figura 2.7 – Ilustração da deposição de camadas no processo *FFF* [6].

Os comandos de movimento da impressora são fornecidos em código G. Este ficheiro é gerado por um software de *slicing* e nele está toda a informação referente à impressão; é transferido para a impressora por uma interface em rede. O *software* de *slicing* usado na impressora tridimensional é o *Slic3r* [7].

O *Slic3r* é uma ferramenta disponível em código aberto que a partir de um ficheiro STL gera a lista de instruções necessárias para a impressão tridimensional. Divide o modelo 3D em camadas horizontais (*slices*), gera o percurso da ferramenta e calcula a quantidade de material a ser extrudido.

Não esquecendo o objetivo último de introduzir a câmara no processo de fabrico aditivo, é necessário analisar em detalhe as limitações geométricas da impressora em causa e fazer as devidas considerações sobre a influência dos elementos que a constituem. Esta e outras considerações são feitas na secção 2.4.

### 2.3.3 Materiais correntes e utilização de termoplásticos de elevado desempenho

Atualmente, a impressora opera com os filamentos de polímeros correntes utilizados na tecnologia *FFF*. No manual da impressora [6] são referidos como materiais de trabalho os seguintes termoplásticos: ABS; HIPS; Poliamida (PA, Nylon); Policarbonato; PET; PVA; Elastómeros Termoplásticos (TPE) e PLA. Na Tabela 1 podem-se observar as propriedades mecânicas desses materiais.

Tal como anteriormente referido, o controlo da temperatura das peças por recurso a uma câmara termográfica justifica-se pela intenção de introduzir termoplásticos de elevado desempenho no fabrico aditivo. Na Tabela 2, podem-se observar as propriedades mecânicas de alguns desses materiais.

Tabela 1 – Propriedades mecânicas dos materiais que constituem os filamentos para a impressora Kühling & Kühling (adaptado de [2] )

|             | Designação                       | Temp. de fusão | Temp. de extrusão | Temp. de decomposição | Densidade ( $Kg. m^{-3}$ ) | Dureza (Shore D) | Módulo de Young (GPa) | Tensão de Cedência / Rotura máxima (MPa) |
|-------------|----------------------------------|----------------|-------------------|-----------------------|----------------------------|------------------|-----------------------|--|
| <b>ABS</b>  | Acrilonitrila butadieno estireno | 230°C          | 265°C             | 350°C                 | [1,02 ; 1,20]              | [67 ; 80]        | [2,1 ; 2,4]           | 50 / 55                                  |
| <b>HIPS</b> | Poliestereno de alto impacto     | 220°C          | 230°C             | 340°C                 | 1,04                       | 95               | 1,9                   | 25 / 60                                  |
| <b>PA 6</b> | Poliamida (Nylon 6)              | 220°C          | 260°C             | 350°C                 | [1,03 ; 1,29]              | [76 ; 83]        | [0,35 ; 3,5]          | 40 / 80                                  |
| <b>PC</b>   | Policarbonato                    | 260°C          | 275°C             | 390°C                 | [1,19 ; 1,26]              | [79 ; 80]        | [1,79 ; 3,24]         | 70 / 74                                  |
| <b>PET</b>  | Poliétileno Tereftalato          | 260°C          | 270°C             | 380°C                 | [1,16 ; 1,40]              | [73 ; 75]        | [1,16 ; 4,15]         | 70 / 80                                  |
| <b>PVA</b>  | Acetato de polivinilino          | 200°C          | 215°C             | 290°C                 | 1,19                       | [58 ; 80]        | [2,0 ; 3,0]           | 45 / 65                                  |
| <b>TPE</b>  | Elastómero termoplástico         | 225°C          | 260°C             | 420°C                 | [0,85 ; 1,82]              | [11 ; 55]        | [0,01 ; 2,10]         | 12 / 69                                  |
| <b>PLA</b>  | Ácido polilático                 | 180°C          | 220°C             | 300°C                 | [1,00 ; 2,47]              | [59 ; 77]        | [0,23 ; 3,5]          | 66 / 114                                 |

Tabela 2 – Materiais utilizados para aplicação aeroespacial e respetivas propriedades (adaptado de [2])

|              | Designação                 | Temp. de fusão | Temp. de extrusão | Temp. de decomposição | Densidade ( $Kg. m^{-3}$ ) | Dureza (Shore D) | Módulo de Young (GPa) | Tensão de Cedência / Rotura máxima (MPa) |
|--------------|----------------------------|----------------|-------------------|-----------------------|----------------------------|------------------|-----------------------|--|
| <b>PEEK</b>  | Poliéter éter cetona       | 343°C          | 395°C             | 400°C                 | [1,30 ; 1,48]              | 84,5             | [3,0 ; 9,5]           | 95 / 213                                 |
| <b>PEI</b>   | Polieterimida (ULTEM)      | 350°C          | 380°C             | 420°C                 | [1,27 ; 1,51]              | 79,5             | [3,2 ; 9,5]           | 105 / 164                                |
| <b>PI</b>    | Políimida                  | 360°C          | 395°C             | 400°C                 | [1,35 ; 1,51]              | 89               | [4,0 ; 22,6]          | 86,2 / 164                               |
| <b>PAI</b>   | Poliamida-imida            | 370°C          | 371°C             | 410°C                 | [1,42 ; 1,61]              | [86 ; 90]        | [4,5 ; 14,5]          | 120 / 221                                |
| <b>PPS</b>   | Polissulfeto de p-fenileno | 280°C          | 340°C             | 370°C                 | [1,40 ; 1,51]              | 86               | [3,7 ; 14]            | 105 / 185                                |
| <b>PPSU</b>  | Polifenilsulfona           | 365°C          | 380°C             | 400°C                 | 1,29                       | 84               | 2,34                  | 70 / 121                                 |
| <b>PPP</b>   | Poli-(para-fenileno)       | 346°C          | 350°C             | 400°C                 | 1,21                       | 23               | 8,3                   | 207                                      |
| <b>PA 66</b> | Poliamida (Nylon 66)       | 260°C          | 295°C             | 300°C                 | 1,14                       | 83               | 3,1                   | 80 / 116                                 |

A implementação destes termoplásticos tem como objetivo obter peças com melhores propriedades mecânicas, vocacionados para aplicações e indústrias mais exigentes. Com base na análise das tabelas 1 e 2, comprova-se que existe uma melhoria significativa nas propriedades mecânicas dos termoplásticos de elevado desempenho em relação aos materiais correntes.

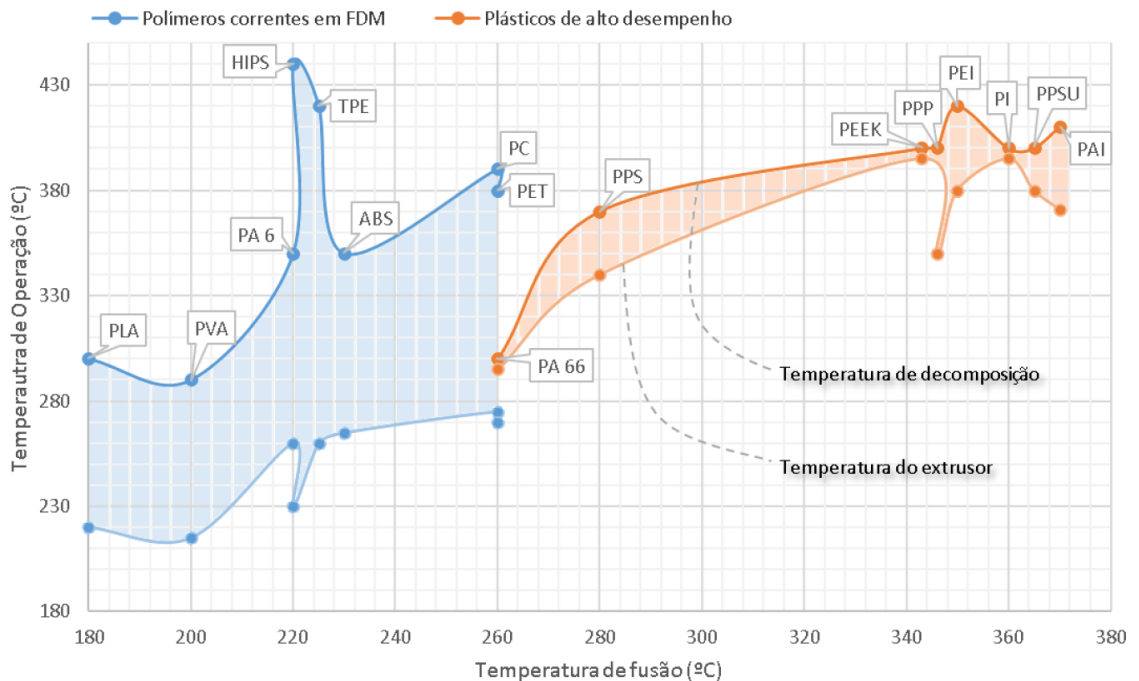


Figura 2.8 – Relação entre a temperatura de fusão de plásticos para extrusão e a respetiva gama de temperaturas de operação [2].

A Figura 2.8, ilustra de forma bastante elucidativa o problema associado à introdução dos termoplásticos de elevado desempenho. Como se pode observar, no caso destes materiais, o intervalo entre a temperatura de extrusão do polímero e da sua degradação é extremamente reduzido. Há um conjunto de fatores que devem ser considerados para melhor compreender a situação em causa, tais como:

- A temperatura de extrusão do material é sempre superior à temperatura de fusão, de modo a garantir o estado completamente líquido do filamento;
- A temperatura de extrusão do material é ligeiramente inferior à temperatura do próprio extrusor. Isto acontece para assegurar o fluxo de energia transferida sob a forma de calor por condução ao filamento e pelo facto de existir arrefecimento do filamento quando este entra em contacto com a temperatura ambiente. Uma vez mais, este fator é mais predominante em termoplásticos de elevado desempenho, uma vez que, temperaturas elevadas envolvem maiores quantidades de energia.

Os fatores aqui descritos contribuem decisivamente para o estreitamento do intervalo entre a temperatura de operação e a temperatura de decomposição do material.

## 2.4 Considerações sobre o sistema de medição e de controlo de temperatura com feedback introduzido por imagem

Tradicionalmente, o uso de câmaras termográficas em aplicações de engenharia, destina-se à inspeção contínua de peças na indústria, particularmente em aplicações de sobreaquecimento de equipamentos elétricos, podendo, no entanto, ser utilizada em aplicações de maior grau de complexidade e com exigências mais específicas como a visualização de campos magnéticos [8].

Em automação, as aplicações da termografia geralmente inserem-se no controlo de processos, deteção e prevenção de incêndios e monitorização de temperaturas [9].



Figura 2.9 – Imagem termográfica de uma conduta industrial [10].

Quando se considera uma câmara termográfica como instrumento de monitorização de temperatura, há uma série de variáveis base a considerar tais como: a profundidade de campo; o campo de visão (*FOV – Field of View*); as distâncias entre a lente e o objeto alvo mais próximo; a resolução de medição de temperatura<sup>1</sup>; o nível mínimo de energia que a câmara consegue medir e a gama de comprimentos de onda a que a câmara é sensível [11].

Apesar de no presente trabalho não estar previsto o desenvolvimento de qualquer sistema de controlo, não deverá ser descurado o objetivo final de implementar um sistema de medição de temperatura sem contacto como elemento de feedback em tempo-real para o sistema de controlo de temperatura da peça impressa.

Dependendo da geometria mais ou menos complexa da peça a imprimir, a monitorização de toda a superfície da peça torna-se fulcral devido à existência de um gradiente de temperaturas que pode originar a contração térmica de uma forma não uniforme na estrutura da peça (defeito evidenciado na Figura 2.4).

Neste caso, levanta-se a questão da necessidade de ação de controlo, uma vez que, para um material conhecido, um aquecimento contínuo, independente do feedback da câmara, que mantenha o polímero já depositado a uma temperatura constante, poderá ser suficiente para colmatar esse defeito.

---

<sup>1</sup> Quando se refere à resolução de uma câmara termográfica, existem a resolução espacial e a resolução na medição do valor de temperatura. O significado destes termos é abordado em detalhe no decorrer deste trabalho.

A conceção de um sistema de controlo de temperatura para a impressora tridimensional é um processo que naturalmente se espera ser iterativo, tanto na fase mais técnica no que diz respeito às calibrações para obter valores corretos na medição de temperatura de distintos termoplásticos, como também a experimentação de diferentes posições da câmara em relação à peça (estudo de parâmetros extrínsecos na calibração geométrica da câmara).

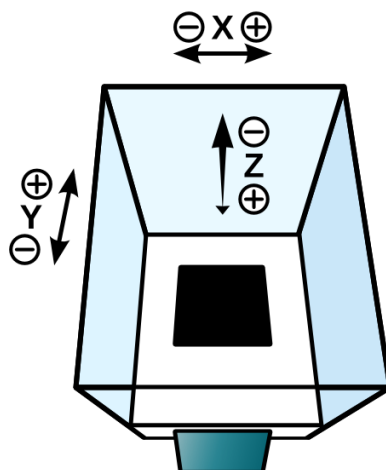


Figura 2.10 – Arquitetura espacial da máquina [6].

Assumindo a inspeção contínua da temperatura da superfície da peça a partir de uma imagem termográfica é necessário estudar uma arquitetura com que seja possível quantificar a radiação emitida por toda a superfície.

Atualmente, existe uma câmara termográfica no INEGI alocada à aplicação em causa. Isto significa que a medição de temperatura de toda a superfície perimétrica está à partida impossibilitada, uma vez que é obtida uma imagem bidimensional que representa o objeto numa determinada perspetiva. Para solucionar este problema, sugere-se um sistema mecânico que movimente a câmara termográfica em redor da peça ou uma solução de visão *stereo* que incorpore mais câmaras a funcionar em simultâneo para obter dados da totalidade da superfície da peça. Note-se que um sistema desta natureza aumenta consideravelmente a complexidade da aquisição e tratamento de dados.

Com o uso de uma câmara, uma primeira sugestão seria acoplar esta solidariamente com o movimento da cabeça extrusora ou com o movimento vertical do tabuleiro. Ambas estas opções devem ter em conta os impactos inerciais que causariam nos sistemas de movimento da máquina.

Existem ainda mais limitações que se devem ter em conta no sistema de medição e controlo. Por exemplo, a temperatura ambiente da impressora é um fator impeditivo para colocar a máquina termográfica sem qualquer sistema de arrefecimento no interior da impressora, uma vez que, a temperatura de funcionamento desta não deve exceder os 50°C [11]. Mais ainda, a leitura de temperatura pela câmara termográfica não pode ser feita no exterior da impressora, uma vez que as paredes acrílicas da *Kühling&Kühling* são opacas à radiação emitida pela fonte de calor no seu interior.

Com esta exposição de problemas quer-se concluir que a instalação de um sistema de medição sem contato como a câmara termográfica em questão é muito dependente da arquitetura da impressora, assim como dos elementos que lhe estão associados.

## 2.5 Soluções a desenvolver

A premissa base sobre a qual foi realizada toda a investigação desenvolvida neste projeto, é o aproveitamento do ficheiro STL que descreve a peça, conferindo-lhe a informação da sua temperatura superficial. Assim, é fundamental desenvolver um método que efetue a ligação do STL à imagem termográfica.

Mais concretamente, com o intuito final de utilizar a câmara termográfica como um elemento de feedback para o controlo de temperatura, é fundamental que se consiga estabelecer uma ligação entre a informação contida na imagem termográfica e a verdadeira localização da temperatura no objeto alvo de medida. De modo a conseguir a referida ligação, a proposta da presente dissertação é mapear sobre a imagem termográfica de um dado objeto, o seu modelo STL. Desta forma, se a resolução do modelo STL da peça for suficientemente elevada, o objetivo será associar diferentes triângulos da malha descritiva do sólido a diferentes secções da imagem termográfica, obtendo assim o gradiente de temperatura da peça em forma numérica e fazendo com que se origine um novo ficheiro STL com informação relativa à temperatura real do objeto.

Para a elaboração deste projeto, é necessário recorrer a ferramentas de cálculo e visão computacional que permitam resolver adequadamente o problema proposto, sendo que, para tal, foi selecionado o *Matlab*.

O *Matlab* é uma plataforma otimizada para a resolução de problemas científicos e de engenharia. Utiliza uma linguagem onde os elementos básicos de informação são matrizes. É capaz de implementar algoritmos de elevada complexidade, criar interfaces gráficas e de interagir com programas provenientes de outras linguagens de programação.

Para obter o referido mapeamento do ficheiro STL sobre a imagem termográfica, existem várias etapas a percorrer, idealmente de forma sequencial, que aqui se expõem:

1. Estudar o funcionamento da câmara termográfica e da termografia em geral, de modo a melhor compreender que operações de processamento de imagem podem vir a ser necessárias para a extração da temperatura da imagem;
2. Compreender o formato STL, entendendo as suas vantagens e limitações para estudar como este pode vir a ser utilizado e moldado para a aplicação a desenvolver;
3. Estudar as questões associadas à visão artificial e calibração da câmara que permitirão desenvolver os algoritmos necessários à ligação da peça com a imagem;
4. Testar a validade dos algoritmos desenvolvidos e as suas limitações, em peças impressas pela máquina de fabrico aditivo referente do projeto.

### 3 Fundamentos Teóricos

#### 3.1 Termografia

A luz visível está limitada a um intervalo muito reduzido do espectro eletromagnético. A energia térmica está presente num comprimento de onda muito mais alargado, o que faz com que não seja visível pelo olho humano.

A termografia é a leitura de imagens térmicas que normalmente não estariam visíveis, e que deste modo permitem expandir drasticamente o espectro em que o ser humano consegue observar radiação. A termografia assenta no princípio de que qualquer objeto que esteja a uma temperatura acima do zero absoluto, emite calor por radiação. Num contexto de engenharia, estas imagens permitem ver, e, mais importante, medir, a temperatura ou a energia térmica emitida por um objeto.

O espectro eletromagnético é dividido arbitrariamente em secções de diferentes comprimentos de onda. A termografia analisa a zona correspondente aos infravermelhos. A secção dos infravermelhos pode ser novamente dividida em 4 subsecções consoante diferentes intervalos de comprimento de onda: [0,75;3  $\mu\text{m}$ ]; [3;6  $\mu\text{m}$ ]; [6;15  $\mu\text{m}$ ]; [15;100  $\mu\text{m}$ ].

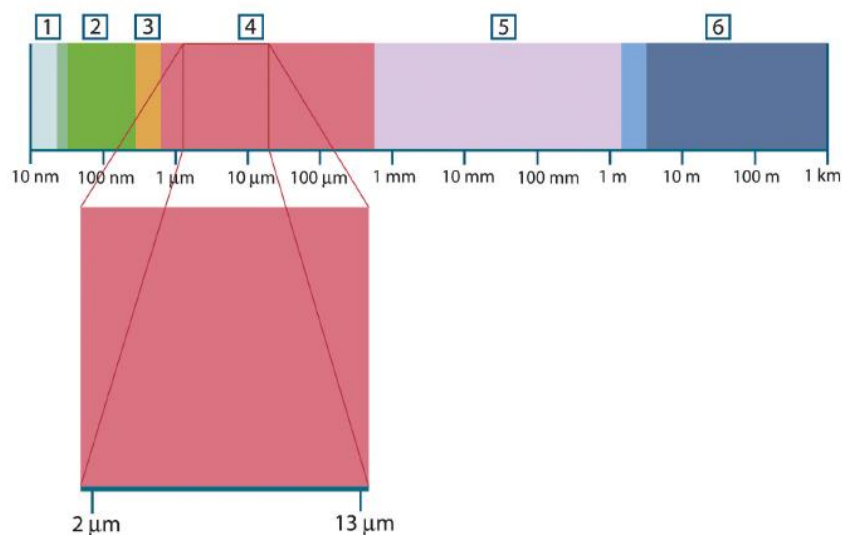


Figura 3.1 – Espectro Eletromagnético: 1- Raios X; 2- UV; 3- Visível; 4- Infravermelhos; 5- Micro-ondas; 6- Ondas rádio [11].

##### 3.1.1 Conceitos e terminologia

Quando um fluxo de radiação incide sobre uma superfície ou atravessa um meio, ocorrem três processos: transmissão, absorção e reflexão.

**Transmissividade** - Transmissão é o termo usado para descrever o processo onde o fluxo de radiação incidente numa superfície ou meio sai por um lado, geralmente o oposto, que não o que está a ter radiação incidida sobre si. A transmissividade espectral de um dado meio é dada por  $\tau_\lambda$  e é o quociente entre o fluxo espectral transmitido e o fluxo espectral incidente.

**Absorsividade** – Absorção é o processo onde o fluxo de radiação incidente é convertido numa outra forma de energia, geralmente calor. A absorvidade é uma fração do fluxo incidente que é absorvida e é uma característica de um elemento que pode ser definida como o quociente da radiação absorvida pela radiação incidente. É representada por  $\alpha$ .

**Emissividade** – É o quociente entre o poder emissivo de um objeto ou de uma superfície com o poder emissivo de um corpo negro para uma dada temperatura. A emissividade é um termo adimensional e pode tomar qualquer valor entre 0 e 1 para corpos radiantes em equilíbrio térmico. A emissividade é representada por  $\epsilon$  [8], [12].

### 3.1.2 Radiação do corpo negro

Qualquer corpo a uma temperatura superior ao zero absoluto emite radiação, em todas as direções, sobre diferentes comprimentos de onda. Analisando um dado comprimento de onda, a quantidade de radiação emitida é função do material do corpo, do tipo e da temperatura da sua superfície. A partir desse princípio, é de interesse definir um padrão que traduza a máxima radiação que pode ser emitida por uma superfície de um corpo a uma dada temperatura. Esse padrão é denominado como corpo negro e é definido como um perfeito emissor e recetor de radiação independentemente da direção – difuso.

A radiação emitida pelo corpo negro é definida pela equação Stefan-Boltzmann (equação 3.1) onde  $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$  é a constante Stefan-Boltzmann,  $T$  é a temperatura absoluta da superfície do corpo em  $K$  e  $E_b$  é o poder emissivo do corpo negro.

$$E_b(T) = \sigma T^4 \quad (W/m^2) \quad (3.1)$$

Em teoria, a construção experimental de um corpo negro é simples. As características da radiação emitida por um orifício de uma cavidade isotérmica construída num material opaco são idênticas às de uma emissão ideal (máxima). Experimentalmente, a construção de um corpo negro consiste na criação de um bloco oco em contacto com a superfície a partir de uma abertura de área reduzida. Quando submetido a uma fonte de energia térmica, qualquer radiação que entra no interior da cavidade é refletida repetidamente nas suas paredes pelo que apenas uma porção infinitesimal da radiação interna “escapa” pelo orifício do corpo.

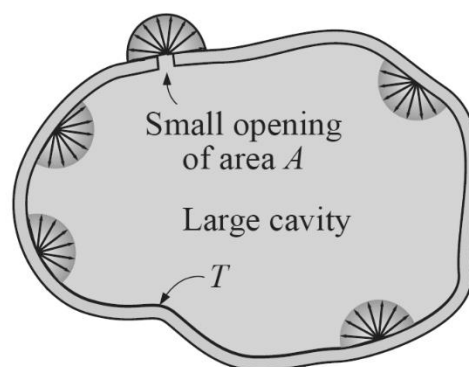


Figura 3.2 – Cavidade isotérmica a uma temperatura  $T$  com uma pequena abertura de área  $A$  [13].

Deste modo, medindo temperatura localizada no orifício é possível obter experimentalmente o valor da radiação do corpo negro. Esta experiência torna-se particularmente relevante na calibração de instrumentos de medição termográficos, tal como a câmara termográfica visada no presente projeto, como bloco padrão de referência.

A equação 3.1 apresenta o poder emissivo total do corpo negro, ou seja, a soma do poder emissivo sobre todos os comprimentos de onda.

Se for necessário obter a quantidade de radiação emitida por um corpo negro a uma dada temperatura absoluta por unidade de tempo, unidade de área e para um dado comprimento de onda  $\lambda$  é necessário obter o poder emissivo espectral  $E_{b\lambda}$ , que pode ser calculado a partir da lei de *Planck* (equação 3.2). O termo espectral indica dependência do comprimento de onda.

$$E_{b\lambda}(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1)} \quad (W/m^2 \cdot \mu m) \quad (3.2)$$

onde:

$$C_1 = 2\pi hc^2 = 3.472 \times 10^8 W \cdot \frac{\mu m^4}{m^2}$$

$$C_2 = \frac{hc}{k} = 1.439 \times 10^4 \mu m \cdot K$$

e onde  $h$  é a constante de *Planck*  $6.6 \times 10^{-34} J \cdot s$ ,  $k$  é a constante de *Boltzmann*  $1.4 \times 10^{-23} JK^{-1}$  e  $c$  é a velocidade da luz  $3 \times 10^8 m \cdot s^{-1}$ .

Representada graficamente, a lei de *Planck* apresenta uma família de curvas para diferentes temperaturas. Observando cada uma dessas curvas, na Figura 3.3, verifica-se que a emissão espectral é zero para um comprimento de onda nulo, crescendo rapidamente até a um dado valor máximo, apresentados a um comprimento de onda,  $\lambda_{m\acute{a}x}$ , e aproximando-se novamente de zero a comprimentos de onda muito maiores.

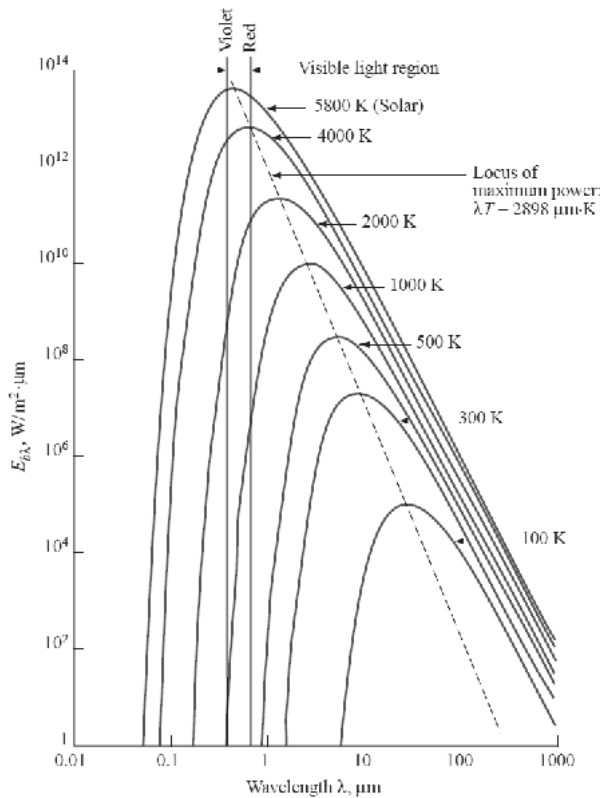


Figura 3.3 – Variação do poder emissivo espectral do corpo negro a várias temperaturas [13].

À medida que a temperatura aumenta, verifica-se que o pico da curva de temperatura move-se para a zona de comprimentos de onda menores.

$$(\lambda T)_{m\acute{a}x} = \frac{C_2}{5} \frac{1}{1 - e^{-C_2/(\lambda T)_{m\acute{a}x}}} = 2898 \mu m \cdot K \quad (3.3)$$

O comprimento de onda onde esse pico ocorre para uma dada temperatura é dado pela Lei de Deslocamento de Wien (equação 3.3) [13].

### 3.1.3 Emissores não ideais (não negros)

Apesar de ser necessário compreender o funcionamento de um corpo negro (ideal), é preciso aludir que na realidade os corpos não se comportam de acordo com as leis referidas sobre uma vasta gama de comprimentos de onda. Ainda que possam ter o comportamento de um corpo negro em certos intervalos espectrais. Tal como já referido, o facto de objetos reais não se comportarem como um corpo negro resulta de três processos distintos: uma parte da radiação incidente é absorvida  $\alpha$ , outra parte é refletida  $\rho$  e outra é transmitida  $\tau$ . Uma vez que estes três parâmetros são dependentes do comprimento de onda, surgem normalmente representados com  $\lambda$ :  $\alpha_\lambda$  – absorvidade espectral;  $\rho_\lambda$  – refletividade espectral e  $\tau_\lambda$  – transmissividade espectral. Estes parâmetros correspondem aos coeficientes entre a potência incidente e a absorção, reflexão e transmissão da radiação, respetivamente. Naturalmente que a soma entre de estes três termos para um dado comprimento de onda, tem de seguir a relação:

$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda + \tau_\lambda = 1 \quad (3.4)$$

e uma vez que em superfícies opacas  $\tau = 0$ , pode-se resolver a expressão anterior como:

$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda = 1 \quad (3.5)$$

A lei de *Kirchoff* diz que a emissividade total hemisférica de uma dada superfície a uma temperatura  $T$  é igual à sua absorvidade hemisférica total para uma radiação proveniente de um corpo negro à mesma temperatura.

$$\epsilon(T) = \alpha(T) \quad (3.6)$$

A mesma relação é verdadeira para um comprimento de onda específico, sendo que se pode obter a mesma equação sob a forma espectral.

$$\epsilon_\lambda(T) = \alpha_\lambda(T) \quad (3.7)$$

De acordo com a lei de *Kirchoff* podemos reescrever a equação 3.5 como:

$$\epsilon_\lambda + \rho_\lambda = 1 \quad (3.8)$$

De uma forma geral, existem três fontes de radiação, distinguidas apenas pela forma como a emissividade espectral varia com o comprimento de onda. Um corpo negro onde  $\epsilon_\lambda = \epsilon = 1$ , um corpo cinzento  $\epsilon_\lambda = \epsilon = const. < 1$  e um corpo radiante seletivo, onde  $\epsilon$  varia com o comprimento de onda.

Para um radiante de corpo cinzento, pode-se reescrever a expressão de *Stefan-Boltzmann* como:

$$W = \epsilon\sigma T^4 \text{ [Watt/m}^2\text{]} \quad (3.9)$$

Fica então estabelecido que o poder emissivo total,  $W$ , de um dado corpo cinzento é o mesmo de um de um corpo negro à mesma temperatura reduzido proporcionalmente pelo valor da emissividade  $\epsilon$ .

### 3.1.4 Materiais semitransparentes

Considerando um corpo não metálico e semitransparente (ex. placa não metálica) – quando a placa é aquecida, a radiação gerada no seu núcleo é conduzida até à superfície onde parte desta é absorvida, outra parte é novamente refletida para o interior e outra parte atinge a superfície exterior sendo praticamente toda emitida. Estas sucessivas emissões refletidas tornam-se progressivamente menos intensas, mas a totalidade das mesmas é somada para obter a emissividade total da placa. Realizada esta soma, a emissividade efetiva da placa semitransparente pode ser expressa como:

$$\epsilon_{\lambda} = \frac{(1 - \rho_{\lambda})(1 - \tau_{\lambda})}{1 - \rho_{\lambda}\tau_{\lambda}} \quad (3.10)$$

## 3.2 Câmara termográfica

### 3.2.1 FLIR Ax5

A câmara selecionada para a aplicação, e na qual todo o trabalho desta dissertação é baseado, é uma FLIR Ax5 *series*, modelo A65  $f=25\text{ mm}$  (distância focal).



Figura 3.4 – Câmara termográfica em uso, FLIR A65.

Trata-se de uma câmara com uma resolução de 640x512 pixéis, uma gama espectral de 7,5 a 13  $\mu\text{m}$  e uma resolução na medição de temperatura de 0,05 °C. A ficha técnica da câmara pode ser consultada em maior detalhe no anexo B.

Ressalva-se que, o trabalho realizado na presente dissertação, não se cinge obrigatoriamente à câmara utilizada, podendo ser adaptado a uma câmara com diferentes especificações.

### 3.2.2 Princípio de funcionamento e componentes

Uma câmara termográfica assenta sobre o princípio de que a radiação emitida por um objeto é função da temperatura da sua superfície e da sua emissividade. Essencialmente, uma câmara de infravermelhos expõe visualmente e mede a radiação infravermelha emitida por um dado objeto alvo.

Um instrumento termográfico é constituído por 4 elementos essenciais que se apresentam descritos pelo seguinte diagrama de blocos.

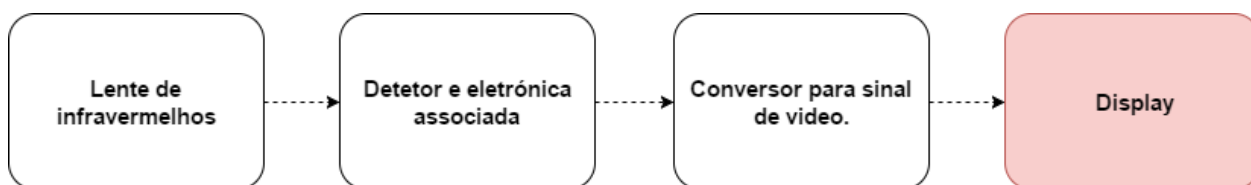


Figura 3.5 – Diagrama dos elementos base que constituem a câmara termográfica (Adaptado de [8]).

Note-se que o bloco de *Display* se encontra a vermelho porque no caso presente, é utilizado uma câmara termográfica em que o display da imagem é obtido no computador através de *software*, tanto em registo fotográfico como em *streaming* de vídeo em tempo-real.

### 3.2.1.1 Sistema ótico

Os sistemas óticos de aquisição de imagem termográfica têm o mesmo princípio de funcionamento dos sistemas óticos para comprimentos de onda no espectro visível, no entanto, são construídos com materiais diferentes.

Um aspeto importante das lentes utilizadas nos sistemas óticos para termografia é o facto do seu índice refrativo ser relativamente maior do que os dos vidros que são usados para construir as lentes destinadas a comprimentos de onda visíveis.

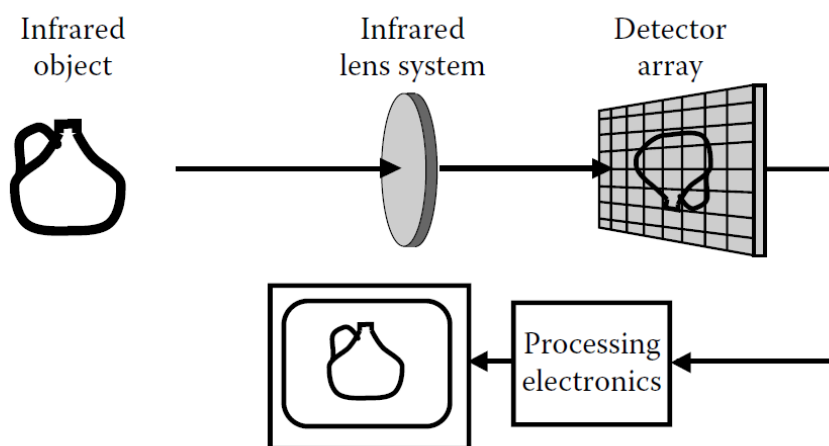


Figura 3.6 – Sistema ótico de aquisição de imagem [8].

### 3.2.1.2 Detetores de radiação

O detetor de radiação é um dos principais componentes de um transdutor termográfico (*Detector Array* na Figura 3.6). Este determina a potencial resolução térmica da câmara que pode ser alcançada bem como o nível de complexidade exigido para tal.

Existem dois tipos de detetores de radiação. O primeiro depende do fluxo de radiação infravermelha que aquece o detetor. A subida da temperatura faz com que se acione um mecanismo físico que é interpretado como a medição da radiação do elemento detetor. Este tipo de detetor é chamado de detetor térmico.

O segundo tipo de detetor toma partido da forma como os fotões que constituem a radiação incidente interagem com o material do detetor a nível atómico, gerando uma tensão elétrica no elemento detetor ou uma alteração na sua resistência elétrica. O mecanismo envolve um conjunto de eletrões que absorvem os fotões incidentes, alterando-se de um nível quântico de energia para outro. Este tipo de detetor é chamado de detetor de fotões ou quântico e oferece uma maior sensibilidade do que os detetores térmicos. Contudo, têm a inconveniência do elemento detetor necessitar de arrefecimento. Este arrefecimento é necessário para que os eletrões sejam capazes de preencher os níveis de carga para que exista a interação necessária entre estes e os fotões incidentes.

A escolha do tipo de detetor a utilizar na construção de um transdutor de temperatura deste tipo tem de considerar uma série de fatores como os requerimentos da aplicação e custo [8].

A câmara em questão utiliza um detetor térmico. Trata-se de um micro-bolómetro de óxido de vanádio não refrigerado (Anexo B).

### 3.2.1.3 Processamento de sinal

O sistema ótico adquire uma imagem termográfica que inevitavelmente contém radiação indesejada por corpos que estão a temperaturas diferentes do objeto alvo assim como radiações de objetos com emissividades diferentes.

Uma nota importante que deve ser referida é a nomenclatura utilizada para se referir ao sistema de medição de temperatura. A câmara termográfica em si é constituída por milhares de sensores que medem temperatura associada a cada pixel, sendo que o condicionamento de sinal é feito de forma multiplexada e exportado individualmente. Assim sendo, a própria câmara é referida na presente dissertação como um transdutor de temperatura uma vez que, englobando toda a sua eletrónica associada, a câmara quando idealizada como um único instrumento, é um transdutor de temperatura.

### 3.2.1.4 Descrição de funcionamento e comunicação

As características da lente da câmara e a distância ao alvo que se pretende monitorizar determinam o *Field of View* que, por sua vez, determina o tamanho real ocupado por cada pixel. O *output* analógico de cada pixel representa a intensidade de energia calorífica do ponto que cobre o objeto alvo. A imagem termográfica que é visualizada, é o resultado do mapeamento realizado pelo microprocessador sobre uma escala de cores ou de cinzentos que representa as temperaturas relativas. A informação radiométrica associada a cada pixel é usada para calcular a temperatura precisamente nesse ponto.

A câmara é alimentada e comunica com o computador através de um sistema *PoE* (*Power over Ethernet*). Este reduz os custos associados à cablagem e fontes de alimentação elétricas quando existem aplicações que integrem uma rede de câmaras. O uso do *PoE* é ubíquo em câmaras endereçadas por *IP* uma vez que permite rápida transmissão de dados e fácil reposicionamento.

O *frame rate* da câmara dita a frequência com a qual a imagem termográfica e a temperatura é atualizada. O protocolo de comunicação digital da câmara pode criar alguma latência neste processo de atualização e apesar de isso ter implicações mínimas sobre o controlo de processos industriais onde as variáveis de temperatura tendem a não ter mudanças bruscas, este é um fator a ter em conta na seleção da máquina [12].

A câmara em questão, comunica exclusivamente por *Ethernet* e é compatível com uma série de protocolos de rede (TCP, UDP, ICMP, IGMP, DHCP, *GigEVision*) [11].

### 3.2.3 Medição de temperatura

Para medir corretamente a temperatura é necessário compensar o efeito de todas as fontes de radiação às quais o ambiente de trabalho está sujeito. No caso da presente câmara, o manual instrui que os seguintes parâmetros devem ser fornecidos de modo a efetuar a dita compensação [11]:

- **Emissividade do objeto;**
- **Temperatura refletora aparente<sup>a</sup>** – parâmetro relativo à compensação da radiação refletida no objeto. Se a emissividade for baixa e a temperatura do objeto for suficientemente afastada da que é refletida, é importante corrigir a temperatura refletora aparente para uma medição correta;
- **Distância do objeto à câmara** – Parâmetro relativo à distância entre o objeto e a lente da câmara com objetivo de compensar a radiação do alvo que é absorvida pela atmosfera entre a lente e o objeto e a própria radiação que é refletida pela atmosfera e é detetada pela câmara;
- **Humidade relativa e temperatura da atmosfera circundante** – Parâmetro com o objetivo de compensar o facto de a transmissividade ser dependente da humidade relativa da atmosfera e da sua temperatura.

<sup>a</sup>Em materiais opacos, a câmara capta a radiação emitida e a refletida pelo objeto. Tendo conhecimento da emissividade do material e a sua temperatura refletora aparente, a câmara calcula a temperatura verdadeira do objeto. Concretamente, a câmara calcula a energia refletida a partir da temperatura refletora aparente e subtrai-a à energia total captada pela camara para obter a energia emitida.

A influência da temperatura refletora aparente na medição correta da temperatura é tanto menor quanto maior for a emissividade do objeto.

Ainda no manual da câmara, é detalhado o processo que permite obter a emissividade de um material experimentalmente.

### 3.2.4 Procedimento de medição

Na Figura 3.7 é ilustrada a arquitetura da medição por meio de uma câmara termográfica com todas as condicionantes associadas. Tal como anteriormente referido, a câmara não só recebe a radiação do objeto, mas também do restante ambiente de trabalho.

Tendo em conta o projeto em causa, facilmente se entende que esta perturbação estará presente uma vez que no processo de fabrico aditivo, FDM, o tabuleiro onde é depositado o material encontra-se aquecido a uma temperatura relativamente elevada, tal como o bico extrusor e eventuais fontes externas de aquecimento, o que inevitavelmente leva à emissão de radiações que perturbam a medição de temperatura do alvo.

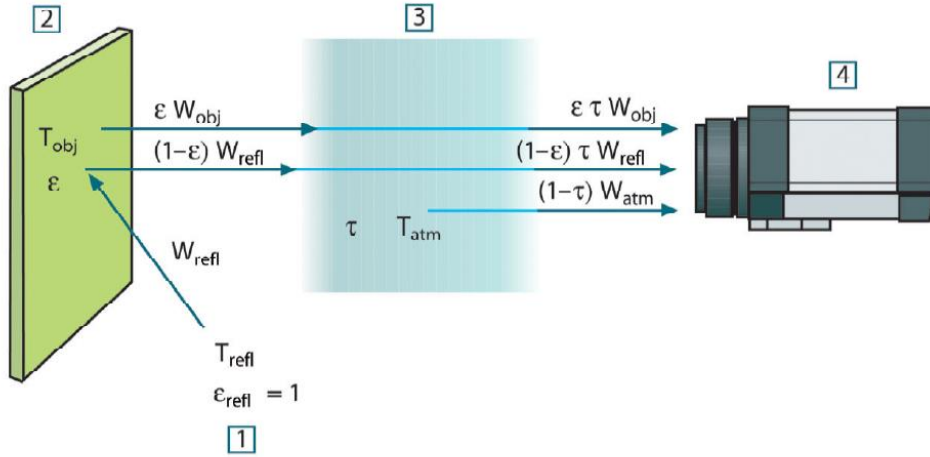


Figura 3.7 – Representação esquemática de uma medição por recurso a câmara termográfica 1 - Vizinhança; 2- Objeto alvo; 3- Atmosfera; 4- Câmara [11].

A radiação medida pela câmara é proveniente de três fontes: A emissão do objeto  $\epsilon\tau W_{obj}$ , a emissão refletida das fontes de calor presentes no ambiente  $(1 - \epsilon)\tau W_{refl}$  e a emissão da atmosfera  $(1 - \tau)W_{atm}$ .

O poder emissivo captado pela câmara  $W$  é transformado num sinal de saída em tensão  $U$ . A potência total recebida da radiação pode ser escrita como:

$$W_{tot} = \epsilon\tau W_{obj} + (1 - \epsilon)\tau W_{refl} + (1 - \tau)W_{atm} \quad (3.11)$$

Para uma dada radiação de um corpo negro,  $W$ , de temperatura  $T_{source}$  a uma distância reduzida, é gerado um sinal de saída da câmara  $U_{source}$  que é proporcional ao *Power Input* (*power linear camera*).  $U_{source} = CW_{source}$  onde  $C$  é uma constante definida pelo fabricante (FLIR). Pode-se então reescrever a equação 3.11 como:

$$U_{tot} = \epsilon\tau U_{obj} + (1 - \epsilon)\tau U_{refl} + (1 - \tau)U_{atm}$$

$$U_{obj} = \frac{1}{\epsilon\tau} U_{tot} - \frac{1 - \epsilon}{\epsilon} U_{refl} - \frac{1 - \tau}{\epsilon} U_{atm} \quad (3.12)$$

Note-se que a equação 3.12 é resolvida em ordem à tensão relativa ao objeto, pelo que é possível obter a fórmula geral usada nos sistemas termográficos FLIR [11].

### 3.3 Representação computacional de peças para impressão 3D (STL)

Os ficheiros no formato STL derivam da Estereolitografia (*STereoLithography*) sendo, no entanto, vulgarmente reconhecidos como *Standard Tessellation Language* ou *Stereolithography Tessellation Language*. De uma forma geral, estes ficheiros são gerados a partir de ficheiros CAD e consistem numa representação da superfície do sólido modelado numa malha composta por triângulos interligados. Quanto maior a resolução e complexidade do modelo, maior o número de triângulos necessários para replicar a sua superfície.

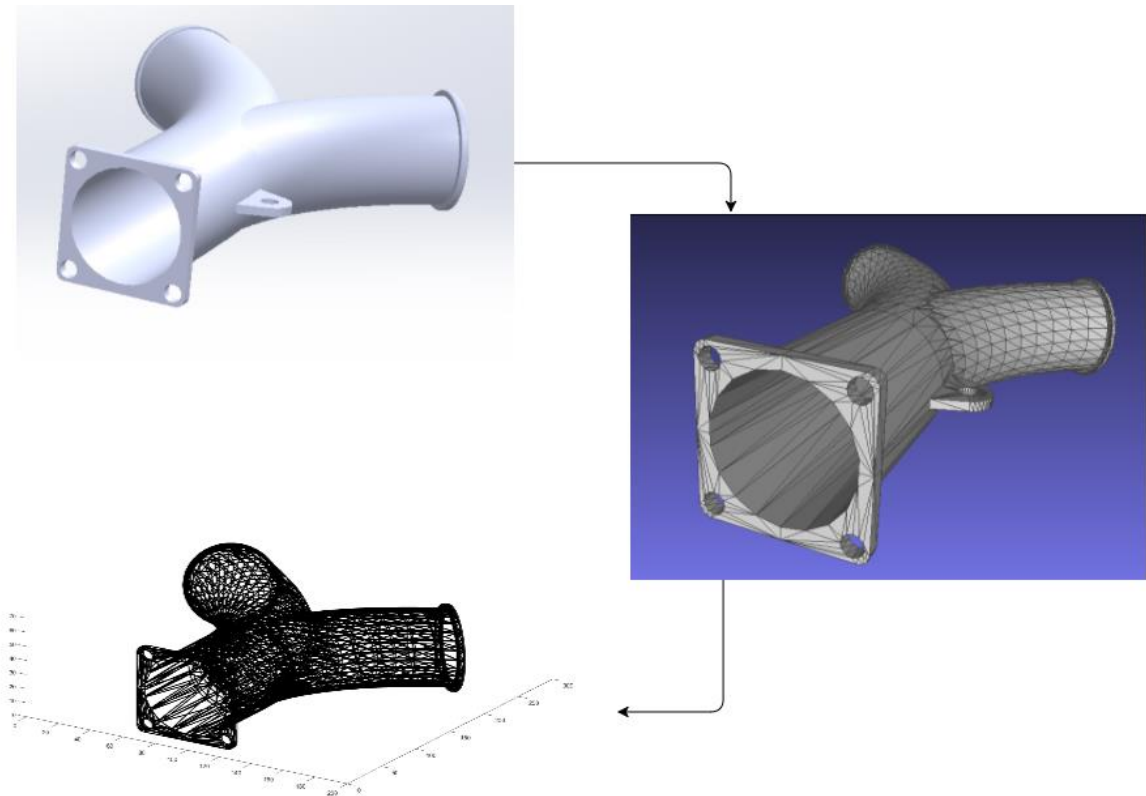


Figura 3.8 – Conversão de ficheiro CAD em STL -Representação do mesmo sólido em *Solidworks*, *MeshLab* e *Matlab* (função *Patch*) respetivamente.

Os ficheiros STL podem ser extraídos como código binário ou em formato ASCII sendo que o último é menos comum, mas de leitura mais simples. Estes ficheiros apenas contêm a informação relativa à superfície ou sobre o formato do sólido, pelo que parâmetros como o material, camadas de construção e histórico são descartados no processo de conversão para STL. Um ficheiro STL consiste numa lista de facetas triangulares em que cada triângulo está identificado por um vetor normal unitário e três vértices. Uma vez que cada vértice é constituído por três números, cada triângulo é descrito por um total de 12 números.

```

solid triangular_pyramid
  facet normal 0.0 -1.0 0.0
    outer loop
      vertex 0.0 0.0 0.0
      vertex 1.0 0.0 0.0
      vertex 0.0 0.0 1.0
    endloop
  endfacet
  facet normal 0.0 0.0 -1.0
    outer loop
      vertex 0.0 0.0 0.0
      vertex 0.0 1.0 0.0
      vertex 1.0 0.0 0.0
    endloop
  endfacet
  facet normal 0.0 0.0 -1.0
    outer loop
      vertex 0.0 0.0 0.0
      vertex 0.0 0.0 1.0
      vertex 0.0 1.0 0.0
    endloop
  endfacet
  facet normal 0.577 0.577 0.577
    outer loop
      vertex 1.0 0.0 0.0
      vertex 0.0 1.0 0.0
      vertex 0.0 0.0 1.0
    endloop
  endfacet
endsolid

```

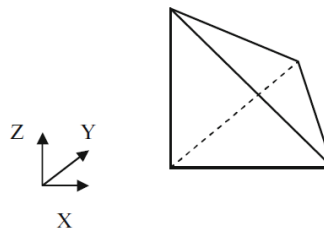


Figura 3.9 – Ficheiro STL em texto ASCII que representa uma estrutura triangular piramidal [3].

Os triângulos podem estar em qualquer ordem e cada um está delimitado como uma faceta. A normal do triângulo é calculada da forma mais conveniente, seja a partir de um vértice ou a partir do centro do triângulo. Convencionou-se que a normal define a superfície exterior do sólido. Os vértices que dizem respeito a um triângulo estão definidos pelas instruções *outer loop* e *endloop*, e devem estar listados de maneira a que a parte de fora do triângulo esteja concordante com a “regra da mão direita”, ou seja, à medida que olhamos para o triângulo do lado de fora os vértices devem estar listados por ordem que siga o sentido retrógrado, sendo o vértice inicial arbitrário.

No caso da representação do ficheiro STL em código binário o ficheiro pode ser escrito como: um cabeçalho ASCII de 80 bytes que pode ser usado para descrever a peça; um número inteiro de 4 bytes que indica o número de facetas de um objeto. Cada faceta é constituída por 50 bytes, sendo que cada uma é representada por arranjos de 4 bytes com 3 valores em vírgula flutuante que representam o vetor normal, o primeiro, segundo e terceiro vértice e 2 bytes (por defeito a zero) que representam a cor.

### 3.4 Manipulação de ficheiros STL

Com o intuito de estabelecer uma relação entre as imagens obtidas pela câmara termográfica e o ficheiro STL da peça a ser impressa, nesta secção serão abordadas quais as operações que podem ser realizadas para manipulação de um ficheiro STL.

Após a conversão de um sólido CAD em STL é possível fazer alterações na sua estrutura, com algumas limitações. Associação de diferentes triângulos só pode ser feita se estes tiverem nós em comum. Um ponto ou vértice pode ser movido, causando distorção na forma dos triângulos, mas alterações que provoquem uma mudança numa região mais alargada que inclua vários nós torna esta operação mais difícil. Pequenas mudanças podem alterar drasticamente a forma como estão dispostos os triângulos. Operações que visem reduzir o número de triângulos, por exemplo, têm o objetivo de simplificar o modelo, mas podem comprometer a definição das delimitações geométricas. Quando se pretende captar uma imagem tridimensional, a posição e a orientação da câmara no espaço têm de ser rigorosamente conhecidas num referencial predefinido de modo a que o alinhamento entre a imagem térmica e a verdadeira posição do sólido seja correto [3].

Só assim será possível obter uma medição de temperatura o mais espacialmente correta. Tal como já anteriormente referido, o ficheiro STL das peças a analisar contém os triângulos que delimitam as superfícies dos sólidos, ou seja, é possível obter uma matriz ( $n \times 3$ ) com as coordenadas de  $n$  vértices desses triângulos no espaço, que originam uma nuvem de pontos que serão os vértices dos polígonos que representam a superfície do sólido em causa. Nesta secção irão também ser abordadas as operações geométricas que se podem aplicar para a manipulação e projeção do ficheiro STL.

### 3.4.1 Transformação de imagem

As rotações tridimensionais podem ser conseguidas pelas matrizes de transformação (3.13) rotação  $\psi$  segundo o eixo dos x, (3.14) rotação  $\varphi$  segundo o eixo dos y, (3.15) rotação  $\theta$  segundo o eixo dos z.

$$R_x(\psi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\psi) & -\sin(\psi) \\ 0 & \sin(\psi) & \cos(\psi) \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

$$R_y(\varphi) = \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & 0 & \sin(\varphi) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\varphi) & 0 & \cos(\varphi) \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

$$R_z(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

De modo a poder realizar uma sequência de rotações 3D no mesmo sólido, é possível escrever a expressão  $R = R_x(\psi)R_y(\varphi)R_z(\theta)$  que nos dá a rotação composta sobre os eixos z, y e x sucessivamente [14].

No caso da translação de pontos sobre uma distância,  $d$ , podemos utilizar as seguintes expressões:

$$X' = X + d1 \quad (3.16)$$

$$Y' = Y + d2 \quad (3.17)$$

$$Z' = Z + d3 \quad (3.18)$$

Onde  $d1$ ,  $d2$  e  $d3$  são as distâncias que se pretende transladar um determinado ponto ou conjunto de pontos.

Para representar as translações numa forma matricial é necessário expandir para uma matriz 4x4 onde se podem observar os parâmetros de rotação e translação conjuntamente.

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & d1 \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & d2 \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & d3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

A expressão 3.19 traduz a expressão geral do deslocamento em forma matricial (rotação e translação).

### 3.4.2 Projecção num plano a partir de visão tridimensional

Convencionando que o ponto focal da lente da câmara é a origem do referencial  $(0,0,0)$  alinhada com o eixo dos  $z$  e que o plano da imagem é o plano  $Z = f$ , sendo  $f$  a distância focal. Para um ponto genérico do espaço  $(x, y, z)$ , que aparece no plano como  $(x_1, y_1)$ , a projecção é dada por [14]:

$$(x_1, y_1) = \left( \frac{fx}{z}, \frac{fy}{z} \right) \quad (3.20)$$

### 3.5 Calibração geométrica da câmara

A calibração geométrica da câmara é um procedimento fundamental em qualquer medição realizada a partir de um sistema de visão artificial. Tem como função estimar os parâmetros da lente e do sensor de uma câmara fotográfica ou de vídeo, podendo esses parâmetros ser usados para corrigir a distorção da lente, medir o tamanho de um determinado objeto ou localizar e posicionar a câmara numa determinada cena.

As deduções realizadas anteriormente são válidas para um referencial global coincidente com o da câmara, no entanto, geralmente, o objeto alvo de medição ou a câmara estão localizados arbitrariamente, o que leva a uma necessidade de estabelecer uma relação vetorial entre ambos.

Para relacionar a câmara e o objeto geometricamente, é comum assumir uma transformação geral entre as coordenadas globais e a imagem projetada sobre uma determinada perspetiva, localizando na imagem vários pontos de calibração posicionados de forma padronizada. Havendo suficientes pontos, teoricamente será possível obter computacionalmente todos os parâmetros que permitem interpretar os pontos da imagem corretamente [14].

#### 3.5.1 Parâmetros na calibração da câmara

Os algoritmos de calibração calculam a matriz da câmara a partir de parâmetros extrínsecos e intrínsecos.

Os parâmetros extrínsecos representam as transformações rígidas de um sistema de eixos global (3D) para o sistema de eixos da câmara (3D). Os parâmetros intrínsecos representam as transformações referentes à projecção das coordenadas tridimensionais para as coordenadas bidimensionais que formam a imagem.

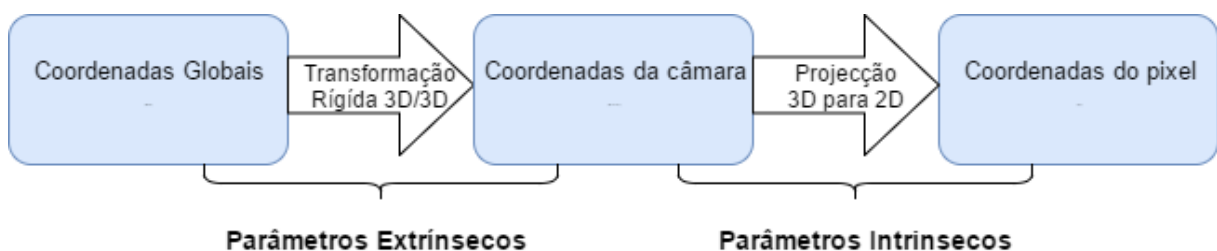


Figura 3.10 – Parâmetros de calibração da câmara (adaptado de [15]).

A calibração da câmara tem o objetivo de fazer coincidir o referencial global com o da câmara, executando as seguintes operações:

1. Mover a origem do referencial global para a origem do sistema de eixos da câmara;
2. Rodar o referencial global até que os seus eixos estejam coincidentes com os do referencial da câmara;
3. Deslocar o plano da imagem lateralmente até que exista uma sobreposição de ambos os referenciais. Este passo é necessário uma vez que inicialmente não é conhecida a correspondência entre o ponto no referencial global e o ponto central do centro da projeção (ponto contido no eixo ortogonal da câmara, eixo focal).

A transformação completa para a calibração da câmara é dada por  $G = PLRT$

$$G = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1/f & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & t_1 \\ 0 & 1 & 0 & t_2 \\ 0 & 0 & 1 & t_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & 0 \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & 0 \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & T_1 \\ 0 & 1 & 0 & T_2 \\ 0 & 0 & 1 & T_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

Onde as transformações regidas pelas matrizes  $P$  e  $L$  descrevem os parâmetros intrínsecos da câmara, onde são controladas as perspetivas requeridas para formar uma imagem e as matrizes  $R$  e  $T$  são as transformações externas da câmara, isto é, parâmetros extrínsecos. Desta forma a equação 3.21 pode ser escrita como  $G = G_{int}G_{ext}$  onde  $G_{int} = PL$  e  $G_{ext} = RT$  [14].

### 3.5.2 Distorção na calibração da câmara

No presente trabalho é importante efetuar um certo paralelismo entre câmaras fotográficas convencionais e termográficas uma vez que, em termos óticos, são semelhantes. Assim, com esta comparação, certos parâmetros podem ser corrigidos, nomeadamente a distorção, responsável pela deformação da imagem. Em fotografia, existem dois tipos de distorção: ótica e de perspetiva.

#### 3.5.2.1 Distorção ótica

A natureza curva da lente de qualquer câmara fotográfica conduz a que haja, muitas das vezes impercetível, uma distorção radial na imagem. Isto significa que, por vezes, as fotografias apresentem linhas com curvaturas irregulares, particularmente na periferia da imagem.

Apesar do seu aspeto irregular, geralmente a distorção radial pode ser classificada em dois tipos (*Pincushion* e *Barrel Distortion*) que obedecem a uma determinada linha de padrões simétricos.

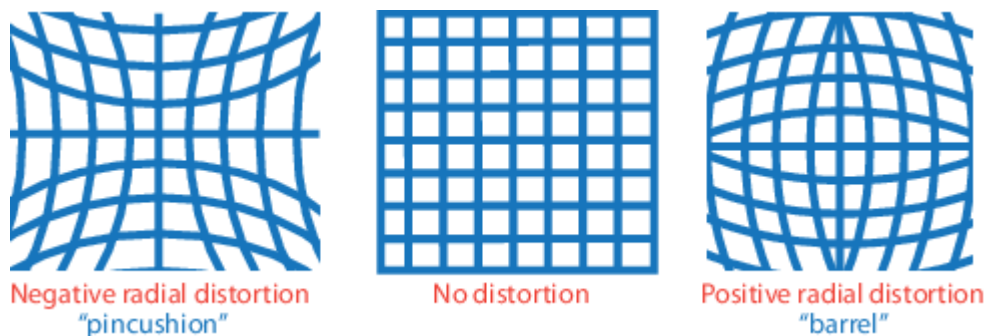


Figura 3.11 – Tipos de distorção radial [15].

### 3.5.2.2 Distorção de perspectiva

A distorção de perspectiva está associada aos parâmetros intrínsecos da câmara. Quando um objeto tridimensional está a ser projetado numa imagem 2D, se o objeto estiver próximo da lente da câmara, este aparecerá de forma desproporcional a outros objetos, mais afastados, captados na mesma cena. A distância entre o sujeito e a câmara é o que determina a perspectiva.

É comum tentar corrigir este defeito com a utilização de câmaras com uma distância focal maior, que aumentam o tamanho do objeto numa determinada cena. Apesar de a distância focal não influenciar diretamente a perspectiva, uma distância focal maior força a câmara a afastar-se do objeto para obter a mesma imagem.

Regressando ao paralelismo inicialmente mencionado entre as câmaras fotográficas convencionais e as termográficas, é compreensível que a distorção de perspectiva não seja um fator muito preocupante na aquisição da temperatura pretendida nesta dissertação, uma vez que, é possível manipular o ficheiro STL para obter uma orientação semelhante ao objeto representado pela imagem termográfica, não afetando assim a medição localizada da temperatura sobre o objeto. No entanto, é importante que esta distorção seja referida e estudada para futuras aplicações com recurso à mesma câmara.



## 4 Processamento da imagem termográfica

O processamento da imagem adquirida pela câmara termográfica é a etapa chave na realização do presente trabalho. Nesse sentido, este capítulo serve para explicar a metodologia abordada para efetuar o tratamento da imagem de modo a ser possível definir uma ligação entre os valores das temperaturas medidas, em cada ponto da imagem, pela câmara, e os diferentes elementos da malha STL do objeto em causa.

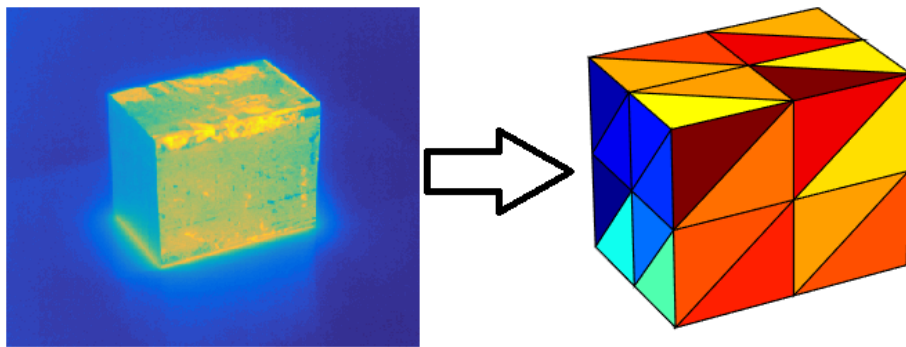


Figura 4.1 – Objetivo do algoritmo. Cada triângulo do STL representa uma temperatura em escala de cores, baseada na informação da imagem termográfica.

### 4.1 Metodologia

Desde a aquisição da imagem térmica ao objetivo final de associar temperaturas ao ficheiro STL existem três etapas fundamentais:

- Aquisição de imagem termográfica;
- Calibração geométrica da câmara e do objeto;
- Projeção do objeto e aquisição de temperatura – Atribuição do mapa de temperaturas ao sólido.

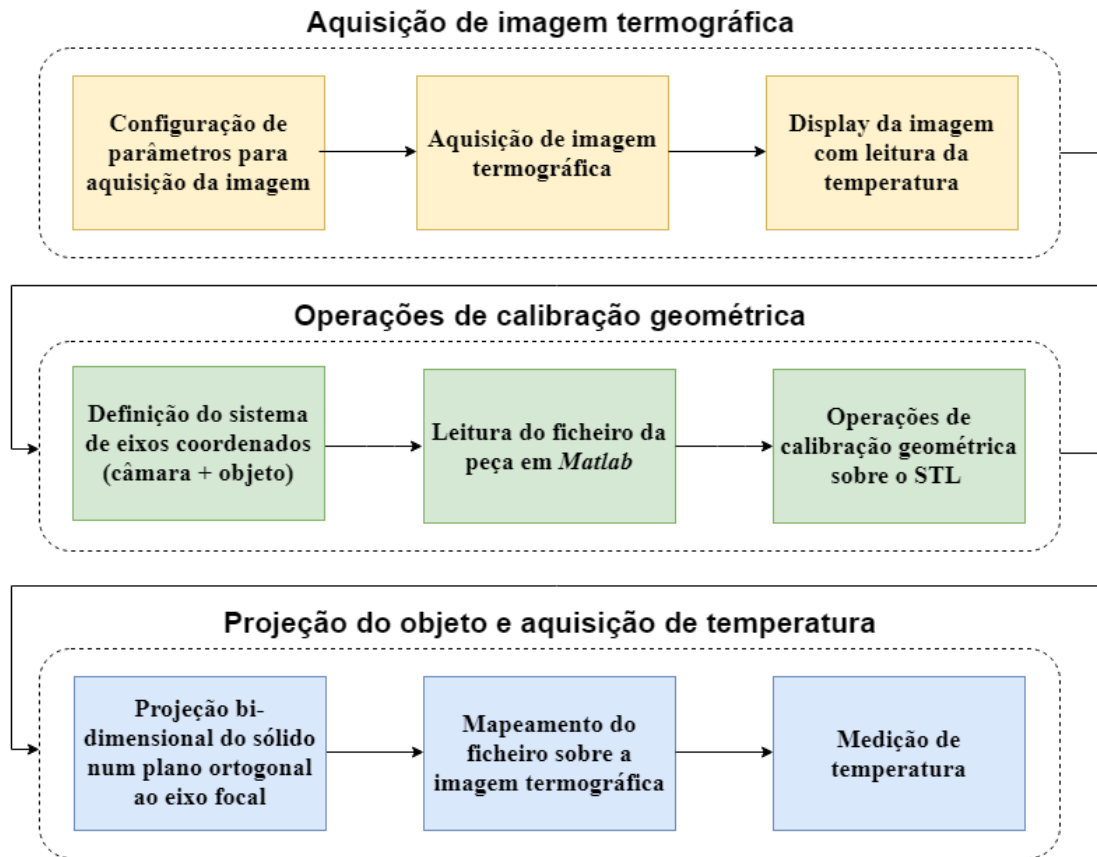


Figura 4.2 – Estrutura do algoritmo de processamento de imagem termográfica e aquisição de temperatura.

O fluxograma do algoritmo, Figura 4.2, é dividido em três fase fundamentais, que são descritas em detalhe neste capítulo.

Os três primeiros blocos dizem respeito à aquisição da imagem termográfica, com recurso ao *Matlab*, permitindo configurar os parâmetros da câmara para obter a temperatura correta. Com o intuito de fazer uma apreciação quantitativa da evolução dos gradientes térmicos de um determinado objeto, foi escrita, em paralelo com os algoritmos de aquisição de imagem fornecidos pelo fabricante, uma função que permite guardar em vídeo (para um dado número de *frames* por segundo definido pelo utilizador) as experiências realizadas.

Seguidamente, os blocos a verde dizem respeito à calibração geométrica do objeto em relação à câmara e das operações de rotação e translação do sólido (STL) que permitirão posicionar e orientar a representação virtual do objeto de acordo com a sua posição real.

Os três últimos blocos dizem respeito à sobreposição da projeção do sólido, malha STL, sobre a imagem termográfica. Note-se que este processo é repetitivo, no sentido em que para obter a maior precisão de alinhamento de imagens possível é necessário realizar múltiplos ensaios. Concluído este passo, é então finalmente possível obter o mapa de temperaturas da superfície do objeto de medida.

## 4.2 Aquisição e representação da imagem termográfica

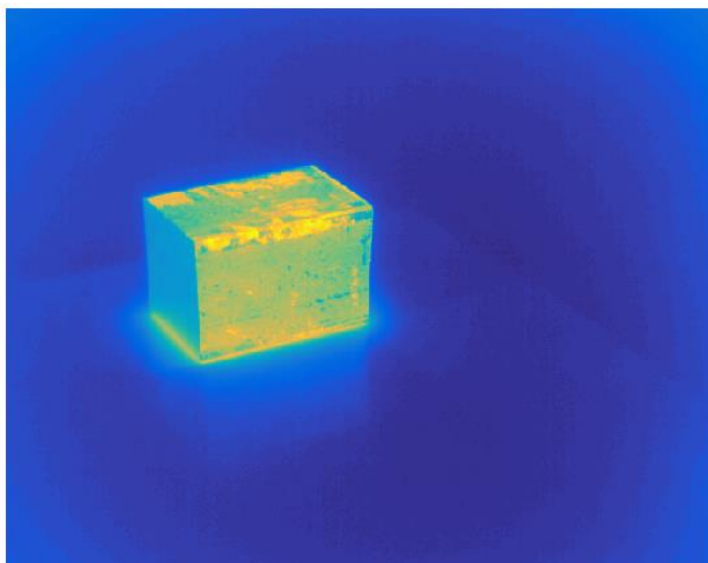


Figura 4.3 – Imagem termográfica de um bloco metálico.

A aquisição e representação de imagem pela câmara termográfica é feita através de *Matlab* com o recurso às *Toolboxes* de aquisição e processamento de imagem. Nas instruções online do fabricante da máquina, *FLIR Systems*, podem ser encontrados *scripts* para esse efeito. Sucintamente, cada pixel da imagem é o resultado do sinal digital emitido pelo sensor da câmara num número de 14 *bits*, multiplicado por um fator constante introduzido pelo fabricante.

Antes de iniciar a aquisição de imagem, seja uma única fotografia ou um número indeterminado de *frames*, é necessário invocar uma função que configura os parâmetros iniciais da máquina.

Seguidamente, é preciso instruir como a imagem vai ser representada. Essencialmente é construído um *plot* bidimensional com uma proporção de tela de 640x512 (resolução da câmara) e é representada a imagem com recurso à função `imagesc`. Uma vez que a imagem é adquirida pela câmara como uma escala de cinzentos, contendo a informação real do valor de cada pixel, a função de `imagesc` permite visualizar a imagem com todas as cores disponíveis numa determinada paleta de cores, em proporção à intensidade de cada pixel, obtendo-se assim uma representação típica de uma imagem termográfica (Figura 4.3). A temperatura de cada pixel é obtida da mesma forma, assumindo que os valores de emissividade e restantes correções estão corretamente impostos.

A par da aquisição contínua da imagem (*streaming*), é vantajoso guardar um histórico dos dados adquiridos pela câmara. Para isso, foi escrito um algoritmo que tira proveito das funções disponibilizadas pela *Toolbox* de aquisição de imagem do *Matlab*.

Essencialmente, esse algoritmo guarda continuamente as imagens obtidas pela câmara, em escala de cinzentos, no formato TIFF. O uso deste formato justifica-se pelo facto de não comprimir o ficheiro da imagem, não deturpando os valores obtidos.

Num outro *script*, é feito o carregamento dessas imagens para o espaço de trabalho e, utilizando a função `VideoWriter`, é guardado o vídeo da experiência realizada, num diretório à escolha do utilizador.

### 4.3 Representação do ficheiro STL sobre a imagem termográfica

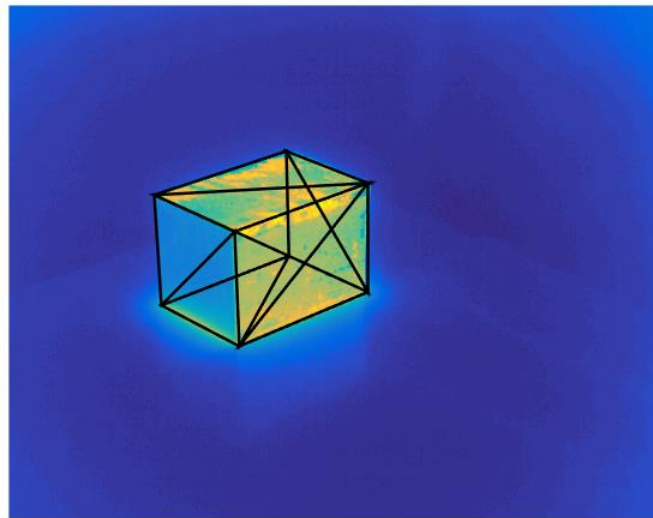


Figura 4.4 – Representação do STL de um bloco metálico sobre a sua respetiva representação termográfica.

#### 4.3.1 Funcionamento base do algoritmo

Nesta secção é descrita como foi realizada, em *Matlab* a projeção do ficheiro STL sobre a imagem adquirida pela câmara, tendo em conta as etapas a verde e azul da Figura 4.2.

Por questões de simplicidade, o objeto de teste utilizado foi um bloco de aço de dimensões 70x50x50 mm, sendo que o ponto de referência deste seria o canto inferior direito da face que está voltada para a câmara.

Convenciona-se que esse ponto será a origem do referencial, a partir do qual serão calculadas as coordenadas do ponto focal da câmara.

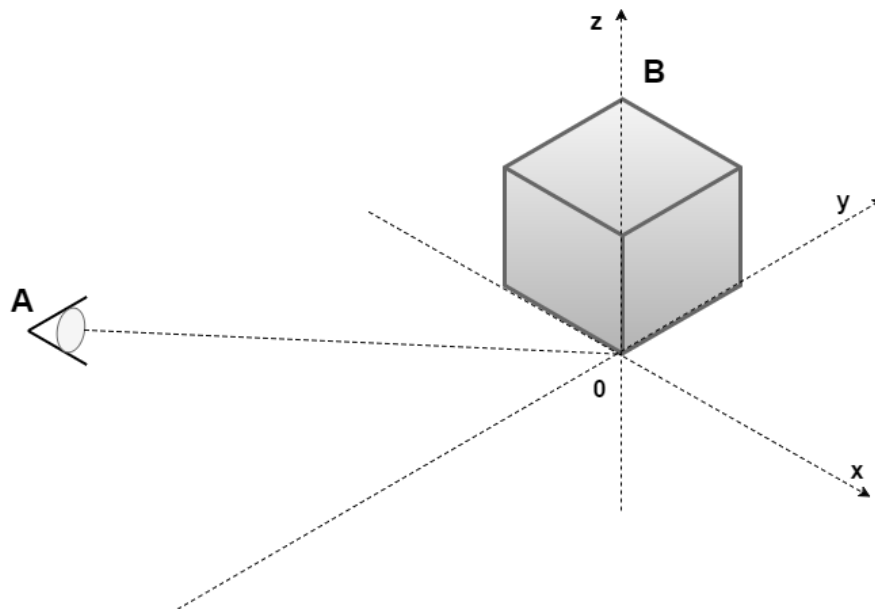


Figura 4.5 – Ilustração do referencial para o sistema de calibração. Câmara representada por A e bloco por B.

Definido então o referencial global, é necessário efetuar a leitura do ficheiro STL do bloco em *Matlab*. O bloco de teste é desenhado e convertido em STL pelo *Solidworks*.

Para a leitura do ficheiro é utilizada uma função, `stlread`, disponibilizada pela *Mathworks* no repositório comunitário de partilha de ficheiros (*File Exchange*). Esta função retorna três matrizes ( $v, f, n$ ) correspondentes aos vértices de todos os triângulos, à lista de vértices que formam cada faceta e às normais de cada triângulo, respetivamente.

A partir das matrizes, é necessário representar o sólido tridimensionalmente. Para isso é utilizada a função `patch` que essencialmente cria um conjunto de polígonos que conectam os vértices dados por  $v$  e em que  $f$  dita quais as faces conectar.

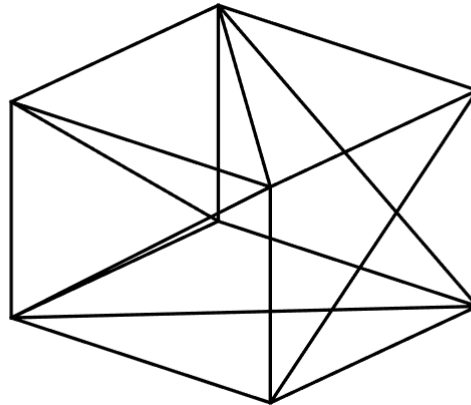


Figura 4.6 – STL do bloco representado em *Matlab* (função `patch`).

Ainda seguindo a estrutura do algoritmo geral, Figura 4.2, para inicialização de dados é necessário dar as coordenadas da posição da câmara, calcular a elevação e o azimute em relação à origem do referencial e calcular o vetor normal do plano ortogonal ao eixo focal da câmara.

Nesta fase, foi criada e utilizada uma função que permite transladar e rodar o sólido conforme seja necessário, seguindo as transformações descritas na secção 3.4.1. Estas operações permitem replicar a orientação do sólido real e movimentá-lo livremente segundo os eixos do referencial definido.

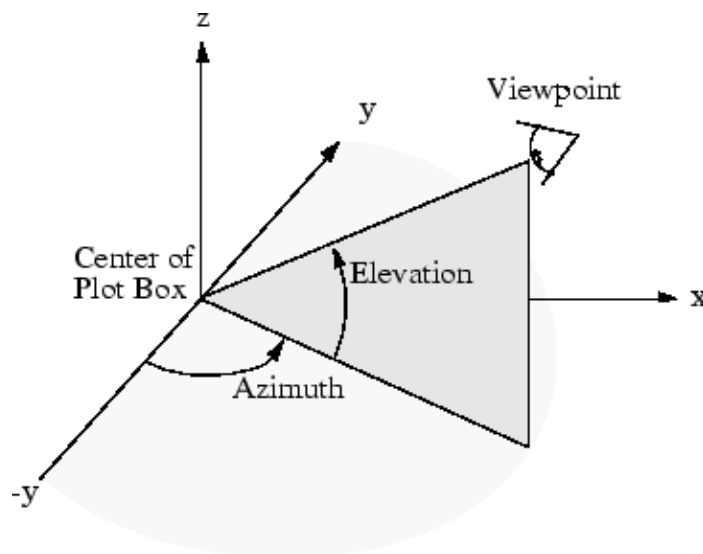


Figura 4.7 – Sistema de eixos coordenados para a visualização do objeto pela câmara (*Viewpoint*), com a ilustração do significado de azimute e elevação [16].

### 4.3.2 Projeção do sólido

De modo a projetar as matrizes dos vértices do sólido sobre a perspectiva desejada, são criadas retas que unem os vértices do sólido ao ponto focal da câmara. A projeção é descrita pela interseção dessas retas com um plano ortogonal ao eixo focal da câmara.

Para obter esse plano é necessário um ponto pertencente ao mesmo e a sua normal. A normal pode ser obtida como:

$$\vec{X}_c = \frac{(0,0,0) - (x_c, y_c, z_c)}{\sqrt{x_c^2 + y_c^2 + z_c^2}} \quad (4.1)$$

Onde  $(x_c, y_c, z_c)$  são as coordenadas do ponto focal da câmara segundo os eixos dos x, y e z do referencial global.

Para a obtenção do ponto do plano é utilizado o ponto focal da câmara. Este é afastado na direção da normal obtida anteriormente sobre uma distância arbitrária que controla a escala da projeção (quanto maior o afastamento, maior a dimensão do sólido projetado).

Findo este processo, é possível recriar o sistema de medição virtualmente (Figura 4.8). Esta recriação não é absolutamente necessária, uma vez que não altera o resultado final, mas a sua observação provou-se ser muito importante no desenvolvimento do algoritmo, pois permite ajustar visualmente os parâmetros inseridos e ter uma visão do esquema geral de projeção.

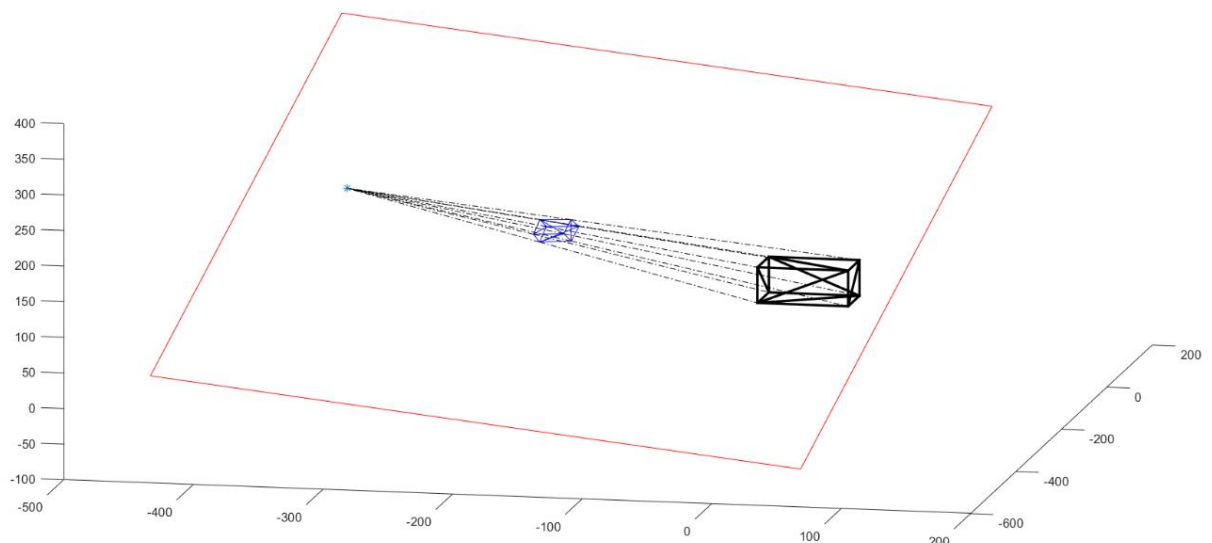


Figura 4.8 – Recriação do sistema de medição. Câmara (ponto focal) representado por \*, sólido a preto, plano de projeção a vermelho, projeção do sólido a azul e linhas de interseção representadas a traço ponto.

Com a translação do plano sobre o eixo focal, é possível ampliar a projeção do objeto através do afastamento do plano em relação ao objeto (Figura 4.9).

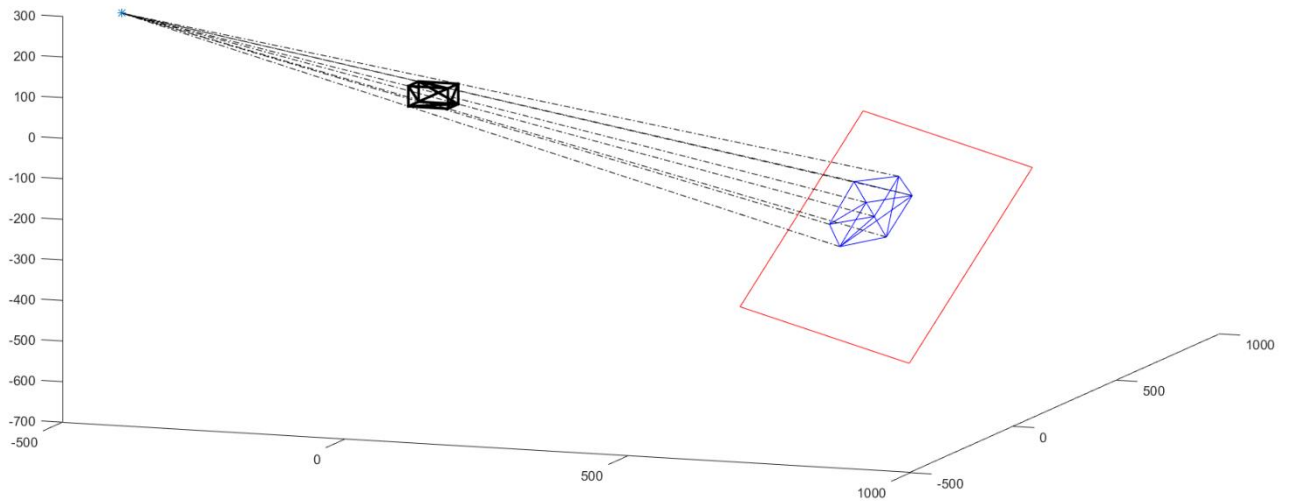


Figura 4.9 – Ampliação da projeção do objeto.

Os cálculos efetuados anteriormente resultam na verdadeira grandeza do sólido projetado. No entanto, à semelhança do funcionamento da câmara que retorna uma imagem bidimensional com a resolução de 640x512, é necessário encontrar uma imagem bidimensional que corresponda à projeção efetuada sobre um plano, em termos de posição e dimensões da imagem.

Para tal, é necessário definir, com base nos ângulos de azimute e elevação, a transformação que é necessária efetuar sobre os pontos da projeção para rebater o plano sobre um que esteja concordante com o que é obtido pela câmara.

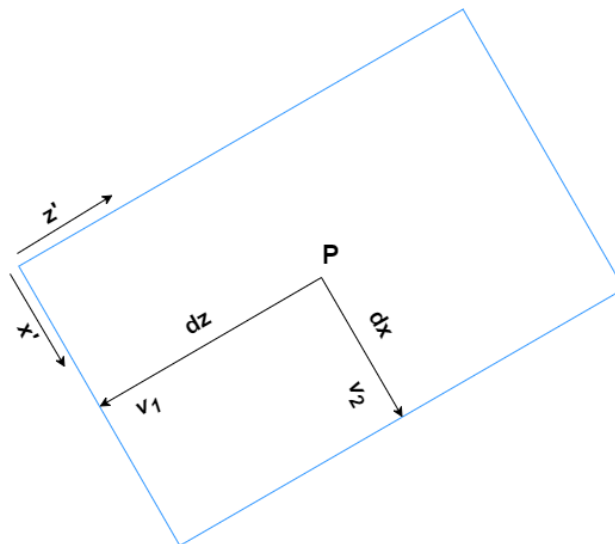


Figura 4.10 – Transformação para os novos eixos coordenados.

Na Figura 4.10 é apresentada a transformação dos eixos coordenados que definem o plano onde a projeção do objeto será representada de forma concordante com a posição da câmara e do ponto de referência do objeto, onde os vetores  $\vec{v}_1$  e  $\vec{v}_2$  são regidos por:

$$\vec{v}_1 = (-\text{sen}(az) \cdot \text{sen}(el), -\text{sen}(el) \cdot \text{cos}(az), -\text{cos}(el))$$

$$\vec{v}_2 = (\text{cos}(az), -\text{sen}(az), -0)$$

Onde  $az$  e  $el$  são os ângulos de azimute e elevação, respetivamente.

Efetuada o produto escalar entre os vetores  $\vec{v}_1$  e  $\vec{v}_2$  e os pontos do sólido projetado é possível obter as novas coordenadas sobre o plano bidimensional no novo referencial.

$$(P - V) \cdot \vec{v}_1 = x' \quad (4.2)$$

$$(P - V) \cdot \vec{v}_2 = z' \quad (4.3)$$

Onde  $V$  é um ponto da matriz de projeção (vértice do sólido) e  $P$  o ponto central da tela (Figura 4.10).

Para a sobreposição das duas imagens, a projeção do STL e a imagem termográfica, é então necessário equacionar uma transformação das matrizes correntes para que correspondam à resolução da imagem adquirida (640x512).

$$\begin{bmatrix} X \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & 0 \\ 0 & A_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Resolvendo o sistema de equações em relação às variáveis  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $B_1$  e  $B_2$ , a partir de pontos conhecidos do plano da imagem ( $X Z$ ) e do plano de projeção ( $x z$ ) é possível então calcular a nova matriz bidimensional que diz respeito à projeção do STL sobre a imagem.

Executando os *plots* da imagem e da matriz simultaneamente verifica-se a sobreposição do STL e da imagem termográfica, Figura 4.4.

### 4.3.3 Distinção das faces visíveis e invisíveis

Concluída a representação do ficheiro STL sobre a imagem, é necessário discernir quais os triângulos que estão visíveis numa determinada posição. Com recurso a um algoritmo desenvolvido no âmbito deste trabalho é possível chegar a esse resultado.

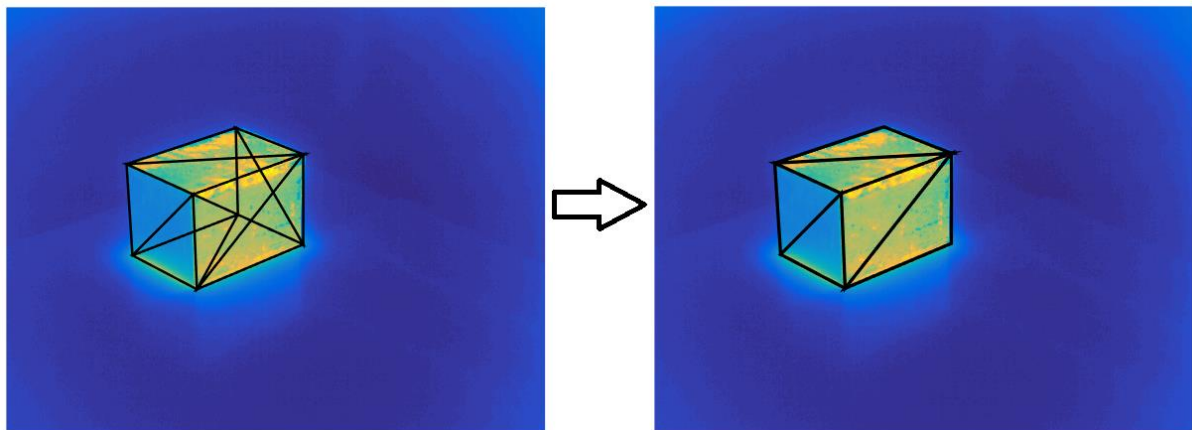


Figura 4.11 – Transformação da imagem após distinção dos triângulos visíveis.

Para obter a referida distinção, visualizada na Figura 4.11, foi escrito um algoritmo que sucintamente faz o seguinte:

- Determina o ponto do objeto mais próximo da câmara;
- Determina quais os triângulos que estão ligados a esse ponto;
- Determina todos os triângulos que estão visíveis face aos triângulos iniciais;
- Cria as novas matrizes do STL apenas com os triângulos visíveis.

Após o cálculo do ponto do objeto mais próximo da câmara, é possível determinar quais os triângulos que contém esse vértice e por sua vez determinar qual o triângulo ou os triângulos mais próximos da câmara, que evidentemente estarão visíveis.

A partir desta primeira etapa, o algoritmo recorre a um Envoltório Visual Convexo que permite verificar, de entre a nuvem de pontos que constituem os vértices do sólido, os pontos de triângulos escolhidos que já se encontram dentro dos limites de triângulos previamente selecionados.

Um Envoltório Visual Convexo define-se como a menor forma convexa que contém a forma original [14].

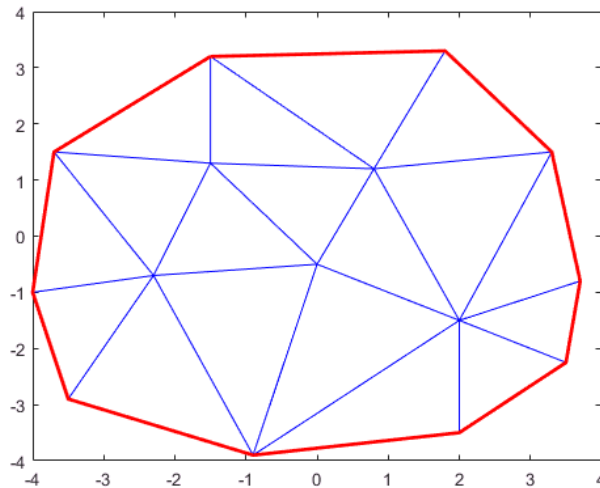


Figura 4.12 – Computação do Envoltório Visual Convexo (a vermelho) – *Convex Hull* – em *Matlab* [17].

Note-se que, a computação desta secção do algoritmo é passível de ter tempos de cálculo elevados, nomeadamente em ficheiros STL de maior resolução (maior número de triângulos). Esta problemática será abordada posteriormente no capítulo 5.

#### 4.3.4 Interface gráfica

Uma vez que a medição física das coordenadas da câmara está sempre sujeita a erros e pela forma como a ampliação do objeto é realizada, é sempre necessário introduzir fatores de correção na sobreposição do STL à representação térmica do objeto.

Estes fatores de correção são o deslocamento horizontal e vertical, a orientação e a ampliação/redução do objeto representado sobre a imagem.

De forma a realizar estas correções de forma mais cómoda, na ótica do utilizador comum, e com recurso a um ambiente gráfico, foi desenvolvida no contexto deste trabalho uma interface gráfica com a ferramenta *GUIDE* – *Graphical user interface design environment* do *Matlab* que permite o utilizador ajustar o STL à imagem adquirida e registar os valores de correção.

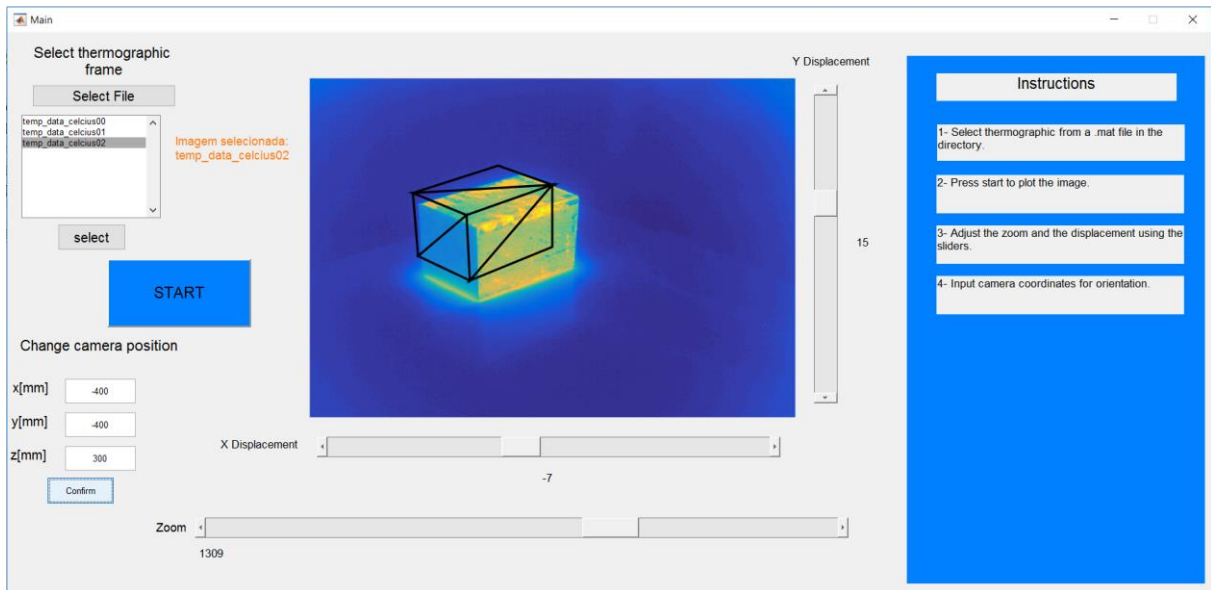


Figura 4.13 – Interface gráfica.

Tal como se pode observar na Figura 4.13, a interface permite seleccionar a partir de um directório, uma determinada *frame* termográfica do objeto em análise e corrigir de forma intuitiva a posição e escala do ficheiro sobre a peça com recurso a *sliders*, e corrigir também a orientação da peça com a alteração das coordenadas da posição da câmara, em relação ao referencial global.

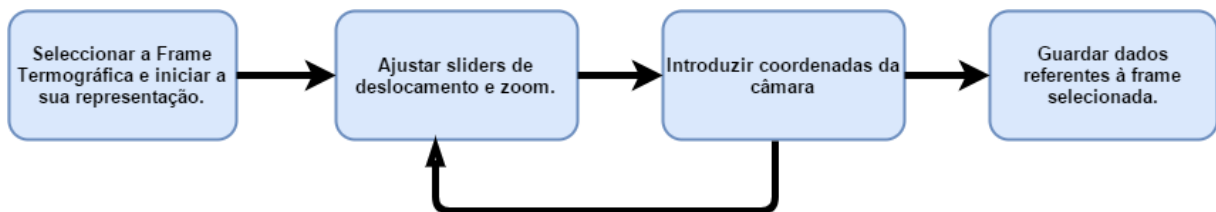


Figura 4.14 – Instruções de uso da interface.

O utilizador deve utilizar esta ferramenta de forma sequencial (Figura 4.14), iterando o segundo e terceiro passo até obter a sobreposição o mais correta possível.

Uma vez realizadas as referidas correções, o utilizador pode guardar os dados inseridos para a correção que serão sempre válidos para uma determinada imagem termográfica e respetivo STL.

Atualmente, a interface encontra-se simples e eficiente, no entanto alguns melhoramentos podem já aqui ser referidos na perspetiva de trabalhos futuros, tais como a introdução de uma *listbox* que permita seleccionar diferentes peças (STL), alterações estéticas, alteração da orientação do objeto com base em *input* de valores angulares de rotação e refinamentos no funcionamento do algoritmo.

#### 4.4 Projeção do mapa de temperatura sobre o objeto

Assim que o STL e a imagem termográfica estão devidamente relacionados, é necessário atribuir as temperaturas ao ficheiro de modo a ser possível proceder ao desenvolvimento do de um sistema de aquecimento da peça.

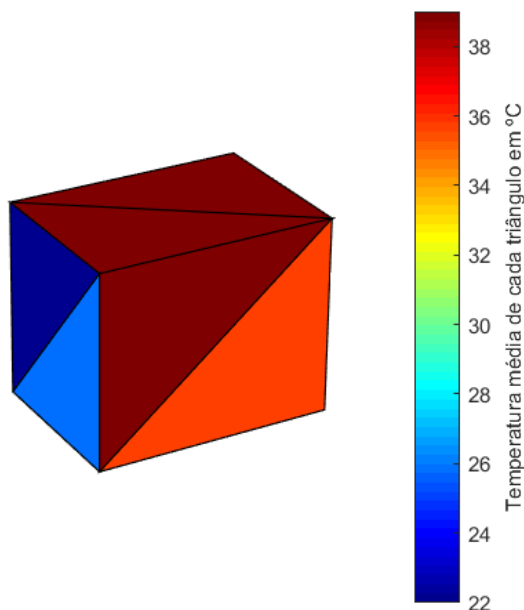


Figura 4.15 – Atribuição da temperatura superficial do sólido à malha de triângulos (STL).

Uma vez que existe uma representação numérica (matricial) das coordenadas do objeto em causa, é possível associar diretamente a intensidade de cada pixel da imagem a cada vértice (ponto) do ficheiro STL.

No entanto, é notoriamente vantajoso existir a capacidade de atribuir o valor da temperatura a qualquer ponto delimitado pela região do triângulo, uma vez que permitirá obter uma medição de temperatura muito mais exata.

Numa primeira aproximação pode-se associar a temperatura de cada triângulo ao seu ponto central (baricentro).

Sejam  $a$ ,  $b$  e  $c$  os vértices com coordenadas distintas de um dos triângulos da malha da STL; é possível determinar o baricentro do triângulo  $P$  a partir de

$$P(x, y, z) = \frac{a(x_a, y_a, z_a) + b(x_b, y_b, z_b) + c(x_c, y_c, z_c)}{3} \quad (4.5)$$

Contudo, para ficheiros com menor resolução (formas menos complexas) ou para ficheiros que necessitem de um aquecimento numa área muito reduzida, é necessário atribuir temperaturas a mais pontos no interior de cada triângulo.

Para isso, a temperatura a atribuir a cada triângulo será calculada através de uma média ponderada (equação 4.6) da intensidade dos pixéis correspondentes a pontos no interior do triângulo, escolhidos de forma arbitrária.

$$\frac{\sum_{i=1}^n f_i x_i}{\sum_{i=1}^n f_i} \quad (4.6)$$

Nesta fase, o algoritmo seleciona a partir do baricentro de cada triângulo pontos na redondeza conferindo-lhes um peso ( $f_i$ ) maior do que o que é atribuído aos vértices, uma vez que estes estão mais suscetíveis a erro de medição.

Na Figura 4.16 apresenta-se um esquema muito simples dos primeiros pontos que o algoritmo calcula. Com um simples cálculo de soma de coordenadas são obtidos de pontos no interior do triângulo, os pontos  $j$ ,  $k$  e  $l$  são os pontos médios entre o centro,  $C$ , e os vértices  $a$ ,  $b$  e  $c$ , respetivamente.

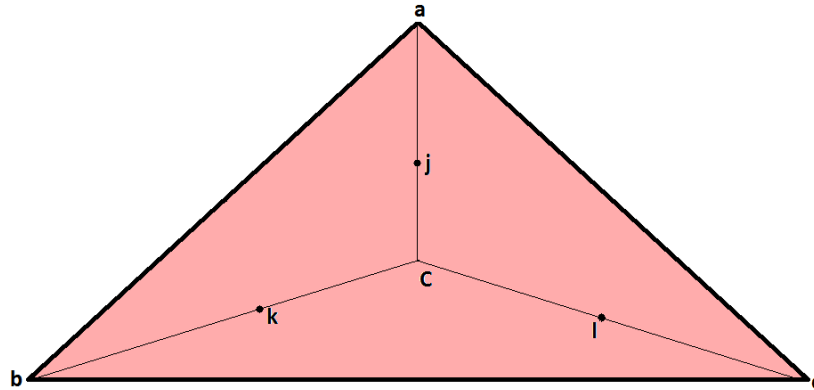


Figura 4.16 – Disposição dos pontos de interesse em cada triângulo da malha STL.

Obviamente, é possível calcular inúmeros pontos no interior de cada triângulo, mas uma vez que o interesse da aplicação em questão se volta para peças com maior grau de complexidade, torna-se evidente que não há necessidade de calcular mais pontos no interior de cada triângulo visto que as malhas STL de peças de elevada complexidade aumentam exponencialmente o número de triângulos necessários fazendo com que cada triângulo esteja ligado a uma área muito reduzida da peça.

Relembra-se que a resolução espacial da temperatura, para além de estar limitada pela resolução da malha de triângulos, está inerentemente associada à resolução disponibilizada pela câmara termográfica, que por sua vez está associada à distancia física entre objetiva da câmara e o objeto.

É importante ressaltar o significado da resolução do sistema de medição no caso presente. Quando se está a referir à resolução conferida pela distribuição da malha de triângulos esta trata-se da resolução espacial do sistema de medição. Quando se refere a resolução do transdutor de medição em si, câmara termográfica, trata-se da resolução na medição da temperatura de cada pixel, resolução esta que permanece constante para o mesmo sensor.

Com este método não só é possível melhorar a resolução espacial do sistema de medição como também é possível minimizar o erro na medição da temperatura do objeto, uma vez que, no mesmo triângulo, pode existir um gradiente térmico acentuado que faça flutuar a intensidade dos pixels da imagem termográfica.

Determinando os pontos necessários que se encontram delimitados pela região de um dado triângulo, é então calculada uma média da intensidade dos pixels que ultimamente representará a temperatura referente a cada triângulo, valor este que representará a temperatura de cada triângulo.

Como existe a representação matricial dos vértices e triângulos da malha que representa a peça, é facilmente adicionada uma nova coluna à matriz com os valores da temperatura lida (Figura 4.17).

| $x$      | $y$      | $z$      | $T$      |
|----------|----------|----------|----------|
| $x_1$    | $y_1$    | $z_1$    | $T_1$    |
| $x_2$    | $y_2$    | $z_2$    | $T_2$    |
| $\vdots$ | $\vdots$ | $\vdots$ | $\vdots$ |
| $x_n$    | $y_n$    | $z_n$    | $T_n$    |

Figura 4.17 – Coordenadas dos vértices referentes a cada triângulo, associados com a temperatura do seu respetivo triângulo.

#### 4.5 Modificação do STL com *software* de modelação sobre malhas tridimensionais

Antes de avançar para testes que comprovem a validade do algoritmo, nesta secção são abordadas as modificações que podem ser efetuadas sobre os ficheiros da peça e que ultimamente auxiliam o funcionamento mais expedito do algoritmo e, em alguns casos, aumentam a própria resolução espacial do sistema de temperatura.

Assim sendo foi estudada, e implementada, a possibilidade de fazer uma edição controlada sobre a malha do STL.

Esta edição de malha traz grandes vantagens no sentido em que permite resolver vários problemas e, é feita externamente, ou seja, não tem qualquer relação com o algoritmo escrito em *Matlab*. Assim sendo, é necessário a introdução de *softwares* que possibilitem a edição de malhas tridimensionais. Um dos *softwares* selecionados para esse efeito, foi o *MeshLab*.

O *MeshLab* é um programa *open source* que permite o processamento e edição de malhas triangulares tridimensionais. Oferece um conjunto de ferramentas de *rendering*, limpeza, inspeção, edição, texturização e conversão de malhas. Permite processar dados provenientes de tecnologias de varrimento tridimensional e preparar modelos para fabrico aditivo [18].

Um dos casos típicos onde se comprova que a reestruturação da malha STL é muito proveitosa, é na organização dos triângulos em superfícies redondas.

Para melhor entender esta problemática, tome-se como exemplo a Figura 4.18.

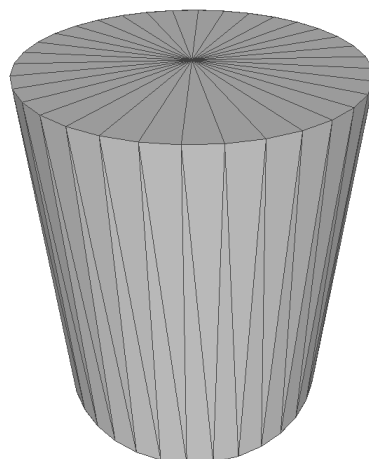


Figura 4.18 – Malha STL de um cilindro.

A forma como os triângulos estão dispostos, com a hipotenusa a ligar a base ao topo do cilindro, constitui um grave problema na atribuição do mapa de temperaturas do sólido. Na eventualidade de o gradiente térmico superficial se apresentar, por exemplo, mais evidente no topo do cilindro, irão ocorrer erros na medição da temperatura, uma vez que a temperatura é atribuída individualmente a cada triângulo.

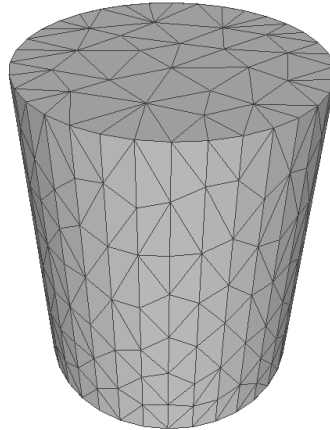


Figura 4.19 – *Remeshing* da malha STL do cilindro (*3 matic*).

É notoriamente possível obter um reposicionamento mais favorável à medição de temperatura dos triângulos sobre a superfície do sólido.

Note-se que para obter a estruturação de malha obtida na Figura 4.19, foi necessário utilizar um *software* de modelação de malha tridimensional diferente do anteriormente referido, que possui ferramentas mais evoluídas. Para esse efeito, o programa selecionado foi o *3 Matic* [19], disponível no INEGI.

No decorrer dos capítulos seguintes, de teste e validação do algoritmo, são abordadas esta e outras reestruturações da malha STL, consoante os requisitos do sistema de medição para as peças em questão.

## 5 Exemplos de aplicação do algoritmo e validação

Nesta secção são apresentados os casos de estudo de temperatura para mostrar e validar as capacidades dos algoritmos desenvolvidos. É mostrado o bloco inicial de ensaio que foi analisado durante o desenvolvimento dos algoritmos de visão artificial, e foram analisadas outras duas peças geometricamente mais complexas para se poder avaliar os limites dos algoritmos.

Os casos abordados neste capítulo foram os primeiros a ser feitos no estudo do funcionamento do algoritmo. Assim, inevitavelmente, espera-se que surjam limitações ou defeitos no seu funcionamento. Nesse sentido, neste capítulo serão propostas algumas soluções e será feita uma discussão dos resultados e problemas encontrados no decorrer dos testes.

### 5.1 Teste 1 (bloco)

Tal como referido anteriormente, foi utilizado, por questões de simplicidade, um bloco metálico para efetuar as calibrações necessárias e como primeiro ensaio de medição.

Seguidamente apresentam-se os resultados do algoritmo para três posições distintas da câmara em relação ao sólido.

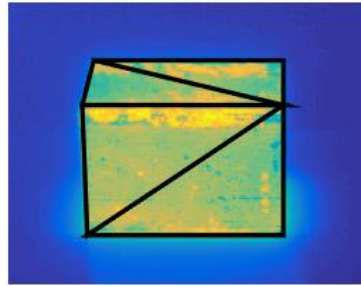
Tabela 3 – Posicionamento da câmara e parâmetros de correção.

|                  | <b>d [mm]</b> | <b>x [mm]</b> | <b>y [mm]</b> | <b>z [mm]</b> | <b>l</b> | <b>n</b> |
|------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------|----------|
| <b>Posição 1</b> | 1600          | 0             | -600          | 300           | -25      | +32      |
| <b>Posição 2</b> | 1580          | -295          | -522          | 300           | +9       | +33      |
| <b>Posição 3</b> | 1580          | -419          | -435          | 300           | +33      | +30      |

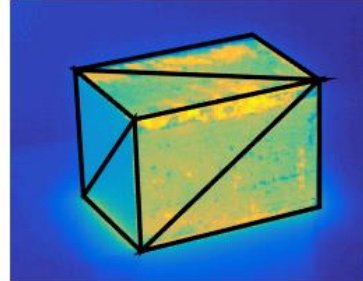
- O parâmetro **d** é a distância do ponto focal da câmara ao plano de projeção sobre o eixo focal e controla a escala do objeto projetado (*zoom*).
- **x**, **y** e **z** são as coordenadas da posição do ponto focal da câmara no referencial global (recordar a Figura 4.5).
- Os parâmetros **l** e **n** são os deslocamentos segundo os eixos dos **x** e dos **y**, respetivamente, e têm a função de corrigir os parâmetros intrínsecos da câmara, ou seja, ajustam a posição da representação do STL face à imagem termográfica.

A interface gráfica descrita em 4.3.4 é utilizada para determinar estes parâmetros de correção. Estes encontram-se aqui descritos para que o leitor possa ter noção das variações que estes valores podem tomar, sendo que não é necessário referir estes parâmetros nas secções seguintes.

### Posição 1



### Posição 2



### Posição 3

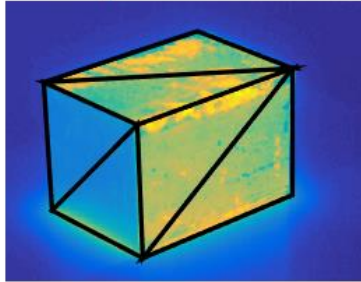


Figura 5.1 – Projção do STL sobre diferentes posições da câmara.

A partir dos resultados obtidos, é possível retirar algumas limitações do algoritmo.

Por defeito, o *software* de CAD utilizado na criação das peças de teste, *SolidWorks*, mesmo quando instruído para exportar o ficheiro STL na resolução máxima possível, define as faces planas apenas com dois triângulos cada.

Na eventualidade do objeto apresentar um gradiente térmico superficial de grande disparidade, é de grande interesse que se atribuam valores de temperatura a mais secções (triângulos) da superfície. Sintetizando, é necessário um incremento controlado do número de triângulos na malha STL.

Através do *MeshLab*, é possível aplicar um filtro que subdivide as superfícies triangulares do modelo. Este simplesmente percorre iterativamente os triângulos de cada face aplicando um esquema de subdivisão de triângulos onde todas as arestas são divididas no seu ponto central.

Na

Figura 5.2 podem-se observar os resultados de duas iterações do filtro sobre o STL do bloco.

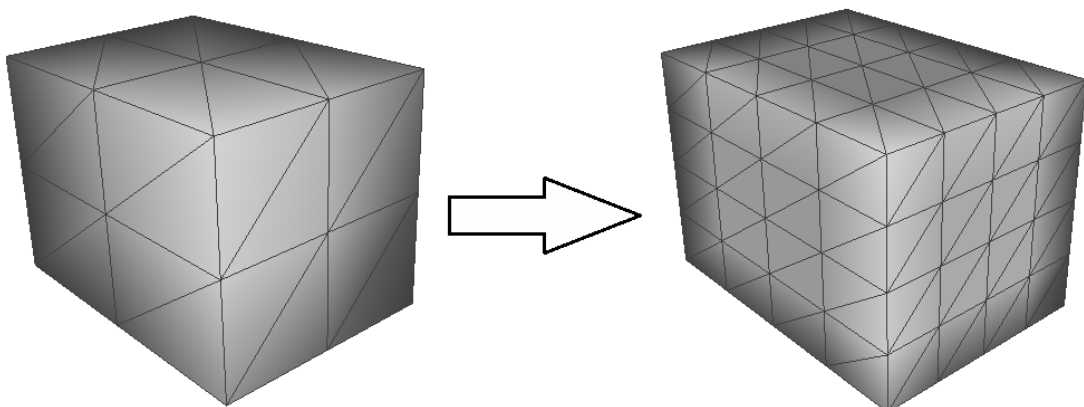


Figura 5.2 – *Remeshing* da malha STL.

Aplicando então as transformações referidas, com apenas uma iteração do filtro, pode-se obter o seguinte resultado (Figura 5.3).

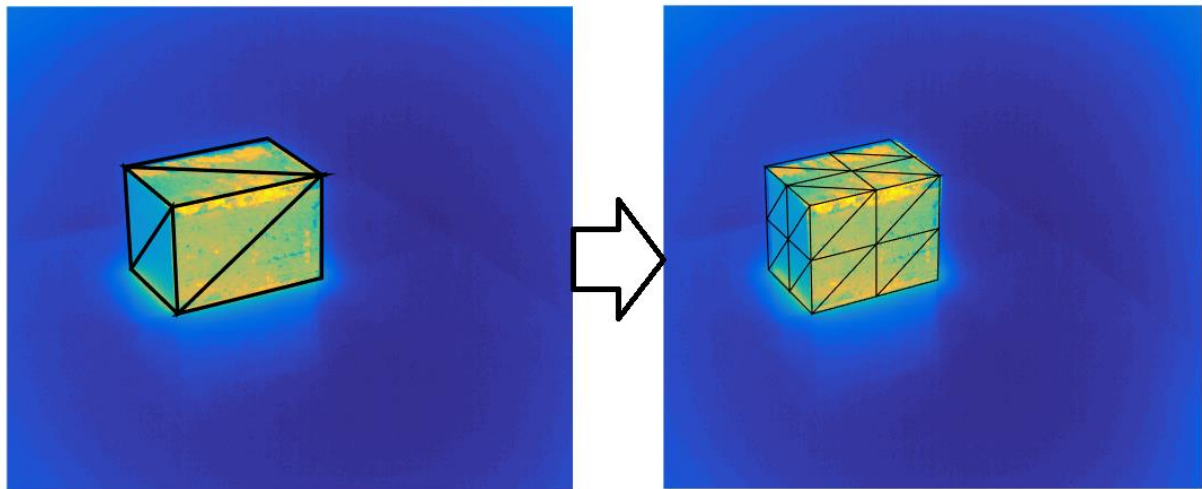


Figura 5.3 – Comparação da imagem termográfica com malhas STL distintas.

Com esta operação, é expectável um melhoramento significativo da resolução do sistema de medição de temperatura. Na Figura 5.4, pode-se observar uma atenuação na distribuição de temperaturas médias dos triângulos sobre a superfície.

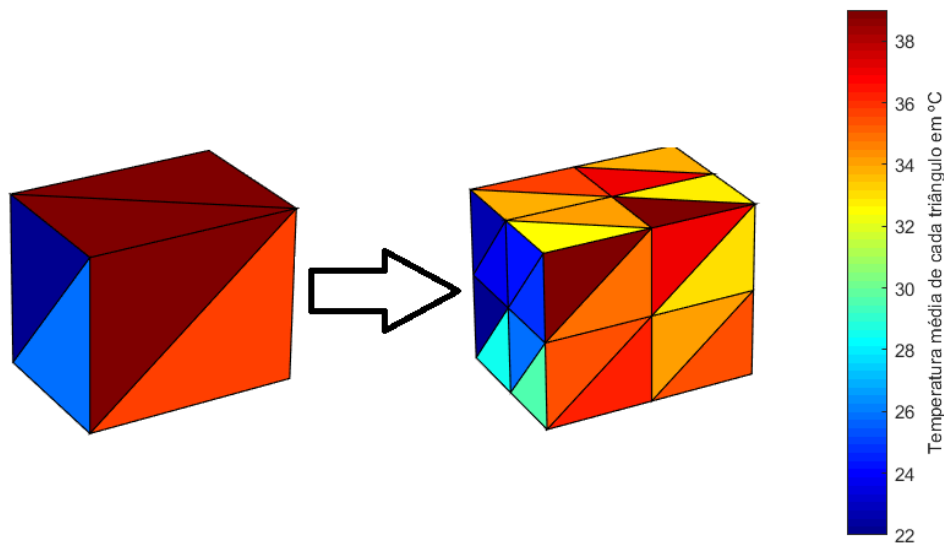


Figura 5.4 – Melhoramento da resolução espacial do sistema de medição para o bloco metálico.

## 5.2 Teste 2 (prisma)

Feita a análise do bloco em aço, objeto de maior simplicidade geométrica, é fulcral testar os algoritmos desenvolvidos em geometrias mais complexas.

O segundo caso de estudo desenvolvido foi um prisma hexagonal com uma das faces arredondadas. É necessário incluir na geometria do sólido uma face redonda de modo a aumentar significativamente a resolução do STL e assim testar a validade do algoritmo, particularmente no discernimento dos triângulos visíveis e invisíveis.

A peça em questão foi construída utilizando a impressora tridimensional já referida. O filamento utilizado foi de ABS, uma vez que este polímero suporta temperaturas elevadas sem sofrer nenhum tipo de deformação.

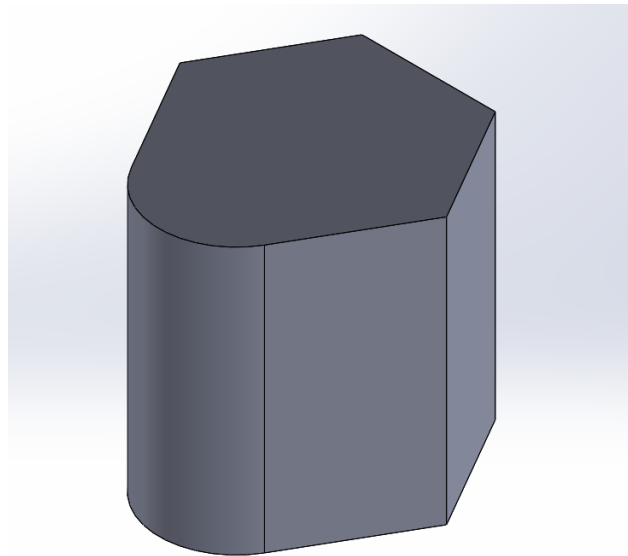


Figura 5.5 – CAD do prisma em *Solidworks*.

Uma vez que o presente trabalho está inserido nas tecnologias de fabrico aditivo, é relevante abordar, de uma forma ligeira, a sequência de fabrico da peça de teste.

Após exportado o STL para o software *Slicer* da impressora, há uma série de parâmetros que podem ser alterados, nomeadamente o enchimento da peça.

Na Figura 5.6 podem-se observar dois dos tipos de enchimento passíveis de seleccionar. Uma vez que se tenciona aquecer a peça a temperaturas relativamente elevadas, optou-se por realizar um enchimento muito completo da peça. Isto é, tornar o corpo o mais denso possível de modo a evitar deformações causadas pelo aquecimento contínuo na peça. O padrão do enchimento escolhido foi uma *Hilbert Curve*<sup>2</sup>.

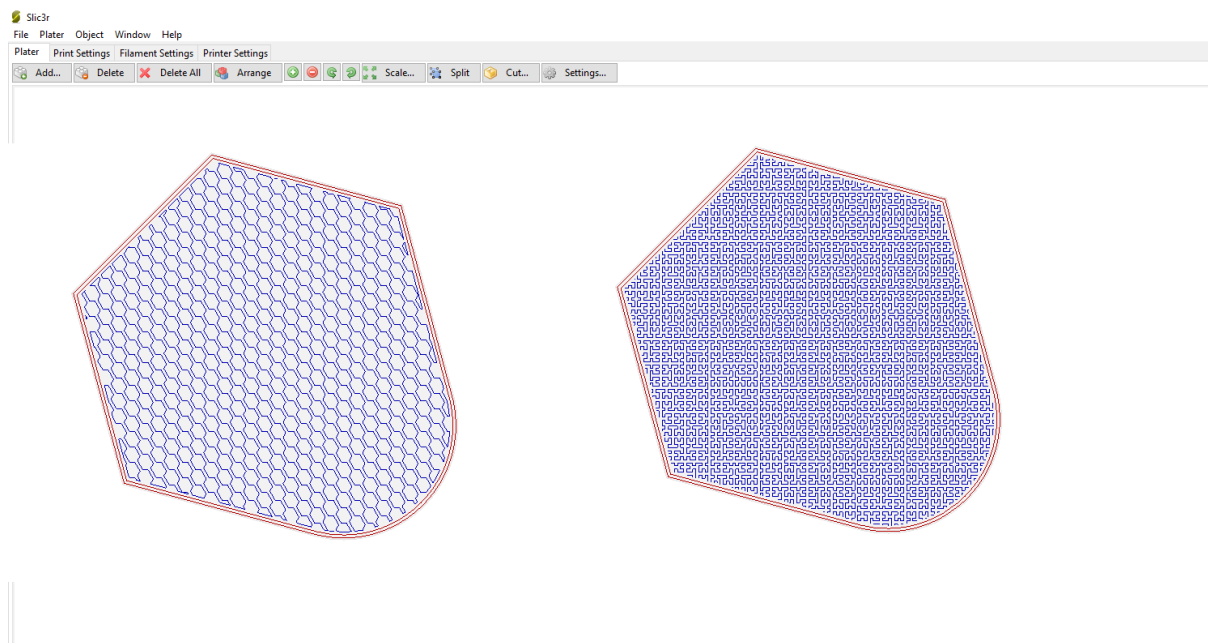


Figura 5.6 – Peça com padrão de enchimento a 50% (esq.) e 99% (dir.) (*Slic3r*).

<sup>2</sup> A *Hilbert Curve* é uma função de enchimento contínua do espaço plano (podendo ser formada tridimensionalmente) comum em aplicações de fabrico aditivo [21].

Note-se que este padrão de enchimento aumenta consideravelmente o tempo de impressão e o volume de material utilizado. No caso desta peça, com um volume de aproximadamente  $60\text{cm}^3$ , a impressão demorou cerca de 12 horas.

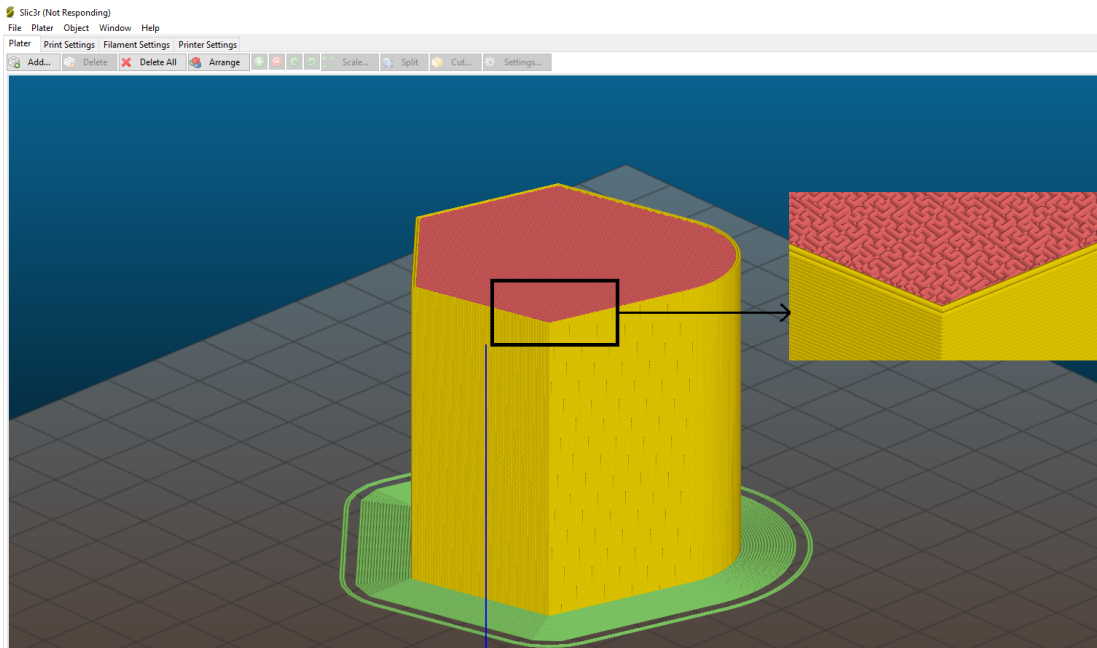


Figura 5.7 – Modelação virtual da peça a imprimir e aproximação do padrão de enchimento (*Slic3r*).

Ainda no *software slicer* existem mais parâmetros importantes a seleccionar tais como a temperatura do tabuleiro e do extrusor; a velocidade e aceleração do extrusor; o diâmetro do filamento extrudido e a altura das camadas.

Outro parâmetro a definir é o perímetro e as distâncias da “saia” que circunda o objeto (representada a verde na Figura 5.7). Esta “saia” são os primeiros filamentos depositados que se assemelham ao contorno do objeto e servem para o utilizador fazer uma análise qualitativa sobre a impressão que irá decorrer.

Na Figura 5.8 podem-se observar os resultados da aplicação do algoritmo desenvolvido sobre diferentes *frames* termográficos. Para melhor compreensão, a peça foi aquecida de forma a gerar diferentes gradientes térmicos e a câmara termográfica foi colocada em diferentes posições em relação ao objeto.

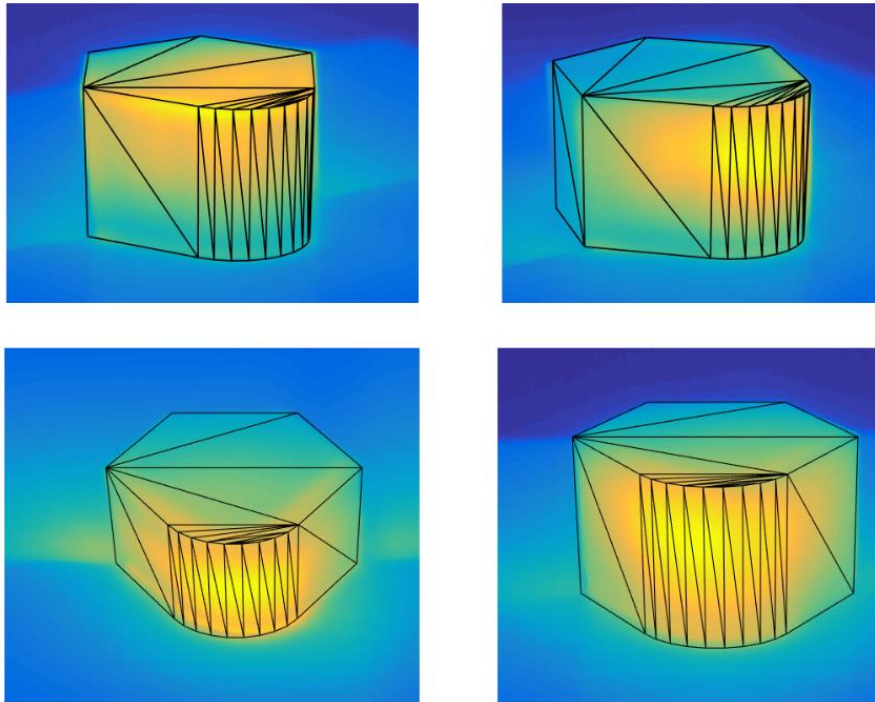


Figura 5.8 – Resultados experimentais (câmara em posições distintas em diferentes instantes).

Até agora, apenas é demonstrado o funcionamento do algoritmo na sobreposição do STL sobre a imagem termográfica.

Assim como referido no capítulo 4, a sobreposição da malha STL à imagem térmica é apenas um passo intermédio para o objetivo final, a medição de temperatura sobre a superfície da peça.

Tome-se como exemplo a seguinte imagem termográfica do prisma (Figura 5.9).

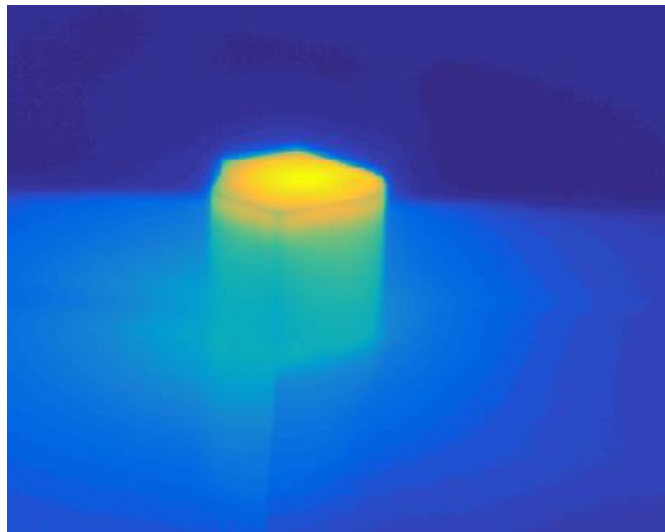


Figura 5.9 – Imagem termográfica do prisma.

Após efetuada a devida sobreposição da peça sobre a sua representação real, é necessária então a atribuição das temperaturas aos triângulos da malha STL (metodologia exposta em 4.4).

A partir da leitura do ficheiro da peça, o algoritmo determina os pontos indicados (Figura 5.10) para fazer a média ponderada das temperaturas de cada triângulo.

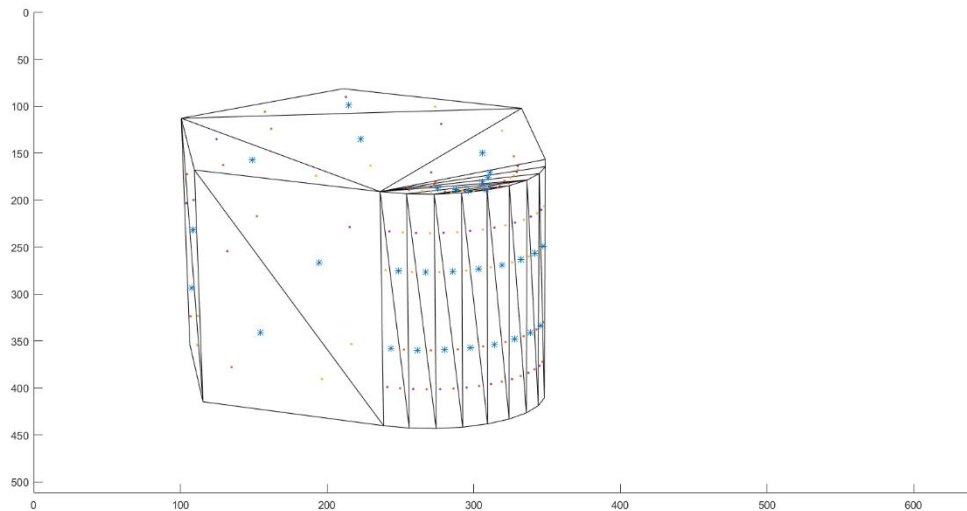


Figura 5.10 – Localização de pontos para efetuar a média de temperaturas.

Assim que os pontos são calculados, e como o STL está corretamente sobreposto sobre a imagem térmica, são atribuídas temperaturas a cada triângulo da malha, obtendo-se assim uma leitura que, ainda que dependente da imagem térmica, é representada num ficheiro à parte. Esta “independência” de ficheiros torna-se vantajosa para mais tarde o algoritmo transferir dados para um sistema de controlo, por exemplo.

Na Figura 5.11 pode-se observar uma escala de cores atribuída à malha de triângulos, com base na leitura da imagem térmica. Claramente que se manifesta uma temperatura muito superior para os triângulos na face de topo da peça, tal como se pode observar na imagem termográfica do objeto (Figura 5.9).

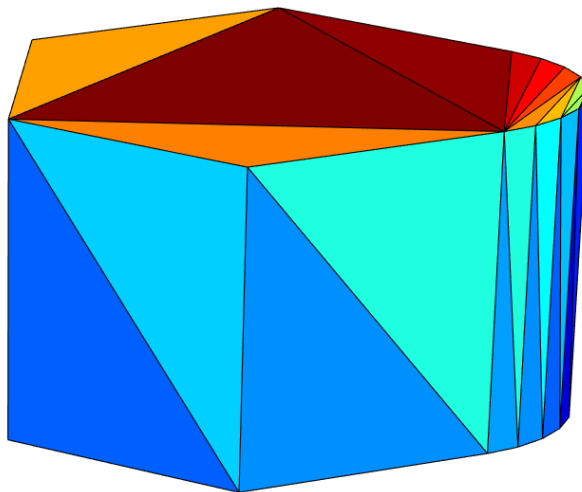


Figura 5.11 – Temperatura atribuída aos triângulos em escala de cores.

Novamente, a partir dos resultados obtidos, é possível retirar algumas limitações do funcionamento do algoritmo.

Tal como na situação do bloco da secção 5.1, as superfícies planas do sólido carecem de uma maior definição na leitura de temperaturas, uma vez que são definidas por triângulos de grande dimensão.

Na superfície cilíndrica, ocorrem também erros na atribuição das temperaturas aos triângulos. No entanto, esta não se deve ao número reduzido ou à dimensão dos triângulos, mas sim à orientação e estruturação dos mesmos.

Para este problema sugere-se que seja efetuada uma alteração da distribuição dos triângulos da malha STL, seguindo uma metodologia semelhante à que é exposta em 4.5.

O prisma hexagonal é um caso de estudo particularmente interessante, pois conjuga dois refinamentos de malha distintos, nomeadamente a incrementação de triângulos e a alteração na sua disposição.

Assim, nas faces planas do prisma (Figura 5.11) é necessário a subdivisão em mais triângulos e na face semicilíndrica é necessária uma alteração na disposição dos triângulos.

Na Figura 5.12 estão representados os STL do prisma reestruturado em *3 matic*, por dois processos diferentes, ou seja, o mesmo modelo com malhas de forma e distribuição de triângulos distintas. Note-se que para o caso prático de atribuição de valores de temperatura a elementos da malha da superfície da peça, a malha à direita tem a distribuição de triângulos mais adequada, sendo então essa a utilizada para teste.

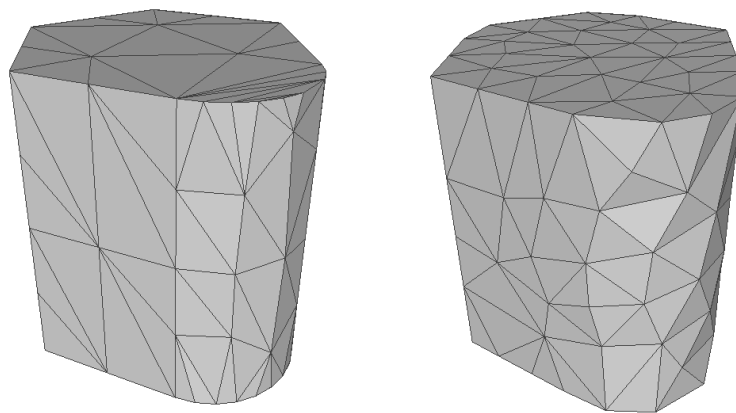


Figura 5.12 – Malha reestruturada do STL do prisma (*3 matic*).

Seguidamente apresentam-se os resultados obtidos com a nova malha, onde é notável um melhoramento substancial na resolução do sistema de medição face aos resultados obtidos na Figura 5.11.

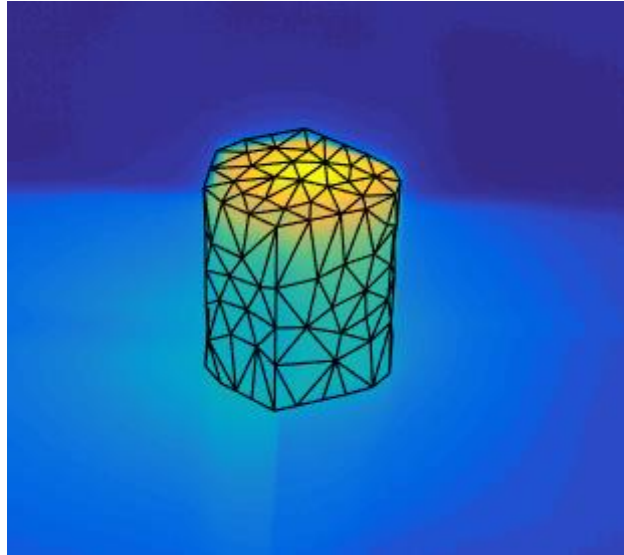


Figura 5.13 – Sobreposição da nova malha à imagem termográfica.

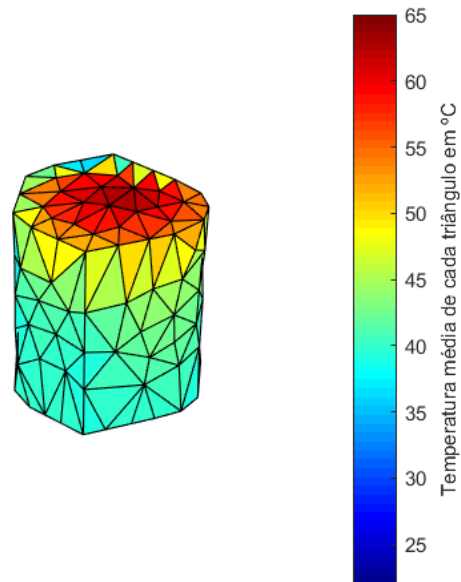


Figura 5.14 – Medição de temperatura em cada triângulo.

### 5.3 Teste 3 (conduta)

Como teste de validação final do algoritmo é tido como objeto de estudo uma estrutura baseada em condutas de admissão da indústria aeroespacial, fazendo assim uma ligação com o projeto *Fibr3d* (Anexo A). Esta geometria é particularmente interessante pois apresenta uma superfície curva com alhetas dispostas sobre a mesma com uma certa curvatura (*fillets*).

Neste caso, a complexidade do STL é bastante elevada devido ao perfil curvo da peça, e por isso, é necessário aplicar operações que visem simplificar a malha da peça.



Figura 5.15 – CAD de conduta típica em aplicações aeroespaciais.

A simplificação da malha do STL causa uma redução no tempo de cálculo do algoritmo. O funcionamento do código desenvolvido envolve cálculos numéricos para determinar pontos no espaço (vértices dos triângulos), ou seja, é compreensível que quanto maior for a resolução do STL maior o número de pontos que o algoritmo tem de determinar. Em particular, na computação necessária para a determinação das superfícies visíveis, o número de triângulos faz aumentar muito significativamente o tempo de cálculo do programa.

Compreenda-se que, em ficheiros STL de peças com geometrias muito complexas, o número de triângulos necessários para a descrever a peça suplanta a resolução da própria câmara aquando a sobreposição do ficheiro e da imagem termográfica, pelo que a simplificação do STL em pouco ou nada reduz a própria resolução espacial do sistema de medição.

Antes de apresentar as iterações de simplificação na malha STL em *MeshLab*, mostra-se a resolução máxima e mínima do ficheiro exportado pelo *software* de CAD (Figura 5.16).

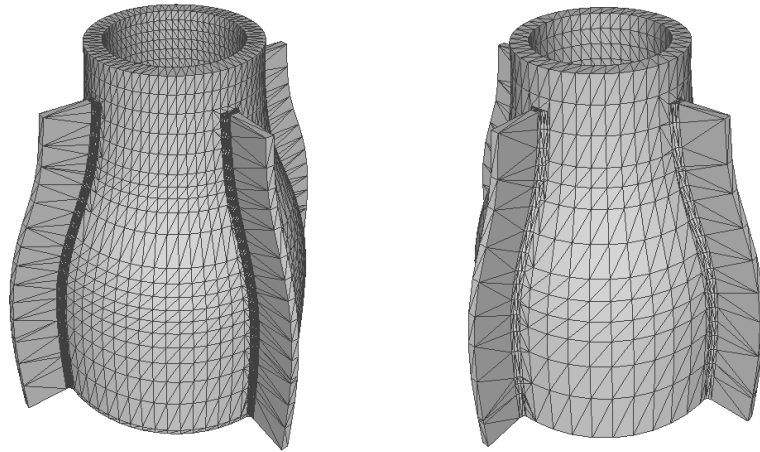


Figura 5.16 – Resolução máxima e mínima do STL da conduta quando exportado em *SolidWorks*.

De modo a alcançar tempos de simulação mais expeditos, é necessário simplificar ainda mais a malha. Para tal, em *MeshLab*, recorre-se a um processo simplificação de malha com uma estratégia baseada na dizimação incremental triângulos com base em cálculos de erro na quádrica da superfície.

Seguidamente, podem-se observar três iterações do processo de simplificação de malha.

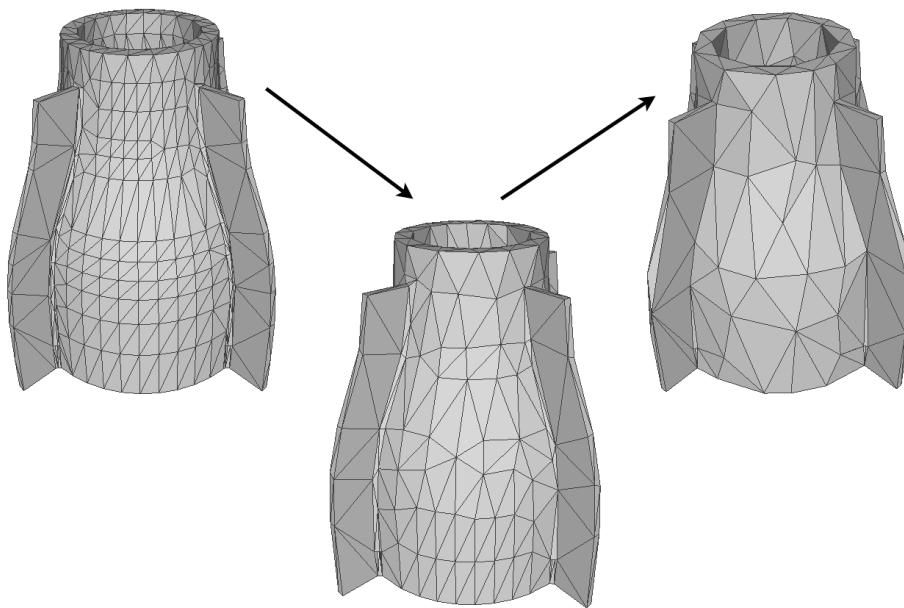


Figura 5.17 – *Remeshing* da malha STL da conduta (*Meshlab*).

Apesar de possível, não é necessário proceder a mais simplificação da malha uma vez que esta poderia começar a prejudicar a estrutura da peça, e a resolução espacial da do sistema na medição de temperatura. Na Figura 5.17, pode-se observar que a conduta já começa a sofrer uma certa deformação geométrica, nomeadamente nos contornos das alhetas. Assim, para não prejudicar a capacidade da medição do sistema, é seleccionada a malha central para efetuar os testes de validade do algoritmo.

Seguidamente, apresentam-se os resultados de medição de temperatura de uma das *frames* termográficas da conduta.

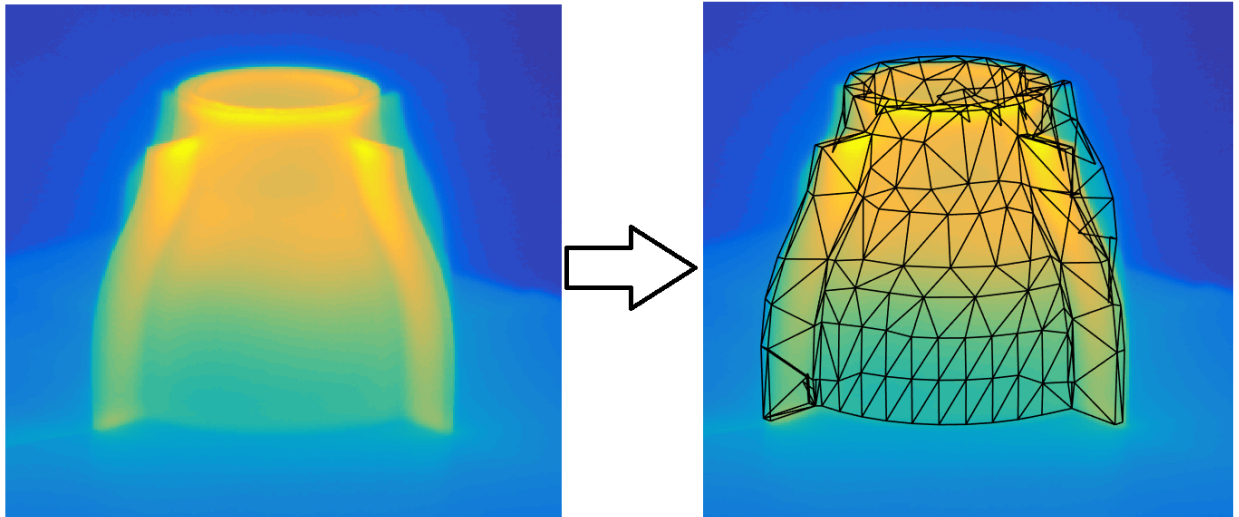


Figura 5.18 – Imagem termográfica da conduta e sobreposição do objeto (STL) na imagem.

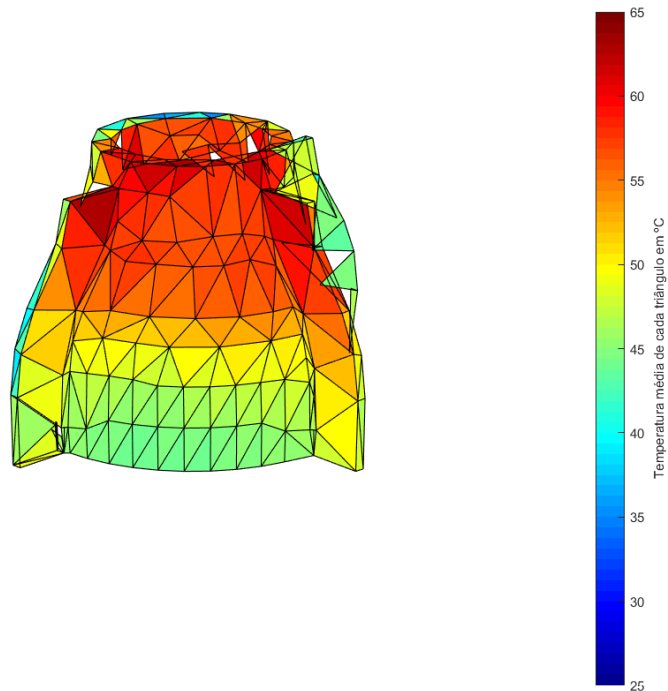


Figura 5.19 – Malha com a distribuição das temperaturas.

Pela análise das imagens, e observando a Figura 5.19 em particular, é possível concluir que ainda existem algumas limitações no algoritmo, nomeadamente no cálculo dos triângulos visíveis uma vez que existem triângulos sem preenchimento. Esta e outras limitações do algoritmo são discutidas na secção seguinte.

## 5.4 Discussão de resultados

### Novos métodos de edição da malha

É evidente que existem refinamentos a introduzir no algoritmo de processamento de imagem e na remodelação das malhas STL.

No caso da conduta, secção 5.3, onde é necessário simplificar a malha, há um método alternativo que consiste em remover triângulos que se sabe à partida que não estão visíveis pela câmara. Para melhor ilustrar este exemplo, tenha-se como referência o caso em que a conduta tem a base de diâmetro maior apoiada no chão, assim como disposta na Figura 5.18.

Nesta situação, sabe-se à partida que parte dos triângulos no interior da conduta, desde que o ângulo de elevação não seja próximo de  $90^\circ$ , não estão visíveis pela câmara. Em situações como esta, a remoção de triângulos na superfície interior, em nada prejudica a medição de temperatura e diminui consideravelmente a resolução da malha. Na Figura 5.20 exhibe-se a conduta após esta operação.

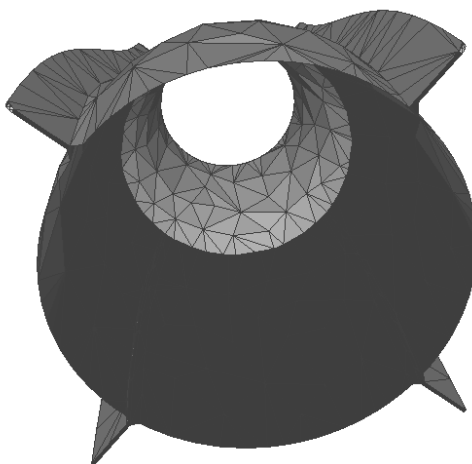


Figura 5.20 – Malha da conduta com secção de triângulos removidos (*3 matic*).

Facilmente se compreende que este método não é aplicável em muitas situações, pelo que esta situação é apenas aqui referida como uma alternativa em aplicações futuras.

A edição de malhas tridimensionais é uma área que se provou ser muito importante no desenvolvimento do sistema de medição presente, o seu estudo e compreensão é uma funcionalidade que traz grande interesse para a aplicação em causa pois certamente levará a grandes melhorias no funcionamento do sistema de medição.

### Alterações no princípio de funcionamento do algoritmo

Ainda no exemplo da conduta, encontram-se limitações na secção do algoritmo que determina as superfícies visíveis do objeto. Apesar de ser uma área da computação gráfica de grande complexidade, existem diferentes métodos de efetuar esta computação que devem ser estudados e testados na aplicação presente. Sem entrar em grande especificidade, seria interessante explorar algoritmos de perceção de profundidade de campo; algoritmos de varrimento de linhas que preencham os triângulos da malha ou um algoritmo de *Warnock* [20].

### Deformação da malha

Outra observação que pode ser retirada, desta feita dos exemplos 5.2 e 5.3, é a problemática associada à deformação geométrica causada pela reestruturação da malha. Em casos em que a câmara esteja posicionada na periferia da peça, a deformação mencionada pode dificultar a sobreposição do STL sobre os contornos da representação em imagem do objeto, o que, consequentemente, leva a erros de medição de temperatura.



## 6 Aplicação do sistema de medição desenvolvido

### 6.1 Descrição

No sentido de por em prática o sistema de medição desenvolvido, neste capítulo são descritos e apresentados ensaios em que o objetivo é analisar a variação do gradiente térmico superficial de uma peça em função do tempo.

Assim, utilizando peças previamente estudadas em capítulos anteriores, tenciona-se analisar a evolução de temperatura em três diferentes secções (triângulos) do objeto. Para tal, serão representados gráficos que mostram a evolução temporal térmica de diferentes triângulos da malha STL em zonas da peça que se julguem relevantes para medição.

Antes de proceder a tal medição, é necessário desenvolver uma função que faça a câmara capturar uma quantidade considerável de imagens a um *frame rate* constante, bem como um processo automatizado que efetue os algoritmos já desenvolvidos sobre as novas imagens adquiridas. É imperativo que a frequência de captura da imagem seja constante e relativamente curta, para que possa ser possível obter uma análise precisa dos resultados obtidos.

A solução adotada para a aquisição de imagem foi uma função em *Matlab* que efetua um *trigger* manual da câmara a uma frequência constante, para um número de *frames* escolhido atempadamente. Após a aquisição de imagem, o algoritmo de medição é aplicado individualmente a cada *frame*, gerando desta forma os resultados de medição de temperatura pretendidos de forma automática para um determinado ensaio. Obtidos estes valores, é possível traçar os gráficos de evolução de temperatura para os triângulos da malha selecionados.

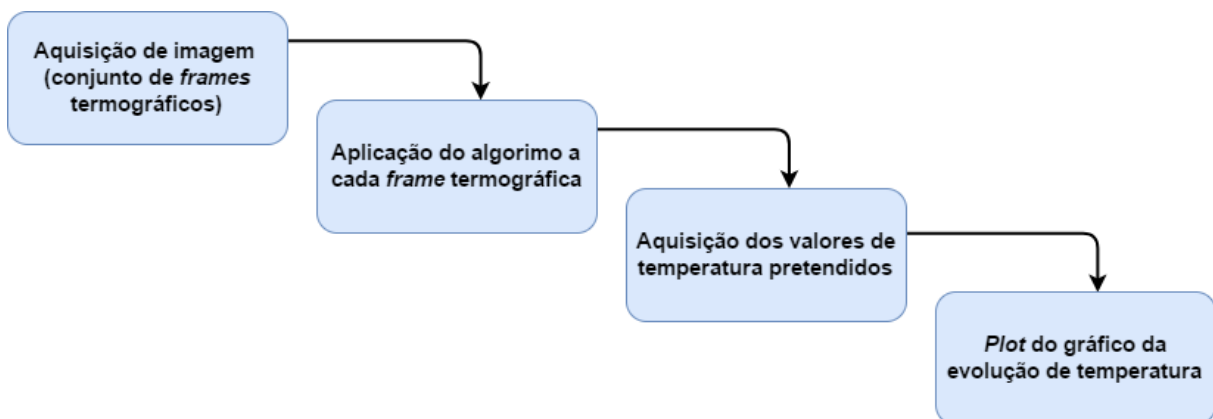


Figura 6.1 – Estrutura do algoritmo de ensaios.

A aquisição de imagem nas experiências realizadas é feita a um *frame* por segundo.

É importante referir que, as experiências realizadas têm o propósito de exemplificar a aplicação desenvolvida, nomeadamente a medição de temperatura de peças sem contacto e com alta resolução. As medições aqui efetuadas são apenas demonstrativas da capacidade de resolução espacial do sistema de medição e dos seus respetivos algoritmos, não tendo, à partida, mais nenhum propósito científico.

## 6.2 Aplicação e resultados

### 6.2.1 Estudo de arrefecimento do bloco

Como primeiro ensaio foi utilizado o mesmo bloco metálico utilizado em 5.1, pretendendo-se estudar o comportamento do arrefecimento do bloco após este ter sido aquecido superficialmente. São selecionados triângulos em cada face e apreciadas as suas evoluções de temperatura individualmente.

Durante 30 segundos, a superfície do bloco foi aquecida manualmente com uma pistola de ar quente (300 °C) e deixado à temperatura ambiente. Durante três minutos, foram registadas segundo a segundo, imagens termográficas do bloco em repouso.

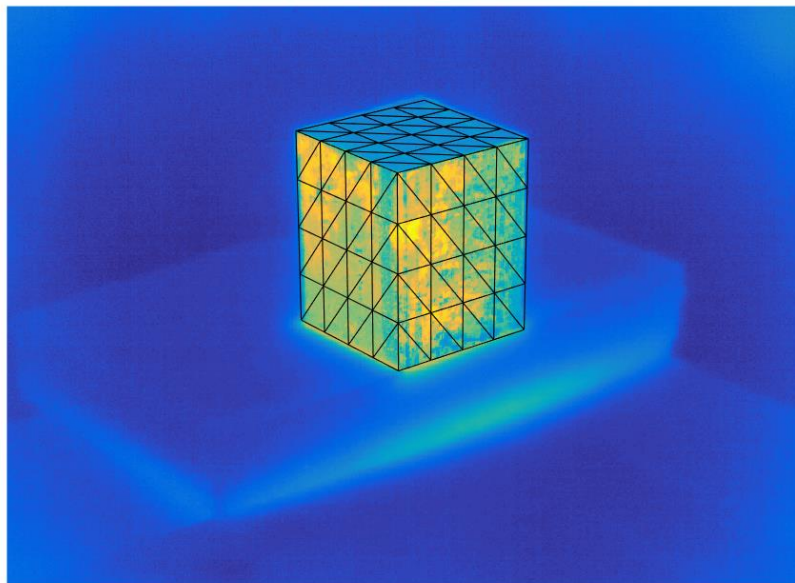


Figura 6.2 – Termograma do bloco.

Uma vez que a secção do algoritmo que calcula os triângulos visíveis altera de forma não linear a sequência dos triângulos na matriz que dita a organização da malha, é necessário recorrer a uma metodologia de observação gráfica para selecionar os triângulos de interesse.

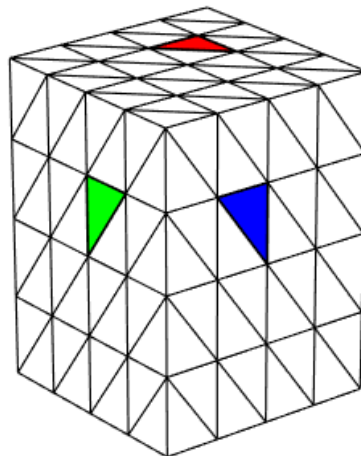


Figura 6.3 – Localização dos triângulos selecionados para a medição de temperatura.

Neste caso, os triângulos que se julgam de interesse selecionar, um em cada face, são os que se podem observar na Figura 6.3. Posto isto, é possível estudar a temperatura em cada face.

Os resultados da evolução temporal da temperatura dos triângulos podem ser observados na Figura 6.4. Assim, como esperado, as temperaturas superiores decrescem mais rapidamente estabilizando após algum tempo.

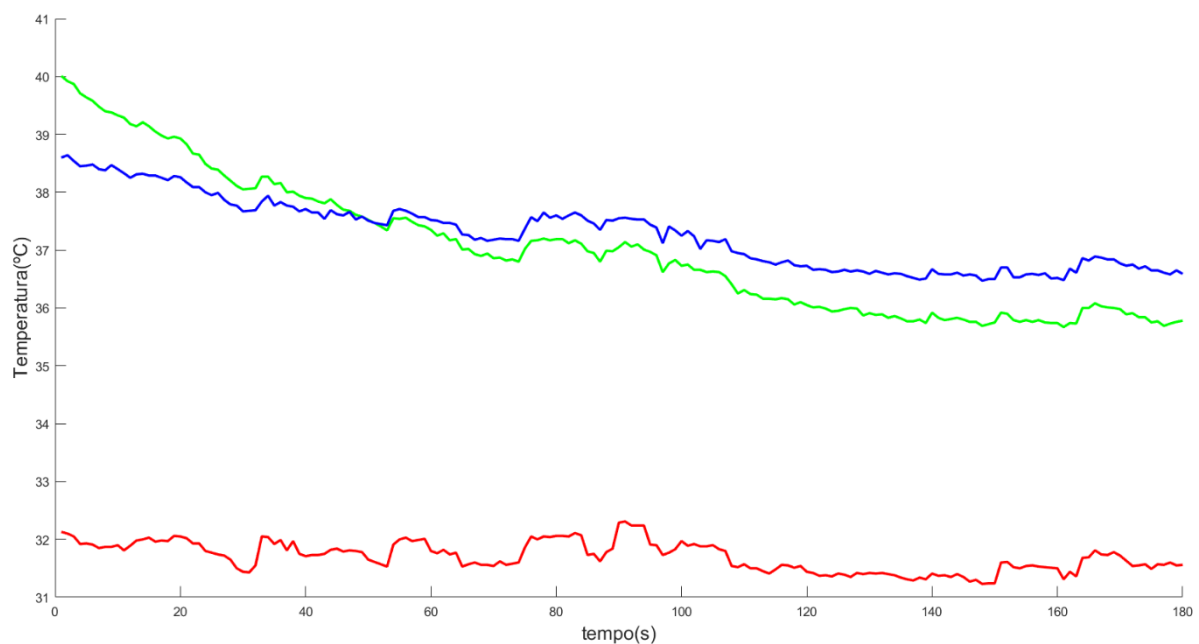


Figura 6.4 – Evolução temporal da temperatura dos triângulos selecionados no bloco.

É interessante notar que as temperaturas tendem a estabilizar em cerca de 36 °C no caso das faces laterais e permanece estável na face de topo. Na verdade, a temperatura ambiente não estava nestes valores, mas o valor lido é defeituoso porque o valor de emissividade imposto à máquina por defeito é de 1, e o valor da emissividade do bloco é de cerca de 0,3 [11]. O facto de as temperaturas nas faces se apresentarem diferentes, tem a ver com o facto da face de topo ser polida. Este detalhe é abordado posteriormente na secção 6.2.3.

### 6.2.2 Estudo de arrefecimento do prisma

Como segundo ensaio foi utilizado o mesmo prisma do teste 5.2. Utilizando novamente a pistola de ar quente, foram aquecidas sucessivamente durante 15, 20 e 25 segundos a face da frente, da esquerda e a de topo, respetivamente, e deixado à temperatura ambiente. Repetindo então o método utilizado na secção anterior, obtêm-se os seguintes resultados:

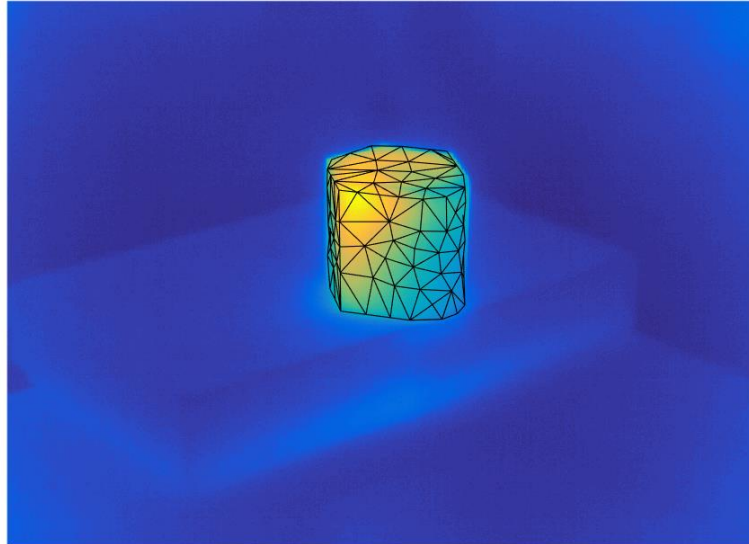


Figura 6.5 – Termograma do prisma.

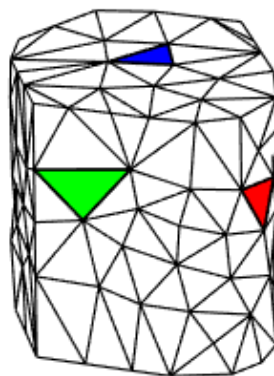


Figura 6.6 – Localização dos triângulos selecionados para a medição de temperatura.

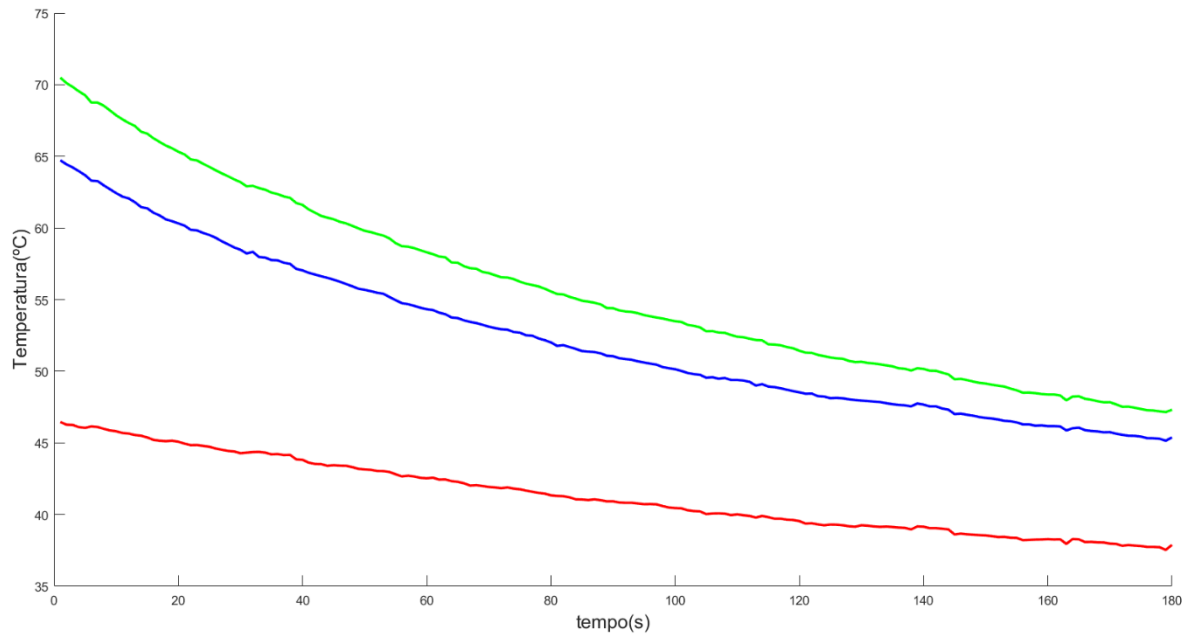


Figura 6.7 – Evolução temporal da temperatura dos triângulos selecionados no prisma.

Nesta situação, observa-se, tal como seria de esperar, um arrefecimento contínuo das faces, obviamente mais acentuado nos triângulos que estão a temperaturas superiores. Nesta situação o valor de temperatura está mais próximo do real uma vez que a emissividade do plástico é mais próxima de 1 [11].

### 6.2.3 Estudo do aquecimento e arrefecimento do bloco

#### 6.2.3.1 Ensaio 1

Neste ensaio, pretende-se analisar o comportamento de diferentes zonas do bloco durante o seu aquecimento e arrefecimento. A pistola aquece continuamente a face de topo, sendo desligada ao fim de 50 segundos; após isso, o bloco é deixado em repouso e analisado no restante tempo. O tempo total da experiência é de 180 segundos.

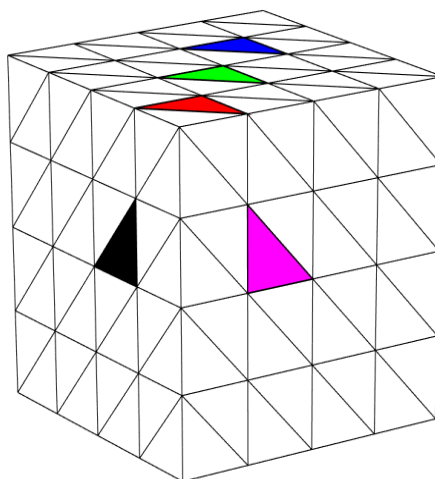


Figura 6.8 – Localização dos triângulos selecionados para a medição de temperatura.

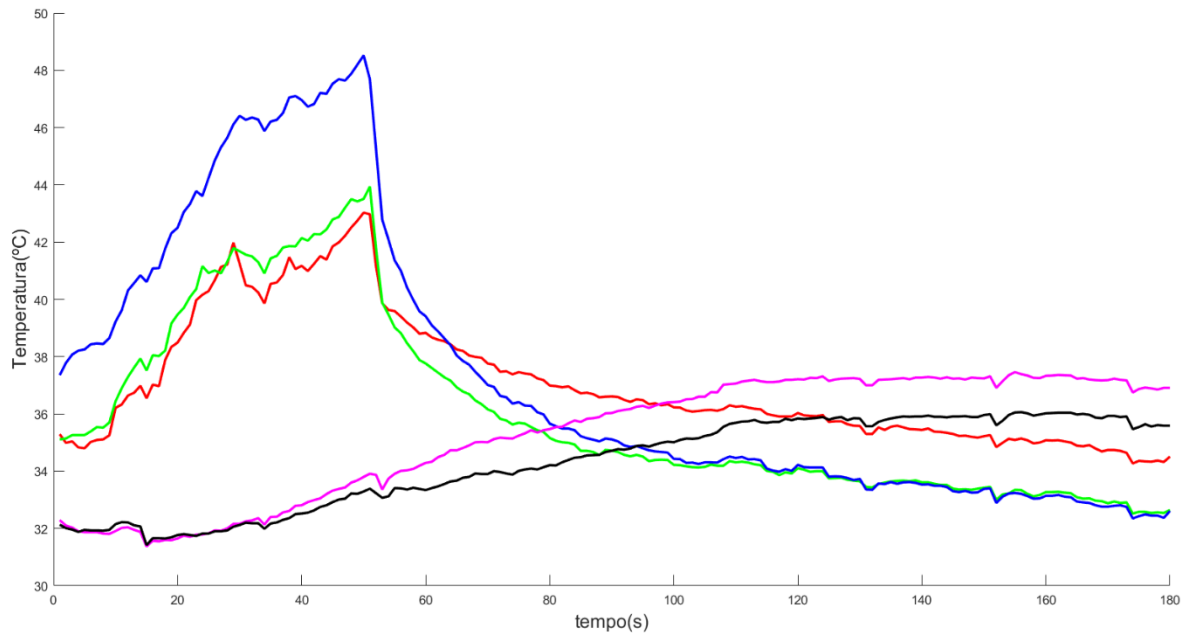


Figura 6.9 – Evolução temporal da temperatura dos triângulos selecionados.

Concluído este ensaio, é possível retirar uma conclusão particularmente interessante.

Conforme pode ser visualizado na Figura 6.9, nos instantes iniciais onde o bloco está a ser aquecido, a temperatura sobe rapidamente, arrefecendo aquando a paragem da pistola. Conforme expectável, por condução, as faces laterais do bloco continuam a aquecer até que estabilizam novamente. Até aqui, a evolução descrita é a expectável da experiência realizada; no entanto, existe uma observação importante a fazer.

A determinada altura ( $\approx 70s$ ) as temperaturas das faces laterais do bloco, começam a ultrapassar a temperatura da face de topo. Fisicamente, não existe qualquer razão para que tal aconteça, caso a superfície do bloco seja homogénea, ou seja, de emissividade igual.

Acontece que, a face de topo encontra-se polida, fazendo com que a leitura da câmara termográfica da temperatura da face superior seja adulterada em relação às faces laterais. A emissividade da superfície polida é inferior à emissividade da superfície lateral do bloco [11].

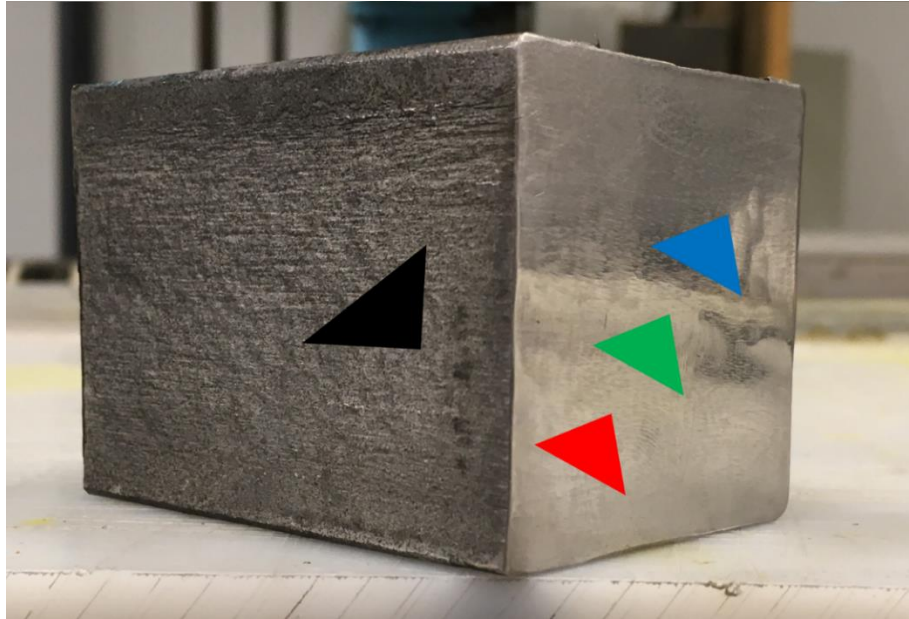


Figura 6.10 – Diferença de superfícies com a representação aproximada dos triângulos utilizados (face lateral à esquerda e face de topo à direita).

Esta problemática pode ser também ilustrada numa sequência de *frames* de determinados instantes da experiência.

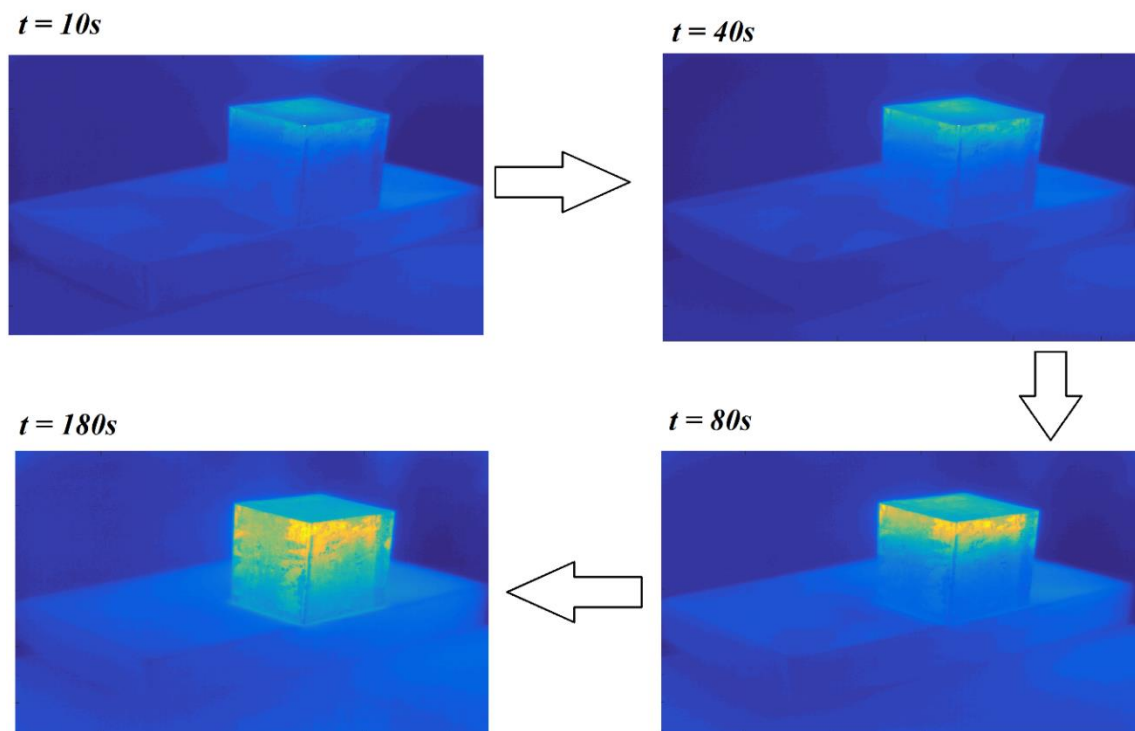


Figura 6.11 – Evolução temporal da imagem termográfica do bloco.

Tirada esta conclusão, será feito um novo ensaio com o mesmo bloco que vise corrigir as limitações encontradas.

### 6.2.3.2 Ensaio 2

Para resolver a problemática encontrada no ensaio anterior, é realizada uma tentativa de homogeneização da superfície de modo a corrigir o facto do valor da emissividade ser díspar nas faces onde se pretende adquirir a temperatura.

Para tal, foi utilizada uma tinta em *spray* preta resistente a altas temperaturas sobre a superfície do bloco. Deste modo espera-se que a emissividade das faces do bloco seja igual.

Realizando então a mesma experiência descrita em 6.2.3.1, aquecendo o bloco aproximadamente 1 minuto e para a mesma disposição de triângulos da Figura 6.8, obtêm-se os seguintes resultados:

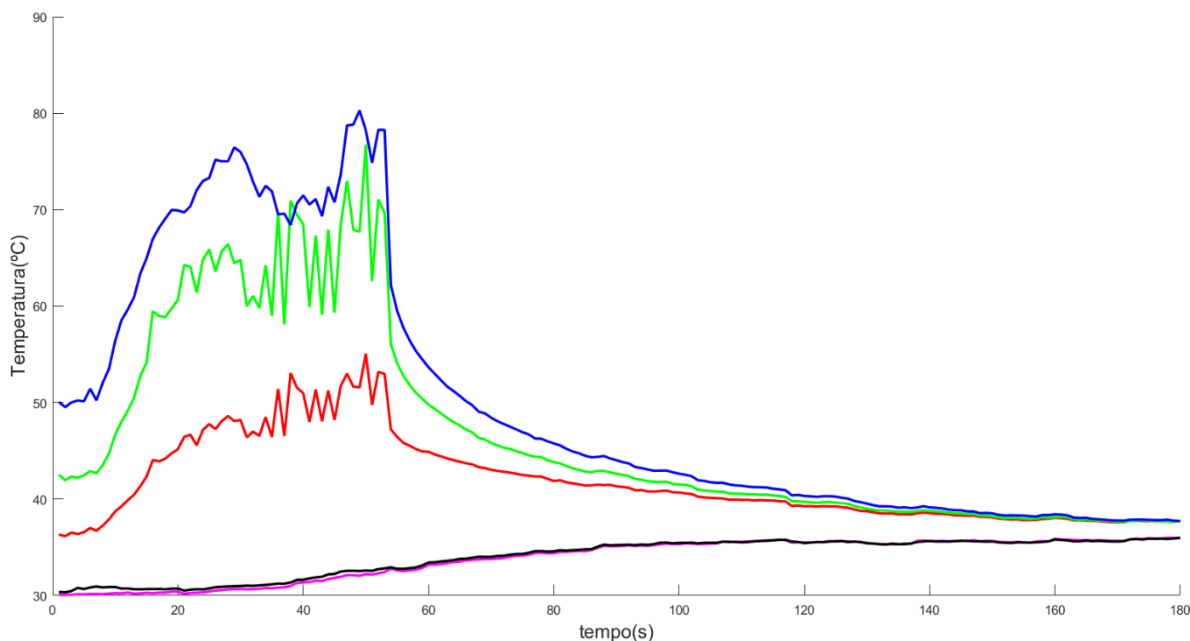


Figura 6.12 – Evolução temporal da temperatura dos triângulos selecionados.

É possível concluir que o problema encontrado no ensaio anterior ficou, à primeira vista, resolvido com o uso de tinta preta.

Tal como esperado, as temperaturas dos triângulos da face superior sobem rapidamente devido à continuidade do fluxo de ar quente sobre a superfície, enquanto que as faces laterais não sofrem alteração da temperatura. Quando a fonte de calor é desligada, a temperatura da face superior sofre uma queda acentuada ao passo que a temperatura das faces laterais começa a subir continuamente devido à condução de calor da face de topo para as laterais. À medida que o tempo passa, as curvas começam a convergir assintoticamente, o que significa que a temperatura do corpo se está a tornar homogénea.

Seguidamente, apresentam-se o bloco pintado e uma sequência de *frames* termográficos da experiência.

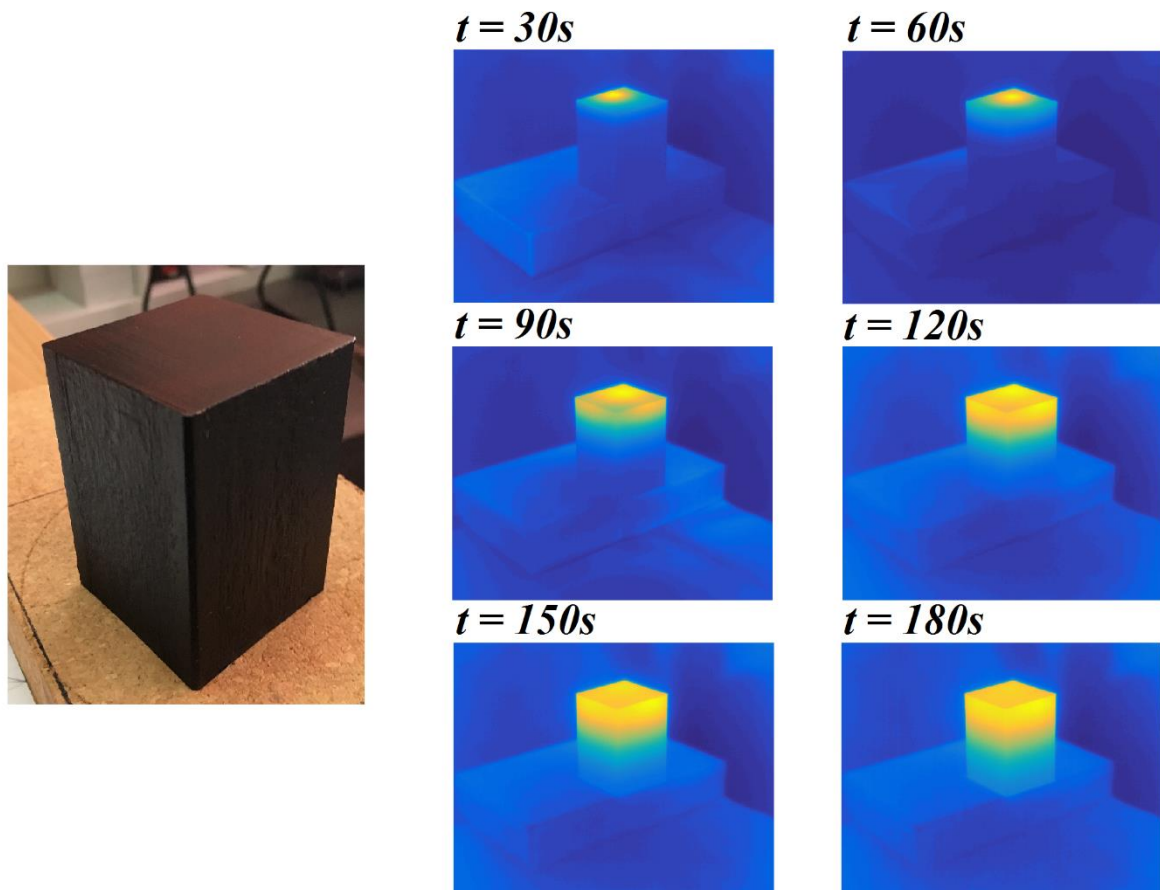


Figura 6.13 – Evolução temporal da imagem termográfica do bloco pintado.

No gráfico da Figura 6.12, observa-se que, a partir dos 20 segundos até que a pistola é desligada, existe uma oscilação relevante na curva de evolução da temperatura. Este comportamento é justificado pelo facto de a pistola ser segurada à mão e se movimentar relativamente à face do topo do bloco, alterando então a localização da face onde a fonte de calor é mais intensa.

#### 6.2.4 Avaliação sobre os requisitos de tempo-real do sistema

Considerando o objetivo último de construir um sistema de controlo baseado no sistema de medição desenvolvido, é importante avaliar se os algoritmos de medição e atribuição de temperatura poderão eventualmente cumprir os requisitos de tempo-real deste sistema. No seu estado atual, é claramente inviável que o computador calcule em tempo-real, a par da aquisição de imagem, todos os algoritmos que sobrepõem a malha à imagem termográfica. No entanto, se admitirmos que a câmara está numa posição fixa durante todo o período em que o objeto está a ser alvo de medição, esta sobreposição pode ser feita numa fase de inicialização.

Deste modo, é apenas necessário saber qual o tempo que o algoritmo depende para o cálculo de temperaturas nos pontos no interior de cada triângulo.

Para os 180 *frames* das experiências realizadas, e utilizando 4 pontos de cálculo de temperatura em cada triângulo, para 5 triângulos da malha, o tempo de cálculo foi cerca de 0,333s. Ou seja, em cada *frame* pode-se aproximar que o tempo de cálculo de temperatura é de cerca de 2ms. Tendo em conta a aplicação em causa, é possível afirmar que as deformações de origem térmica das peças de estudo não são tão imediatas que necessitem de uma aquisição de temperatura inferior às duas milésimas de segundo, ou seja, é possível concluir que, para um sistema com a câmara e objeto fixos, a atribuição de temperatura dos triângulos pode ser feita em tempo-real.



## 7 Conclusões e perspectivas de trabalhos futuros

### 7.1 Conclusões finais

O objetivo principal deste trabalho foi o desenvolvimento de um sistema de aquisição de temperatura para peças de impressão tridimensional, com base num sistema de visão artificial. É possível afirmar que o objetivo principal deste trabalho foi atingido com êxito.

A ligação entre a informação de uma imagem térmica e o ficheiro STL de uma peça para impressão 3D, provou ser um método capaz de medir gradientes térmicos superficiais destes tipos de peça com grande exatidão, devido ao facto de ser possível escolher singularmente zonas específicas da malha para análise do seu comportamento térmico.

A edição de malhas é uma técnica que merece ser explorada com maior detalhe em relação ao que foi no trabalho presente, pois com certeza permitirá ordenar as malhas triangulares das peças de forma a enriquecer ainda mais a qualidade do sistema de medição desenvolvido.

No seu estado atual, o sistema de aquisição de temperaturas desenvolvido, tem uma resolução espacial suficientemente elevada para medições de temperatura de peças com dimensões típicas de fabrico por FDM. No entanto, recorrendo a câmaras dotadas de diferentes especificações, é possível, utilizando os métodos desenvolvidos neste trabalho, analisar qualquer tipo de peças desde que exista acesso às suas dimensões.

No que diz respeito ao desenvolvimento de sistemas de controlo a partir da investigação feita neste trabalho, o facto de o novo ficheiro STL obtido conter a informação da temperatura superficial da peça, permite que este fique disponível para ser utilizado pelo controlador da impressora. Em situações em que a câmara e o objeto estejam fixos, o sistema de medição cumpre os requisitos de tempo-real do sistema de controlo, uma vez que a atribuição de temperatura à malha STL é feita em milissegundos.

A flexibilidade dos algoritmos desenvolvidos neste trabalho é particularmente relevante, uma vez que as tecnologias de fabrico aditivo, atualmente, estão na vanguarda da evolução tecnológica. Todos os passos dos procedimentos efetuados no presente trabalho foram descritos com detalhe, para fácil utilização posterior ou melhoria dos mesmos.

## 7.2 Trabalhos futuros

No decorrer desta dissertação é descrito o objetivo final de introduzir a câmara termográfica como um elemento de feedback do sistema de controlo de uma impressora tridimensional. Assim sendo, o trabalho aqui desenvolvido tem um seguimento muito bem delineado onde a investigação e algoritmos aqui descritos são uma base de trabalho sólida que pode ser consultada e utilizada. É expectável que, com novos requisitos, os algoritmos de processamento e leitura de imagem necessitem de ser refinados ou modificados.

### Aplicação em controlo de temperatura

No que diz respeito à aplicabilidade do sistema de medição em tempo-real, o sistema é capaz de atribuir temperaturas em tempo-real apenas em situações de medição de componentes fixos. Se a solução adotada não for um sistema em que a câmara e a peça estejam solidárias, é necessária uma reformulação dos algoritmos para que estes possam cumprir os requisitos de tempo-real do sistema de controlo.

Com intuito de fazer uma análise quantitativa do gradiente térmico da peça durante a sua impressão tridimensional, sugere-se que seja desenvolvido uma simulação do código G proveniente do *software* do *Slic3r* em *Matlab* para que este possa ser diretamente associado à imagem lida pela câmara, e assim fornecer o feedback necessário para um sistema de gestão de temperaturas de peças durante a sua impressão tridimensional.

### Parametrização da leitura de temperatura

Sugere-se ainda, que seja efetuado um registo dos valores de emissividade de diferentes materiais, nomeadamente os termoplásticos de elevado desempenho, de forma experimental. Este trabalho, ainda que moroso, é relativamente simples pois consiste em comparar valores da leitura da câmara com os de um transdutor de temperatura devidamente calibrado e, assim, corrigir o valor de emissividade fornecido à câmara termográfica, repetindo este processo até que o valor medido esteja correto.

### Outras aplicações

Como qualquer outro sistema de visão artificial, a investigação e o trabalho desenvolvido no presente trabalho podem ser ramificados em diversas outras aplicações.

Como a partir de um ficheiro de CAD pode ser sempre obtida uma malha triangular do objeto (STL), o sistema de aquisição de temperatura pode ser adaptado para outras tecnologias, ou processos de fabrico, onde seja necessário um estudo fino da temperatura na superfície de um objeto de geometria e dimensões conhecidas.

Em aplicações que envolvem materiais compósitos, a medição contínua de temperatura é um requisito muito importante. O sistema de medição desenvolvido é de grande utilidade, por exemplo, para efetuar uma monitorização de alta resolução da temperatura superficial de peças durante o processo de cura destes materiais.

## 8 Referências bibliográficas

- [1] G. A. with Pwc, «3D printing: A potential game changer for aerospace and defense», 2012. [Online]. Disponível em: <http://www.pwc.com/us/en/industrial-products/publications/gaining-altitude-with-pwc/issue-4.html>. [Acedido: 06-Mar-2017].
- [2] R. M. D. Moreira, «Conceção de um sistema de medição sem contacto da temperatura do polímero à saída do bico de uma impressora 3D FDM», Universidade do Porto, 2016.
- [3] I. Gibson, D. W. Rosen, e B. Stucker, *Additive manufacturing technologies: Rapid prototyping to direct digital manufacturing*. Springer, 2010.
- [4] Nike, «Nike News - At Nike the Future is Faster, and it's 3D». [Online]. Disponível em: <http://news.nike.com/news/nike-hp-3d-printing>. [Acedido: 08-Jun-2017].
- [5] Simplify3D, «Print Quality Troubleshooting Guide | Simplify3D Software». [Online]. Disponível em: <https://www.simplify3d.com/support/print-quality-troubleshooting/#warping>. [Acedido: 08-Jun-2017].
- [6] Kühling&Kühling, «The Kühling&Kühling HT500.2 3D Printer – Kühling&Kühling». [Online]. Disponível em: <http://kuehlingkuehling.de/ht500-2/>. [Acedido: 08-Jun-2017].
- [7] Slic3r, «Slic3r - G-code generator for 3D printers». [Online]. Disponível em: <http://slic3r.org/>. [Acedido: 08-Jun-2017].
- [8] T. L. Williams, *Thermal Imaging Cameras : Characteristics and Performance*. CRC Press, 2009.
- [9] FLIR, «FLIR' s Infrared Handbook for Automation Applications | FLIR Systems». [Online]. Disponível em: <http://www.flir.com/automation/display/?id=67015>. [Acedido: 13-Jun-2017].
- [10] FLIR, «Thermal imaging cameras for predictive maintenance inspections - FLIR». [Online]. Disponível em: <http://www.flir.co.uk/cs/display/?id=41717>. [Acedido: 08-Jun-2017].
- [11] FLIR Systems, «User's Manual - FLIR Ax5 Series». 2016. [Online]. Disponível em: [http://support.flir.com/DocDownload/Assets/dl/t559770-en-us\\_a4.pdf](http://support.flir.com/DocDownload/Assets/dl/t559770-en-us_a4.pdf) [Acedido: 08-Jun-2017].

- [12] M. Bass e O. S. of America, *Handbook of Optics: Devices, measurements, and properties*. McGraw-Hill, 2001.
- [13] Y. A. Çengel, *Heat transfer: a practical approach*. WBC McGraw-Hill, 1998.
- [14] R. Davies, *Computer and Machine Vision: Theory, Algorithms, Practicalities*, 4th ed. Elsevier, 2012.
- [15] Mathworks, «What Is Camera Calibration? - MATLAB & Simulink». [Online]. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/vision/ug/camera-calibration.html>. [Acedido: 08-Jun-2017].
- [16] Mathworks, «Viewpoint specification - MATLAB view». [Online]. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/view.html>. [Acedido: 08-Jun-2017].
- [17] Mathworks, «Computing the Convex Hull - MATLAB & Simulink». [Online]. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/matlab/math/computing-the-convex-hull.html>. [Acedido: 08-Jun-2017].
- [18] P. Cignoni e G. Ranzuglia, «MeshLab». [Online]. Disponível em: <http://www.meshlab.net/>. [Acedido: 08-Jun-2017].
- [19] Materialise, «3D Modeling Software | Materialise 3-matic». [Online]. Disponível em: <http://www.materialise.com/en/software/3-matic>. [Acedido: 08-Jun-2017].
- [20] J. Bell, «Intro to Computer Graphics: Visible Surface Determination». [Online]. Disponível em: <https://www.cs.uic.edu/~jbell/CourseNotes/ComputerGraphics/VisibleSurfaces.html>. [Acedido: 08-Jun-2017].
- [21] N. J. Rose, «Hilbert-Type Space-Filling Curves», *Mem. Hans Sagan 1928 - 2000*. [Online]. Disponível em: <http://www4.ncsu.edu/~njrose/pdfFiles/HilbertCurve.pdf>. [Acedido: 13-Jun-2017].

## **ANEXO A: Sumário do Projeto FIBR3D**

O projeto FIBR3D centra-se na tecnologia emergente de fabrico aditivo (FA) e sua aplicação para além do estado da arte em termoplásticos reforçados com fibras (TPRF). O principal objetivo do FIBR3D consiste em desenvolver um processo híbrido integrado que combina operações de adição e subtração de material e permite produções do CAD-à-Peça com formas livres usando TPRF longas ou contínuas.

O FIBR3D visa ainda as seguintes contribuições científicas:

- Regras de projeto para o FA híbrido (FAH);
- Composições de termoplásticos para FA adequados para aplicações de alta temperatura e resistência;
- Cabeças de extrusão e conceitos de processo avançados para FA de TPRF;
- Estratégias de hibridação tendo em conta especificações de FA (suportes, fatiamento, preenchimento) e de propriedades de material em processamento (reologia, adesão interfacial, consolidação da camada);
- Ecossistema de software para o projeto, o pré-processamento, o planeamento do processo, a simulação virtual e o processamento multi-eixos para FAH;
- Gerador de trajetórias 3D para FAH com base num algoritmo de otimização multi objetivo que combina o recente método de fatiamento curvo adaptativo com um novo esquema de percurso transversal;
- Monitorização de parâmetros de processo em tempo real e em malha fechada;
- Ferramenta multi-paramétrica de ensaios não-destrutivos (NDT) adaptada para peças produzidas por FAH em TPRF;
- Processo de fabrico sustentável validado por modelos avançados de LCA/LCC.

O projeto FIBR3D visa preencher uma lacuna de investigação do SCTN sobre FA de materiais compósitos e, ao mesmo tempo, contribuir para o progresso científico de FAH para produtos de elevado desempenho, baixo peso e multifuncionais. Devido ao âmbito inovador e aos desafios subjacentes ao FIBR3D, uma estratégia de investigação abrangendo a totalidade da cadeia de valor desta tecnologia de próxima geração é proposto começando com o projeto das peças e a composição dos materiais; passando em seguida por fases de transformação; e terminando com a avaliação do produto e respetivos estudos de fim de vida.



## ANEXO B: Ficha técnica da câmara FLIR A65 f=25 mm

### 13.23 FLIR A65 f=25 mm

P/N: 73425-0101

Rev.: 35207

|   |                                  |
|---|----------------------------------|
| <b>General description</b>  |                                  |
| <p>The FLIR A65 has features and functions that make it the natural choice for anyone who uses PC software to solve problems and for whom 640 × 512 pixel resolution is sufficient.</p> <p>Among its main features are GigE Vision and GenICam compliance, which makes it plug-and-play when used with software packages such as IMAQ Vision and Halcon.</p>  |                                  |
| Key features:   |                                  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Very affordable.</li> <li>• Compact (40 mm × 43 mm × 106 mm).</li> <li>• GigE Vision and GenICam compliant.</li> <li>• GigE Vision lockable connector.</li> <li>• PoE (power over Ethernet).</li> <li>• 8-bit 640 × 512 pixel images streamed at 30 Hz, signal linear</li> <li>• 14-bit 640 × 512 pixel images streamed at 30 Hz, signal and temperature linear</li> <li>• Synchronization between cameras possible.</li> <li>• 1x+1x GPIO.</li> <li>• Compliant with any software that supports GenICam, including National Instruments IMAQ Vision, Stemmers Common Vision Blox, and COGNEX Vision Pro.</li> </ul> |                                  |
| Typical applications:   |                                  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Automation and thermal machine vision.</li> <li>• Entry level "high-speed" R&amp;D.</li> </ul>   |                                  |
| <b>Imaging and optical data</b>   |                                  |
| IR resolution   | 640 × 512 pixels                 |
| Thermal sensitivity/NETD  | < 0.05°C @ +30°C (+86°F) / 50 mK |
| Field of view (FOV)   | 25° × 20°                        |
| Focal length  | 25 mm (0.98 in.)                 |
| Spatial resolution (IFOV)   | 0.68 mrad                        |
| F-number  | 1,25                             |
| Image frequency   | 30 Hz                            |
| Focus   | Fixed                            |
| <b>Detector data</b>  |                                  |

Conceção de um sistema de aquisição de temperatura de peças para impressão tridimensional


|                                     |  |
|-------------------------------------|--|
| Detector type                       | Focal plane array (FPA), uncooled VOX microbolometer   |
| Spectral range                      | 7.5–13 $\mu\text{m}$   |
| Detector pitch                      | 17 $\mu\text{m}$   |
| Detector time constant              | Typical 12 ms  |
| <b>Measurement</b>                  |  |
| Object temperature range            | <ul style="list-style-type: none"> <li>• –25 to +135°C (–13 to 275°F)</li> <li>• –40 to +550°C (–40 to +1022°F)</li> </ul> |
| Accuracy                            | $\pm 5^\circ\text{C}$ ( $\pm 9^\circ\text{F}$ ) or $\pm 5\%$ of reading  |
| <b>Measurement analysis</b>         |  |
| Atmospheric transmission correction | Automatic, based on inputs for distance, atmospheric temperature and relative humidity                                     |
| Optics transmission correction      | Automatic, based on signals from internal sensors  |
| Emissivity correction               | Variable from 0.5 to 1.0   |

|   |   |
|---|---|
| <b>Measurement analysis</b>               |   |
| External optics/windows correction        | Automatic, based on input of optics/window transmission and temperature |
| Measurement corrections                   | Global object parameters  |
| Reflected apparent temperature correction | Automatic, based on input of reflected temperature                      |

|                           |   |
|---------------------------|---|
| <b>Ethernet</b>           |   |
| Ethernet                  | Control and image   |
| Ethernet, type            | Gigabit Ethernet  |
| Ethernet, standard        | IEEE 802.3  |
| Ethernet, connector type  | RJ-45   |
| Ethernet, communication   | GigE Vision ver. 1.2<br>Client API GenICam compliant  |
| Ethernet, image streaming | <p>8-bit monochrome @ 30 Hz</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Signal linear/ DDE</li> <li>• Automatic/ Manual</li> <li>• Flip H&amp;V</li> </ul> <p>14-bit 640 × 512 pixels @ 30 Hz</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Signal linear/ DDE</li> <li>• Temperature linear</li> </ul> <p>GenE Vision and GenICam compatible</p> |

Conceção de um sistema de aquisição de temperatura de peças para impressão tridimensional

|   |  |
|---|--|
| Ethernet, power                         | Power over Ethernet, PoE IEEE 802.3af class 0 Power                            |
| Ethernet, protocols                     | TCP, UDP, ICMP, IGMP, DHCP, GigE Vision  |
| <b>Digital input/output</b>             |  |
| Digital input, purpose                  | General purpose  |
| Digital input                           | 1x opto-isolated, "0" <1.2 VDC, "1" = 2–25 VDC.                                |
| Digital output, purpose                 | General purpose output to ext. device (programmatically set)                   |
| Digital output                          | 1x opto-isolated, 2–40 VDC, max. 185 mA  |
| Digital I/O, isolation voltage          | 500 VRMS   |
| Digital I/O, supply voltage             | 2–40 VDC, max. 200 mA  |
| Digital I/O, connector type             | 12-pole M12 connector (shared with Digital synchronization and External power) |
| Synchronization in, purpose             | Frame synchronization in to control camera                                     |
| Synchronization in                      | 1x, non-isolated   |
| Synchronization in, type                | LVC Buffer @3.3V, "0" <0.8 V, "1">2.0 V.                                       |
| Synchronization out, purpose            | Frame synchronization out to control another FLIR Ax5 camera                   |
| Synchronization out                     | 1x, non-isolated   |
| Synchronization out, type               | LVC Buffer @ 3.3V, "0"=24 MA max, "1"= -24 mA max.                             |
| Digital synchronization, connector type | 12-pole M12 connector (shared with Digital I/O and External power)             |
| <b>Power system</b>                     |  |
| External power operation                | 12/24 VDC, < 3.5 W nominal < 6.0 W absolute max.                               |
| External power, connector type          | 12-pole M12 connector (shared with Digital I/O and Digital Synchronization )   |

|                                  |  |
|----------------------------------|--|
| <b>Environmental data</b>        |  |
| Operating temperature range      | -15°C to +50°C (+5°F to +122°F)  |
|                                  |  <b>NOTE</b><br>The operating temperature range assumes that the camera is mounted on the base support (included in the package) or a similar type of heatsink. |
| Storage temperature range        | -40°C to +70°C (-40°F to +158°F)   |
| Humidity (operating and storage) | IEC 60068-2-30/24 h 95% relative humidity +25°C to +40°C (+77°F to +104°F)   |
| Voltage                          | Allowed range 10–30 VDC  |

Conceção de um sistema de aquisição de temperatura de peças para impressão tridimensional

|               |   |
|---------------|---|
| EMC           | <ul style="list-style-type: none"> <li>• EN 61000-6-2 (Immunity)</li> <li>• EN 61000-6-3 (Emission)</li> <li>• FCC 47 CFR Part 15 Class B (Emission)</li> </ul> |
| Encapsulation | IP 40 (IEC 60529) with base support mounted   |
| Shock         | 25 g (IEC 60068-2-27)   |
| Vibration     | 2 g (IEC 60068-2-6)   |

|                             |  |
|-----------------------------|--|
| <b>Physical data</b>        |  |
| Weight                      | 0.200 kg (0.44 lb.)  |
| Camera size (L × W × H)     | 106 × 40 × 43 mm (4.2 × 1.6 × 1.7 in.)   |
| Tripod mounting             | UNC ¼"-20 (on three sides)   |
| Base mounting               | 4 × M3 thread mounting holes (bottom)  |
| Housing material            | Magnesium and aluminum   |
| <b>Shipping Information</b> |  |
| Packaging, type             | Cardboard box  |
| List of contents            | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Infrared camera with lens</li> <li>• Base support</li> <li>• Printed documentation</li> </ul> |
| Packaging, weight           |  |
| Packaging, size             | 295 × 200 × 105 mm (11.6 × 7.9 × 4.1 in.)  |
| EAN-13                      | 7332558010600  |
| UPC-12                      | 845188011277   |
| Country of origin           | Sweden   |

**Supplies & accessories:**

- T951004ACC; Ethernet cable CAT6, 2 m/6.6 ft.
- T198349; Base support
- T198348; Cable kit Mains (UK,EU,US)
- T198392; Table stand kit
- T911183; Gigabit PoE injector 16 W, with multi-plugs
- T127605ACC; Cable M12 Pigtail
- T127606ACC; Cable M12 Sync
- T198594ACC; Transport case Ax5
- T199356; FLIR Ax5 accessory starter kit
- T198584; FLIR Tools
- T198583; FLIR Tools+ (download card incl. license key)
- DSW-10000; FLIR IR Camera Player
- T199233; FLIR Atlas SDK for .NET
- T199234; FLIR Atlas SDK for MATLAB