



Projeto

Mestrado em Engenharia Mecânica - Produção Industrial

***Desenvolvimento de Processo de Fabrico Aditivo  
Robotizado***

**Rui João Marto Guedes**

Leiria, *Setembro* de 2016





Projeto

Mestrado em Engenharia Mecânica - Produção Industrial

***Desenvolvimento de Processo de Fabrico Aditivo  
Robotizado***

**Rui João Marto Guedes**

Projeto de Mestrado realizada sob a orientação da Doutora Maria Leopoldina Alves, Professora Coordenadora da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria e coorientação do Doutor Artur Mateus, Professor Adjunto da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria.

Leiria, Setembro de 2016

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

# Agradecimentos

---

Este projeto pretende ser o culminar de uma etapa da minha vida que exigiu tempo, esforço e dedicação. A sua realização não seria possível sem a ajuda, direta ou indireta, de inúmeras pessoas, às quais quero deixar um grande obrigado.

À minha orientadora, Prof. Leopoldina Alves, pela transmissão de conhecimento, pelo *feedback* do trabalho desenvolvido, pela persistência e tempo dedicado e acima de tudo por não me deixar baixar a cabeça.

Ao meu coorientador, Prof. Artur Mateus, pela disponibilidade e apoio necessários para ultrapassar alguns obstáculos que foram surgindo.

Ao CDRSP (Centro para o Desenvolvimento Rápido e Sustentável do Produto), em especial ao João Horta e ao Jorge Domingues, pela disponibilidade e ajuda ao longo de toda a parte experimental e pela prontidão na resolução de todas as contrariedades e atrasos que foram surgindo.

Obrigado aos meus colegas de turma, Nilza Reis, Maria Esperança e Paulo Cabral pela motivação e amizade ao longo de todo o curso.

Aos meus amigos que tornaram tudo mais fácil, Joana Carreira, Kevin Oliveira, Guilherme Oliveira, João Gaspar, Débora Pereira e João Henriques por toda a amizade e ajuda desde sempre.

Ao meu patrão, Ricardo Pereira e aos meus colegas de trabalho da CNC Sistemas, Victor Vieira, Manuel Pereira, Micael Vieira, Rafael Santos, Sutchá Pereira, um obrigado pela ajuda na maquinação das amostras e por toda a amizade e conhecimento transmitido ao longo desta etapa.

Por último, um enorme obrigado à minha família, por todo o esforço, por toda a calma, por toda paciência e por toda a confiança transmitida, principalmente à minha mãe, à minha irmã e à minha avó, com quem pude, posso e poderei contar sempre.

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

# Resumo

---

O crescimento das tecnologias de fabrico aditivo tem comprovado que cada vez mais estas deixaram de ser apenas consideradas para a fabricação de protótipos, passando a estar no leque de escolhas quando há a necessidade de criar um componente final. Vantagens como a elevada liberdade geométrica, que permite a criação de componentes otimizados com formas que dificilmente seriam possíveis de obter com qualquer outro processo convencional ou a competitividade na produção de pequenas séries, tornam o fabrico aditivo numa opção a ter em conta.

O trabalho desenvolvido neste projeto tem como objetivo o estudo de diferentes processos de fabrico aditivo que recorrem a metais como matéria-prima, com especial ênfase no processo de fabrico aditivo com recurso à tecnologia MIG/MAG como fonte de material de adição e a um braço robotizado como meio de deslocação da tocha do equipamento MIG/MAG. Este é um processo de fabrico aditivo com elevada taxa de deposição, o que permite a obtenção de componentes de grande volume de material. Após uma primeira parte de pesquisa bibliográfica, foram idealizados e concebidos diversos mecanismos necessários à implementação do processo fabrico aditivo robotizado. Procedeu-se ao fabrico de componentes-teste com base nessa tecnologia como validação da exequibilidade do processo, no qual se recorreu a vários parâmetros de soldadura e de velocidade de deslocação da tocha, sendo posteriormente realizados ensaios laboratoriais de análise de mecânica dos componentes.

Os ensaios laboratoriais confirmaram a capacidade desta tecnologia na criação de componentes com um bom nível global de homogeneização da sua estrutura bem como uma boa interligação entre camadas sem uma presença significativa de inclusões ou defeitos.

*Palavras-chave: Deposição metálica, Deposição robotizada, MIG/MAG*

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

# Abstract

---

The growth of additive manufacturing technologies has shown that those are increasingly considered not only for the manufacture of prototypes, but also as possible choice when there is the need to create a final component. Advantages such as high geometric freedom, which allows creation of optimal components with shapes that would hardly be possible to obtain with any other conventional process or the competitiveness in the production of small series, makes additive manufacture an option to be considered.

The present project aims to study different additive manufacturing processes that use metals as raw material, with special emphasis on additive manufacturing process technology using MIG / MAG as a source of added material and a robotized arm to control the displacement of the MIG/MAG equipment. This is an additive manufacturing process with high deposition rate, which allows obtaining components of large volume. After a first part of bibliographic research, various mechanisms required for the implementation of this robotized additive manufacturing process were designed and developed. Some prove components were manufactured based on this technology in order validate the feasibility of the process, and various welding parameters and linear torch speeds were tested. A laboratorial mechanical analysis was performed allowing determine mechanical properties of the components.

Laboratory tests have confirmed the feasibility of this technology in the creation of components with a good overall level of homogenization of the structure as well as a good interconnection between layers without a significant presence of inclusions or defects.

Keywords: Metal deposition, Robotized deposition, MIG/MAG

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

# Lista de figuras

---

Figura 1 - Processo DMLS (41).....	9
Figura 2 - Processo SLM (42).....	10
Figura 3 - Processo EBM (43).....	11
Figura 4 - Processo LENS (44).....	12
Figura 5 - Processo DMD (45).....	13
Figura 6 - Processo WLAM (15).....	15
Figura 7 - Fluxograma representativo das etapas da metodologia de trabalho.....	23
Figura 8 - Braço robot Motoman HP-20D.....	24
Figura 9 - Equipamento MIG/MAG Red Star MIG 250/4.....	25
Figura 10 - Pormenor do acoplamento entre a tocha de soldadura e o braço robot.....	26
Figura 11 - Área de trabalho.....	28
Figura 12 - Controlo do equipamento (1- caixa de controlo do equipamento de soldadura; 2 - Processador do braço robot).....	29
Figura 13 - Pedal auxiliar.....	29
Figura 14 - Desenho 3D da geometria de teste.....	32
Figura 15 - Controlador FS 100 do braço robot.....	34
Figura 16 - Linguagem de programação utilizada.....	35
Figura 17 - Pormenor do corte transversal das camadas.....	38
Figura 18 - Microscópio Zeiss AxioTech.....	40
Figura 19 - Microdurómetro Shimadzu HMV-2.....	41
Figura 20 - Esquema representativo da indentação e respetivas diagonais na medição de microdurezas HV.....	42
Figura 21 - Esquema representativo dos ensaios de microdureza.....	42

Figura 22 - Pormenores da sobreposição de camadas (1-Ligação material de base/primeira camada depositada; 2-Ligação camada depositada 1/2; 3-Ligação camada depositada 2/3; 4-Ligação camada depositada 3/4) .....	46
Figura 23 - Micrografias das amostras: 1- amostra 2 (velocidade 70m/s e incremento de 3mm); 2- amostra 4 (velocidade 70m/s e incremento de 4mm); 3- amostra 6 (velocidade 90m/s e incremento de 3mm); 4- amostra 7 (velocidade 90m/s e incremento de 4mm) .....	47
Figura 24 - Posição das diferentes indentações dos ensaios de microdurezas.....	48
Figura 25 - Gráfico de dureza HV (ensaio 2) .....	49
Figura 26 - Resultados obtidos nos ensaios de microdureza HV.....	51
Figura 27 - Termogramas das diferentes camadas de material (Ensaio 7 – Velocidade 90m/s, incremento 4mm) .....	53

# Lista de tabelas

---

Tabela 1 - Características do equipamento MIG/MAG Red Star MIG 250/4 .....	25
Tabela 2 - Composição química do material de adição AWS/SFA 5.18 ER70S-6 .....	26
Tabela 3 - Composição química das placas de teste em aço SAE 1045 .....	27
Tabela 4 - Parâmetros do equipamento de soldadura durante os ensaios preliminares .....	36
Tabela 5 - Parâmetros do braço robot durante os ensaios de deposição .....	37

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

# Lista de siglas

---

ABS – Acrilonitrila Butadieno Estireno

Ar – Árgon

CAD – *Computer Aided Design*

CDRSP – Centro para o Desenvolvimento Rápido e Sustentável do Produto

CNC – Controlo Numérico Computorizado

CO<sub>2</sub> – Dióxido de Carbono

DMD – *Direct Metal Deposition*

DMLS – *Direct Metal Laser Sintering*

EBM – *Electron Beam Melting*

FA – Fabrico Aditivo

He – Hélio

LENS – *Laser Engineered Net Shaping*

MAG – *Metal Active Gas*

MIG – *Metal Inert Gas*

SDM – *Shape Deposition Manufacturing*

SI – Sistema Internacional

SLI – *Slide File*

SLM – Selective Laser Melting

STL – *Standard Tessellation Language*

TIG – *Tungsten Inert Gas*

WLAM – Wire and Laser Additive Manufacturing

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

# Índice

---

<b>AGRADECIMENTOS</b>	<b>III</b>
<b>RESUMO</b>	<b>V</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>VII</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>IX</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b>	<b>XI</b>
<b>LISTA DE SIGLAS</b>	<b>XIII</b>
<b>ÍNDICE</b>	<b>XV</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1. Enquadramento	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Estrutura do Relatório	2
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>5</b>
<b>2.1. Processos de Fabrico Aditivo</b>	<b>5</b>
2.1.1. Funcionamento	6
2.1.2. Materiais	7
<b>2.2. Processo de cama de pó</b>	<b>8</b>
2.2.2. Sinterização direta de metais por laser – ( <i>Direct Metal Laser Sintering – DMLS</i> )	8
2.2.3. Fusão seletiva a laser – ( <i>Selective Laser Melting – SLM</i> )	9
2.2.4. Fusão por feixe de eletrões – ( <i>Electron Beam Additive Manufacturing – EBM</i> )	10
<b>2.3. Processos com injeção de pó</b>	<b>11</b>
2.3.1. Modelação para forma final através de laser ( <i>Laser Engineered Net Shaping - LENS</i> )	11

2.3.2. Deposição de Metal Direta – ( <i>Direct Metal Deposition – DMD</i> )	12
2.3.3. Consolidação por Laser	13
<b>2.4. Processos com alimentação de fio</b>	<b>13</b>
2.4.1. Processo Aditivo com Fio e Laser – ( <i>Wire and Laser Additive Manufacturing - WLAM</i> )	14
<b>2.5. Processo Aditivo com Arco Elétrico e Fio</b>	<b>16</b>
2.5.1. MIG/MAG	17
2.5.2. Gases de Proteção	19
<b>3. CONCEPTUALIZAÇÃO DO SISTEMA</b>	<b>23</b>
<b>3.1 Robot/Tecnologia Aditiva</b>	<b>24</b>
<b>3.2. Desenvolvimento do Acoplamento</b>	<b>26</b>
<b>3.3. Área de Trabalho</b>	<b>27</b>
<b>3.4. Adaptação do controlo do equipamento de soldadura</b>	<b>28</b>
<b>4. METODOLOGIA DE TRABALHO</b>	<b>31</b>
<b>4.1. Ensaios</b>	<b>31</b>
<b>4.2. Geometrias de teste</b>	<b>31</b>
<b>4.3. Programação do Robot</b>	<b>33</b>
<b>4.4. Parâmetros do Equipamento de Soldadura</b>	<b>35</b>
<b>4.5. Ensaios Mecânicos e Termográficos</b>	<b>38</b>
4.5.1. Micrografia	38
4.5.2. Ensaios de Micro-dureza	40
<b>4.6. Termografia</b>	<b>43</b>
<b>5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS</b>	<b>45</b>
<b>5.1. Ensaios de Micrografia</b>	<b>45</b>
<b>5.2. Ensaios de Microdureza e Termográficos</b>	<b>48</b>

<b>6. CONCLUSÕES</b>	<b>55</b>
<b>7. TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>57</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>59</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>63</b>
<b>Anexo A: Características do material de adição</b>	<b>64</b>
<b>Anexo B: Desenho 2D da geometria de teste</b>	<b>65</b>
<b>Anexo C: Desenho técnico do acoplamento</b>	<b>66</b>

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

# 1. Introdução

---

## 1.1. Enquadramento

---

Como fenómeno económico, a globalização tem intensificado a competição entre companhias. Isto significa que, de forma a manter a posição de liderança no mercado, a produção de componentes tem de ser melhorada em termos de qualidade e de utilização de material. Outros tipos de limitações tais como emissões e preservação do meio-ambiente, custos de fabrico, legislação e otimização do material usado levaram a uma maior consideração do Fabrico Aditivo (FA) na hora de escolher um processo de fabrico.

O Fabrico Aditivo pode ser considerado como um conceito associado à produção direta de componentes numa variedade de materiais tais como o aço, alumínio, plástico, titânio, entre outros. Este tipo de processo cria os componentes a partir de um ficheiro CAD (*Computer Aided Design*) através da sobreposição de camadas de material.

Nos dias que correm, indústrias como a automóvel ou aeroespacial, encontram-se na procura de aplicações e sistemas que permitam a produção de peças metálicas de grandes dimensões e elevada complexidade, em lotes pequenos, com elevada integridade estrutural e precisão dimensional e que possam ser prontamente utilizadas.

Nos anos mais recentes, tem havido um interesse crescente no uso do fabrico aditivo para a produção de peças *near net shape*, de componentes metálicos funcionais. Algumas das vantagens destes processos quando comparados com os processos convencionais são a não necessidade de ferramentas dedicadas, o mínimo desperdício de material, a redução do tempo para atingir o mercado e o custo reduzido na produção de pequenos volumes de encomenda.

Contudo, a baixa taxa de deposição de material e velocidade de processamento, o custo e qualidade dos consumíveis, a capacidade de produzir apenas peças de pequenas dimensões e ainda fraca qualidade das propriedades finais e necessidade de pós-processamento levam a que o processo seja muitas vezes preterido por processos convencionais.

Surtem então alternativas que possibilitam a produção de componentes com volumes mais elevados e a taxas de produção mais altas como o fabrico aditivo com recurso a matéria prima em fio e recorrendo à utilização do arco elétrico para sua deposição.

## **1.2. Objetivos**

---

Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento e implementação de um processo de fabrico aditivo robotizado para a produção de componentes metálicos.

De modo a que sejam atingidos os objetivos globais do projeto, foram definidos objetivos específicos, nomeadamente:

- Proceder a uma pesquisa bibliográfica incidente nos processos de fabrico aditivos que utilizam metal como material de adição;
- Conceptualização e desenvolvimento de um sistema de acoplamento do equipamento responsável pelo depósito do material ao braço robot;
- Desenvolvimento e adaptação do sistema de controlo do conjunto equipamento de depósito do material/braço robot;
- Realização em ambiente laboratorial de diversos componentes-teste da exequibilidade do processo no fabrico de componentes;
- Realização de ensaios micrográficos e mecânicos a provetes extraídos dos componentes-teste.

## **1.3. Estrutura do Relatório**

---

O presente documento encontra-se dividido em 6 capítulos.

No capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica que visa dar a conhecer diversas técnicas de fabrico aditivo. É também revisto, de uma forma mais detalhada neste capítulo, o funcionamento da tecnologia do arco elétrico que serve de base ao processo de fabrico aditivo utilizado neste projeto.

No capítulo 3 abordou-se as diferentes etapas necessárias ao funcionamento da tecnologia de fabrico aditivo. É apresentado o desenvolvimento do componente de acoplamento do equipamento de depósito/braço robot, bem como a implementação das modificações necessárias para que o equipamento de depósito e o robot utilizados fossem comandados externamente.

No capítulo 4 são descritos todos os procedimentos experimentais referentes aos ensaios laboratoriais realizados.

No capítulo 5 são analisados os resultados obtidos laboratorialmente - nos ensaios micrográficos e mecânicos a provetes extraídos dos componentes-teste.

Por fim, no capítulo 6 e 7 são apresentadas as principais conclusões do presente projeto e identificados trabalhos futuros que podem vir a ser desenvolvidos de forma a completar o trabalho efetuado neste projeto, respetivamente.

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

## 2. Revisão Bibliográfica

---

### 2.1. Processos de Fabrico Aditivo

---

Inicialmente, o processo de fabrico aditivo, devido à sua utilização quase exclusiva para a obtenção de protótipos, foi apelidado de prototipagem rápida. Este tipo de processo pode ser descrito como a fabricação de um determinado modelo 3D, gerado através de um software CAD através da sobreposição de camadas de material. Esta abordagem de fabrico permite, de uma forma rápida e económica, a obtenção de protótipos. (1)

Com os tempos, tornou-se claro que a utilização desta tecnologia permitia não só a obtenção de protótipos, mas também de peças finais e funcionais, de elevada qualidade e rigor dimensional, passando a designar-se de FA. (2)

A inexistência de limitações geométricas pode ser descrita como a maior vantagem do FA. A construção por camadas de espessura pré-determinada permite uma liberdade maior na construção de formas mais complexas comparativamente a outros processos considerados convencionais (1).

A velocidade de fabrico é no presente a maior limitação do FA em comparação com os métodos de fabrico convencionais. Estes permitem uma maior rapidez de fabrico, com melhores acabamentos e um rigor dimensional mais elevado. A taxa de fabrico do FA é ainda mais reduzida se se tiver em conta todas as atividades necessárias para a obtenção do acabamento desejado e da remoção de suportes.

Além da diversidade de materiais, é ainda possível a utilização mais que um material na construção da mesma peça, permitindo assim otimizar a estrutura do componente desejado/produzido.

Outras das vantagens quando comparado com os processos mais convencionais, é a possibilidade de controlo e evolução microestrutural dos materiais. Desta forma é possível seleccionar os materiais e otimizar a sua deposição (3).

A grande liberdade geométrica permite que sejam obtidos produtos sem qualquer recurso a ferramentas auxiliares sendo que por vezes é necessário recorrer a operações de acabamento dependendo da aplicabilidade do produto.

Outra grande vantagem deste processo é o fabrico de lotes de produção de dimensão reduzida, ao contrário de processos como a fundição ou injeção que necessitam de molde, o que os torna dispendiosos para pequenas produções (3).

Como já referido anteriormente, o FA permite a obtenção de uma peça dispensando o uso de ferramentas adicionais e reduzindo os custos de operação o que se traduz numa redução dos custos associados ao produto final. Porém, necessita de operários mais especializados e, dependendo do processo, com mais conhecimento técnico o que se traduz num acréscimo de despesas (2).

É também importante referir o elevado preço da matéria-prima e a importância de stocks mínimos indispensáveis que vão de alguma forma encarecer o processo. Por outro lado, por se tratar de um processo aditivo, o desperdício de material é menor comparativamente com os processos convencionais.

### **2.1.1. Funcionamento**

---

São diversas as etapas a percorrer até à obtenção do produto final. Dependendo da finalidade da peça, pode haver etapas passíveis de serem saltadas, como por exemplo acabamentos superficiais no caso de a peça ser apenas um protótipo estético ou eventualmente funcional.

Genericamente, o processo pode ser dividido em sete etapas:

- Modelo CAD – Representação tridimensional (3D) do produto obter através de um software CAD (2).

- Conversão para *formato Standard Tessellation Language* (STL) – Formato reconhecido pelas máquinas de FA. É a representação dos contornos exteriores do ficheiro CAD sob a forma de superfícies triangulares (malha) (2).

- Manipulação do ficheiro STL – Ajuste da dimensão dos triângulos consoante o rigor desejado. Quanto maior o rigor, maior o tempo de fabrico, e menor será a dimensão (área) dos triângulos (refinamento da malha) (2).

- Formato STL para formato *Slide File* (SLI) – Divisão do modelo em camadas (*layers*) de construção e programação da máquina de FA tendo em conta o material, fonte de energia e potência, espessura da camada e tempo de produção (2).

- Construção – Etapa em que a peça desejada é fabricada de forma automatizada. É necessário apenas garantir a existência de stock de material disponível na máquina é suficiente. Pode ser considerada nesta etapa o retirar da peça da câmara de fabrico no fim da operação, podendo ser necessário ou não a remoção dos suportes de fabrico (2).

- Acabamentos - Como já referido anteriormente, a qualidade superficial quando comparada com outros métodos é inferior pelo que pode ser preciso acabamentos como polimento, maquinação ou pintura depois da parte de fabrico estar terminada de forma a melhorar as propriedades da peça (2).

- Aplicação – Após as etapas anteriores a peça encontra-se terminada e funcional. (2).

Com a construção do produto ou modelo através da sobreposição de camadas tem-se a vantagem do desenvolvimento de um objeto tridimensional trabalhando apenas com secções bidimensionais (1). Como já foi referido, pode haver a necessidade de acabamentos superficiais devido ao “efeito escada”, isto é, irregularidades na superfície diretamente proporcionais à espessura da camada (5).

## 2.1.2. Materiais

---

Existem diversas técnicas de fabricos aditivos e por consequência diversos materiais que neles são utilizados, podendo estes ser divididos em quatro grupos: plásticos, metais, cerâmicos e compósitos. (4).

De entre as várias formas pelas quais é possível caracterizar os materiais, neste projeto, optou-se por os definir em relação ao estado inicial em que se encontram: em pó, sobre o qual se fará uma abordagem mais ligeira, e em fio, sobre o qual se fará uma

abordagem mais detalhada pois é neste grupo que se enquadra a tecnologia utilizada no âmbito deste projeto.

## **2.2. Processo de cama de pó**

---

Neste tipo de fabrico aditivo uma cama de pó metálico é espalhada sobre a área de trabalho. A fonte de energia (laser ou arco elétrico) fornece energia à superfície fundindo ou sinterizando a área desejada. De seguida, uma nova camada do pó metálico é depositada, repetindo-se o processo até se obter o produto tridimensional desejado (5).

### **2.2.2. Sinterização direta de metais por laser – (*Direct Metal Laser Sintering* – DMLS)**

---

Este processo utiliza pó metálico que é sinterizado por um laser de elevada potência. Uma conjugação de parâmetros como a potência do laser, as propriedades mecânicas do material e a velocidade de varrimento do feixe fazem com que seja atingida uma densidade relativa de aproximadamente 100% (6).

O DMLS pode utilizar como matéria prima um só material ou a mistura de dois, em que um servirá como metal estrutural (ponto de fusão mais elevado) e outro como ligante ou aglomerante do sistema (ponto de fusão mais baixo). Para que isto seja possível a energia fornecida pelo laser tem de ser suficiente para elevar a temperatura dos pós metálicos para uma temperatura intermédia à temperatura de fusão dos dois metais (7, 8).

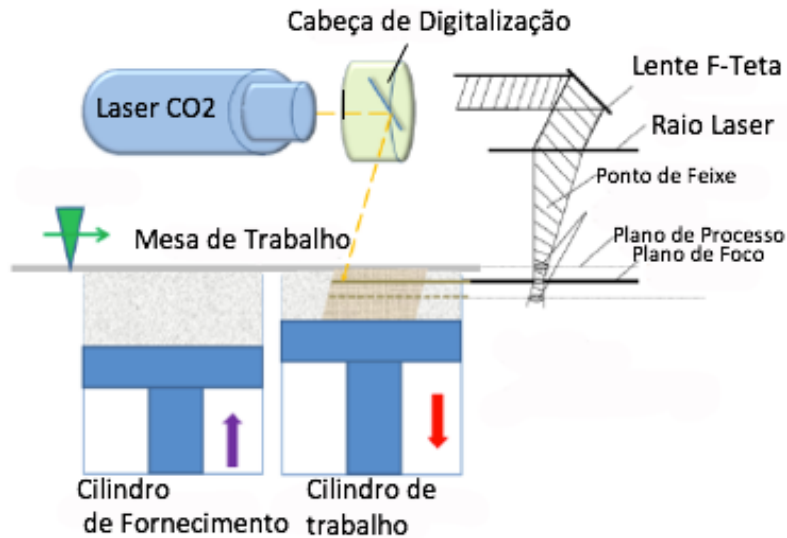


Figura 1 - Processo DMLS (41)

### 2.2.3. Fusão seletiva a laser – (*Selective Laser Melting – SLM*)

---

Este processo utiliza a fusão total dos pós metálicos recorrendo a um laser como fonte de energia para obtenção de um componente com densidade total ou muito próxima de total sem utilizar qualquer tipo de ligante ou tratamento de acabamento (8, 9). O facto de a fusão ser praticamente total, permite a redução das etapas de acabamento o que resulta num tempo total de processo mais reduzido. No entanto, este processo potencia elevados gradientes térmicos e taxas de arrefecimento na direção do substrato metálico e das camadas subjacentes à sinterizada traduzindo-se em tensões residuais térmicas que podem atingir valores elevados, sendo em alguns casos superiores à tensão de rutura do material causando o aparecimento de fendas e delaminação das camadas. Por estas razões, nem todas as ligas metálicas podem ser consideradas para este processo (8, 9).

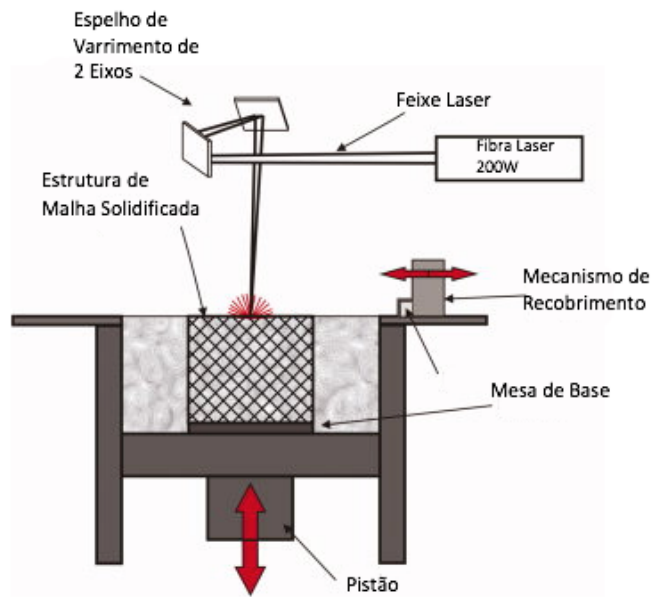


Figura 2 - Processo SLM (42)

#### 2.2.4. Fusão por feixe de elétrons – (*Electron Beam Additive Manufacturing – EBM*)

---

Este é um dos processos com maior capacidade de produção de peças metálicas com elevada densidade e propriedades mecânicas semelhantes às peças obtidas pelos processos convencionais (10). Este processo utiliza como fonte de energia um feixe de elétrons que permite uma elevada eficiência energética. É realizado numa atmosfera controlada, em vácuo, o que potencia um ambiente livre de oxigénio assegurando a pureza do material utilizado e garantindo a precisão do feixe, devido à não existência de contacto com partículas do ar e garantindo assim um bom isolamento térmico (11). As tensões residuais são reduzidas devido às altas temperaturas no interior da camara de trabalho. A possibilidade de trabalhar com um espectro de potências caloríficas torna possível a utilização de diversos tipos de materiais (10).

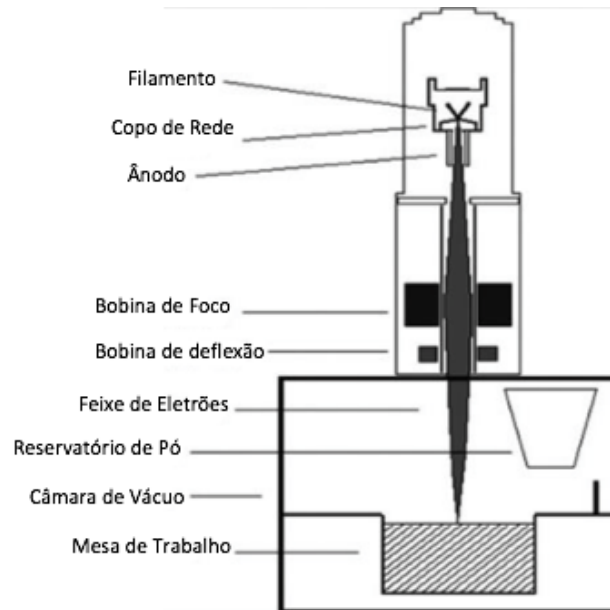


Figura 3 - Processo EBM (43)

## 2.3. Processos com injeção de pó

---

Neste sistema o pó metálico é transferido para a área de trabalho através de um bocal. Um laser é utilizado para fundir o metal sob a forma desejada. Existem essencialmente dois sistemas de *Powder feed systems*: aqueles em que a área de trabalho é estacionária e a cabeça de deposição se move e aqueles em que a área de trabalho se move e a cabeça de deposição é estacionária (5).

### 2.3.1. Modelação para forma final através de laser (*Laser Engineered Net Shaping - LENS*)

---

Este processo desenvolvido pelo *Sandia National Laboratory* e licenciado pela Optomec funciona injetando pó metálico para uma poça de metal fundido usando como fonte de energia um laser (35).

Este tipo de sistema pode funcionar com a utilização da maior parte dos pós metálicos disponíveis no mercado sendo que a maior área de utilização tem sido na

reparação de turbinas de motores de tanques *Abrams M1* por parte do exército americano (36).

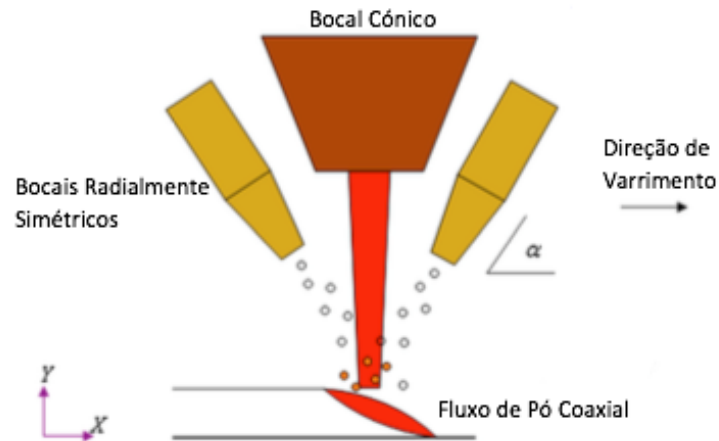


Figura 4 - Processo LENS (44)

### 2.3.2. Deposição de Metal Direta – (*Direct Metal Deposition – DMD*)

---

Desenvolvida pela *Precision Optical Manufacturing (POM)*, esta tecnologia utiliza um sistema de injeção de pó e um *laser* acoplados a um braço robot.

Devido à sua elevada liberdade e amplitude de movimentos esta tecnologia tem sido utilizada na reparação de ferramentas, adição de novas funcionalidades a componentes de grande escala e na manufatura de produtos funcionais. Permite o uso de pós metálicos de aços de ferramenta, ligas de inonel e de titânio (37).

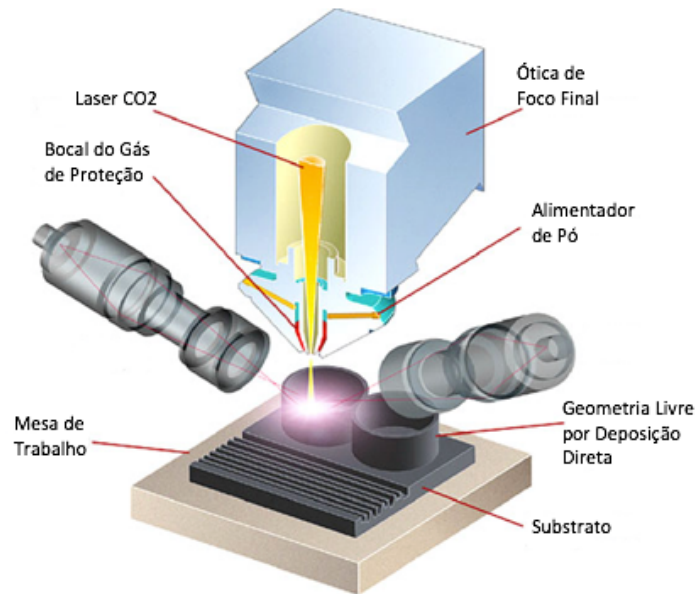


Figura 5 - Processo DMD (45)

### 2.3.3. Consolidação por Laser

---

Este processo foi desenvolvido pelo *Integrated Technologies Institute of the National Research Council of Canada* em conjunto com o *GE Global Research*. Embora este processo seja em tudo semelhante ao LENS (tanto na forma de funcionamento como no ambiente controlado necessário ao seu funcionamento), apresenta melhor acabamento superficial, não necessitando por isso de operações de acabamento. Apresenta uma taxa de deposição mais baixa (38).

## 2.4. Processos com alimentação de fio

---

Os processos de fabrico baseados em sistemas de alimentação por fio podem ser vistos como uma alternativa aos processos de fabrico subtrativos, em particular quando é necessário produzir componentes de grandes dimensões e de elevada complexidade.

Nestes sistemas o material encontra-se sob a forma de fio e a fonte de energia utilizada na sua fusão pode ser, entre outros, o feixe de elétrons, laser ou arco elétrico. Da mesma forma que nos processos anteriores, o material é depositado por camadas.

Este tipo de processos é adequado para taxas de deposição de material elevadas e para peças com elevados volumes, porém carece de mais operações de acabamento quando comparados com outros processos cujo material se encontra sob a forma de pó (5).

Fatores como a energia despendida, a taxa de alimentação do fio, velocidade de deposição, o padrão de deposição e as sequências de deposição necessitam de um acerto permanente de forma a reduzir as tensões residuais e a distorção devido ao calor excessivo introduzido. A fraca precisão e acabamento superficial limitam o campo de aplicação do fabrico aditivo por fio.

Os processos de fabrico com alimentação por fio podem ser classificados em três grupos fundamentais tendo por base a sua fonte de energia: laser, arco elétrico e feixe de elétrons. O laser tem sido a fonte mais utilizada devido à sua precisão, embora apresente uma reduzida eficiência energética (2-5%) (quantidade de energia gerada pela fonte de calor que é absorvida pela mesa de trabalho) (12). O feixe de elétrons tem uma eficiência energética ligeiramente superior (15-20%) mas necessita de uma atmosfera controlada para ser utilizado. Comparativamente com estes dois processos com baixa eficiência energética os processos de arco elétrico, como por exemplo MIG/MAG (*Metal Inert Gas/Metal Active Gas*) ou o TIG (*Tungsten Inert Gas*) podem apresentar uma eficiência a rondar os 90% (13, 14). De salientar ainda que o custo dos equipamentos de arco elétrico é relativamente mais baixos que os dos outros dois processos mencionados anteriormente.

### **2.4.1. Processo Aditivo com Fio e Laser – (*Wire and Laser Additive Manufacturing - WLAM*)**

---

O processo aditivo com recurso a fio e Laser é um processo de FA que produz componentes com 100% de densidade utilizando fio metálico e laser como fonte de energia. Este processo é constituído por um laser, um sistema automático de alimentação do fio, uma estação de controlo numérico ou um sistema robótico e alguns elementos

acessórios (como o gás de proteção, sistema de aquecimento ou arrefecimento, entre outros).

O laser é responsável pela geração de um banho de fusão no material do substrato, em que o fio metálico é depositado e fundido, formando uma ligação metalúrgica com o substrato (15).

Movendo a cabeça do laser e o alimentador do fio ou movendo a área de trabalho, um cordão de material depositado é formado durante a solidificação. O movimento relativo entre a tocha de soldadura (que deposita o material) e a mesa de trabalho pode ser efetuado por um braço robot ou através de uma mesa controlada por controlo numérico.

WLAM é um processo versátil que é capaz de processar uma vasta gama de metais e ligas. O desempenho em termos de acabamento, complexidade geométrica e qualidade de depósito pode ser avaliado mediante o rigor dimensional obtido (incluindo a geometria da secção transversal do cordão), as características micro-estruturais (tamanho de grão, textura, etc.) e as propriedades mecânicas resultantes (resistência, dureza, tensão residual, etc.), constituindo as principais limitações dos processos WLAM.

Estes itens são fortemente dependentes do material a depositar e do processo, em particular das características do fio metálico (por ex: composição química e diâmetro do fio) e dos parâmetros de processamento (por ex: direção e ângulo da alimentação do fio, velocidade de alimentação do fio, potência do laser e velocidade de soldadura).

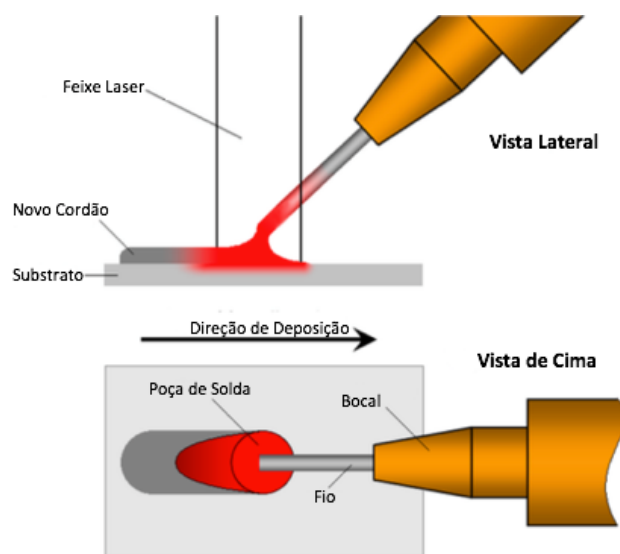


Figura 6 - Processo WLAM (15)

## 2.5. Processo Aditivo com Arco Elétrico e Fio

---

O arco elétrico é a fonte de calor de mais comum utilização na soldadura por fusão de metais, apresentando uma combinação de características que incluem uma concentração adequada de energia para a fusão localizada do metal de base, facilidade de controlo, baixo custo relativo do equipamento e um nível aceitável de riscos para a saúde dos seus operadores. Todas estas características fazem desta fonte de energia um bom candidato à sua utilização no fabrico aditivo.

O fabrico aditivo utilizando arco elétrico como fonte energética tem sido investigado por diversos grupos de investigação, utilizando diferentes tipos de processo: MIG/MAG (*Metal Inert Gas/Metal Active Gas*), TIG (*Tungsten Inert Gas*) e Plasma (*Plasma Arc Welding*).

A sua origem data de 1920, ano em que foi registada a patente apresentada por Baker (1925), atribuída a *Westinghouse Electric & Manufacturing Company*, que fabricou objetos metálicos 3D sobrepondo, manualmente, camadas de material.

Em 1971, Ujiie (Mitsubishi) procede à fabricação de vasos de pressão usando a tecnologia de arco-submerso, eletroescória e TIG com diferentes dimensões de fio conforme a necessidade e funcionalidade da parede produzida.

Em 1983, Kussmaul utilizou processos de soldadura no fabrico de peças de grandes dimensões e elevada qualidade na liga nuclear estrutural 20MnMoNi5 5, com uma taxa de deposição de 80kg/h, num total de 79 toneladas de material depositado.

Em 1993, Prinz e Weiss patentearam o processo que combinava o fabrico com base em processos de soldadura com o processo de maquinação CNC (Comando Numérico Computorizado). Este processo viria a ser chamado de *Shape Deposition Manufacturing* (SDM)

Entre 1994 e 1999 a Universidade de Cranfield desenvolveu o processo SDM para a Rolls Royce, para utilização em carcaças de motores. Vários processos e materiais foram analisados neste âmbito.

## 2.5.1. MIG/MAG

---

O processo de soldadura MIG/MAG pode ser descrito como um processo de soldadura por arco elétrico que utiliza um eletrodo nu consumível (continuamente adicionado) e proteção gasosa, para promover a união de metais através da fusão localizada e introdução de um metal de adição fundido, proveniente do eletrodo consumível. O arco e poção banho de fusão são protegidos por um gás ou mistura de gases (habitualmente Ar/CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>). O processo é denominado MAG se o gás ativo (habitualmente CO<sub>2</sub> ou misturas Ar/O<sub>2</sub>) for utilizado, senão denomina-se MIG (gás inerte).

A alimentação contínua do eletrodo permite uma boa velocidade de fusão do fio ( e o uso de uma alta densidade de corrente (em virtude do reduzido diâmetro do fio). O processo pode ser operado de forma manual, semi-automática ou automatizado (utilização de robôs).

A forma como o material de enchimento é depositado na base a soldar (modo de transferência) é definida por vários fatores: tipo de metal da base, composição do metal de enchimento, diâmetro do eletrodo, polaridade, corrente do arco, voltagem, gás de proteção e posição de de soldadura. Em caso de trabalho em exterior, poderá existir a necessidade de utilização de corta-vento de forma a aumentar a eficiência do gás de proteção.

A transferência de metal fundido do eletrodo para a peça no processo MIG/MAG pode dividir-se em quatro formas principais: Transferência por Curto-Circuito, Transferência Globular, Transferência por "Spray" (Aerossol ou Goticular) e Spray Pulsado (21-22-24).

A transferência por curto-circuito é característica da soldadura com um pequeno comprimento de arco (onde as intensidades de corrente são baixas e os eletrodos são de de reduzido diâmetro). Nesta, o eletrodo toca periodicamente (frequência de curto-circuito entre 20 a 200 *Hz*) na peça (ou banho de fusão), ocorrendo um curto-circuito.

Durante o curto-circuito, a intensidade de corrente de soldadura eleva-se rapidamente causando: aquecimento do eletrodo (efeito Joule), fusão (transferência de metal para o banho de fusão - rutura de uma parte do eletrodo) e a re-ignição do arco elétrico. O curto-circuito pode ser do tipo acidental, ou seja, que possuem um período muito curto (podendo

ser causados por movimentação caótica do banho de fusão e do diâmetro da gota na ponta do eletrodo) originado altas frequências de curto-circuito (23).

Este modo de transferência está associado tipicamente à utilização de eletrodos de 0,6 a 1,1 mm de diâmetro ou de 100% de CO<sub>2</sub>, ou com uma mistura de 75-80% de Argon com 25-20% de CO<sub>2</sub>. A baixa transferência de calor faz com que seja ideal para materiais de baixa espessura como chapas metálicas compreendidas na sua grande maioria entre 0,6 e 5,0 mm (24).

É um tipo de transferência bastante versátil pela sua capacidade de trabalhar em qualquer posição (ao baixo, na vertical, ao teto), pela elevada eficiência e facilidade de manuseamento. No entanto, um mau controle de procedimentos pode resultar numa fusão incompleta causando defeitos na soldadura ou mesmo salpicos.

Outra das limitações que este método apresenta é a necessidade de utilização de um corta-vento para trabalhos em exterior.

A transferência metálica globular que se caracteriza pela ausência de curtos-circuitos, correntes baixas e moderadas, com tensões mais elevadas que no curto-circuito. Dá-se basicamente por ação gravítica (23).

Este tipo de transferência apresenta gotículas fundidas de forma irregular e de maiores dimensões que o diâmetro do eletrodo. As gotículas de fundição de forma irregular não seguem um desprendimento axial do eletrodo, em vez disso, podem cair fora do local a soldar ou mover-se para a ponta do eletrodo.

Este modo de transferência é de difícil controle e os salpicos são elevados. A gravidade é fundamental para a transferência de grandes gotículas fundidas, com eventuais curto-circuitos.

Durante os anos entre 1960-1970, a transferência globular era um modo popular de transferência de metal. Este modo de transferência está associado ao uso de 100% de CO<sub>2</sub> como gás de proteção, embora a mistura de Argon/CO<sub>2</sub> também seja recorrente (24).

Embora apresente uma taxa de deposição elevada, este modo de transferência é propenso a defeitos devido à fusão incompleta de material, apresentando uma geometria de cordão convexa e baixa molhabilidade. O elevado número de salpicos reduz a eficiência do eletrodo e aumenta os custos de acabamento.

A transferência metálica goticular é caracterizada pela ausência de salpicos, pela forma estável como ocorre a transferência, pela alta produção, elevada tensão e intensidade de corrente, pela promoção de gotas com diâmetro próximo ao do eletrodo e por promover uma taxa de fusão elevada (23). Caracteriza-se ainda pelo bom acabamento necessitando de poucas operações de limpeza e também pela facilidade em ser automatizada. É no entanto, um modo de transferência com elevada geração de fumos.

Este modo de transferência é o que permite uma maior taxa de transferência de metal no processo MIG/MAG. Para serem atingidas estas taxas elevadas de transferência de material são utilizadas gases de proteção mais dispendiosos como misturas de argônio com oxigênio (de 1%-5%) ou argônio com CO<sub>2</sub>, em que os níveis de CO<sub>2</sub> são inferiores a 18%. A transferência goticular pode ocorrer com a maioria das ligas comuns nomeadamente: alumínio, magnésio, aço carbono, aço inoxidável, ligas de níquel e ligas de cobre.

A seleção deste modo de transferência de metal é fortemente dependente da espessura do material de base e do posicionamento da junta a soldadura na posição horizontal (24).

## **2.5.2. Gases de Proteção**

---

Os gases de proteção têm como principal finalidade proteger poção banho de fusão e a gota em transferência dos efeitos nocivos do oxigênio contigo no ar atmosférico. Estes gases podem ser inertes, ativos ou uma mistura dos dois tipos e a sua utilização acarreta benefícios à qualidade final do cordão.

A composição do gás de proteção influencia as características do arco, o modo de transferência, a velocidade linear da realização da soldadura, o aumento ou diminuição das perdas por projeção (salpicos), a penetração do cordão e o seu formato bem como o custo total da operação. Perdas de elementos químicos, temperatura do banho de fusão, a sensibilidade à fissuração e porosidade, bem como a facilidade na execução da soldadura em diferentes posições são também consequências do tipo de gás utilizado.

A escolha do tipo de atmosfera de proteção depende de fatores como o custo, facilidade de manuseamento, toxicidade, produção de fumos e gases, estabilidade a temperaturas elevadas, entre outros. A solubilidade do gás no metal é também um fator a

ter em consideração durante o processo de soldadura pois se uma quantidade substancial de gás entra no metal fundido pode causar libertação do gás durante o processo de solidificação causando defeitos no cordão, tais como por exemplo, porosidades.

Entre os gases mais utilizados encontram-se o Árgon (Ar), Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) e Hélio (He) (25).

As propriedades físicas e químicas dos gases tais como o potencial de ionização, condutividade térmica, potencial de oxidação, densidade e tensão superficial definem as principais características operacionais do arco elétrico e as propriedades do cordão de soldadura. Variações dos parâmetros de soldadura, de que é exemplo a intensidade de corrente, modificam a geometria do cordão de soldadura, e são intensamente influenciados pela composição química do gás de proteção.

O potencial de ionização do gás traduz-se pela energia necessária para remover um eletrão de um átomo, tornando-o num ião, expressa em eletrão-Volt (eV). Este valor diminui com o aumento do peso molecular do gás.

O potencial de ionização é uma propriedade importante dos elementos presentes no arco elétrico, formado por uma atmosfera complexa devido aos gases de proteção e metais em estado de vapor. A ignição do arco, a sua capacidade de conduzir corrente elétrica e a sua estabilidade são determinados de acordo com a facilidade de ionização destes materiais.

Para comprimentos de arco e intensidades de corrente equivalentes, a tensão obtida mediante a utilização de Hélio é significativamente maior do que com Árgon (25, 26).

A condutividade térmica de um gás de proteção é a quantidade de calor transferido por este gás, através do choque das partículas existentes na coluna de plasma. Esta vai ter influência na transferência metálica e no perfil de penetração do cordão de soldadura.

Juntamente com o potencial de ionização, esta propriedade determina a tensão de soldadura necessária para manter o arco ativo. Quanto maior for a condutividade de um gás, maior é a tensão necessária para manter um mesmo arco. Para além do referido anteriormente, também tem influência na condução de calor para o metal de base e consequentemente no perfil do cordão (28).

O potencial de oxidação de um gás pode ser definido como a capacidade de um gás de proteção oxidar um metal durante a soldadura. Por exemplo, o Árgon e o Hélio, são

gases inertes, não exercendo por isso qualquer influência química sobre o metal depositado. Já o Dióxido de Carbono e o Oxigênio ( $O_2$ ) reagem com os elementos do metal de adição ou do metal base e formam escória na superfície do metal depositado. Isto pode resultar no enfraquecimento de qualidade da soldadura. Porém, a adição de gases reativos como o Oxigênio e o Dióxido de Carbono aumentam a estabilidade do arco elétrico. O tamanho de gota é diminuído e o número de gotas transferidas por unidade de tempo aumenta com o aumento da quantidade de oxigênio no gás de proteção (29, 30).

A densidade é um dos principais fatores que influencia a eficiência do gás de proteção. Os gases mais pesados que o ar atmosférico, tais como o oxigênio e o dióxido de carbono, necessitam de menor consumo do que os gases mais leves que o ar atmosférico para assegurar uma proteção adequada (31).

A tensão superficial define-se como sendo uma força por unidade de comprimento numa superfície líquida cuja unidade no Sistema Internacional (SI) é N/m. A tensão superficial influencia a transferência do metal líquido do eletrodo para o metal de base e também na formação e fluência do banho de fusão, tornando esta propriedade de grande importância na soldadura (26).

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

### 3. Conceptualização do Sistema

---

A presente investigação foca o processo aditivo com recurso a arco elétrico e matéria-prima na forma de fio. Neste processo, a deposição de material é feita através da utilização de um braço robótico ao qual foi acoplada a tocha de um equipamento de soldadura MIG/MAG. O fluxograma figura 7 permite identificar as diferentes etapas da metodologia de trabalho utilizada até à fase de realização de uma bateria de teste experimentais.

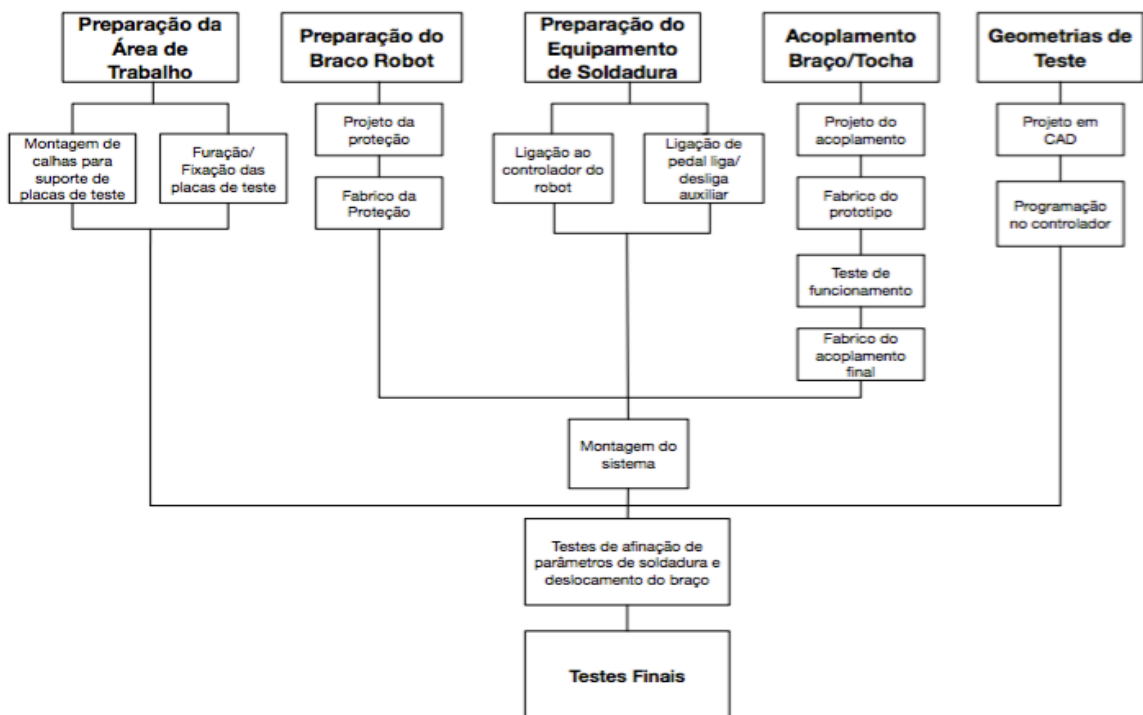


Figura 7 - Fluxograma representativo das etapas da metodologia de trabalho

### 3.1 Robot/Tecnologia Aditiva

---

A mobilidade da tocha de soldadura é assegurada por um braço robotizado da marca MOTOMAN, modelo HP-20D (Figura 8). Este braço mecânico é constituído por seis eixos controláveis, admitindo uma carga máxima de 20Kg. A precisão de movimentos de posicionamento dos eixos é de +/- 0,06 mm.

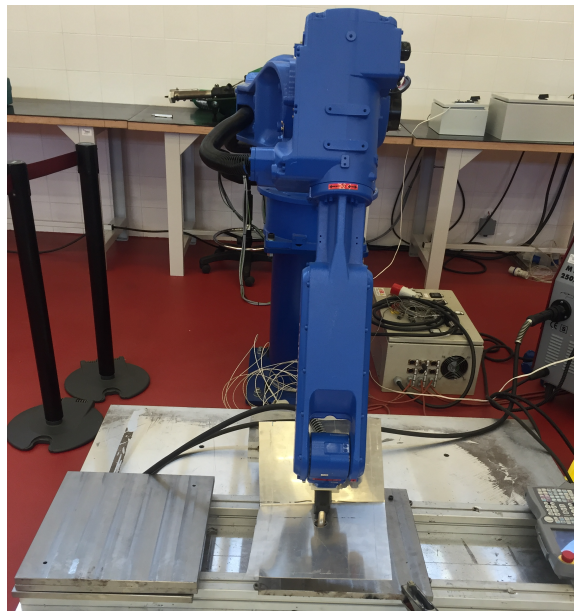


Figura 8 - Braço robot Motoman HP-20D

A deposição de material é efetuada com recurso a um equipamento de soldadura MIG/MAG da marca RED STAR, modelo MIG 250/4. Esta máquina trifásica, pode ser utilizada em diversos materiais, como aço, aço inoxidável e alumínio. Apresenta uma corrente de soldadura entre os 30 e os 250 amperes (A), pode utilizar fio entre os 0,6mm e os 1,0mm e a sua capacidade de inversão de polaridade permite a comutação entre fio sólido e fio fluxado (Figura 9). As principais características do equipamento encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1 - Características do equipamento MIG/MAG Red Star MIG 250/4

<b>Alimentação</b>	3 x 400 V	<b>Arrefecimento</b>	Ar
<b>Fusível</b>	16 A	<b>Fio (mm)</b>	0,6-1,0
<b>Ciclo de Trabalho 35%</b>	250 A	<b>Classe de Proteção</b>	IP 23
<b>Corrente de Soldadura</b>	30-250 A	<b>Classe de Isolamento</b>	H
<b>Tensão em Vazio</b>	32 V	<b>Dimensões (mm)</b>	800x450x770
<b>Seleções</b>	20	<b>Peso (kg)</b>	66



Figura 9 - Equipamento MIG/MAG Red Star MIG 250/4

O material de adição selecionado foi o AWS/SFA 5.18 ER70S-6. Este é um aço médio na forma de fio sólido cobreado manganês-silício destinado à soldadura de MIG/MAG de aços não ligados, como por exemplo aços de construção com uma tensão de rutura mínima de 485 MPa (Tabela 2). Tem como principais campos de aplicação a indústria automóvel, construção de tubagens, construção e reparação de linhas ferroviárias, equipamentos de construção e vasos de pressão (33). Pode ser utilizado quer em transferência por *spray* quer por curto-circuito.

Tabela 2 - Composição química do material de adição AWS/SFA 5.18 ER70S-6

<b>Carbono</b>	0,06-0,15%	<b>Cobre</b>	0,50% max	<b>Manganésio</b>	1,4-1,85%
<b>Silício</b>	0,8-1,15%	<b>Enxofre</b>	0,035% max	<b>Fósforo</b>	0,025% max
<b>Níquel</b>	0,15% max	<b>Crómio</b>	0,15% max	<b>Vanádio</b>	0,03% max
<b>Molibdénio</b>	0,15% max	<b>Ferro</b>	Balance	<b>Outros</b>	0,5% max

## 3.2. Desenvolvimento do Acoplamento

Para que a movimentação da tocha por parte do braço robot fosse possível foi necessário criar um acoplamento que permitisse a ligação entre tocha de soldadura e o braço robot. Este acoplamento vai fixar numa base já existente que serve como ponto de montagem para outras aplicações. Esta base permite o acoplamento de diferentes extremidades no braço robot para várias finalidades. Uma das novas finalidades e novas funcionalidades que foram acrescentadas à peça já existente foi um novo componente que permite acoplar a tocha de soldadura.

O acoplamento foi numa primeira fase desenhado recorrendo ao *software* CAD Solidworks e posteriormente fabricado por depósito de material fundido recorrendo à tecnologia FDM. Esta tecnologia de fabrico aditivo permite a criação de peças em termoplástico, neste caso o ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno). O equipamento utilizado foi a impressora UPrint da marca Stratasys.

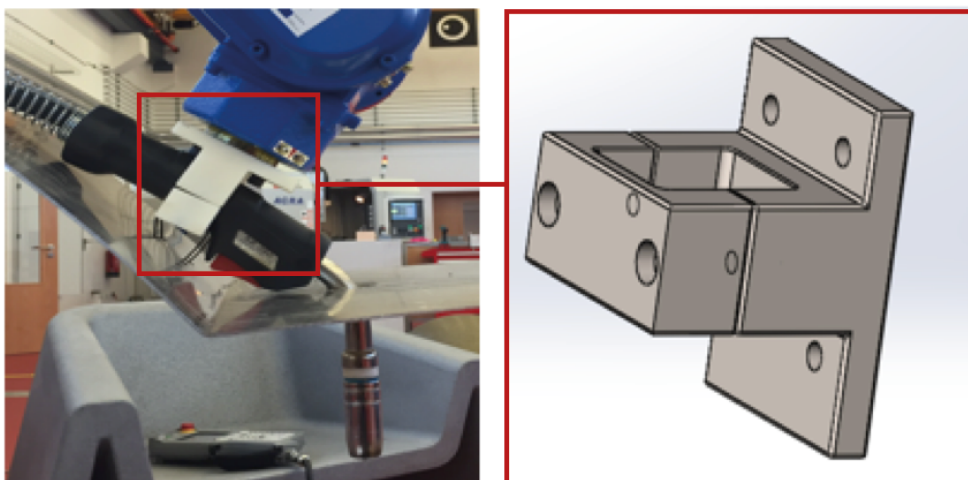


Figura 10 - Pormenor do acoplamento entre a tocha de soldadura e o braço robot

### 3.3. Área de Trabalho

---

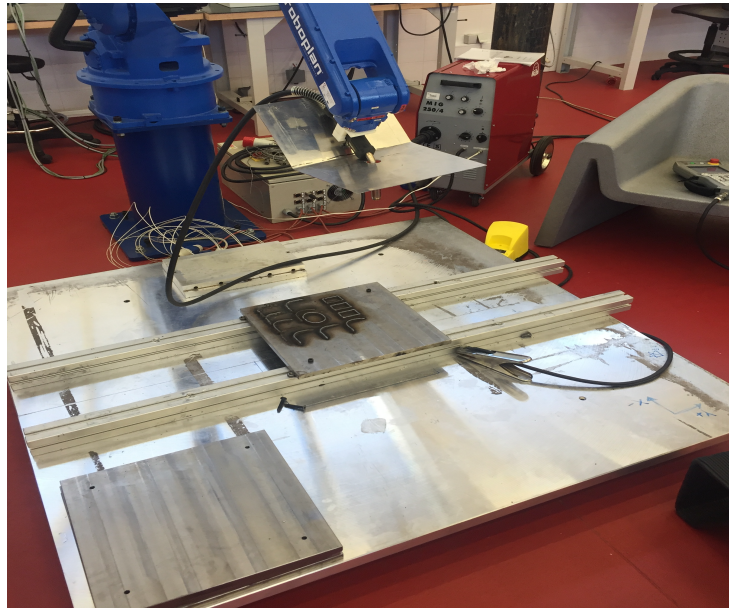
A área de trabalho sobre a qual foram realizados os ensaios experimentais é constituída por uma base de alumínio sobre a qual serão fixadas as placas de aço de construção (SAE 1045) com a dimensão de 400x400 mm e uma espessura de 20mm. Estas placas são fixas por meio de quatro parafusos M8, um em cada extremidade da mesma. Sobre as placas de aço, cuja composição química se encontra na tabela 3, foram realizados os ensaios experimentais.

*Tabela 3 - Composição química das placas de teste em aço SAE 1045*

<b>Constituintes</b>	<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>P max.</b>	<b>S max.</b>
<b>Composição Química (%)</b>	0,43-0,5	0,6-0,9	0,04	0,05

Entre as placas de teste e a placa base de alumínio foram colocadas calhas de forma a criar espaço para a colocação da pinça do polo positivo (massa) do equipamento de soldadura. Da mesma forma que as placas, as calhas são fixas na placa base por meio de um parafuso em cada extremidade da mesma.

A calha permite o correr das porcas onde enroscam os parafusos de fixação da placa de trabalho, podendo desta forma ajustar-se a placas de diversos tamanhos.



*Figura 11 - Área de trabalho*

### **3.4. Adaptação do controlo do equipamento de soldadura**

---

Sendo o controlo do equipamento de soldadura MIG/MAG normalmente feito através da ativação do gatilho na tocha, foi necessário criar uma alternativa a este mecanismo para que fosse possível aciona-lo à distância evitando-se assim possíveis problemas de segurança causados por salpicos ou pelo deslocamento do braço robot. Para tal, foi feita uma ligação entre o equipamento de soldar e o controlador do braço robot. Esta ligação permite, junto com a programação do braço, que se introduzam sinais que liguem/desliguem o equipamento de soldar remotamente (Figura 12).

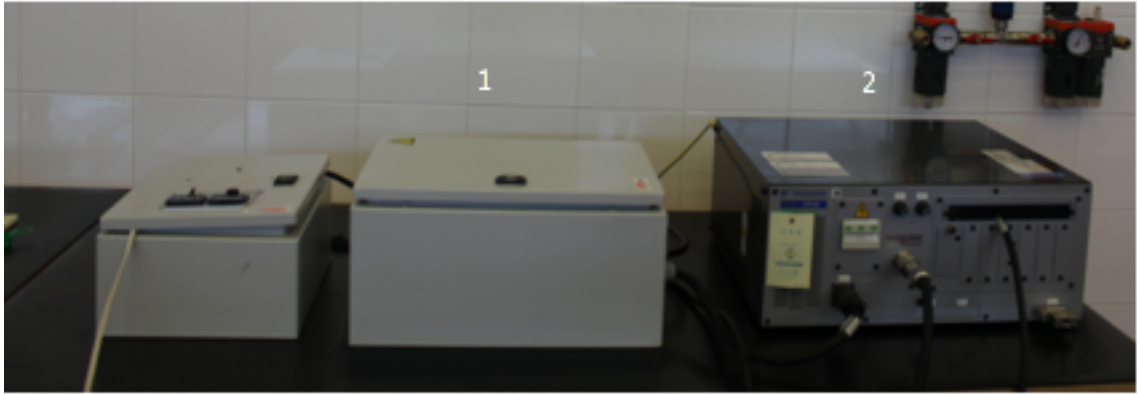


Figura 12 - Controlo do equipamento (1- caixa de controlo do equipamento de soldadura; 2 - Processador do braço robot)

Criou-se também uma ligação externa com recurso a um pedal de interruptor simples que quando pressionado ativa a deposição de material e quando na ausência de contacto desliga a mesma (Figura 13). A ligação do pedal foi feita através de um *bypass* ao cabo que conecta a tocha ao corpo da máquina. Esta ligação serve essencialmente como situação de recurso e para pequenos testes de rotina e de limpeza da tocha no final de cada deposição (desligando o gás, com o arco elétrico extinto e mantendo a deposição de fio para que seja possível cortar a sua ponta para que a próxima deposição seja feita com o *stick out* correto).



Figura 13 - Pedal auxiliar

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

## 4. Metodologia de Trabalho

---

### 4.1. Ensaios

---

Após o desenvolvimento e fabrico de todos os componentes e preparação dos espaços de trabalho necessários ao funcionamento do processo, iniciou-se a etapa experimental deste projeto.

Numa primeira fase foi depositado material sobre as várias placas de trabalho. Este material depositado respeita determinadas geometrias, escolhidas consoante os objetivos dos testes que foram realizados *a posteriori*.

Numa segunda fase, o material depositado foi estudado recorrendo a diversos ensaios mecânicos e termográficos permitindo a análise dos resultados obtidos experimentalmente.

### 4.2. Geometrias de teste

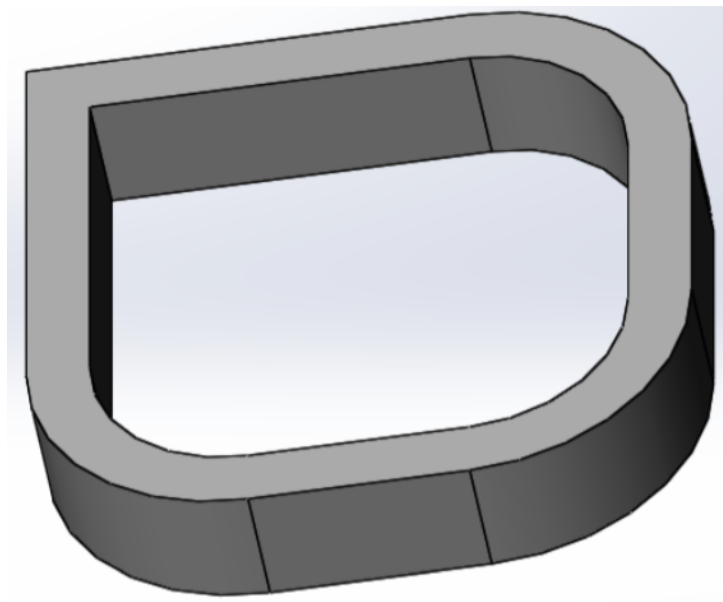
---

Como referido anteriormente, o material foi depositado segundo determinadas geometrias. Inicialmente foi escolhida uma geometria em “L” que, após os primeiros testes preliminares para afinação dos parâmetros de soldadura, foi rejeitada e substituída por uma geometria de secção fechada que permitisse que a deposição fosse feita em contínuo. Dessa forma conseguiu-se obter uma altura de camada mais constante. Na geometria em “L” a diferença de altura entre o ponto no qual se dá o início da deposição e o ponto onde se cessa a deposição (antes da tocha se posicionar novamente no ponto inicial e incrementar o seu valor de posição em  $Z$ ) era significativo. Isto devia-se ao desfasamento existente no equipamento de soldar entre o momento em que é terminado o arco elétrico e a alimentação do fio. Este desfasamento criava uma dimensão de fio à saída da tocha, ou seja, o comprimento do eléctrodo até ao bico de contacto da tocha (*stick out*) superior à

ajustada na máquina de soldar fazendo com que o início do cordão de soldadura tivesse um maior volume de material acumulado.

Sendo assim, optou-se por duas geometrias: uma geometria fechada de base quadrangular, mas com os cantos arredondados, com exceção do canto onde é feito o incremento em altura da tocha. Com o arredondamento dos cantos consegue-se uma maior fluidez da deposição de material uma vez que não existem mudanças de direção bruscas. Esta geometria permite, numa primeira etapa, verificar as diferenças em termos dimensionais e distorções ocorridas durante sobreposição das camadas entre a geometria obtida e o respetivo modelo CAD. Numa segunda etapa, a geometria é seccionada e maquinada para que possam ser feitos os ensaios de micrografia e de microdurezas, de acordo com as normas ASTM E3-11 e ASTM E92.

Cada chapa de trabalho tem a capacidade de acolher 16 geometrias teste numa configuração de 4 geometrias por linha com um intervalo de cerca de 16 milímetros entre cada geometria e também de distância às extremidades da placa.



*Figura 14 - Desenho 3D da geometria de teste*

A outra geometria é um paralelepípedo, de dimensões 220x28x10mm em que a orientação de construção vai diferindo. Um tipo de paralelepípedo será construído com a deposição de camadas ao longo do seu comprimento e outro paralelepípedo será construído com a deposição de material no sentido da sua largura. Estes paralelepípedos são maquinados até ao formato *standard* de provetes para a realização de ensaios de tração, de acordo com a norma ASTM E8/E8M.

Os ensaios de deposição nas duas geometrias são feitos com a variação de dois parâmetros: a velocidade do deslocamento da tocha, controlada através da velocidade do braço robot, e o incremento entre camadas, também ele controlado no braço robot. Os parâmetros de soldadura foram mantidos constantes em todos os testes.

Por limitações de tempo apenas foi possível concluir os primeiros ensaios de deposição referentes à geometria quadrangular. Os ensaios de deposição referentes à geometria paralelepipedica ficarão como trabalho futuro que servirá de complemento a este projeto.

### **4.3. Programação do Robot**

---

O controlo e a programação do braço robot são efetuados através do controlador FS100. Este permite trabalhar com diferentes tipos de programação, seja esta feita internamente no controlador ou externamente a partir de outros programas, como o bloco de notas ou programas semelhantes aos usados no desenho e maquinaria CAD/CAM que permitem uma maior complexidade de geometrias a trabalhar (Figura 15).



Figura 15 - Controlador FS 100 do braço robot

Uma vez que as geometrias teste apresentam reduzida complexidade, a programação foi feita manualmente. Numa primeira fase começou-se por programar no controlador, mas mostrou-se mais vantajosa a programação através do Bloco de Notas pois permitia uma edição de dados mais rápida. Outra das vantagens de programar a partir do PC é capacidade de duplicar os programas salvaguardando desta forma o programa original e utilizando outra cópia como base para experimentação de parâmetros.

A programação é feita através de dois programas: um primeiro no qual é programada a geometria de base e um segundo programa no qual são programados os incrementos. Este segundo programa é “chamado” pelo primeiro sempre que se inicia um novo ciclo, até se atingir a altura final no componente pretendia.

Os parâmetros de velocidade e incremento em altura foram deixados sob forma de variáveis que podem ser alteradas numa secção do controlador sem ser necessária a modificação do programa.

A passagem do programa entre PC e controlador foi feita por meio de uma *pen-drive* (ver Figura 16)

```
PECAPROVETE_2posicoes-2.txt
/JOB
//NAME PECAPROVETE_2posiAoes
//POS
///NPOS 21,0,0,0,0
///USER 11
///TOOL 2
///POSTYPE USER
///RECTAN
///RCONF 1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0
C00000=0.000,0.000,0.000,158.2795,25.3873,-42.8802
C00001=0.000,220.000,0.000,158.2811,25.3862,-42.8786
C00002=4.000,220.000,0.000,158.2811,25.3862,-42.8786
C00003=4.000,0.000,0.000,158.2795,25.3873,-42.8802
C00004=8.000,0.000,0.000,158.2811,25.3862,-42.8786
C00005=8.000,220.000,0.000,158.2811,25.3862,-42.8786
C00006=12.000,220.000,0.000,158.2811,25.3862,-42.8786
C00007=12.000,0.000,0.000,158.2811,25.3862,-42.8786
C00008=16.000,0.000,0.000,158.2811,25.3862,-42.8786
C00009=16.000,220.000,0.000,158.2811,25.3862,-42.8786
C00010=20.000,220.000,0.000,158.2811,25.3862,-42.8786
C00011=20.000,0.000,0.000,158.2811,25.3862,-42.8786
C00012=24.000,0.000,0.000,158.2811,25.3862,-42.8786
C00013=24.000,220.000,0.000,158.2811,25.3862,-42.8786
C00014=28.000,220.000,0.000,158.2811,25.3862,-42.8786
C00015=28.000,-4.000,0.000,158.2811,25.3862,-42.8786
C00016=0,-4.000,0.000,158.2811,25.3862,-42.8786
C00017=0.000,0.000,2.000,158.2795,25.3873,-42.8802
C00018=28.000,0.000,0.000,158.2811,25.3862,-42.8786
C00019=28.000,4.000,0.000,158.2811,25.3862,-42.8786
C00020=0.000,4.000,0.000,158.2811,25.3862,-42.8786

//INST
///DATE 2016/07/21 02:09
///ATTR SC,RW,RJ
///FRAME USER 11
///GROUP1 RB1
NOP
MOVL C00000 V=I002
MOVL C00001 V=I002
MOVL C00002 V=I002
MOVL C00003 V=I002
MOVL C00004 V=I002
MOVL C00005 V=I002
MOVL C00006 V=I002
MOVL C00007 V=I002
```

Figura 16 - Linguagem de programação utilizada

## 4.4. Parâmetros do Equipamento de Soldadura

---

Os parâmetros usados no equipamento de soldadura foram definidos em função do material utilizado neste projeto como material de adição, nomeadamente o material AWS/SFA 5.18 ER70S-6, sob a forma de fio bobinado, e com um diâmetro de 1 mm.

Durante os testes preliminares de deposição foram utilizados os valores tabelados para este material, indicados pelo fornecedor. A introdução dos valores desejados na máquina não pode ser feita de uma forma precisa uma vez que esta funciona por intermédio de manípulos e não contém nenhum tipo de *display* que os permita verificar. Os manípulos são numerados de 0 a 10, correspondentes ao valor mínimo e máximo suportado pela máquina, respetivamente. Contudo, o braço robot permite o controlo da velocidade linear de soldadura e da distância entre tocha e placa de teste de forma precisa (que define o comprimento do arco elétrico).

Inicialmente optou-se por uma distância de 2mm entre a placa de teste e a extremidade do fio e com base nesse valor e nos valores de referência apresentados pelo fornecedor relativos ao material de adição, foram testados os parâmetros do equipamento de soldar até se obter um cordão de soldadura o mais perto do ideal. Na tabela 4 encontram-se os vários resultados obtidos nos ensaios preliminares. O teste 7 e o teste 14, que apresentam valores semelhantes, foram os que permitiram obter os melhores cordões de soldadura. Estes testes iniciais foram feitos com uma velocidade linear de soldadura de 100m/min, à exceção do teste 13 e 14 em que a velocidade foi reduzida para 90m/min de forma a obter um cordão ligeiramente mais largo.

*Tabela 4 - Parâmetros do equipamento de soldadura durante os ensaios preliminares*

<b>Nº Teste</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
<b>Gás (l/min)</b>	20	24	25	25	25	25	25	20	20	20	20	20	20	20
<b>Regulação do Comprimento do Fio (Posição)</b>	3	3	3	3	3	3	2,5	2	1,5	2	2	2	2	2
<b>Regulação do Tempo de Pontos (Posição)</b>	5	5	5	7	8	8	4,5	4,5	4,5	4,5	5	5,5	6	4
<b>Velocidade do Fio (Posição)</b>	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	2,5	2,5	3	3	2,5	3	3,5	3
<b>Voltagem (Posição)</b>	6	6	7	6	6	7	6	6	6	4	4	4	4	4

Após os testes para afinação dos parâmetros de soldadura realizaram-se os ensaios finais destinados aos ensaios mecânicos. Estes testes foram realizados fazendo-se variar dois fatores: a velocidade de deslocamento da tocha e o incremento no eixo Z. Desta forma para a geometria quadrangular foram realizados 16 ensaios experimentais, em que 8 foram realizados com uma velocidade de deslocação linear de 70m/min e os outros 8 com uma velocidade de 90m/min. Para cada uma das velocidades foram utilizados os mesmos incrementos entre deposição de camadas no eixo Z: 2mm, 3mm, 4mm e 4,5mm, o que faz

com que cada incremento tenha 2 ensaios. Isto permite uma comparação entre ensaios semelhantes, possibilitando verificar a repetibilidade dos mesmos.

Em cada geometria foram feitos 6 incrementos (7camadas).

*Tabela 5 - Parâmetros do braço robot durante os ensaios de deposição*

<b>Nº Ensaio</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
<b>Velocidade (m/min)</b>	70	70	70	70	90	90	90	90	90	90	90	90	70	70	70	70
<b>Incremento (mm)</b>	2	3	4	4	2	3	4	4,5	2	3	4	4,5	2	3	4	4,5

Os ensaios nº 8,9,10,11,12 apresentaram alguns defeitos na deposição devido à extinção prematura no arco elétrico. Esta quebra deu-se essencialmente no último incremento em que a tocha já se encontrava a uma distância maior da camada anterior. Já o ensaio nº3 foi interrompido devido a uma falha no robot. No entanto, estes foram considerados pois esta falha de arco elétrico só se deu na última passagem.

Após estar terminada a deposição do material, a chapa foi cortada na serra separando os 16 provetes individualmente. Os provetes obtidos, por sua vez, foram fresados de forma a obter uma superfície plana e que permitisse ser visualizada ao microscópio. De cada provete obtiveram-se quatro amostras, pertencentes a cada um dos quatro lados retos da geometria quadrangular. As amostras que contêm o ponto onde se dá o incremento em Z (primeiro lado a ser depositado e último lado a ser depositado) apresentam uma dimensão menor pois apenas compreendem no seu trajeto uma das curvas do provete. As duas restantes amostras apresentam uma dimensão maior pois compreendem duas curvas no seu trajeto. Ao serem seccionadas na região da curva (canto em arco), permitem visualizar as camadas transversalmente (Figura 17).

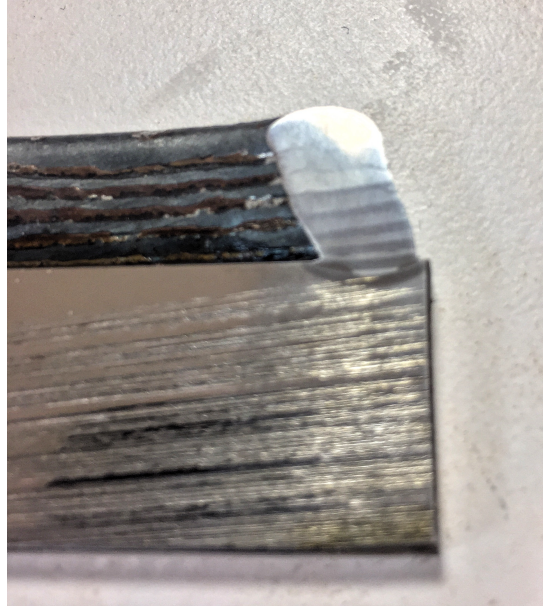


Figura 17 - Pormenor do corte transversal das camadas

## 4.5. Ensaios Mecânicos e Termográficos

---

Durante a deposição de material foram tiradas algumas termografias com o propósito de se perceber a variação de calor consoante o incremento e a velocidade da deslocação.

Depois de criadas as geometrias necessárias, foram realizados os ensaios mecânicos em laboratório.

Os ensaios mecânicos efetuados em ambiente laboratorial foram os ensaios de micrografia e micro-dureza. Estes ensaios visam obter informações detalhadas sobre o estado do material após a deposição, bem com a ligação entre camadas.

### 4.5.1. Micrografia

---

Os ensaios de micrografia, ou quando aplicados a metais, denominados de ensaios de metalografia, são o estudo de metais através da observação, com recurso a apenas o olho humano ou com recurso a microscópio. Informação como o tamanho do grão, as fases presentes, homogeneidade química, distribuição de fases e alongamento de estruturas

formadas pela deformação plástica podem ser obtidas através deste tipo de observação (32).

Para que o ensaio fosse feito nas melhores condições foram seguidas as diretrizes da norma ASTM E3-11.

Como referido anteriormente, os provetes obtidos por deposição de material foram fresados e seccionados para que as suas dimensões fossem concordantes com a área do microscópio.

A superfície das amostras foi ainda lixada com recurso a duas lixas de diferentes granulometrias: uma de 300 para um primeiro desbaste e uma de 1200 para eliminar os riscos superficiais resultantes da fresagem. Posteriormente foram polidas de forma a uniformizar ainda mais a superfície. Para este processo recorreu-se à máquina de lixar/polir ROTOPOL-21 da marca Struers existente no Laboratório de Materiais da Escola Superior de Tecnologia e Gestão.

Foram utilizadas várias ampliações sendo que a capacidade de distinguir as diferentes zonas de deposição no material era mínima pelo que se optou por recorrer ao ataque químico com Nital de forma a revelar a estrutura do material.

O Nital é uma solução de ácido nítrico e álcool etílico que pode ver a sua concentração variar consoante o material sobre o qual vai ser aplicado. A concentração utilizada foi de 5% (5% Ácido Nítrico – 95% Álcool Etilico) sendo esta a concentração normalmente recomendada na bibliografia para aços médios, aços de baixo carbono e para alguns aços de ferramenta.

Depois do polimento, o Nital é colocado sobre a área a inspecionar recorrendo a uma pipeta plástica sendo a amostra depois lavada em água corrente a fim de eliminar o Nital da superfície e terminar a sua reação. Para o efeito pretendido o tempo necessário para o Nital reagir com a superfície ao ponto de se conseguir distinguir as diferentes camadas foram de 4 segundos. Efetuaram-se testes com uma exposição mais elevada mas o grão do material torna-se demasiado arredondado retirando alguma nitidez à micrografia.

Os equipamentos utilizados para os ensaios de micrografia foram o microscópio Zeiss Axiotech acoplado a uma câmara fotográfica Canon PowerShot A640 (Figura 18). Desta forma foi possível fotografar as amostras.



Figura 18 - Microscópio Zeiss AxioTech

## 4.5.2. Ensaios de Micro-dureza

---

Os ensaios de dureza podem ser descritos como sendo de macro-dureza, micro-dureza e nano-dureza (34).

Macro-dureza é um método rápido e simples de se obter dados de propriedades mecânicas do material a partir de uma pequena amostra. No entanto, quando os materiais têm uma microestrutura fina, são multi-fase, não homogêneos ou propensos a fissuras, os resultados obtidos pelos ensaios de macro-dureza vão ser altamente variáveis e não irão identificar características de superfície individuais. É aqui que as medições de micro-dureza são adequadas.

Este tipo de ensaio permite determinar a dureza dos diferentes microconstituintes de uma estrutura, ou a identificação de gradientes de dureza elevados como por exemplo as resultantes de encruamento.

O ensaio de micro-dureza efetua-se exercendo uma carga contínua sobre o material, medindo a carga, profundidade de penetração e tempo de aplicação da carga.

Os ensaios foram realizados no microdurometro HMV-2 da marca Shimadzu (Figura 19) respeitando a norma ASTM E92 equipado com uma mesa micrométrica xy. As

medições de microdurezas de Vickers foram executadas de acordo com a norma ISO 6507/2, respeitando uma distância de 1,5mm entre cada indentação

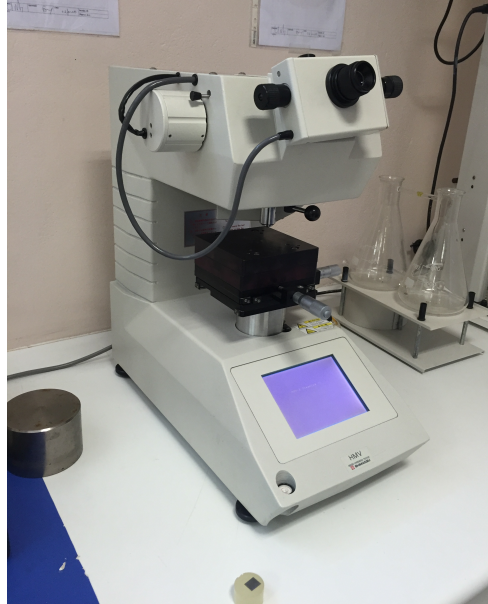


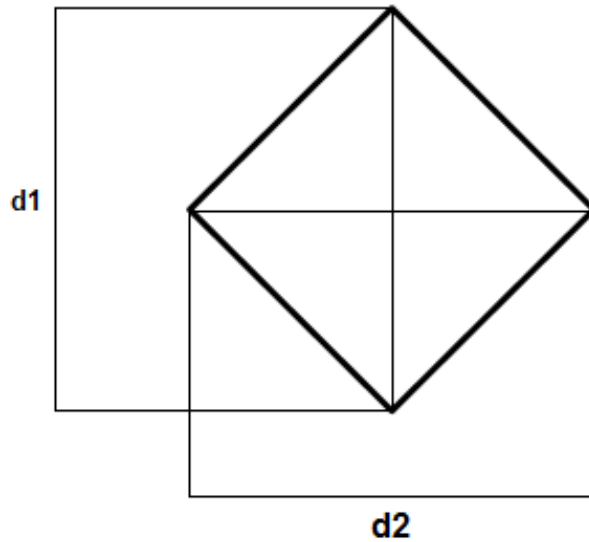
Figura 19 - Microdurómetro Shimadzu HMV-2

A medição dos valores de microdureza foi efetuada com base na seguinte expressão matemática,

$$HV (N/mm^2) = 0,1891 \frac{F}{d^2} \quad (1)$$

onde F é a carga de teste (500gr/4,903N) e d é a média das linhas diagonais da indentação (d1 e d2 – Figura 20). A duração de cada teste foi de 15 segundos e a lente utilizada no monitor ótico do microdurómetro permitiu uma ampliação da amostra igual a 40x.

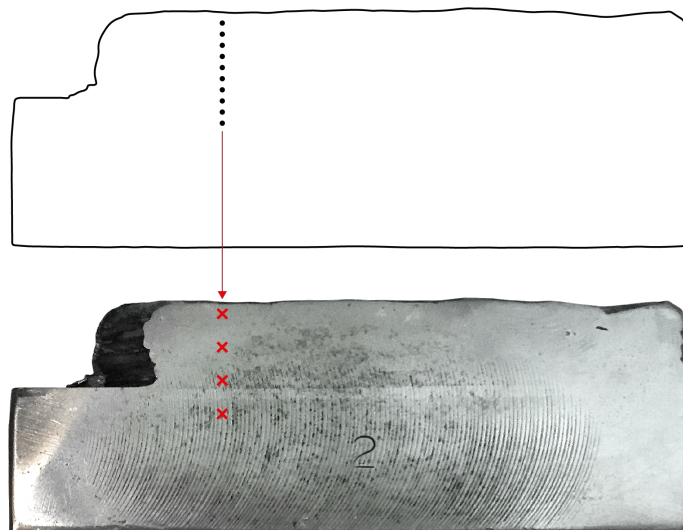
O micrómetro que permite a deslocação da mesa xy, tem uma gama de medição [0-250 µm] e uma resolução de 0,01 µm.



*Figura 20 - Esquema representativo da indentação e respectivas diagonais na medição de microdurezas HV*

Para este ensaio foram selecionados quatro amostras, duas de cada velocidade de deslocação da tocha. Os incrementos entre camadas são respectivamente de 3mm e 4mm.

Na figura 21 é apresentado um esquema representativo da forma como foram distribuídos as indentações pela amostra. A primeira indentação em cada uma das amostras foi realizada a 15mm da base, sendo que os ensaios seguintes foram realizados até ao limite superior da amostra. Consoante a altura das camadas de material depositado cada amostra pode apresentar um número diferente de pontos de medição.



*Figura 21 - Esquema representativo dos ensaios de microdureza*

## 4.6. Termografia

---

A termografia é um método de diagnóstico não destrutivo com diferentes aplicabilidades. Este método permite a obter uma imagem da variação de temperaturas à superfície de um determinado objeto sem contato direto com o mesmo. Esta medição é conseguida através da radiação térmica na gama dos infravermelhos emitida e refletida pela superfície do objeto (39).

Conhecendo a emissividade do objeto em análise e pela medição da energia total cria-se uma imagem denominada de termograma de onde é possível retirar valores de diferentes pontos da superfície. No entanto a medição destes valores encontra-se condicionado variáveis como a temperatura dos meio envolvente, condições atmosféricas, de valores de emissividade, de distância e ângulo de incidência (40).

O procedimento deste ensaio é bastante acessível bastando para a câmara disponível calibrar o fator de emissividade do material em análise, a distância, temperatura e humidade relativa. Após essa calibração a câmara encontra-se ajustada e pronta a funcionar.

O valor de emissividade é um valor tabelado para os aços e ferros, na especificação de placa aplainada e tem o valor de 0,61. Os valores de humidade relativa e da temperatura foram utilizados valores aproximados para o dia em que se realizaram os ensaios, sendo de 50% para a humidade relativa e 28°C para a temperatura.

As termografias foram tiradas em vários pontos da peça, tentando que estes fossem semelhantes de incremento para incremento.

Para a realização dos ensaios foi utilizada uma máquina termográfica da marca FLIR, modelo T335.

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

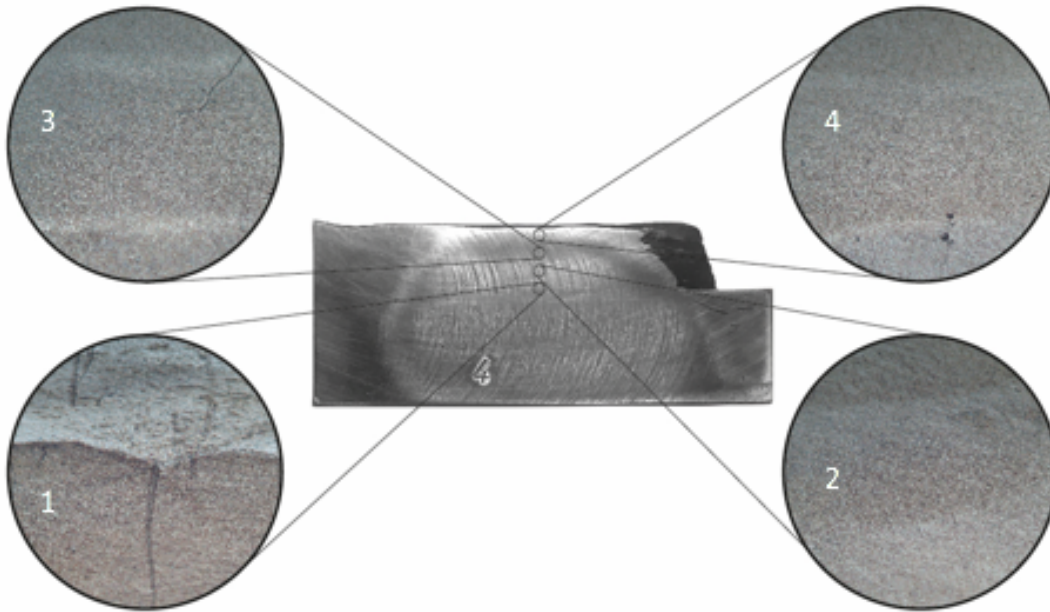
## 5. Análise e Discussão de Resultados

### 5.1. Ensaios de Micrografia

---

Percorrendo a superfície da amostra é possível perceber as diferentes camadas resultantes dos vários incrementos, bem como as diferentes microestruturas resultantes em cada. Na figura 22, pertencente à amostra 4 (70m/s e incrementos de 4mm) foram registadas diversas micrografias, a partir das quais se pode constatar que existe um bom nível global de homogeneização da estrutura obtida na parede do componente resultante da deposição das diversas camadas de material. Esta homogeneização está patente nos pormenores 2 a 4 da figura 22, onde a diferença de coloração é ligeira entre camadas, estando a mesma relacionada com a zona de dimensão de grão diferenciada resultante do arrefecimento mais rápido do material quando em contacto com a camada anterior (já arrefecida). Já no pormenor 1 da figura 22 onde é visualizada a camada que se encontra em contato com o material da base existe uma coloração mais escura resultante de um maior gradiente térmico no material.

Atendendo ao objetivo final da realização de componentes de grande volume de material, os resultados experimentais obtidos no presente trabalho permitem afirmar que se verifica uma boa interligação entre camadas, não se verificando de um modo geral a presença de inclusões ou defeitos.



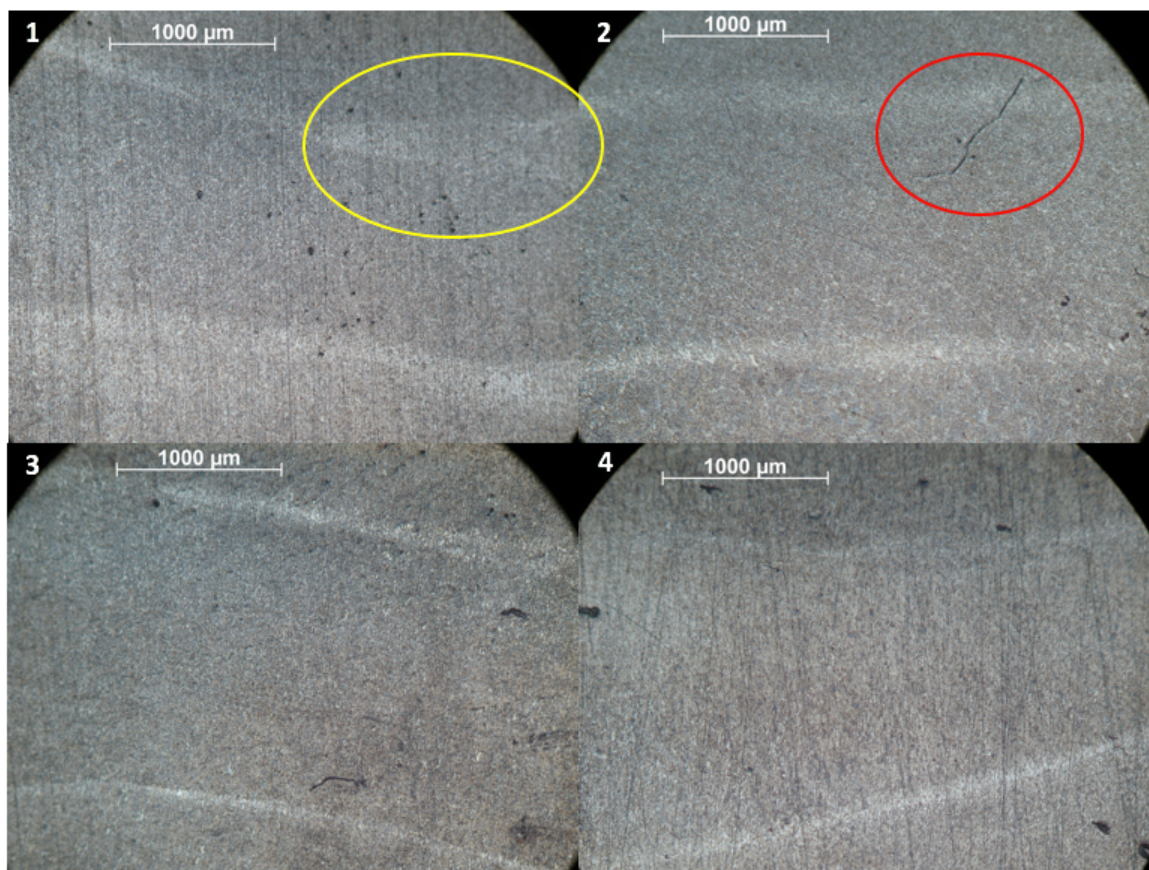
*Figura 22 - Pormenores da sobreposição de camadas (1-Ligação material de base/primeira camada depositada; 2-Ligação camada depositada 1/2; 3-Ligação camada depositada 2/3; 4-Ligação camada depositada 3/4)*

Um aspeto que pode revelar-se bastante influenciador da produtividade de um sistema de fabrico aditivo automatizado é a velocidade linear a que são realizados os ensaios. Esta velocidade deverá ser tal que permita, por um lado, uma efetiva e eficaz união entre camadas de material depositado, e por outro lado, deve assegurar um componente final com uma estrutura o mais uniforme possível. Comparando as micrografias das amostras 2 (velocidade 70m/s e incremento de 3mm), 4 (velocidade 70m/s e incremento de 4mm), 6 (velocidade 90m/s e incremento de 3mm) e 7 (velocidade 90m/s e incremento de 4mm) (Figura 23), realizadas com uma ampliação de 5x, é possível verificar a influência da variação da velocidade na distância entre camadas depositadas. Estas micrografias foram obtidas para a mesma camada, ou seja, para a 3<sup>a</sup> camada a partir da camada de ligação com o material de base. Pela observação da figura 23, pode-se constatar que, de um modo global, não é muito notória a inconstância na espessura das camadas depositadas. Pode destacar-se a micrografia da amostra 4, que apresenta uma distância entre camadas muito uniforme.

Outro aspeto que pode ser referido é a distorção existente entre camadas, que pode ser visível pela inclinação entre elas. Pode verificar-se uma ligeira tendência para a existência de uma menor distorção entre camadas cujo incremento seja superior,

nomeadamente 4mm. Do ponto de vista da produtividade do processo, nomeadamente em termos de taxa de depósito de material, esta tendência apresenta-se como bastante favorável, carecendo contudo de trabalho de investigação adicional de modo a corroborar os resultados obtidos no presente trabalho. Verifica-se uma tendência similar para a variação da velocidade linear de depósito, onde com velocidades mais baixas se denota uma maior distorção. A micrografia da amostra 2 ilustrada na figura 23 apresenta um exemplo do referido, facto que pode parcialmente ser justificado pelo maior gradiente térmico a que o material é sujeito devido à diferença de temperaturas existente no momento de deposição do material entre cada camada.

É ainda de salientar que, tal como observado na amostra 2, associado a velocidades de depósito mais baixas, podem ocorrer zonas em que o banho de fusão é de maior dimensão (para a mesma espessura de camada) podendo propiciar a existência de zonas de refusão na mesma camada. O pormenor da amostra 2 mostra, para a mesma camada, a coexistência de duas zonas de microestrutura de grão mais fino, e coloração mais clara.



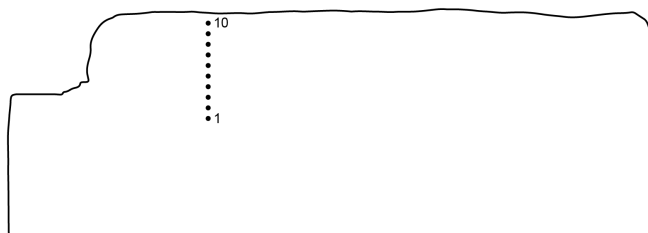
*Figura 23 - Micrografias das amostras: 1- amostra 2 (velocidade 70m/s e incremento de 3mm); 2- amostra 4 (velocidade 70m/s e incremento de 4mm); 3- amostra 6 (velocidade 90m/s e incremento de 3mm); 4- amostra 7 (velocidade 90m/s e incremento de 4mm)*

Embora, de um modo geral, os ensaios não revelem quantidades significativas de inclusões e defeitos no material das camadas depositadas, foi possível identificar, como se pode visualizar na imagem 2 da figura 23, circundada a vermelho, uma microfissura. Esta pode resultar de tensões internas geradas no material resultantes da deposição das camadas a velocidades mais baixas temperaturas mais elevadas, eventualmente provenientes de gradientes térmicos elevados entre os momentos da deposição.

## 5.2. Ensaios de Microdureza e Termográficos

---

Os ensaios de microdureza foram realizados em quatro amostras selecionadas (igualmente utilizadas nas micrografias), de forma ascendente, partindo de um primeiro ponto, a aproximadamente 15 mm da base (ensaio 1) e todos os outros ensaios foram feitos com um espaçamento de 1,5 mm entre eles até ao limite superior da amostra (Figura 24). Em virtude de o incremento diferir entre os provetes, pode resultar uma coluna de material de adição maior ou menor, pelo que o número de ensaios em cada amostra irá variar. Nos ensaios 2 e 6 foram efetuadas 10 medições, enquanto nos ensaios 4 e 7 foram efetuadas 11 e 9 medições, respetivamente.



*Figura 24 - Posição das diferentes indentações dos ensaios de microdurezas*

Pela análise dos gráficos de dureza resultantes das medições efetuadas nos provetes, das posições 1 a 10 (figura 26) é possível verificar a existência de um pico de dureza, que tipicamente ocorre nas medições correspondentes às posições de 2 a 4. Estas posições

correspondem à zona de ligação entre o material de base e o material de adição. Esse pico apresenta valores de dureza compreendidos entre os 350 HV (Dureza Vickers) e os 400 HV, à exceção do ensaio 4 em que o valor máximo obtido foi de 249 HV.

Após esse pico de dureza, os valores voltam a estabilizar, permanecendo numa gama de valores entre 200 HV e 250 HV. Na figura 25, está representado o gráfico de dureza do ensaio 2 (velocidade 70m/s e incremento de 3mm) onde através de uma linha de tendência é possível verificar a estabilização dos valores de dureza. Este facto denota uma estrutura com características uniformes em termos de dureza o que assegura um componente final com características constantes na sua composição.

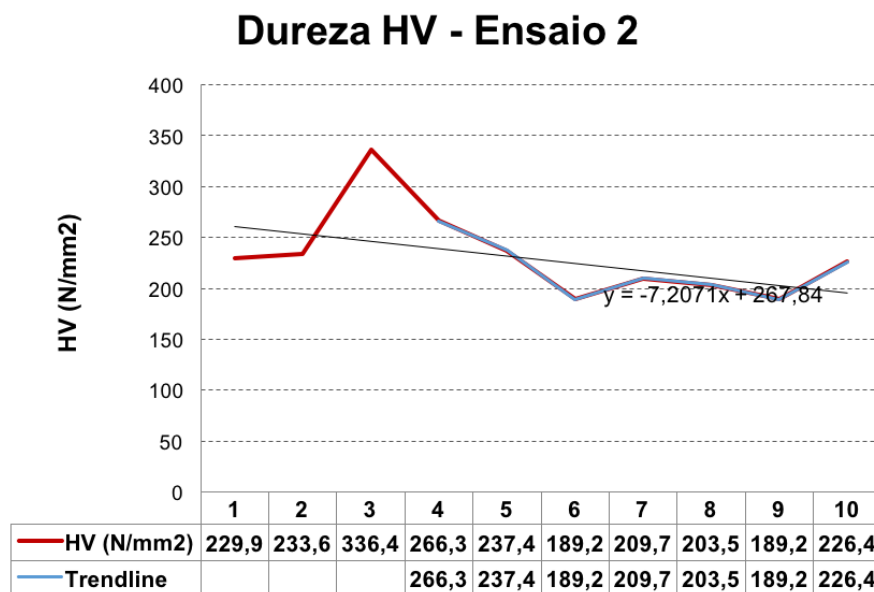


Figura 25 - Gráfico de dureza HV (ensaio 2)

De salientar ainda que os ensaios realizados à velocidade de 90m/s, na zona após o pico de dureza, apresentam valores de dureza mais uniformes, enquanto os ensaios realizados à velocidade de 70 m/s apresentam valores mais irregulares. Este facto pode resultar dos maiores gradientes de temperatura a que o material se encontra sujeito uma vez que o tempo entre deposições de camadas é superior ao que ocorre a quando da utilização de velocidades de deslocação lineares superiores.

É ainda possível distinguir uma aparente tendência de que os ensaios em que o incremento entre camadas foi de 3mm, apresentam um pico de dureza de valor mais elevado. Contudo, em virtude do reduzido número de amostras ensaiadas, será prematuro

avançar com algumas conclusões a respeito destes resultados, carecendo de trabalho de investigação adicional de modo a corroborar os resultados obtidos no presente projeto.

Comparativamente com os valores de dureza tabelados para o material de adição, de aproximadamente 300 HV, os valores atingidos nos ensaios laboratoriais foram relativamente mais baixos, o que pode significar um amaciamento da estrutura pelo efeito de temperatura da deposição sobre camadas ainda quentes. **(ver Anexo A)**

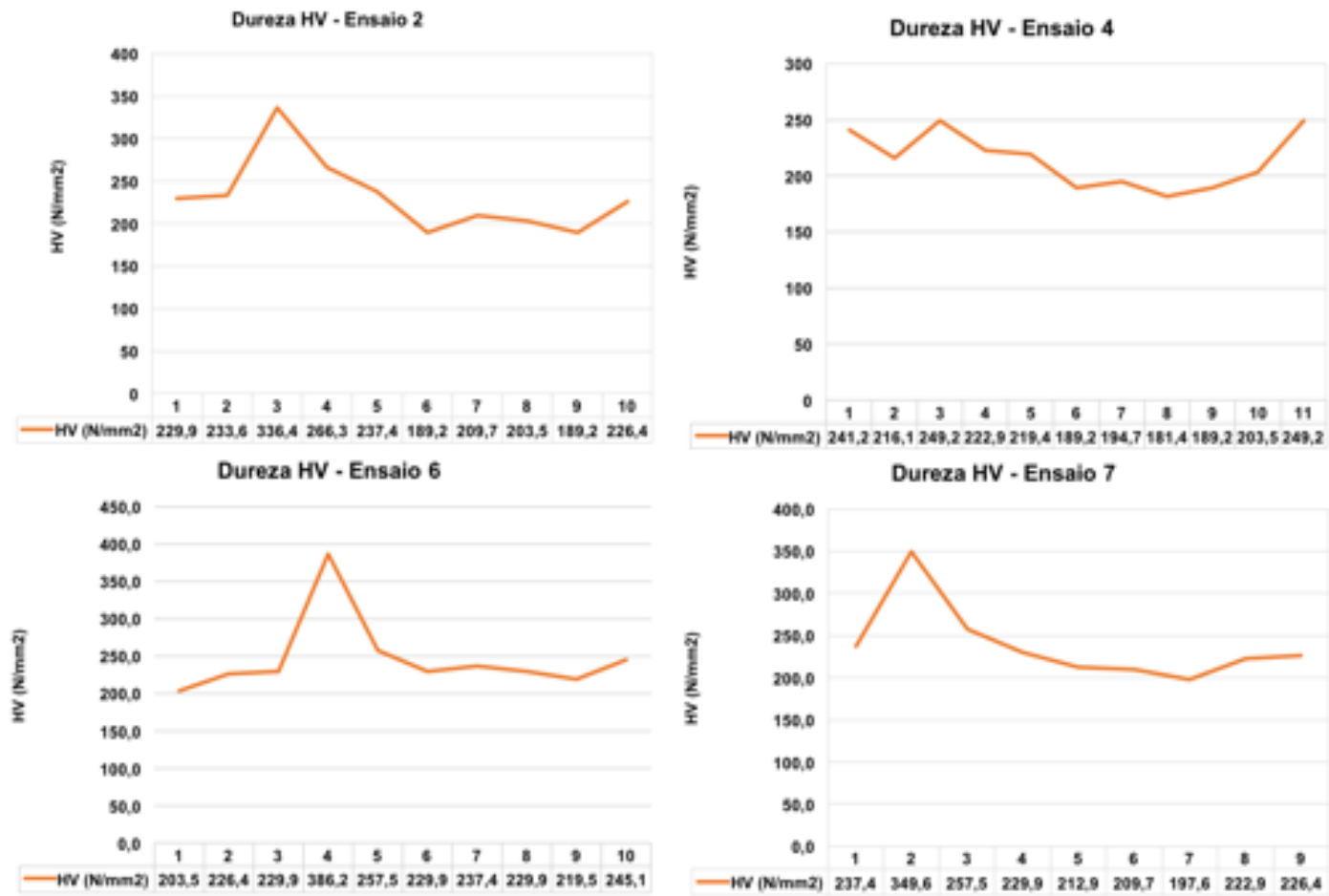


Figura 26 - Resultados obtidos nos ensaios de microdureza HV

Nas termografias efetuadas durante os ensaios realizados é possível ver a influência do calor libertado durante a deposição sobre as camadas inferiores. A figura 27, é composta por 7 termogramas, obtidos um em cada passagem, durante o ensaio 7 (Velocidade 90m/s, incremento 4mm) de deposição. Apenas na primeira passagem as temperaturas alcançadas não ultrapassaram a escala máxima suportada pelo equipamento (limite de 750°C), tendo sido atingido um valor máximo de 632°C. Nas restantes é possível visualizar que a zona com temperaturas que excedem os 750°C vai aumentando, bem como a zona afetada pelo calor da deposição.

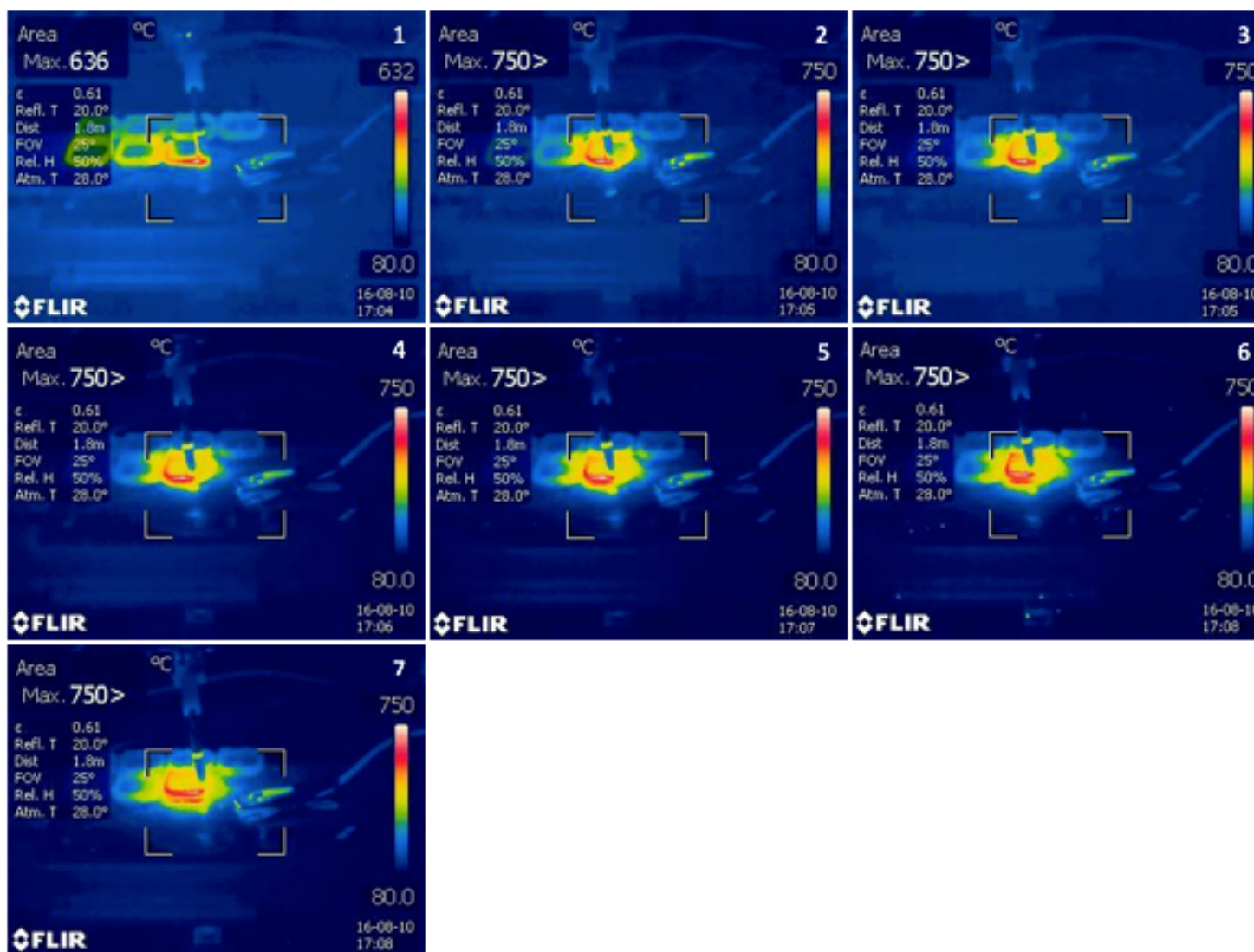


Figura 27 - Termogramas das diferentes camadas de material (Ensaio 7 – Velocidade 90m/s, incremento 4mm)

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

## 6. Conclusões

---

Quer a pesquisa bibliográfica, quer o trabalho prático desenvolvido permitiram aferir um conhecimento vasto de vantagens e desvantagens da utilização dos processos de fabrico aditivo estudados.

A conceptualização e desenvolvimento dos componentes necessários ao funcionamento do processo de fabrico aditivo, tais como o acoplamento do equipamento responsável pelo depósito do material ao braço robot e o sistema de controlo do conjunto revelaram-se eficazes no cumprimento da sua função sem falhas prejudiciais ao desempenho do processo. Embora a sua conceção tenha sido destinada à utilização neste projeto, facilmente é adaptável, podendo servir de base para trabalhos futuros.

Foram testados vários parâmetros de soldadura e de velocidade de deslocação do braço robot que resultaram em componentes-teste que diferiram entre si na altura e espessura da parede de material depositado.

A realização de ensaios micrográficos, mecânicos e termográficos nos componentes-teste obtidos permitiram verificar a existência de uma boa interligação entre camadas, sem a presença, de um modo geral, de falhas ou defeitos no material, viabilizando o objetivo final deste processo que seria a construção de componentes de grande volume de material.

Comparativamente a outros métodos de FA, foi possível verificar de forma prática as elevadas taxas de depósito associadas a este método. Embora apenas se tenha utilizado um tipo de material e um diâmetro de fio, facilmente se percebe que recorrendo a outros diâmetros se consegue aumentar ainda mais o volume de material depositado e que a variedade de materiais possíveis de serem utilizados só se encontra limitada pela quantidade de materiais disponíveis para o tipo de soldadura MIG/MAG ou a sua compatibilidade com o material de base.

O desenvolvimento do processo de fabrico aditivo robotizado revelou-se positivo, não como um substituto dos métodos de fabrico convencionais, mas sim como um complemento devido às suas características. A sua utilização permite uma otimização do material utilizado, garantindo um menor desperdício e uma conseqüente redução dos custos associados.

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

## 7. Trabalhos Futuros

---

A tecnologia estudada neste projeto é uma tecnologia recente, especialmente no CDRSP e na ESTG, uma vez que foi o primeiro projeto desenvolvido sobre este processo de FA. Existe portanto um conjunto vasto de trabalhos que poderão ser desenvolvidos a fim de complementar o conhecimento sobre este processo.

Como mencionado ao longo do projeto, devido aos atrasos inesperados, a parte dedicada aos ensaios de tração ficou por concluir. Seria importante a realização deste tipo de ensaio para que se percebesse a resistência do material quando sujeito a diversos esforços, nomeadamente de tração, flexão e fadiga. Desta forma seria possível perceber se, para o mesmo tipo de aplicação, um componente produzido por meio deste processo apresenta alguma vantagem ou desvantagem quando comparado com um componente fabricado por métodos convencionais.

A engenharia inversa, pela sua capacidade de criação de modelos tendo por base objetos reais, poderia também ser útil para perceber a diferença entre o modelo idealizado numa primeira fase e o modelo obtido. Este estudo permitiria aferir o tipo de tolerâncias conseguidas por este processo, averiguando a sua capacidade ou incapacidade de fabrico direto de componentes.

A programação e acionamento através de computador permite uma maior complexidade de geometrias e menores tempos de fabrico. Tal como na indústria da maquinação, também para este tipo de robots já existem *softwares* capazes de converter um modelo CAD para a linguagem da máquina. Este seria um bom complemento ao modo de programação utilizado neste projeto.

O estudo de diferentes tipos de material, dependendo da aplicação e do interesse do CDRSP/ESTG, poderá ser aprofundado. Materiais como aços, ligas níquel, alumínio ou titânio têm vindo a ser cada vez mais utilizados na indústria do FA.

A sobreposição de camadas de diferentes materiais permitiria a otimização das características dos componentes por zona, permitindo a poupança de material, diminuição do peso final e consequentemente o custo associado ao fabrico. O desenvolvimento de um processo capaz de fazer a adição de dois ou mais materiais distintos poderá ser ponderado.

Para diferentes tipos de materiais são utilizados diferentes tipos de gases de proteção. O estudo da influência dos parâmetros dos gases de proteção poderá ser igualmente alvo de trabalhos futuros.

# Bibliografia

---

1. K. G. Cooper, *Rapid Prototyping Technology*. Nova Iorque: Marcel Dekker, 2001.
2. D. W. R. I. Gibson, B. Stucker, *Additive Manufacturing Technologies* Nova Iorque Springer, 2010.
3. E. Grenda, *Printing the Future*: Castle Island, 2006.
4. Wohlers, Terry T., and Tim Caffrey. *Wohlers Report 2015: 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report*. Wohlers Associates, 2015.
5. F. B. Fernando Jorge Lino Alves, Manuel Simão, Rui Neto, Teresa Duarte, *ProtoClick - Prototipagem Rápida*. Porto: FEUP, 2001.
6. A. B. K. P. Karunakaran, S. Suryakumar, Lucas Dembinski, Georges Taillandier, "Rapid manufacturing of metallic objects", *Rapid Prototyping J.*, vol. 18 [4], pp. 264-80, 2012.
7. Fernando J. L. Alves, Manuel Simão, Rui Neto, Teresa Duarte, "Protoclick - Prototipagem Rápida", *Protoclick*, Porto, 2001.
8. Y. P. Kathuria, "Microstructuring by selective laser sintering of metallic powder", *Surface and Coatings Tec.*, vol. 116–119, pp. 643-647, 1999.
9. B. Song, S. Dong, S. Deng, H. Liao, and C. Coddet, "Microstructure and tensile properties of iron parts fabricated by selective laser melting", *Optics & Laser Tec.*, vol. 56, pp. 451- 460, 2014.
10. A. Safdar, "Microstructures and surface roughness of EBM produced Ti - 6Al - 4V," Licentiate Dissertation, Materials Science, Malmo University, Sweden, Lund, Sweden, 2010.
11. S. Biamino, A. Penna, U. Ackelid, S. Sabbadini, O. Tassa, P. Fino, et al., "Electron beam melting of Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy: Microstructure and mechanical properties investigation", *Intermetallics*, vol. 19, pp. 776-781, 2011.
12. Unocic, R. R., and J. N. DuPont. "Process efficiency measurements in the laser engineered net shaping process." *Metallurgical and materials transactions*, B 35.1, pp. 143-152, 2004.

13. DuPont, J. N., and A. R. Marder. "*Thermal efficiency of arc welding processes.*" Welding Journal-Including Welding Research Supplement 74.12, pp. 406, 1995.
14. Stenbacka, Nils, Isabelle Choquet, and Kjell Hurtig. "*Review of arc efficiency values for gas tungsten arc welding*", IIW Commission IV-XII-SG212, Intermediate Meeting, BAM, Berlin, Germany, 18-20 April, 2012.
15. Heralic, Almir. "*Monitoring and control of robotized laser metal-wire deposition*", Chalmers University of Technology, 2012.
16. Taminger, Karen, and Robert A. Hafley. "*Electron beam freeform fabrication: a rapid metal deposition process*", 2003.
17. Ding, J., et al. "*Thermo-mechanical analysis of wire and arc additive layer manufacturing process on large multi-layer parts*" Computational Materials Science, 50.12, pp. 3315-3322, 2011.
18. Almeida, P. S., and S. Williams. "*Innovative process model of Ti-6Al-4V additive layer manufacturing using cold metal transfer (CMT)*", Proceedings of the Twenty-first Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium, University of Texas at Austin, Austin, TX, USA, 2010.
19. Aiyiti, Wurikaixi, et al. "*Investigation of the overlapping parameters of MPAW-based rapid prototyping*", Rapid Prototyping Journal, 12.3, pp. 165-172, 2006.
20. Mannion, Bernard, and J. Heinzman. "*Plasma arc welding brings better control*", Tooling and Production 5, pp.29-30, 1999.
21. A. Scotti, "*A Review on Special Metal Transfer Modes in GMAW*", Rev. Bras. de Ciências Mecânicas - RBCM, ABCM, vol XX, n. 3, pp. 465-478. (ISSN 0100-7386), 1998.
22. V. Ponomarev, A. Scotti, J. Norrish and W. Lucas, "*Metal Transfer Modes in MIG/MAG (GMAW) Welding: Contributions to a New IIW Classification*", IIW Doc. XII-1960-09, 2009.
23. D. Sousa Leva, "*Levantamento de mapas operacionais de transferência metálica para soldagem MIG/MAG de aço ao carbono na posição plana*". Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, 2010.
24. Bracarense, Alexandre Queiroz. "*Gas Metal Arc Welding.*" Artigo Info Solda, PHD, 2003.

25. Irving, B., *Shielding Gases are the Key to Innovations in Welding*, Welding Journal, vol. 78, n 1, pp. 37-41, 1999.
26. Lancaster, J.F., *The Physics of Welding*, Oxford: Pergamon Press, London, 2 Ed., pp.340, 1996.
27. Machado, I. G., *Soldagem & Técnicas Conexas: Processos*, Porto Alegre: Editado pelo autor, pp. 477 , 1996.
28. Suban, M.; Tusek, J., *Dependence of Melting Rate in MIG/MAG Welding on the Type of Shielding Gas Used*, Materials Processing Technology, n. 119, pp. 185-192, 2001.
29. Stenbacka, N.; Persson, K.A., *Shielding Gases for Gas Metal Arc Welding*, Welding Journal, v. 68, n. 11, pp. 41-47, 1989.
30. Lyttle, K.A.; Stapon, W.F.G., *Select the Best Shielding Gas Blend for the Application*, Welding Journal, v. 69, n. 11, pp. 21-27, 1990.
31. Souza, Daniel, *Levantamento de mapas operacionais de transferência metálica para soldagem MIG/MAG de aço ao carbono na posição plana*, pp. 304. Dissertação de Mestrado-Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2010.
32. Science-Mech, Materials - Prepared by S. Venkannah. Materials Science, 2004.
33. UNIBRAZE, *Er70S-6 Carbon Steel Welding Wire*, <http://www.unibraze.com/DataSheets/Data70S-6.pdf> (consultado em 26/09/2016).
34. CALIFORNIA STATE UNIVERSITY NORTHRIDGE, *MSE:528 Microhardness Hardness Measurements*, [http://www.csun.edu/~bavarian/Courses/MSE\\_528/MicroHardnessLab.pdf](http://www.csun.edu/~bavarian/Courses/MSE_528/MicroHardnessLab.pdf) (consultado em 26/09/2016)
35. Costello A. and Sears J., “*Repair Opportunities for aerospace components through laser powder deposition*,” ICALEO Congress Proceedings, paper #305, pp.139-147, 2006.
36. Herderick, E., *Additive manufacturing of metals: A review*, Materials Science and Technology Conference and Exhibition 2011, MS and T’11, pp. 1413–1425, 2011.
37. Dutta B., Natu H., and Mazumder J., “*Near Net Shape Repair and Manufacturing of High Value Components using DMD*”, Supplemental Proc:

- Vol. 1 Fabrication, Materials, Processing, and Properties TMS, pp.131-138, 2009.
38. Xue L. and Islam M. U., "*Laser Consolidation – A Novel One-Step Manufacturing Process for Making Net-Shape Functional Components,*" Cost Effective Manufacture via Net-Shape Processing, Meeting Proceedings RTO-MP-AVT-139 15-1 – 15-14, 2006.
  39. Pina dos Santos, C.A.; Matias, L. C., *Aplicação laboratorial da análise termográfica para visualização da absorção capilar e da secagem de um provete de parede de alvenaria de tijolo cerâmico furado*, Relatório 144/02 – NCCt, Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, pp.34, 2002.
  40. Mendonça, Luís V., Miguel Martins do Amaral, Pedro Soares Catarino, "*A termografia por infravermelhos como ferramenta para auxílio à inspeção e manutenção dos edifícios*", 2013
  41. Lacatus, Elena, *Analysis of 3D Biocompatible Additive Structures Using COMSOL Multiphysics*, 2016
  42. Mullen, Lewis, et al., "*Selective laser melting: A unit cell approach for the manufacture of porous, titanium, bone in-growth constructs, suitable for orthopedic applications. II. Randomized structures*", Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials, 92.1, pp.178-188, 2010.
  43. Negi, Sushant, Suresh Dhiman, and Rajesh Kumar Sharma. "*Basics, Applications and Future of Additive Manufacturing Technologies: A Review*", Journal of Manufacturing Technology Research, 5.1/2, pp. 75, 2013.
  44. Wen, Shaoyi, and Yung C. Shin., "*Modeling of transport phenomena during the coaxial laser direct deposition process*", Journal of Applied Physics, 108.4: 044908, 2010.
  45. Palaniswamy, S. et al., *Direct Metal Deposition*, pp. 33–36, 2011.

# Anexos

---

# Anexo A: Características do material de adição



## 70S-6 Carbon Steel Welding Wire and Rod

U.S. ALLOY CO.  
dba Washington Alloy  
7010-G Reames Rd.  
Charlotte, NC 28216  
[www.weldingwire.com](http://www.weldingwire.com)



### ALLOY DESCRIPTION AND APPLICATION;

70S-6 is commonly a copper coated carbon steel that contains high levels of manganese and silicon for stronger deoxidizing power and has excellent welding results on mild steels where poor fit-up, rust and oils may be present.

### TYPICAL GMAW WELDING PROCEDURES; DCEP Short Circuit <sup>(1)</sup> 98Ar/2O<sub>2</sub>

Wire Diameter	Wire Speed (ipm)	Amps	Volts	Travel speed (ipm)	CO <sub>2</sub> (cfh)
0.023	80-350	30-85	14-19	10-15	20-25
0.030	110-340	40-130	15-20	12-24	20-25
0.035	100-520	60-235	16-25	11-40	20-30
0.045	70-270	90-290	18-23	12-22	25-35
<i>Spray 0.035</i>	<i>320-600</i>	<i>160-300</i>	<i>23-26</i>	<i>11-22</i>	<sup>(1)</sup> 25-35
<i>0.045</i>	<i>170-550</i>	<i>170-375</i>	<i>23-29</i>	<i>12-21</i>	<sup>(1)</sup> 25-35
<i>1/16"</i>	<i>175-350</i>	<i>275-475</i>	<i>25-31</i>	<i>9-19</i>	<sup>(1)</sup> 25-35

### TYPICAL GTAW WELDING PROCEDURES; DCEN with EWTh-2 truncated conical tip

Filler Wire Size	Tungsten	Amps	Volts	Gas Cup Size	Argon (cfh)	Base thickness
1/16"	1/16"	100-160	12	3/8"	20	1/16-3/32"
1/16-3/32"	3/32"	120-250	12	3/8"	20	1/8- 3/16"
1/8"	1/8"	150-300	12	1/2"	25	1/4-1/2"

Procedures may vary with change in position, base metals, filler metals, equipment and other changes.

### TYPICAL WIRE CHEMISTRY (%) AND WELD METAL PROPERTIES; 100%CO<sub>2</sub>

	AWS Spec.	70S-6		AWS Spec.	Typical
Carbon	0.06-0.15	0.10	Tensile Strength (psi)	70,000 min.	90,000
Manganese	1.40-1.85	1.70	Yield Strength (psi)	58,000 min.	73,000
Silicon	0.80-1.15	1.00	Elongation in 2"	22% min.	25%
Phosphorus	0.025 max.	0.010	Charpy V-notch at -20°F	20 ft-lbs min.	28 ft-lbs
Sulfur	0.035 max.	0.015	Reduction of area	n/a	60%
Copper contents and coating	0.5 max.		Average Brinell Hardness	n/a	160

**AVAILABLE SIZES:** TC 70S-6 = Spools of .023, .030, .035, .040, .045, .052, 1/16

TT 70S-6 = Cut lengths of .030, .035, .045, 1/16, 3/32, 1/8, 5/32

**SPECIFICATIONS;** ANSI/AWS A5.18 ER 70S-6

ASME SFA 5.18 ER 70S-6

**EAST COAST**  
7010-G Reames Rd  
Charlotte, NC 28216  
Tel (888) 522-8296  
Fax (704)598-6673

**GULF COAST**  
4755 Alpine Drive #100A  
Stafford, TX 77477  
Tel (877) 711-9274  
Fax (281)313-6332

**WEST COAST**  
8535 Utica Ave  
Rancho Cucamonga, CA 91730  
Tel(800)830-9033  
Fax (909)291-4586



DC 2012

Warehouse Distribution Center – Dayton, Ohio

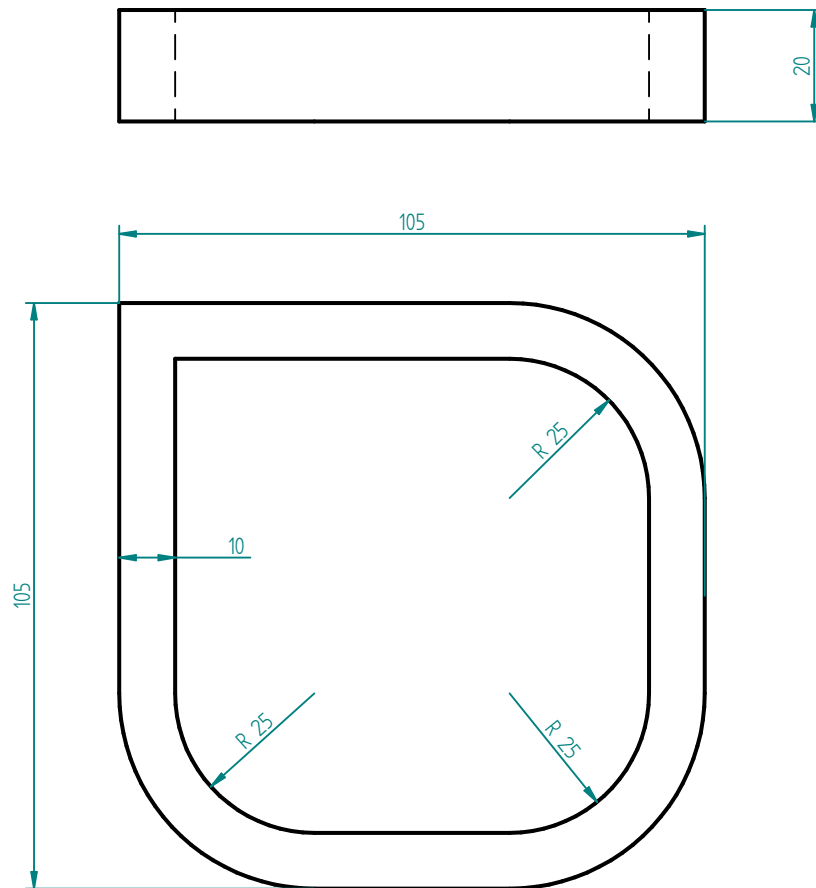
Head Office – Puyallup, Washington

Washington Alloy Company believes that all information and data given is correct. Use this information to assist in making your own evaluations or decisions and this information should not be mistaken as an expressed or implied warranty. U.S. ALLOY CO. assumes no liability for results or damages incurred from the use of any information contained herein, in whole or in part.

## Anexo B: Desenho 2D da geometria de teste

---

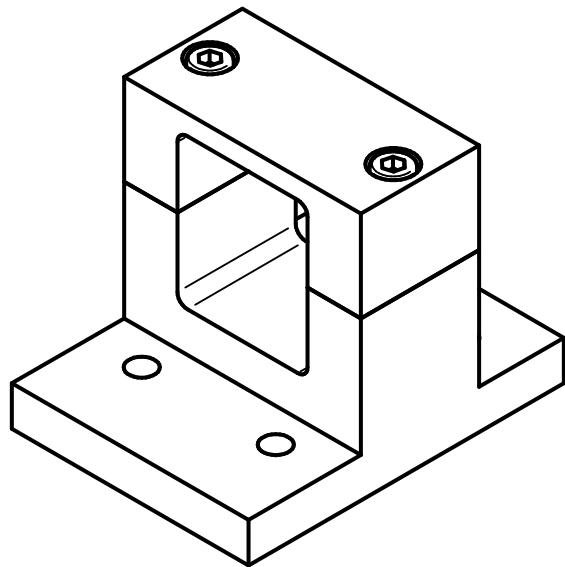
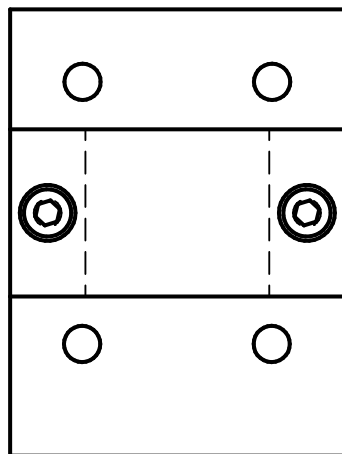
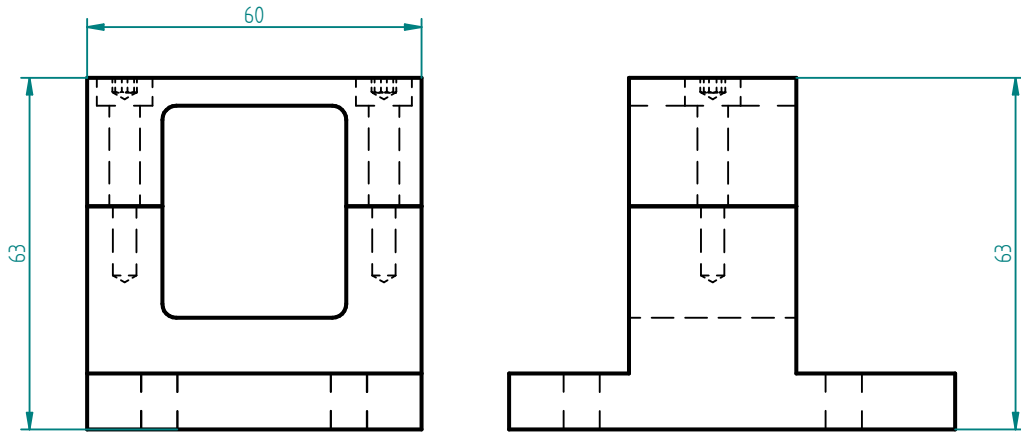
### Geometria de teste



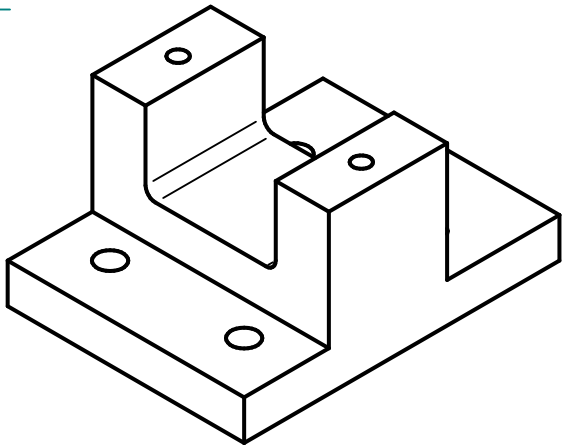
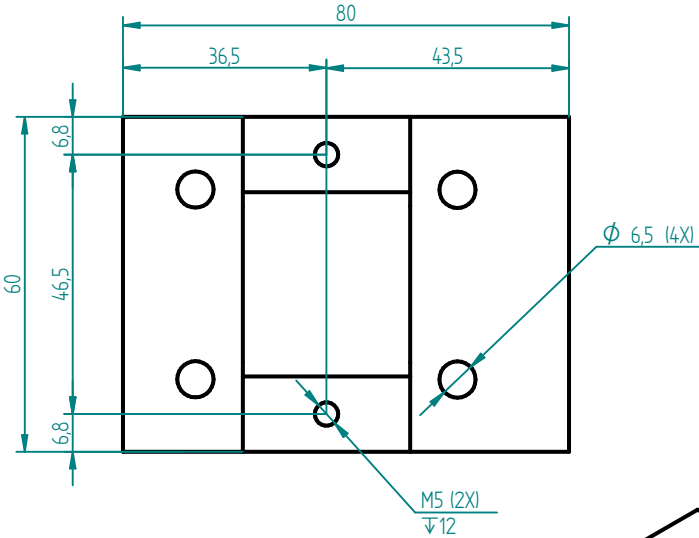
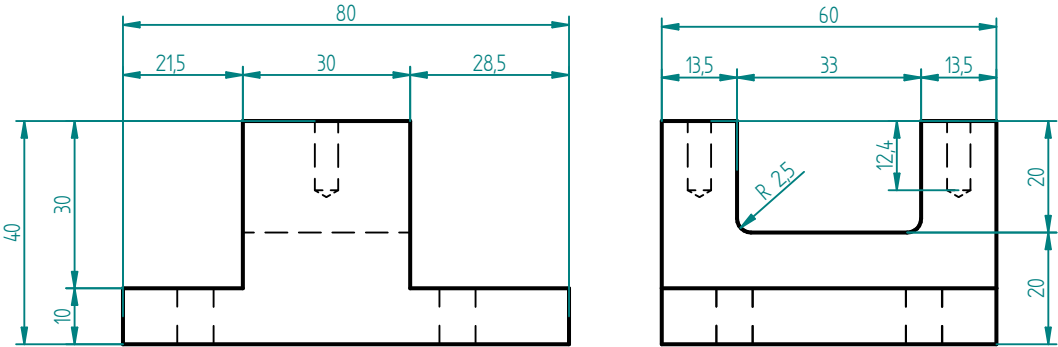
# Anexo C: Desenho técnico do acoplamento

---

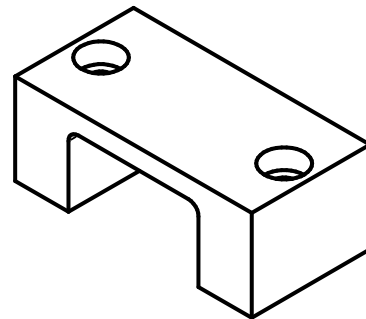
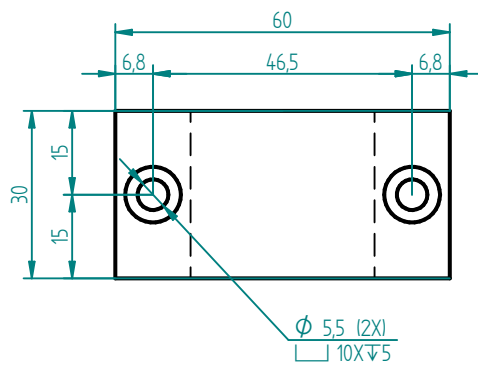
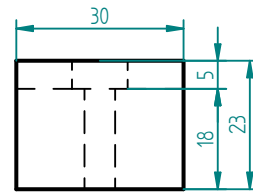
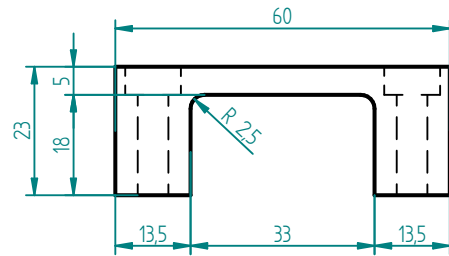
## Acoplamento completo



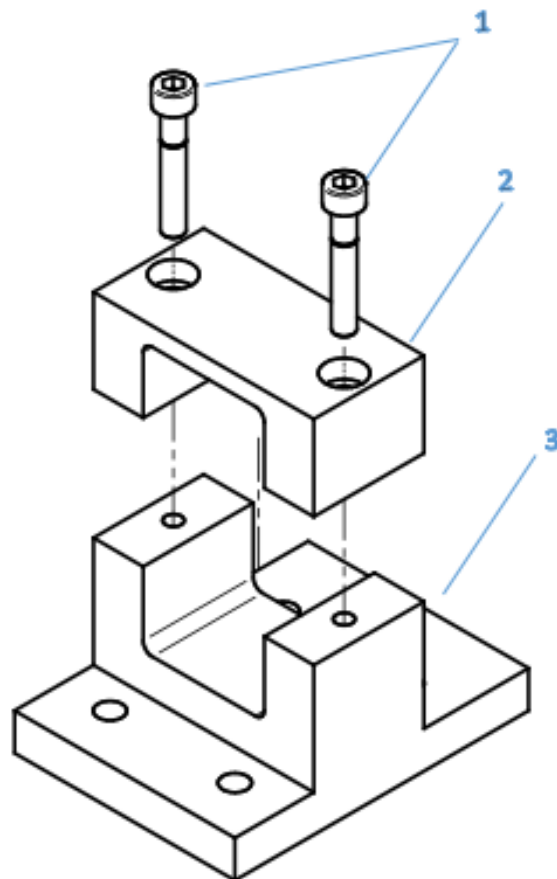
Parte inferior do acoplamento



## Parte superior do acoplamento



## Vista explodida



Posição	Descrição	Material	Quantidade
1	Parafusos Allen DIN 912 M5x30	Aço	2
2	Parte superior do acoplamento	ABS	1
3	Parte inferior do acoplamento	ABS	1