Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto





Teste e Caracterização de Peças Metálicas Produzidas por Directed Energy Deposition

Rui Pedro Teixeira Rodrigues

DISSERTAÇÃO: VERSÃO FINAL

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto em Engenharia Metalúrgica e de Materiais

> Orientador: Manuel Vieira (FEUP) Supervisor: Manuel Oliveira (CEiiA)

Candidato	Rui Pedro Teixeira Rodrigues	Código 201305475
Título	Teste e Caracterização de Peças Metálicas Produzida Deposition	as por Directed Energy
Data	17 de setembro de 2018	
Local	F106 - DEMM - FEUP - 17h00	
Júri	Presidente Professora Doutora Laura Maria Ribeiro	DEMM/FEUP
	Arguente Professora Doutora Ana Reis	DEMec/FEUP
	Orientador Professor Doutor Manuel Fernando Vieira	DEMM/FEUP

"7	Fenho em mim todos os sonhos do mundo." Fernando Pessoa
	À minha família

Agradecimentos

Em primeiro lugar, quero agradecer ao CEiiA pela oportunidade que me concedeu para poder trabalhar e evoluir diariamente rodeado de excelentes profissionais e amigos. Este agradecimento é extensivo a todas as pessoas com quem tive o prazer de privar ao longo dos últimos meses nesta instituição.

Ao meu orientador, professor Vieira, quero deixar o meu sincero obrigado pela sua disponibilidade e apoio ao longo deste trabalho. Sem a sua ajuda teria sido mais difícil.

À ADIRA, por todas as partilhas de conhecimento e por todo o apoio que me prestaram, o meu muito obrigado.

Aos meus pais, irmã, avôs, tios e primos, por todas as palavras de incentivo e por todo o apoio que me prestaram "mesmo não percebendo nada do assunto", quero agradecer de uma forma muito especial.

À Tintol, agradeço por todos os momentos que passamos juntos e por todos os sorrisos que partilhamos.

Aos meus amigos que me acompanharam nesta jornada, e que me proporcionaram inúmeros momentos de felicidade, quero agradecer pela nossa amizade.

Resumo

A tecnologia de *Additive Manufacturing* apresenta vantagens quando comparada com metodologias convencionais na produção de peças metálicas. No entanto, trata-se de uma tecnologia recente e necessita que vários parâmetros sejam melhor estudados de forma a otimizar a sua utilização.

Várias empresas em todo o mundo têm investido no desenvolvimento de equipamentos para *Additive Manufacturing*, incluindo a empresa portuguesa ADIRA. Esta empresa desenvolveu e construiu a primeira máquina portuguesa - versão protótipo - de *Additive Manufacturing*, que se encontra atualmente no CEiiA.

Sabendo que as propriedades mecânicas das peças produzidas por Additive Manufacturing são influenciadas por diversos fatores, utilizando a tecnologia Directed Energy Deposition no equipamento protótipo que o CEiiA adquiriu e um pó metálico de aço inoxidável martensítico AISI 431, pretendeuse descobrir quais são os parâmetros de construção que conferem as melhores propriedades às peças produzidas. Desse modo, variaram-se alguns parâmetros chave de construção, com o objetivo de perceber qual o seu impacto na qualidade final das peças.

Como resultado principal deste trabalho é de referir que se avançou na compreensão da influência dos diversos parâmetros e se conseguiu uma aproximação aos parâmetros de processamento ideais. Além disso, é de salientar que todas as peças produzidas apresentaram uma microestrutura heterógena, elevada resistência máxima e fratura frágil.

Palavras-Chave: additive manufacturing, directed energy deposition, aço inoxidável martensítico, parâmetros de processamento.

Abstract

The Additive Manufacturing technology presents advantages when compared with conventional methodologies of production of metallic parts. However, it is a recent technology and needs a deeper study of it's parameters in order to optimize their utilization.

Several companies have invested in the development of equipments for Additive Manufacturing, including the portuguese company ADIRA. This company developed and built the first portuguese machine - prototype version - for Additive Manufacturing, which is currently at CEiiA.

Knowing that the mechanical properties of the parts obtained by Additive Manufacturing are influenced by several parameters, using the Directed Energy Deposition technology, in the machine that is at CEiiA, and a stainless steel metal powder (AISI 431) was intended to optimize the parameters of construction to get the best mechanical properties of the parts produced. Thus, during this work, some key parameters were varied in order to understand their impact in the final quality of the parts produced.

Finally, although the optimal construction parameters were not reached, in this dissertation, it was made an approximation in that direction. In addition, it was noted that all the parts produced presented a heterogeneous microstructure, high tensile strength and brittle fracture.

Keywords: additive manufacturing, directed energy deposition, martensitic stainless steel, process parameters.



Índice

Agradecimentos Resumo Abstract Índice Lista de figuras Lista de tabelas	vii vii ix xi xv
Abreviaturasx	
 Introdução 1.1. Apresentação do CEiiA 1.2. Enquadramento do Projeto 1.3. Organização da Dissertação 	1 1
 Revisão Bibliográfica. 2.1. O que é Additive Manufacturing? 2.2. Quais são as principais etapas? 2.3. Quais são as principais vantagens? 2.4. Como é a matéria-prima utilizada? 2.5. Quais são as diferentes técnicas que existem? 2.5.1. Directed Energy Deposition 	3 5 8 9
3. Equipamento ADIRA AM	16
4. Material	19
 Procedimento Experimental Produção de paredes finas em substratos diferentes Produção de paredes finas variando os parâmetros de construção Produção de paredes finas variando as estratégias de deposição Produção em Z 	24 26 29
 6. Análise de Resultados. 6.1. Análise metrológica das paredes finas produzidas em substratos diferentes. 6.2. Análise microestrutural das paredes finas produzidas em substratos diferentes. 6.2.1. Parede fina produzida em substrato grande. 6.2.2. Parede fina produzida em substrato pequeno. 6.3. Análise de diferentes parâmetros de construção. 6.4. Análise de diferentes estratégias de deposição. 6.5. Produção em Z 	34 36 36 43 44 46
7. Considerações Finais	51
Referências Bibliográficas	55
Anexo Δ - Guia de Utilização ΔDIRΔ ΔΜ	58

Lista de figuras

Figura 1. Produção de uma peça metálica por <i>Directed Energy Deposition</i> onde é possível observar e identificar diferentes camadas formadas durante o processo [7]
Figura 2. Quantidade de equipamentos de AM vendidos desde 2000, de acordo com o relatório Wohlers 2018 [12]5
Figura 3. As oito etapas chave dos processos de AM [11]
Figura 4. (a) Pós obtidos por PREP; (b) pós obtidos por RA; (c) pós obtidos por GA; (d) e (e) comparação entre os pós produzidos por GA e WA, respetivamente; (f) e (g) porosidades obtidas num componente produzido nas mesmas condições com pó GA e PREP, respetivamente [8].
Figura 5. Variação da densidade (ρ) de componentes com as dimensão e distribuição das partículas de pó [16]12
Figura 6. Esquema DED utilizando: (a) pó metálico; (b) fio metálico e feixe de eletrões; (c) fio metálico e arco elétrico [8]14
Figura 7. Equipamento ADIRA AM [4]16
Figura 8. PC industrial utilizado para controlar o processo e transferir ficheiros
Figura 9. (a) Laser TERADIODE 2kW; (b) <i>chiller</i> LAUDA; (c) alimentador de pó; (d) árgon comprimido17
Figura 10. (a) e (b) Ilustração dos substratos grandes e pequenos, respetivamente19
Figura 11. Morfologia das partículas do pó utilizado, observada em SEM20
Figura 12. Partícula de pó onde se realizou análise de EDS21
Figura 13. Mapeamento químico de uma amostra do pó utilizado21
Figura 14. Distribuição granulométrica do pó Metco 42C22
Figura 15. Diagrama de Schaeffler23
Figura 16. (a) e (b) Ilustração das paredes finas e respetivas dimensões nos substratos pequenos e grande. A imagem não se encontra à escala24
Figura 17. Estratégia de deposição utilizada na produção das primeiras

Figura 18. (a) Ilustração do processo; (b) equipamento ADIRA AM em funcionamento
Figura 19. Ilustração de uma parede fina e respetivas dimensões, num substrato grande. A imagem não se encontra à escala
Figura 20. (a), (b) e (c) Efeitos provocados pelo reposicionamento da cabeça de deposição após conclusão de cada camada27
Figura 21. Estratégia de deposição utilizada na produção das paredes finas com parâmetros de construção diferentes
Figura 22. Modelo CAD das paredes produzidas e dos provetes obtidos 29
Figura 23. Ilustração das duas pré-formas produzidas segundo o eixo Z. A imagem não se encontra à escala32
Figura 24. Estratégia de deposição com rotação de 67° entre camadas utilizada na produção das duas pré-formas
Figura 25 . Mapa de cores obtido por análise dimensional de uma parede fina produzida sobre um substrato grande34
Figura 26. Mapa de cores obtido por análise dimensional de uma parede fina produzida sobre um substrato pequeno34
Figura 27. Efeito provocado pela descalibração do foco XY35
Figura 28 . Microestrutura das primeiras camadas depositadas afetadas pelo calor gerado durante a remoção do substrato
Figura 29. Microestrutura das primeiras camadas depositadas próximas da base, que não foram afetadas pelo calor gerado durante o corte e remoção do substrato
Figura 30. Microestrutura das camadas depositadas próximas da superfície
Figura 31. Microestrutura das camadas depositadas a 9 mm do substrato37
Figura 32. Microestrutura das camadas depositadas perto da superfície, com matriz ferrítica, onde se pode verificar que na interface entre camadas ocorreu um crescimento do grão
Figura 33. Microestrutura da interface de duas camadas de matriz ferrítica
Figura 34. Microestrutura vista em SEM onde é possível observar óxidos de várias dimensões
Figura 35. Óxido presente na amostra onde foram realizadas 4 análises EDS.

Figura 36. Espectro obtido por EDS para a zona Z2 da figura 3539
Figura 37. Espectro obtido por EDS para a zona Z3 da figura 3540
Figura 38. Espectro obtido por EDS para a zona Z4 da figura 3540
Figura 39. Espectro obtido por EDS para a zona Z5 da figura 3541
Figura 40. Microestrutura da amostra, sem ataque, observada ao MO em campo claro
Figura 41. Microestrutura da amostra, sem ataque, observada ao MO em campo escuro
Figura 42. Porosidade na amostra com vestígios do óxido, observada em SEM
Figura 43. Espectro obtido por EDS para a zona Z1 da figura 4242
Figura 44. Espessura de 4 camadas depositadas próximas do substrato43
Figura 45. Paredes finas produzidas, num substrato grande, utilizando parâmetros de construção diferentes
Figura 46. (a) e (b) Provete na máquina de tração antes do ensaio e após rotura, respetivamente
Figura 47. (a) e (b) Superfícies de rotura típicas dos provetes ensaiados46
Figura 48. Provete de tração de acordo com a norma ASTM E8/E8M47
Figura 49. (a) Deposição de material numa camada; (b) reposicionamento da cabeça de deposição no final da deposição de uma camada49
Figura 50. Geometria final das duas pré-formas produzidas (com interrupção da produção prematuramente)49
Figura 51. Máquina ADIRA AM com indicação a vermelho da porta do quadro elétrico
Figura 52. (a) Laser Teradiode; (b) chiller Lauda; (c) chiller SMC; (d) alimentador de pó
Figura 53. Menu REF.POINT inicial das tecnologias DED e PBF, respetivamente
Figura 54. Luz verde desligada antes de rodar a chave 2 vezes, e luz verde ligada após rodar a chave
Figura 55. Eixos W dessincronizados no momento do arranque do equipamento e eixos W sincronizados - tecnologia PBF

Figura 56 . Modo JOG e modo AUTO estão ativos quando a luz verde está ligada. Os dois modos não podem estar ativos em simultâneo	
Figura 57. Sistema de eixos do equipamento - tecnologia DED	59
Figura 58. Botão FEED STOP e FEED START bloqueia e desbloqueia os eixos respetivamente, e o seletor controla a velocidade dos movimentos	59
Figura 59. Botões X, Y e Z servem para selecionar o eixo que se pretende movimentar. O eixo selecionado possui uma luz verde. Nesta imagem pode ver-se o eixo Z selecionado.	59
Figura 60. Botões incrementais permitem movimentos de 1, 10, 100, 1000 e 10000 mícrons.	59
Figura 61. Botões "+" e "-" movimentam os eixos no sentido positivo e negativo de acordo com o referencial do equipamento	59
Figura 62. Laser guia	59
Figura 63. Sub-menu LMD.	59

Lista de tabelas

Tabela 1. Ligas metálicas mais utilizadas em AM e suas aplicações [8] 4
Tabela 2. Categorias e breve descrição das diferentes técnicas de AM [5]13
Tabela 3. Características das duas categorias de substratos utilizados19
Tabela 4. Composição química do pó metálico utilizado, fornecida pela Oerlikon [19]
Tabela 5. Composição química obtida analisando a zona Z1 da figura 1221
Tabela 6. Valores obtidos no teste Hanson Flodex utilizando diferentes materiais
Tabela 7. Parâmetros utilizados na produção das paredes nos substratos pequenos e grande. 25
Tabela 8. Parâmetros de construção fixos utilizados nesta experiência26
Tabela 9. Parâmetros de construção variados nesta experiência
Tabela 10. Parâmetros de construção utilizados nesta experiência30
Tabela 11. Estratégias de deposição diferentes testadas na produção de paredes
Tabela 12. Parâmetros de construção utilizados na produção das préformas
Tabela 13. Principais observações retiradas na produção de cada parede44
Tabela 14. Resultados obtidos nos ensaios de tração
Tabela 15. Resultados obtidos nos ensaios de tração



Abreviaturas

AISI American Iron and Steel Institute

AM Additive Manufacturing, fabricação aditiva

AMF Additive Manufacturing Format

ASTM American Society for Testing and Materials

CAD Computer Aided Design

DED Directed Energy Deposition

EDS Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy, microanálise por raios X

GA Gas Atomization, atomização a gás

MO Microscópio Ótico
PBF Powder Bed Fusion

PREP Plasma Rotating Electrode process, processo do elétrodo rotativo de plasma

RA Rotary Atomization, atomização rotativa

SEM Scanning Electron Microscopy, microscopia eletrónica de varrimento

STL Standard Tessellation Language

WA Water Atomization, atomização a água



1. Introdução

1.1. Apresentação do CEiiA

O CEiiA - Centro de Engenharia e Desenvolvimento de Produto - é uma associação privada sem fins lucrativos criada em 1999 com o objetivo de aumentar a competitividade da indústria automóvel em Portugal. No entanto, com o objetivo de impulsionar o desenvolvimento industrial de outras áreas e de corresponder às necessidades da sociedade, rapidamente ampliou a sua atividade [1, 2].

Atualmente, o CEiiA é um Centro de Engenharia e Desenvolvimento de Produto que concebe, desenvolve e opera produtos e serviços nas indústrias de Mobilidade, na indústria Aeronáutica e nas indústrias do Mar e do Espaço, com presença em vários países da Europa e da América Latina [1].

Em Portugal, trata-se de um dos 10 maiores investidores de I&D (investigação e desenvolvimento) e pretende atrair cada vez mais e melhores projetos para solo nacional, possibilitando o envolvimento de empresas nacionais nas cadeias de fornecimento e desenvolvendo uma base de engenharia altamente qualificada, composta principalmente por engenheiros portugueses. A nível mundial, o CEiiA pretende ser um centro de referência internacional de desenvolvimento integrado de produto e de processos para as indústrias da mobilidade [1, 2].

1.2. Enquadramento do Projeto

Recentemente, o CEiiA adquiriu um equipamento protótipo de *Additive Manufacturing* (AM) produzido e desenvolvido pela empresa portuguesa ADIRA. Este equipamento trata-se da primeira máquina de AM produzida em Portugal e, no futuro, poderá ser sujeito a algumas atualizações de forma a acompanhar a evolução tecnológica do mercado [3, 4]. Neste momento, os principais desafios consistem em aprender a trabalhar com este equipamento tão inovador e de grandes dimensões e obter uma total compreensão dos parâmetros envolvidos no processo. Mais tarde, quando todos os parâmetros estiverem devidamente analisados, interpretados e otimizados, o objetivo do CEiiA passa por entrar em novas áreas de negócio e utilizar este equipamento na produção de peças metálicas em projetos futuros.

O equipamento de AM adquirido pelo CEiiA possui acoplado duas tecnologias diferentes: *Powder Bed Fusion* (PBF) e *Directed Energy Deposition* (DED) [3, 4]. Além de aprender a trabalhar com este equipamento, neste trabalho, o objetivo focou-se em perceber qual é o impacto que a alteração de alguns parâmetros chave apresentam na qualidade final das peças produzidas e quais são as propriedades mecânicas que se conseguem obter utilizando a tecnologia DED.

1.3. Organização da Dissertação

A presente dissertação foi dividida em 7 capítulos, de modo a cumprir os objetivos propostos. Após a introdução, no capítulo 2, encontra-se a revisão bibliográfica. Neste capítulo foram abordados conceitos necessários à compreensão do trabalho desenvolvido, incluindo as respostas às perguntas mais importantes sobre o tema.

Nos capítulos 3 e 4 encontram-se informações relevantes sobre o equipamento e sobre os materiais utilizados neste trabalho, respetivamente.

No capítulo 5, apresentam-se todas as experiências que foram realizadas neste trabalho e os seus objetivos. De seguida, no capítulo 6, são analisados os resultados correspondentes a cada experiência.

Por último, o capítulo 7 contém as principais conclusões relativas a este estudo, propostas de melhoria e perspetivas para trabalhos futuros.

No final do documento, encontra-se o anexo A que complementa o trabalho realizado. Este anexo contém um guia de utilização do equipamento utilizado elaborado no âmbito desta dissertação.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. O que é Additive Manufacturing?

O termo *Additive Manufacturing* (AM) é o termo oficial utilizado na indústria para todas as aplicações de prototipagem rápida. Basicamente, refere-se ao processo de criar objetos unindo materiais, geralmente através de camadas sucessivas, a partir de um ficheiro CAD (*Computer Aided Design*). Este método é o oposto das técnicas subtrativas e é, muitas vezes, conhecido como *3D printing* ou *freeform fabrication* [4-7]. Na figura 1 é possível observar a produção de uma peça através desta tecnologia.



Figura 1. Produção de uma peça metálica por *Directed Energy Deposition* onde é possível observar e identificar diferentes camadas formadas durante o processo [7].

Os processos de AM consolidam matérias-primas em pó, fio ou folhas em peças metálicas densas, através de fusão ou sinterização, com o auxílio de uma fonte de energia, como um raio laser, um feixe de eletrões ou arco elétrico. A tabela 1 indica quais são as ligas metálicas mais utilizadas por esta tecnologia e quais são as principais aplicações [8].

Tabela 1. Ligas metálicas mais utilizadas em AM e suas aplicações [8].

	Alumínio	Aços Maraging	Aços Inoxidáveis	Titânio	Crómio Cobalto	Super Ligas de Níquel	Metais Preciosos
Aeroespacial	Х		Х	Х	Х	х	
Médica			Х	Х	Х		Х
Energia, óleo e gás			Х				
Automóvel	х		Х	X			
Resistência à Corrosão			Х	Х	Х	x	
Altas temperaturas			Х	X		X	
Moldes e ferramentas		Х	Х				
Outros produtos	Х		X				Х

Esta tecnologia é principalmente utilizada em projetos complexos e personalizados de baixas ou médias séries que são difíceis de realizar através de técnicas convencionais e em projetos de alto valor acrescentado. Porém, a produção de peças estruturais metálicas livres de defeitos requere uma exímia compreensão de todas as etapas do processo [8-10].

Durante a produção das peças, todos os processos relacionados com a construção das mesmas são bastante autónomos e requerem uma intervenção humana mínima. Para obter peças com o melhor acabamento superficial possível, deve-se utilizar a menor espessura possível em cada camada. No entanto, isso requer mais camadas e, consequentemente, um maior arquivo dos dados e um tempo de construção maior [8, 10].

Nos últimos anos, a tecnologia AM experienciou melhorias e desenvolvimentos sem precedentes em relação à velocidade de construção, precisão, propriedades do material e fiabilidade das máquinas. Além disso, o desenvolvimento de máquinas de baixo custo, fez aumentar o número de usuários desta tecnologia. Contudo, a utilização desta técnica ainda está a dar os seus primeiros passos (apenas 1 em cada 1000 produtos utilizados é fabricado usando AM) e espera-se que esta tecnologia continue a crescer e a desenvolver-se num futuro próximo [9-11]. De acordo com o relatório *Wohlers* 2018, em 2017 foram vendidos cerca de 1 768 equipamentos de AM, enquanto em 2016 tinham sido vendidos 983 equipamentos. Na figura 2, é possível observar a evolução que esta tecnologia vivenciou desde o ano 2000 [12].

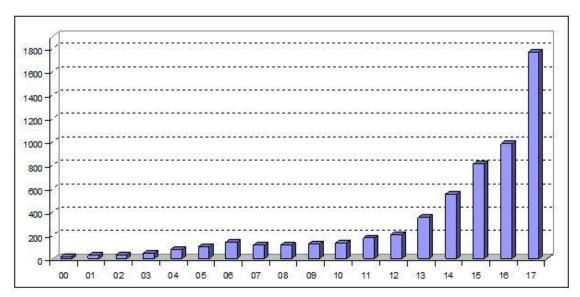


Figura 2. Quantidade de equipamentos de AM vendidos desde 2000, de acordo com o relatório Wohlers 2018 [12].

2.2. Quais são as principais etapas?

As técnicas de AM envolvem algumas etapas desde que se possui o modelo CAD até se obter o produto físico final. É de salientar que diferentes produtos requerem, por vezes, diferentes etapas de produção, tais como tratamentos superficiais [8, 9]. No entanto, as etapas chave são oito [11], tal como ilustradas na figura 3 e descritas posteriormente.



Figura 3. As oito etapas chave dos processos de AM [11].

Etapa 1: Conceptualização e CAD

O primeiro passo para o desenvolvimento de qualquer produto é criar uma ideia do produto final. A conceptualização pode ser realizada de diversas formas. Entre outros, podem utilizar-se descrições textuais, esboços ou modelos representativos. Quando se pretende utilizar técnicas AM na criação de um produto, a sua conceptualização deve ser em formato digital. Se não existissem os modelos CAD 3D a tecnologia de AM também não existiria. Existem várias formas para obter o ficheiro 3D do produto pretendido, destacando-se o design através de um *software* apropriado ou a digitalização inversa 3D [9, 11].

Etapa 2: Conversão para STL/AMF

Hoje em dia, praticamente todos os *softwares* de CAD permitem converter os ficheiros 3D para formato STL (*Standard Tessellation Language*). Este formato permite descrever a geometria das peças através de faces triangulares. Contudo, estes ficheiros limitam-se a representar as superfícies externas fechadas e não apresentam unidades, cor, material ou qualquer outra característica do produto final. Estas limitações provocaram a criação de um novo formato com muito menos limitações que o STL - o formato AMF (*Additive Manufacturing Format*) [9, 11].

Etapa 3: Manipulação do ficheiro STL/AMF e transferência para a máquina de AM Idealmente, o arquivo STL ou AMF deveria ser transferido para o equipamento AM, clicava-se no botão "imprimir" e a máquina iniciava a construção da peça imediatamente. No entanto, antes disso, é necessário aplicar suportes na peça para que a construção seja possível, decidir qual o tamanho real da peça a produzir, e qual a sua posição no substrato e orientação de construção. Para isso, utiliza-se um software específico, que, muitas vezes, é definido pelo fabricante do equipamento e um software pós-processador para converter o ficheiro em linguagem máquina [9, 11].

Etapa 4: Configuração da máquina

Antes de iniciar o processo de construção, o equipamento deve ser devidamente configurado com os parâmetros ideais. Esses parâmetros estão relacionados com a espessura das camadas pretendidas e com o material que vai ser utilizado. Uma

configuração errada normalmente origina a construção de uma peça com qualidade final inaceitável. Além disso, nesta etapa é importante garantir que a máquina possui a quantidade de material necessária para a produção da peça [9, 11].

Etapa 5: Construção

Durante a construção do produto, as primeiras etapas são semiautomáticas e podem exigir algum controlo manual¹. Terminadas essas etapas iniciais, o processo inicia a fase de construção controlada pelo computador, necessitando de pouca intervenção humana [9, 11].

Etapa 6: Remoção e limpeza das peças

Idealmente, a saída das peças do interior da máquina deve estar programada para que não seja necessária intervenção manual. Contudo, nem sempre é possível. No momento em que se removem as peças, é necessária especial atenção no manuseamento das mesmas para não as danificar. É de salientar que após a remoção, inicia-se a limpeza do produto obtido [9, 11].

Etapa 7: Pós-processamento

Após a limpeza, algumas peças podem necessitar de tratamentos pós-produção adicionais, antes de serem utilizadas. O pós-processamento das peças é muito específico para cada aplicação. Algumas aplicações exigem tratamentos simples e rápidos (por exemplo polimento), enquanto outras aplicações exigem tratamentos mais longos e complexos (por exemplo tratamentos químicos e/ou térmicos). Muitas vezes, as peças produzidas também necessitam de ser maquinadas antes da sua utilização [9, 11, 13].

Etapa 8: Inspeção e aplicação

Terminado todo este ciclo, as peças são inspecionadas e, caso cumpram com os requisitos pretendidos, estão aptas a ser utilizadas [9, 11].

¹ No equipamento ADIRA AM a primeira camada produzida necessita da intervenção do operador para garantir que a velocidade de movimento é reduzida e que o posicionamento da peça corresponde ao pretendido.

2.3. Quais são as principais vantagens?

Tanto o AM como os métodos convencionais possuem características singulares que provocam a necessidade de se estabelecer um compromisso entre estas duas técnicas, de modo que os papéis desempenhados por ambas sejam diferentes, mas que cooperem na obtenção dos produtos finais. O AM apresenta o potencial de reduzir o consumo de materiais e de energia, acelerar a inovação e diminuir as redes de fornecimento [9, 10]. De seguida, encontram-se algumas das vantagens desta tecnologia explicadas mais detalhadamente:

- **Liberdade de forma:** o AM permite a obtenção de objetos com geometrias que seriam difíceis (ou até mesmo impossíveis) de obter utilizando métodos convencionais. Com isto, é possível criar novos *designs* de peças que melhorem a performance de alguns equipamentos tecnológicos [9, 10].
- Redução do número de peças num produto: a capacidade de criar novos designs permite a obtenção dos mesmos produtos com menos peças, mas mais complexas, contrariamente ao que se utiliza atualmente (muitas peças simples na elaboração de um produto). Reduzir o número de peças significa que o tempo e a mão-de-obra necessários para montar o produto final é menor, além de se reduzirem os custos de produção [9, 10].
- Redução de desperdícios e de consumo energético: a energia necessária associada a esta técnica é inferior à energia necessária nas técnicas subtrativas convencionais, visto que em AM apenas se utiliza a quantidade de material necessária para o produto final. Além de reduzir o consumo energético, os desperdícios são muito menores e não é necessária a utilização de ferramentas [9, 10].
- Tempo de produção: as peças fabricadas por AM são obtidas a partir de um ficheiro digital STL, obtido através de um programa CAD. Com os avanços tecnológicos e informáticos, obter o ficheiro STL de qualquer produto é um processo relativamente rápido e eficaz, facilitando o desenvolvimento e produção dos produtos [9, 10].

- **Redução de peso:** com a capacidade do AM em criar geometrias complexas, muitas vezes é possível desenhar peças com as mesmas especificações funcionais que as peças convencionais, mas com menos material [9, 10].
- Agilidade: o AM é uma tecnologia polivalente que pode ser utilizada em vários mercados e que pode ser útil na resolução de diversos problemas de forma rápida [9].

2.4. Como é a matéria-prima utilizada?

Na produção de peças metálicas utilizando a tecnologia AM é possível utilizar como matéria-prima: pós metálicos, fio metálico ou folhas metálicas. Os pós metálicos são a matéria-prima mais utilizada, apesar do processo de fabricação ser mais lento e da produção dos mesmos ser dispendiosa. Quando se utiliza fio metálico ou folhas metálicas o processo é mais rápido, no entanto o acabamento superficial apresenta mais irregularidades e o controlo dimensional é menos preciso, especialmente em peças com geometrias complexas [8].

A qualidade final das peças produzidas por AM é significativamente influenciada pelas características do pó metálico utilizado. No entanto, a produção de pós metálicos de alta qualidade consiste num dos principais desafios desta tecnologia, devido à elevada energia superficial das partículas de pó e à suscetibilidade de oxidação. As características mais importantes são a morfologia e a distribuição do tamanho das partículas, a composição química e a floabilidade do pó. A fim de avaliar a morfologia das partículas, pode-se utilizar CT (tomografia computorizada), Raios-X e SEM (microscopia eletrónica de varrimento). Para se conhecer a distribuição do tamanho das partículas podem ser utilizados métodos distintos como a difração laser ou peneiros, enquanto a floabilidade pode ser avaliada usando um *hall flowmeter*. A composição química pode ser analisada utilizando técnicas convencionais de análises químicas ou SEM/EDS (para análises em regiões localizadas). Informação sobre tamanho e orientação cristalográfica dos grãos pode ser obtida por SEM recorrendo à EBSD (difração de eletrões retrodifundidos) [8, 13-15].

A qualidade do pó metálico utilizado depende do seu processo de produção [8, 9, 13, 14]. Existem quatro técnicas principais de produção de pós metálicos:

- Processo de atomização a gás (GA): uma liga fundida é atomizada por um fluxo de elevada pressão de árgon e azoto [8, 13];
- Processo de atomização rotativo (RA): o metal fundido é vazado num disco em rotação. Pequenas gotas do metal fundido são arremessadas pelo disco, solidificadas e recolhidas como partículas sólidas [8, 13];
- Processo do elétrodo rotativo de plasma (PREP): a extremidade de uma barra de metal é fundida usando um arco elétrico ou plasma. A barra é rodada em torno do seu eixo longitudinal provocando que gotículas finas de metal sejam ejetadas por centrifugação e posteriormente recolhidas como partículas de pó [8, 13];
- Processo de atomização a água (WA): um jato de água com alta pressão é utilizado para atomizar e solidificar gotículas de metal fundido [8, 13].

Na figura 4 encontram-se imagens SEM de pós metálicos produzidos pelos diferentes processos. Os pós produzidos por PREP são perfeitamente esféricos e apresentam uma superfície lisa. As partículas de pó produzidas por RA também exibem a superfície lisa, mas não são esféricas. A produção por GA origina partículas de pó que apresentam morfologia esférica com alguma rugosidade superficial, os pós produzidos por WA são geralmente irregulares e apresentam uma superfície rugosa, que provoca uma baixa floabilidade dos mesmos [8, 13].

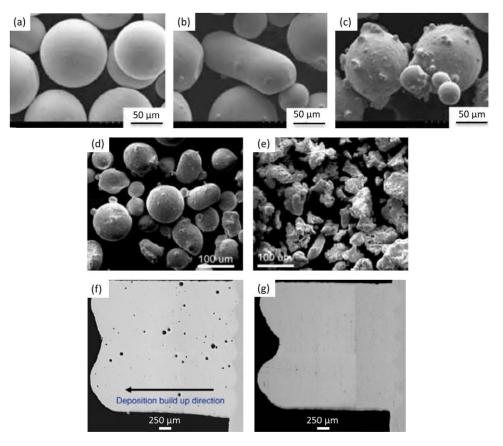


Figura 4. (a) Pós obtidos por PREP; (b) pós obtidos por RA; (c) pós obtidos por GA; (d) e (e) comparação entre os pós produzidos por GA e WA, respetivamente; (f) e (g) porosidades obtidas num componente produzido nas mesmas condições com pó GA e PREP, respetivamente [8].

Os pós obtidos por PREP e WA apresentam as partículas de pó mais e menos esféricas, respetivamente. Os pós com partículas esféricas e distribuição do tamanho das partículas ampla promovem uma fusão homogénea, boa adesão entre camadas, boas propriedades mecânicas e bom acabamento superficial. Em contraste, os pós produzidos por GA e WA contêm frequentemente bolhas de gás retidas que originam porosidades nos componentes. As figuras 4 (f) e 4 (g) demonstram que, nas mesmas condições de processamento, um componente produzido com pós obtidos por PREP apresenta menor porosidade do que um componente produzindo com pós obtidos por GA [8]. Para que a densidade das peças produzidas por AM se aproxime de 100%, é importante que o pó utilizado apresente uma distribuição granulométrica ampla, tal como se pode observar na figura 5 [16].

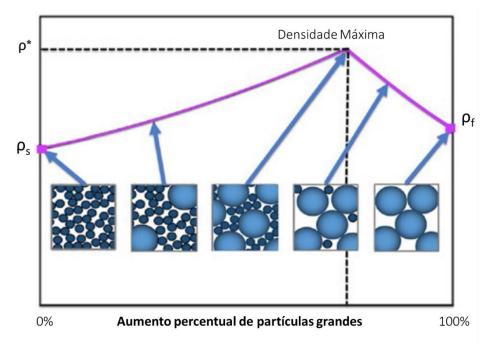


Figura 5. Variação da densidade (ρ) de componentes com as dimensão e distribuição das partículas de pó [16].

2.5. Quais são as diferentes técnicas que existem?

Várias técnicas de AM foram introduzidas no mercado por empresas industriais em diferentes países, por todo o Mundo [11]. De forma a classificar essas técnicas, existem várias propostas. Na tabela 2 encontra-se uma proposta apresentada pelo ASTM (American Society for Testing and Materials), que divide todos os processos em sete categorias. É de realçar que a última atualização desta classificação ocorreu em 2012 e, entretanto, surgiram novos processos que não se enquadram claramente em nenhuma destas categorias [5, 10]. Como tal, é previsível que num futuro próximo esta classificação sofra algumas atualizações [11].

A técnica *Directed Energy Deposition* (DED) encontra-se posteriormente descrita visto que se trata da técnica utilizada na realização deste trabalho.

Tabela 2. Categorias e breve descrição das diferentes técnicas de AM [5].

Categoria	Breve Descrição
Powder Bed Fusion (PBF)	Energia térmica funde seletivamente regiões de uma cama de pós.
Directed Energy Deposition (DED)	Utiliza-se energia térmica focada para fundir material à medida que é depositado.
Material Extrusion	O material é seletivamente distribuído através de um orifício que se desloca num percurso predeterminado.
Vat Photopolymerization	Um fotopolímero líquido contido numa cuba é seletivamente aquecido por polimerização UV (ultravioleta) ou luz.
Binder Jetting	Um agente de ligação líquido é depositado seletivamente sobre um leito de pó, e o produto é sinterizado.
Material Jetting	Gotas de material são depositadas seletivamente.
Sheet Lamination	Unem-se folhas laminadas de material para formar um objeto.

2.5.1. Directed Energy Deposition

A figura 6 (a) representa o processo DED utilizando um feixe laser como fonte de energia e pó metálico como matéria-prima - igual ao princípio de funcionamento da máquina protótipo produzida pela ADIRA. Esta técnica permite produzir peças metálicas por fusão de material à medida que é depositado num substrato, assim como permite recuperar peças danificadas adicionando material para reconstruir zonas deterioradas. Durante a deposição do pó no local pretendido, para evitar a oxidação do metal fundido, utiliza-se vácuo ou um gás de proteção e transporte (por exemplo árgon) [8, 9, 17, 18].

O DED também funciona utilizando fio metálico como matéria-prima e um feixe de eletrões ou um arco elétrico como fonte de energia, como se pode observar nas figuras 6 (b) e 6 (c), respetivamente [8, 9].

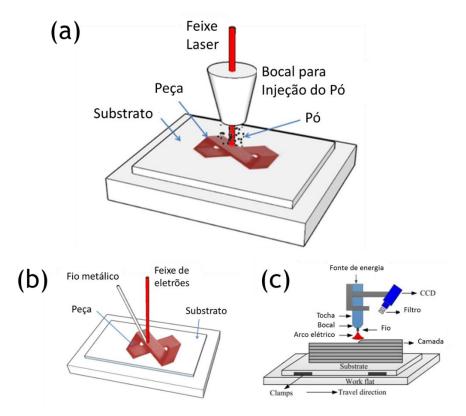


Figura 6. Esquema DED utilizando: (a) pó metálico; (b) fio metálico e feixe de eletrões; (c) fio metálico e arco elétrico [8].

Em todos estes processos, a peça 3D é fabricada camada por camada, de acordo com a geometria do ficheiro CAD utilizado. A distância entre o feixe focalizado e a superfície de construção é mantida constante por um movimento sincronizado dos eixos do equipamento, que mantém o substrato e a fonte de calor à mesma distância durante a deposição. Algumas peças podem requerer suportes apropriados para evitar distorções durante a produção. As condições de processamento, tais como a potência da fonte de calor e a taxa de deposição do material, são pré-definidas ou controladas durante o processo pelos sensores apropriados [8, 11, 13].

Após a deposição estar concluída, a peça fabricada é removida do substrato por maquinagem e, geralmente, requer operações de acabamento adicionais, de forma a obter a qualidade superficial desejada [8, 9, 11].

Outra vantagem desta técnica é a capacidade de adicionar revestimentos às superfícies existentes, melhorando o desempenho tribológico de qualquer produto [8, 11].

Porém, para que a qualidade final das peças obtidas seja a desejada, existem vários parâmetros com influência nas propriedades finais que devem estar otimizados durante a construção. Caso contrário, a produção decorre normalmente, mas as propriedades mecânicas dos produtos finais são insatisfatórias. Entre outros parâmetros, a potência do laser, a velocidade de movimento da cabeça de deposição, a taxa de alimentação, a espessura das camadas, o espaçamento entre percursos e a estratégia de deposição devem ser os ideais para cada material, de modo a que os resultados obtidos sejam os pretendidos [8, 17, 18].

Com esta tecnologia, futuramente, o CEiiA pretende produzir peças metálicas estruturais com o objetivo de reduzir o peso dos componentes finais, assim como ser capaz de reparar peças danificadas e efetuar revestimentos.

3. Equipamento ADIRA AM

Na realização desta dissertação foi utilizado um equipamento protótipo designado por ADIRA AM - primeira máquina de *Additive Manufacturing* produzida pela empresa portuguesa ADIRA (figura 7). Trata-se do primeiro equipamento fabricado em Portugal que possui esta tecnologia e poderá ser sujeito a algumas atualizações no futuro, de forma a acompanhar a evolução tecnológica deste ramo [3, 4].



Figura 7. Equipamento ADIRA AM [4].

Esta máquina possui duas técnicas diferentes acopladas, sendo que ambas permitem a obtenção de peças metálicas. Assim sendo, a máquina encontra-se dividida em duas partes. No lado esquerdo da máquina são produzidas peças fabricadas pela técnica *Directed Energy Deposition* (DED) e no lado direito pela técnica *Powder Bed Fusion* (PBF). Neste trabalho apenas se produziram peças utilizando o lado esquerdo da máquina, ou seja, recorrendo à tecnologia DED. Este equipamento possui um PC industrial (figura 8) com um HMI (*Human machine Interface*) da *Siemens* que, além de permitir a transferência dos ficheiros com as geometrias que se pretendem produzir, também permite controlar e editar os parâmetros do processo.



Figura 8. PC industrial utilizado para controlar o processo e transferir ficheiros.

A produção de peças metálicas utilizando a tecnologia DED engloba a programação dos percursos percorridos pelo laser de acordo com a geometria pretendida, seguida de um pós-processamento para linguagem máquina. Para tal, é necessário um *software* com a capacidade de gerar os percursos aditivos do laser e de um pós-processador que, neste momento, ainda se encontra em desenvolvimento para este equipamento (existe apenas uma versão de teste).

Porém, para que a tecnologia funcione corretamente, também são necessários alguns equipamentos periféricos, como é possível observar na figura 9.

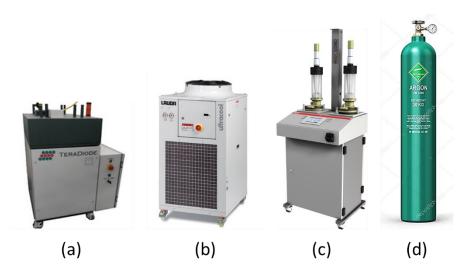


Figura 9. (a) Laser TERADIODE 2kW; (b) chiller LAUDA; (c) alimentador de pó; (d) árgon comprimido.

O Laser TERADIODE funciona como fonte energética para fundir o material de alimentação que, neste caso, é pó metálico. O *chiller* LAUDA permite arrefecer as óticas e o laser, de modo a evitar um sobreaquecimento. O alimentador de pó possui a tarefa de fornecer o material à medida que este é depositado. De forma a garantir que o pó metálico não se extravie nem oxide, utiliza-se um gás inerte comprimido, nomeadamente árgon, com funções de transporte e de proteção do pó metálico.

Durante este trabalho, uma vez que este equipamento não possuía qualquer manual de instruções, surgiu a necessidade de se escrever um guia de utilização para auxiliar a utilização do mesmo e facilitar a aprendizagem de potenciais utilizadores. Assim sendo, no anexo A, encontra-se um guia de utilização para auxiliar qualquer pessoa que opere este equipamento.

4. Material

4.1. Substratos

Neste trabalho, foram utilizados substratos em aço inoxidável austenítico AISI 304 de duas categorias diferentes. As diferenças entre as duas categorias utilizadas são as dimensões e a massa dos substratos. As características de cada categoria de substratos encontram-se na tabela 3. Daqui por diante, neste documento, com base nas dimensões que apresentam, as categorias designam-se por *substratos grandes* e *substratos pequenos* sendo que, na figura 10, é possível observar uma ilustração de cada um destes substratos.

Tabela 3. Características das duas categorias de substratos utilizados.

	Largura (mm)	Comprimento (mm)	Espessura (mm)	Massa (Kg)
Substratos Grandes	342	320	13	18,7
Substratos Pequenos	93	96	13	2,5

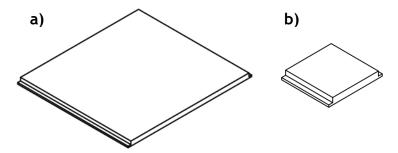


Figura 10. (a) e (b) Ilustração dos substratos grandes e pequenos, respetivamente.

4.2. Pó Metálico

O pó metálico utilizado na realização desta dissertação foi um pó metálico de aço inoxidável martensítico, produzido pela Oerlikon por atomização a água, que se designa comercialmente por Metco 42C (equivalente ao aço inoxidável martensítico AISI 431). A composição química indicada pelo fornecedor encontra-se na tabela 4 e uma imagem SEM que demonstra a forma das partículas deste pó encontra-se na figura 11. Este pó é recomendado para se utilizar em revestimentos de peças metálicas que necessitem de elevada resistência ao desgaste, ao impacto e à corrosão [19].

Tabela 4. Composição química do pó metálico utilizado, fornecida pela Oerlikon [19].

	Cr	Ni	С	Fe
Metco 42C	17 %	2 %	0,18 %	restante

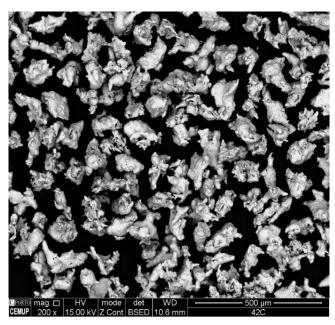


Figura 11. Morfologia das partículas do pó utilizado, observada em SEM.

A fim de confirmar a composição química do pó utilizado, efetuou-se uma análise de EDS (energy dispersive X-ray spectroscopy) e um mapeamento químico de quatro elementos (Fe, Cr, Ni, Si) numa amostra de pó. Os resultados obtidos encontram-se nas figuras 12 e 13 e na tabela 5. É de salientar que, apesar da ficha técnica não referir, o pó utilizado continha silício (Si) na sua composição.

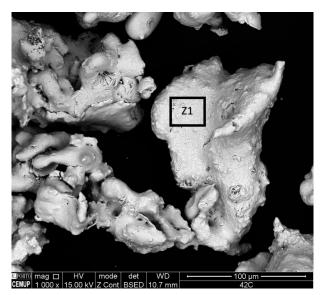


Figura 12. Partícula de pó onde se realizou análise de EDS.

Tabela 5. Composição química obtida analisando a zona Z1 da figura 12.

Elemento	Wt. %
С	2.01
0	0.23
Si	1.18
Cr	16.26
Fe	78.39
Ni	1.92

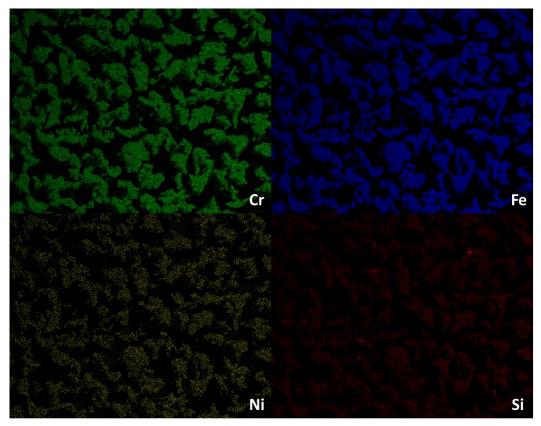


Figura 13. Mapeamento químico de uma amostra do pó utilizado.

De modo a avaliar a distribuição granulométrica do pó, observaram-se, aleatoriamente, 48 partículas do pó utilizando um microscópio ótico (MO) e mediu-se o diâmetro médio de cada partícula. Na figura 14 encontra-se o histograma com

a distribuição granulométrica do pó utilizado, onde é possível observar a heterogeneidade granulométrica do material.

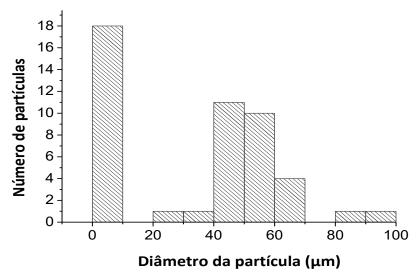


Figura 14. Distribuição granulométrica do pó Metco 42C.

A escoabilidade do pó foi determinada através do método Flodex, que utiliza o cálculo do coeficiente de atrito entre partículas (k) (equação 1.1) para analisar a capacidade do pó de passar livremente por um orifício de um disco: r indica o raio do orifício do disco por onde o pó passa livremente 3 vezes; d indica a densidade aparente do pó; g corresponde à aceleração gravítica. O diâmetro dos discos utilizados varia entre 2 e 34 mm. Quanto maior o coeficiente de atrito entre partículas (k), menor será a escoabilidade do pó [20, 21].

$$k = \frac{r \times d \times g}{2} \tag{1.1}$$

Na tabela 6 encontram-se alguns resultados obtidos com este teste, utilizando diferentes materiais. O açúcar de mesa e o sal de cozinha são materiais com boa escoabilidade e encontram-se na tabela para efeitos de comparação [22]. Observando os valores obtidos para os vários materiais, conclui-se que o pó utilizado neste trabalho apresenta boa escoabilidade uma vez que apresenta baixo coeficiente de atrito entre partículas.

Tabela 6. Valores obtidos no teste Hanson Flodex utilizando diferente	entes materiais.
--	------------------

	m (gr)	V (mL)	d (kg/m³)	r (m)	k (Pa)
Açúcar de Mesa	50		1580	0,004	30,99
Sal de Cozinha	50		2160	0,005	52,97
316L*	50		4545	0,0015	33,43
Metco 42C	50	17,3	2890	0,001	14,16

^{*}Pó metálico produzido pela empresa LPW para AM [23]

Analisando o diagrama de Schaeffler, pode-se prever quais as fases que se poderão encontrar na microestrutura final das peças deste material após um arrefecimento rápido. Observando o diagrama da figura 15, o aço utilizado neste trabalho encontra-se assinalado com um ponto vermelho e conclui-se que pode conter martensite, ferrite e austenite na sua microestrutura final [24, 25].

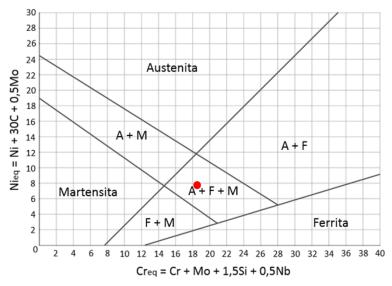


Figura 15. Diagrama de Schaeffler.

Nesta fase preliminar do equipamento, em que ainda não se possui conhecimentos sólidos sobre as suas capacidades, o material a utilizar deveria ser outro (por exemplo aço inoxidável austenítico, devido à estabilidade da fase austenítica). Porém, o único material disponível foi o aço inoxidável martensítico, que apresenta diferentes fases, dependendo da temperatura de arrefecimento. Assim sendo, apesar de não ser a matéria-prima mais indicada, avançou-se para a caracterização e otimização desta tecnologia, neste equipamento, com este material.

5. Procedimento Experimental

5.1. Produção de paredes finas em substratos diferentes

Com o objetivo de adquirir experiência de utilização com a máquina ADIRA AM e retirar as primeiras ilações, produziram-se 4 paredes finas utilizando parâmetros de construção recomendados pelo fabricante do equipamento. Na produção destas 4 paredes, utilizaram-se 2 categorias de substratos diferentes para avaliar a influência dos mesmos. Visto que é possível produzir duas paredes num substrato grande, mas apenas uma em cada substrato pequeno, foram utilizados no total 3 substratos (1 grande e 2 pequenos). Nesta experiência, os percursos da cabeça de deposição foram programados manualmente, devido a uma indisponibilidade do *software* pósprocessador deste equipamento. As dimensões das paredes produzidas e a estratégia de deposição utilizada encontram-se nas figuras 16 e 17, respetivamente.

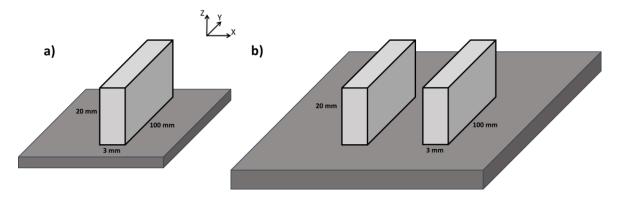


Figura 16. (a) e **(b)** Ilustração das paredes finas e respetivas dimensões nos substratos pequenos e grande. A imagem não se encontra à escala.

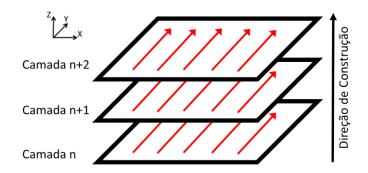


Figura 17. Estratégia de deposição utilizada na produção das primeiras paredes finas em substratos diferentes.

Os parâmetros de produção recomendados pela ADIRA (fabricante do equipamento) e utilizados na produção destas paredes encontram-se na tabela 7.

Tabela 7. Parâmetros utilizados na produção das paredes nos substratos pequenos e grande.

Parâmetros Utilizados		
Velocidade de Avanço	500 mm/min	
Espaçamento entre Passagens do Laser	1,25 mm	
Espessura das Camadas	0,5 mm	
Taxa de Deposição	22,5 g/min	
Consumo de Gás	4 L/min	
Velocidade de Rotação do Misturador do Pó	30 %	
Distância entre Boquilha e Superfície	9 mm	
Potência do Laser	600 W	
Diâmetro do Foco Laser	1,5 mm	

Na figura 18 é possível observar uma imagem ilustrativa desta etapa e uma imagem da máquina ADIRA AM em funcionamento.

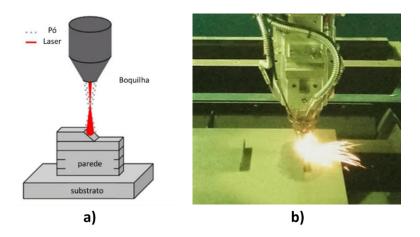


Figura 18. (a) Ilustração do processo; (b) equipamento ADIRA AM em funcionamento.

No final da produção, todas as paredes arrefeceram no interior do equipamento até à temperatura ambiente. Mais tarde, quando o arrefecimento das paredes estava concluído, estas foram removidas dos substratos utilizando uma rebarbadeira. O equipamento mais adequado para esta etapa teria sido algum equipamento que não promovesse aumento da temperatura durante o corte. Porém, devido à escassez de opções, a rebarbadeira foi o equipamento mais indicado entre os disponíveis.

De seguida, para analisar desvios geométricos das paredes produzidas nas duas categorias de substratos utilizados, efetuou-se uma análise dimensional das mesmas, utilizando um equipamento de metrologia *STEINBITCHLER* com um *software* associado que converteu a nuvem de pontos obtida num mapa de cores.

Após a conclusão das etapas anteriores, procedeu-se a uma análise microestrutural das amostras em MO (microscópio ótico) e SEM.

5.2. Produção de paredes finas variando os parâmetros de construção

Com o objetivo de determinar quais os parâmetros ideais de produção utilizando uma velocidade de avanço de 500 mm/min e uma taxa de deposição de 22,5 g/min, produziram-se 6 paredes finas, onde se variou estrategicamente a espessura das camadas e o espaçamento entre passagens do laser.

As dimensões dessas paredes encontram-se na figura 19 e os parâmetros fixos utilizados encontram-se na tabela 8.

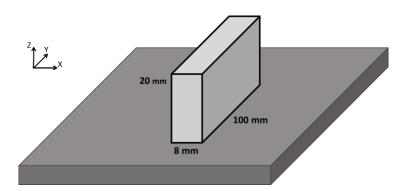


Figura 19. Ilustração de uma parede fina e respetivas dimensões, num substrato grande. A imagem não se encontra à escala.

Tabela 8. Parâmetros de construção fixos utilizados nesta experiência.

Parâmetros Constantes		
Velocidade de Avanço	500 mm/min	
Taxa de Deposição	22,5 g/min	
Consumo de Gás	4 L/min	
Velocidade de Rotação do Misturador do Pó	30%	
Distância entre Boquilha e Superfície	9 mm	
Potência do Laser	600 W	
Diâmetro do Foco Laser	1,5 mm	

Utilizando os parâmetros indicados, foi necessário definir qual é a espessura das camadas formadas, de modo que a cabeça de deposição se reajuste no final de cada camada e mantenha a distância de 9 mm entre a superfície da peça e o bocal de deposição durante toda a produção (figura 20 a). Caso seja indicado, na programação da produção, uma espessura de camada inferior à que realmente se obtém, a distância de 9 mm vai diminuir ao longo da produção (figura 20 b). Por outro lado, caso a espessura da camada indicada na programação seja superior à obtida, a boquilha vai afastar-se cada vez mais da superfície da peça, aumentando essa distância (figura 20 c). No final de cada camada, no equipamento ADIRA AM, a cabeça de deposição reajusta-se em função da espessura da camada indicada na programação.

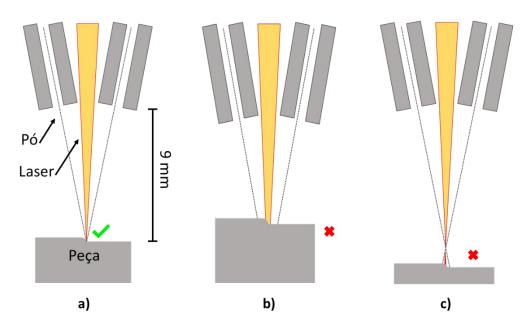


Figura 20. (a), (b) e (c) Efeitos provocados pelo reposicionamento da cabeça de deposição após conclusão de cada camada.

Na tabela 9, encontram-se os parâmetros que foram testados em cada parede e a sequência das alterações, e na figura 21 encontra-se a estratégia de deposição que se utilizou nesta experiência. Esta experiência iniciou-se com a produção da parede A e terminou com a produção da parede F.

Apesar da produção das paredes em questão e da posterior análise dos resultados ter sido feita no âmbito desta dissertação, é importante salientar que as variações dos parâmetros realizadas foram decididas exclusivamente por engenheiros da ADIRA.

Tabela 9. Parâmetros de construção variados nesta experiência.

	Espaçamento entre Passagens do Laser (mm)	Espessura das Camadas (mm)
	1	0,65
A D	1	0,03
D	1 4 F	1
C	1,5	1
D	1,25	0,8
E	1,25	0,65
F	1,25	0,7

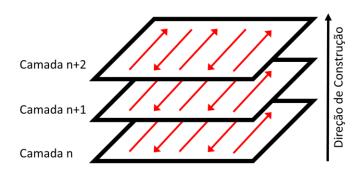


Figura 21. Estratégia de deposição utilizada na produção das paredes finas com parâmetros de construção diferentes

Relativamente aos percursos do laser, nesta experiência utilizou-se um plug- in do software PowerMill para programar os percursos percorridos pela cabeça de deposição durante a produção [26]. Após essa programação, utilizou-se um software em versão beta capaz de pós-processar o ficheiro obtido com o PowerMill Aditivo em linguagem máquina.

Durante a produção, de forma visual, avaliou-se continuamente a conjugação dos parâmetros testados, nomeadamente se a distância entre a boquilha e a superfície se mantinha igual a 9 mm. Na produção das paredes em que essa distância aumentou, o processo foi interrompido definitivamente antes de concluir a produção porque se verificou que, quando a distância aumentava, a tendência era continuar a aumentar no final de cada camada concluída. Nos casos em que a distância entre a boquilha e a superfície diminuiu ao longo da produção, permitiu-se que o processo continuasse, sempre com atenção redobrada, para que não ocorresse colisão entre a boquilha e a superfície da peça.

Após a produção, recorreu-se a um equipamento CNC (*Computer Numerical Control*), de forma a maquinar todas as paredes que possuíam material suficiente para se obter um provete de acordo com a norma ASTM E8/E8M, tal como se encontra ilustrado na figura 22. Sendo assim, maquinaram-se as paredes A, B, E e F, com especial atenção no processo, de modo a que o provete obtido não incluísse as camadas mais próximas do substrato, uma vez que estas foram afetadas pelo calor gerado durante o corte. Por último, realizaram-se ensaios de tração de acordo com a norma ASTM E8/E8M [27].

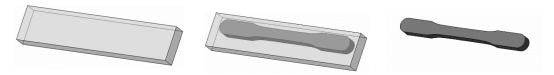


Figura 22. Modelo CAD das paredes produzidas e dos provetes obtidos.

5.3. Produção de paredes finas variando as estratégias de deposição

Após analisar e avaliar os parâmetros de construção testados anteriormente, selecionaram-se os melhores parâmetros e produziram-se paredes finas iguais às produzidas anteriormente, utilizando estratégias de deposição diferentes. É importante realçar que os parâmetros selecionados não correspondem aos parâmetros ideais de construção. No entanto, perante as condições atuais do equipamento, consideraram-se os mais indicados para prosseguir com este estudo, de entre os utilizados anteriormente. Nesta experiência, pretendeu-se analisar a influência de diferentes estratégias de deposição e perceber com qual se obtém as melhores propriedades mecânicas.

Tabela 10. Parâmetros de construção utilizados nesta experiência.

Parâmetros Utilizados		
Velocidade de Avanço	500 mm/min	
Espaçamento entre Passagens do Laser	1,25 mm	
Espessura das Camadas	0,65 mm	
Taxa de Deposição	22,5 g/min	
Consumo de Gás	4 L/min	
Velocidade de Rotação do Misturador do Pó	30 %	
Distância entre Boquilha e Superfície	9 mm	
Potência do Laser	600 W	
Diâmetro do Foco Laser	1,5 mm	

Foram testadas 6 estratégias de deposição diferentes na produção de 6 paredes finas. Nas amostras 1, 2, 3 e 4 utilizou-se a mesma estratégia de deposição em todas as camadas, enquanto nas amostras 5 e 6 se efetuou uma rotação da estratégia entre camadas. Na tabela 11, encontram-se informações mais detalhadas sobre a estratégia de deposição utilizada em cada parede.

Após a produção destas paredes ter sido finalizada, todas as paredes foram maquinadas e obtiveram-se provetes de tração de acordo com a norma ASTM E8/E8M, tal como na experiência anterior [27].

Tal como a experiência anterior, o objetivo inicial era repetir esta experiência várias vezes, de modo a obter resultados mais fiáveis e avaliar a repetibilidade do equipamento. No entanto, devido a falta de material, tal não foi possível e apenas se analisou um provete produzido por cada experiência.

Tabela 11. Estratégias de deposição diferentes testadas na produção de paredes

i abeia II. EST	ratégias de deposição diferentes testadas n	a produção de paredes
Parede	Estratégia de Deposição	Observações
1	Camada n+1 Camada n	Estratégia transversal Tempo de Produção: 3h 57min
2		Estratégia transversal continua Tempo de Produção: 2h 20min
3		Estratégia longitudinal Tempo de Produção: 45min
4		Estratégia longitudinal continua Tempo de Produção: 30min
5		Estratégia com rotação de 90° entre camadas Tempo de Produção: 2h 20min
6		Estratégia com rotação de 67° entre camadas Tempo de Produção: 1h 45min

5.4. Produção em Z

Com o objetivo de avaliar a anisotropia das peças produzidas pelo equipamento ADIRA AM, decidiu-se produzir duas pré-formas segundo o eixo Z, para maquinar de acordo com as geometrias dos provetes que se encontram na norma ASTM E8/E8M. Com os provetes obtidos pretendia-se realizar ensaios de tração comparar com os valores obtidos no plano XY.

A norma ASTM E8/E8M apresenta 2 geometrias de provetes diferentes para ensaio de tração: provete redondo e provete retangular. Nesta experiência, produziu-se uma pré-forma de cada provete, utilizando um substrato grande e os parâmetros de construção e a estratégia de deposição selecionados nas experiências 5.2 e 5.3, respetivamente. Na figura 23 encontra-se uma ilustração das duas préformas num substrato grande.

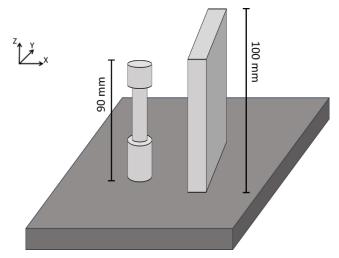


Figura 23. Ilustração das duas pré-formas produzidas segundo o eixo Z. A imagem não se encontra à escala.

Na tabela 12 e na figura 24, encontram-se os parâmetros de construção e a estratégia de deposição que se usou nesta experiência, respetivamente.

Tabela 12. Parâmetros de construção utilizados na produção das pré-formas.

Parâmetros Utilizados		
Velocidade de Avanço	500 mm/min	
Espaçamento entre Passagens do Laser	1,25 mm	
Espessura das Camadas	0,65 mm	
Taxa de Deposição	22,5 g/min	
Consumo de Gás	4 L/min	
Velocidade de Rotação do Misturador do Pó	30 %	
Distância entre Boquilha e Superfície	9 mm	
Potência do Laser	600 W	
Diâmetro do Foco Laser	1,5 mm	

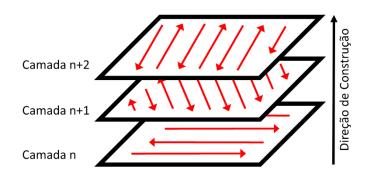


Figura 24. Estratégia de deposição com rotação de 67° entre camadas utilizada na produção das duas pré-formas.

6. Análise de Resultados

6.1. Análise metrológica das paredes finas produzidas em substratos diferentes

Após a primeira produção de paredes finas utilizando o equipamento protótipo ADIRA AM foi possível retirar algumas ilações.

As paredes produzidas nos substratos pequenos apresentaram distorções anormais, enquanto as paredes produzidas nos substratos grandes exibiram uma geometria próxima da esperada. Além disso, todas as paredes produzidas apresentaram gotículas de metal fundido numa das faces e ausência de gotículas na outra face, independentemente do substrato onde foram construídas. A fim de demonstrar estes resultados, procedeu-se a uma análise dimensional de duas paredes e as imagens obtidas encontram-se nas figuras 25 e 26.

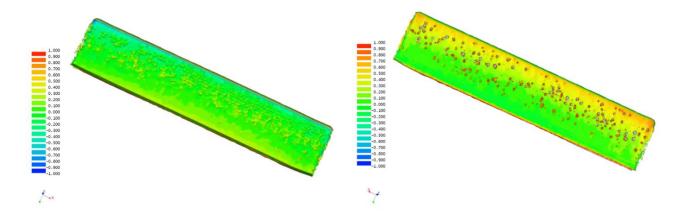


Figura 25. Mapa de cores obtido por análise dimensional de uma parede fina produzida sobre um substrato grande.

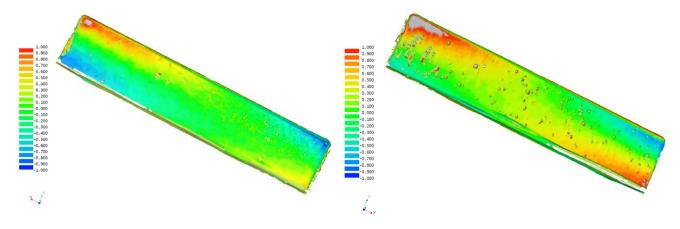


Figura 26. Mapa de cores obtido por análise dimensional de uma parede fina produzida sobre um substrato pequeno.

Analisando estas imagens, conclui-se que o tamanho e a massa dos substratos têm influência na qualidade final das peças produzidas por DED. Tal facto deve-se à dissipação do calor gerado durante o processo. A dissipação do calor gerado na produção das paredes finas produzidas nos substratos pequenos, devido à menor massa do substrato, é menos eficiente do que a dissipação do calor das paredes produzidas nos substratos grandes. Assim sendo, a velocidade de arrefecimento das peças produzidas nos substratos pequenos é menor e a peça vai-se deformando de modo a aliviar tensões internas [28].

O facto de apenas uma das faces das paredes apresentar gotículas de pó metálico fundido demonstra que o foco XY do equipamento não se encontrava corretamente calibrado. A figura 27 pretende esquematizar um esboço do estado da calibração do equipamento. Após esta conclusão, foi agendada com o fabricante do equipamento uma correta calibração do foco XY. Contudo, até à data de entrega deste relatório ainda não foi possível realizar essa calibração.

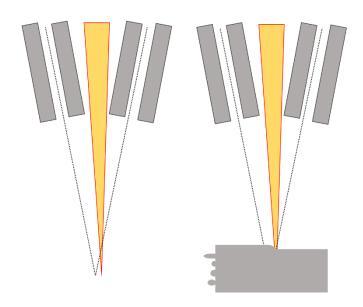


Figura 27. Efeito provocado pela descalibração do foco XY.

Além disso, as paredes produzidas não apresentaram as dimensões pretendidas. Em vez de 20 mm de altura como era pretendido, apresentaram 22 mm. Este desvio demonstrou que os parâmetros utilizados não eram os ideais e que para a velocidade de avanço e taxa de deposição utilizados a espessura das camadas e/ou o espaçamento entre os percursos percorridos pelo laser devia ser corrigido.

Após este primeiro impacto, optou-se por realizar todas as seguintes produções utilizando substratos grandes.

6.2. Análise microestrutural das paredes finas produzidas em substratos diferentes

6.2.1. Parede fina produzida em substrato grande

As primeiras camadas depositadas, atingiram temperaturas elevadas, durante a remoção das paredes do substrato com a rebarbadeira, e, portanto, a microestrutura nessa zona foi afetada. Na figura 28 é possível observar uma microestrutura das primeiras camadas depositadas afetadas pelo calor gerado durante o corte. Como se pode observar na figura, após o corte, a microestrutura das camadas afetadas apresenta glóbulos de cementite numa matriz ferrítica [25, 29, 30].

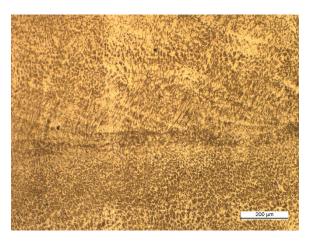


Figura 28. Microestrutura das primeiras camadas depositadas afetadas pelo calor gerado durante a remoção do substrato.

Porém, a microestrutura obtida nas restantes camadas da parede não foi homogénea. Verificou-se que as primeiras camadas depositadas, que não foram afetadas pelo calor gerado no corte, apresentam uma microestrutura com matriz martensítica (figura 29). Em contraste, as camadas depositadas perto da superfície apresentam uma microestrutura com matriz ferrítica (figura 30). Deste modo, verifica-se que existe um gradiente ao longo das amostras e que a martensite formada nas primeiras camadas vai diminuindo, enquanto a ferrite vai surgindo à medida que a distância das camadas ao substrato aumenta (figura 31). As microestruturas que se encontram nas figuras 29, 30 e 31 foram reveladas utilizando o reagente de ataque Kallings 1 [31].

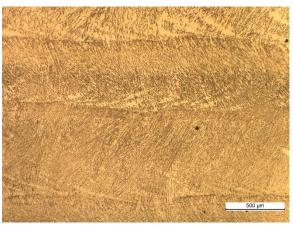


Figura 29. Microestrutura das primeiras camadas depositadas próximas da base, que não foram afetadas pelo calor gerado durante o corte e remoção do substrato.

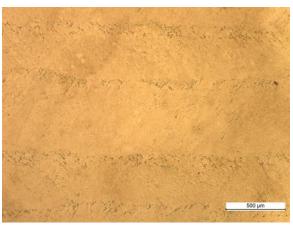


Figura 30. Microestrutura das camadas depositadas próximas da superfície.

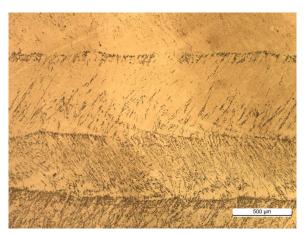


Figura 31. Microestrutura das camadas depositadas a 9 mm do substrato.

Tal facto acontece devido à velocidade de arrefecimento ser diferente em camadas diferentes. As primeiras camadas são depositadas no substrato, que se encontra à temperatura ambiente, e, consequentemente, arrefecem rapidamente. O calor gerado nas primeiras camadas dissipa-se facilmente no substrato e várias camadas conseguem obter estrutura martensítica devido ao arrefecimento destas também ser rápido. No entanto, em cada camada produzida gera-se calor que se vai acumulando. Deste modo, cada camada depositada apresenta uma velocidade de arrefecimento menor do que a camada depositada anteriormente. Assim sendo, utilizando um substrato grande, a partir dos 9 mm, as paredes finas produzidas apresentam microestrutura com matriz ferrítica [8, 25, 29].

Nas figuras 32 e 33 é possível observar que a interface entre duas camadas com matriz ferrítica é afetada pela deposição da segunda camada. Tal como se pode visualizar, os grãos de ferrite na interface cresceram porque ocorreu refusão da superfície da camada depositada anteriormente [32]. O reagente de ataque utilizado para revelar as microestruturas presentes nestas figuras foi o Vilella [31].

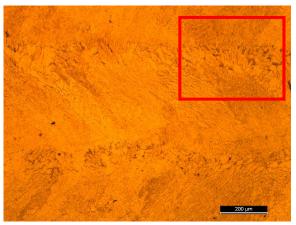


Figura 32. Microestrutura das camadas depositadas perto da superfície, com matriz ferrítica, onde se pode verificar que na interface entre camadas ocorreu um crescimento do grão.

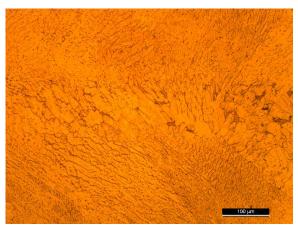


Figura 33. Microestrutura da interface de duas camadas de matriz ferrítica.

A parede produzida nesta experiência, além de ter sido observada ao MO também foi observada em SEM e retiraram-se algumas conclusões. Ao longo da parede, formaram-se óxidos aleatoriamente distribuídos e de várias dimensões, como se pode observar na figura 34.

Na figura 35 pode ver-se um óxido com um diâmetro aproximado de 3 µm onde se realizaram 4 análises de EDS. Essas análises encontram-se nas figuras 36, 37, 38 e 39. Sendo que, nas figuras 36 e 39, encontram-se dois espectros correspondentes à matriz da amostra, e nas figuras 37 e 38 os espectros apresentados representam a zonas interior e periférica do óxido, respetivamente. É de salientar que a zona periférica do óxido é mais rica em silício do que o interior.

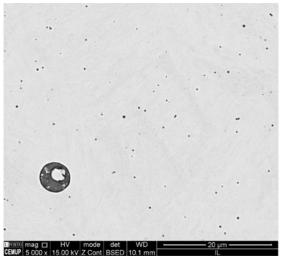


Figura 34. Microestrutura vista em SEM onde é possível observar óxidos de várias dimensões.

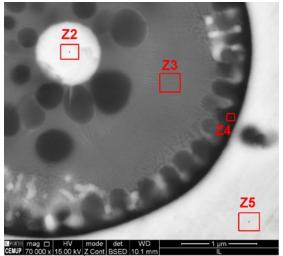


Figura 35. Oxido presente na amostra onde foram realizadas 4 análises EDS.

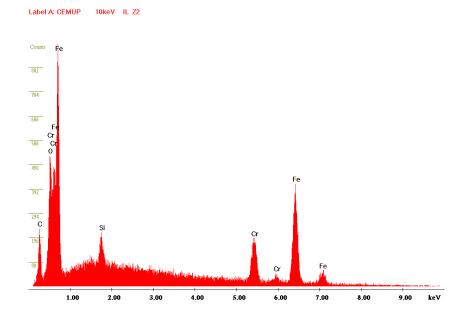


Figura 36. Espectro obtido por EDS para a zona Z2 da figura 35.

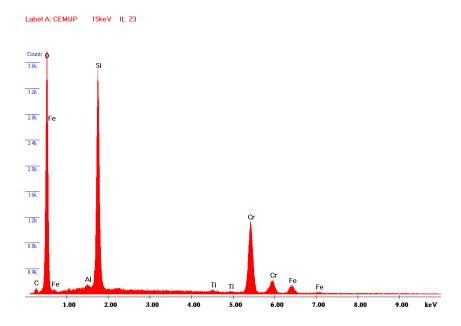


Figura 37. Espectro obtido por EDS para a zona Z3 da figura 35.

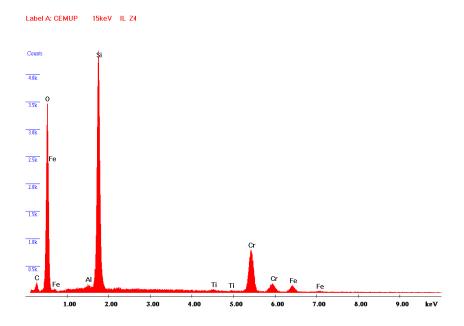


Figura 38. Espectro obtido por EDS para a zona Z4 da figura 35.

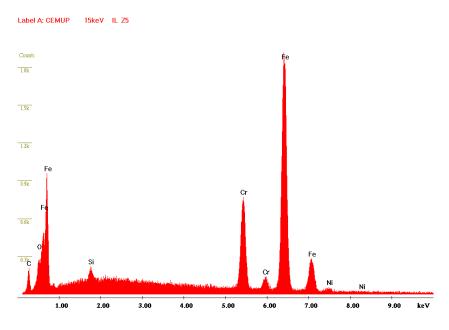


Figura 39. Espectro obtido por EDS para a zona Z5 da figura 35.

Relativamente à densidade das amostras, a análise por MO evidenciou que a porosidade existente na superfície da amostra era muita muito reduzida, como se pode confirmar nas figuras 40 e 41.

No entanto, através de SEM, pôde-se observar que os poros existentes na superfície da amostra apresentam vestígios de óxido, como se pode verificar na figura 42, e portanto, devem corresponder a locais onde se encontravam óxidos que saltaram durante a etapa do polimento.

Na figura 43, encontra-se o espetro EDS da análise desses vestígios.

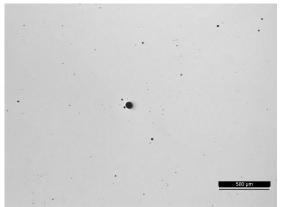


Figura 40. Microestrutura da amostra, sem ataque, observada ao MO em campo claro.

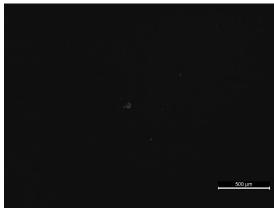


Figura 41. Microestrutura da amostra, sem ataque, observada ao MO em campo escuro.

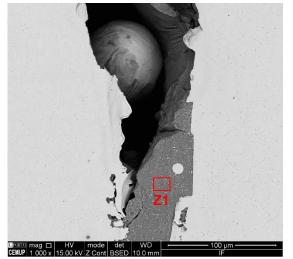


Figura 42. Porosidade na amostra com vestígios do óxido, observada em SEM.

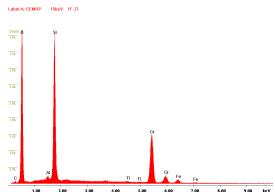


Figura 43. Espectro obtido por EDS para a zona Z1 da figura 42.

De modo a conhecer qual a espessura das camadas formadas utilizando os parâmetros de construção já referidos, observou-se, em SEM, uma amostra sem polimento e mediram-se 4 das primeiras camadas depositadas, tal como se pode verificar na figura 44. Dividindo o valor medido pelas 4 camadas, concluímos que a espessura de cada camada é, aproximadamente, 0,7 mm (2.817/4 = 0,7043).

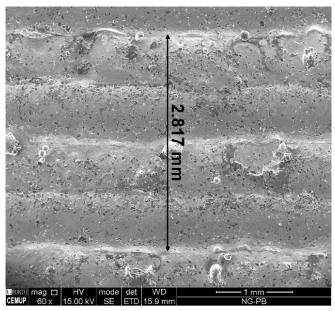


Figura 44. Espessura de 4 camadas depositadas próximas do substrato.

6.2.2. Parede fina produzida em substrato pequeno

Tal como as paredes finas produzidas no substrato grande, as paredes finas produzidas nos substratos pequenos também apresentam uma microestrutura heterógena ao longo da amostra. No entanto, a distância entre as primeiras camadas com matriz ferrítica e o substrato foi 5 mm, e não 9 mm como se verificou no substrato grande. Isto deve-se ao facto da capacidade do substrato pequeno dissipar calor ser menor que a capacidade do substrato grande. Assim sendo, o calor gerado durante a produção de cada camada acumula-se mais rapidamente e a ferrite formou-se em camadas mais próximas do substrato do que na experiência anterior.

Em todas as restantes análises, os resultados obtidos foram equivalentes aos obtidos na parede fina produzida em substrato grande.

6.3. Análise de diferentes parâmetros de construção

Na figura 45 é possível observar todas as paredes produzidas num substrato grande e na tabela 13 encontram-se as principais observações retiradas durante a produção de cada parede.

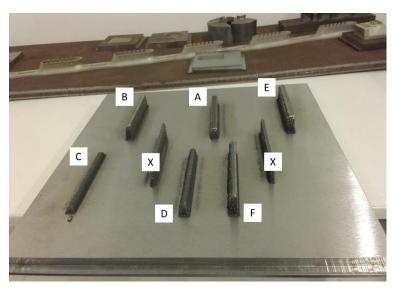


Figura 45. Paredes finas produzidas, num substrato grande, utilizando parâmetros de construção diferentes.

Tabela 13. Principais observações retiradas na produção de cada parede.

Parede	Observações
A	A parede cresceu demasiado rápido e decidiu-se interromper o processo por motivos de segurança. No momento da interrupção a parede tinha 18 mm de altura.
В	A parede cresceu, mas ficou inclinada e com a base mais alargada. A inclinação da parede deveu-se à descalibração do foco XY.
С	A parede não crescia e o processo foi interrompido. A deposição de material era insuficiente para os parâmetros testados.
D	A parede cresceu pouco e o processo foi interrompido. No momento da interrupção, a parede apresentava 12 mm de altura.
E	A parede cresceu 21,8 mm e apresentou bom acabamento superficial.
F	A parede cresceu 20,5 mm mas ficou inclinada, tal como a parede B.

Após a produção destas paredes, comprovou-se que o foco XY não se encontrava calibrado corretamente. No entanto, com o que se produziu, foi possível maquinar as paredes A, B, E e F, de modo a obter-se um provete de tração retangular e realizar o ensaio mecânico, de acordo com a norma ASTM E8/E8M [27].

Após a maquinação dos provetes estar finalizada, realizaram-se os ensaios de tração. Não foi possível utilizar o extensómetro para os provetes em causa, pelo que apenas se obteve informações acerca da ductilidade e da resistência máxima. Na figura 46 é possível observar um provete na máquina de tração antes do ensaio e após a rotura, e na tabela 14 encontram-se os resultados obtidos nos ensaios realizados. Os valores de alongamento após rotura foram sempre inferiores a 3% e a fratura apresentou um aspeto frágil.

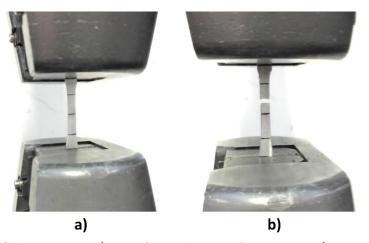


Figura 46. (a) e (b) Provete na máquina de tração antes do ensaio e após rotura, respetivamente.

Amostra	R _m (MPa)	Ductilidade (%)
A	1309	2
В	1330	2
E	1353	2
F	1266	2

Tabela 14. Resultados obtidos nos ensaios de tração.

Todos os provetes ensaiados apresentaram um elevado valor de resistência máxima. No entanto, como é possível verificar na imagem 47, todos eles apresentaram superfícies de rotura frágil. Na figura 47 (a) é possível verificar que

existem algumas porosidades nas superfícies de rotura. Essas porosidades correspondem a locais onde se encontravam óxidos que, no momento da rotura, se soltaram da amostra. Na figura 47 (b) pode-se observar que a deformação plástica ocorrida durante o ensaio de tração foi praticamente nula.

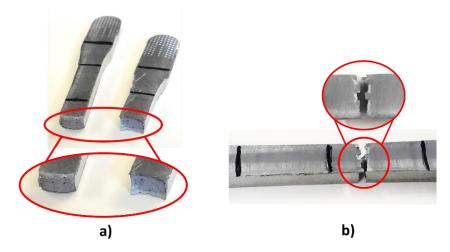


Figura 47. (a) e (b) Superfícies de rotura típicas dos provetes ensaiados.

Com os resultados obtidos, e com o apoio da ADIRA, concluiu-se que os parâmetros de construção da parede F foram os mais próximos dos parâmetros ideais de construção porque, no final da produção, essa parede apresentou as dimensões mais próximas das do ficheiro CAD 3D. Porém, utilizando parâmetros de construção próximos dos ideais, o efeito causado pela descalibração do foco XY é mais significativo. Por esse motivo, em detrimento dos parâmetros utilizados na parede F, que foram os mais próximos dos ideais, decidiu-se prosseguir o trabalho utilizando os parâmetros utilizados na parede E.

6.4. Análise de diferentes estratégias de deposição

No final da produção das paredes com estratégias de deposição diferentes, todas as peças produzidas foram maquinadas e obteve-se um provete para cada estratégia de deposição igual ao que se pode observar na figura 48.



Figura 48. Provete de tração de acordo com a norma ASTM E8/E8M.

Após todos os provetes estarem maquinados, realizaram-se ensaios de tração e os resultados obtidos encontram-se na tabela 15.

Tabela 15. Resultados obtidos nos ensaios de tração.

Parede	R _m (MPa)	Ductilidade (%)
1	1125	2
2	1163	2
3	1170	2
4	1156	2
5	1154	2
6	1230	2

Devido ao reduzido número de provetes tracionados com cada estratégia, e dados os resultados obtidos, não se pode retirar nenhuma conclusão com assertividade sobre qual é a melhor estratégia de deposição. No entanto, a parede 6 apresentou indícios de que poderá ter sido produzida com a melhor estratégia porque conciliou um tempo de produção relativamente curto (quando comparado com os tempos de produção das outras estratégias) e apresentou a melhor resistência máxima.

Mais uma vez, todos os provetes apresentaram elevada resistência máxima e comportamento frágil (alongamento após rotura foi sempre inferior a 3%). De modo a tentar melhorar a ductilidade das peças produzidas, com este material, neste equipamento, antes da aplicação das mesmas, deve-se realizar um tratamento térmico. No entanto, este tratamento não terá grande efeito nos óxidos presentes na matriz metálica.

6.5. Produção em Z

O principal objetivo (realizar ensaios de tração aos provetes obtidos) não foi possível cumprir. Porém, nesta experiência, retiraram-se ilações acerca da velocidade de arrefecimento das camadas mais afastadas do substrato numa peça com dimensões reduzidas.

Tal como já foi referido anteriormente, o calor gerado na produção de cada camada vai-se acumulando ao longo da produção e provoca um aumento de temperatura da peça, que por sua vez influencia a velocidade de arrefecimento das novas camadas depositadas [8, 32].

Durante a produção das pré-formas atingiram-se temperaturas tão elevadas que houve um momento em que as novas camadas eram depositadas sem que as camadas anteriores estivessem solidificadas. Assim sendo, quando a nova camada era depositada, as pré-formas não cresciam porque o material depositado não solidificava corretamente. Em vez de solidificar sobre as camadas anteriores, o material depositado aluía. Isto provocou um distanciamento entre a superfície da peça e a cabeça de deposição e, consequentemente, levou à interrupção das produções sem que estas fossem concluídas.

Na figura 49 (a) e 49 (b) é possível observar dois momentos distintos da produção da pré-forma do provete redondo. A figura 49 (a) corresponde a um momento em que a cabeça de deposição está a depositar material e em 49 (b) observa-se um momento em que a cabeça de deposição se está a reposicionar para iniciar a deposição da camada seguinte. Além disso, na figura 49 (b) é possível verificar que as últimas camadas depositadas ainda não se encontram completamente solidificadas. Este efeito ocorreu na produção das 2 pré-formas.

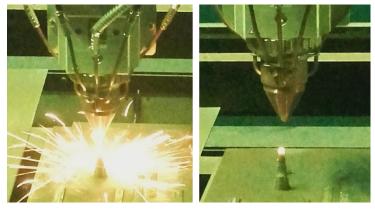


Figura 49. (a) Deposição de material numa camada; (b) reposicionamento da cabeça de deposição no final da deposição de uma camada.

Na figura 50 encontra-se o estado final das duas pré-formas no momento em que o processo foi interrompido.



Figura 50. Geometria final das duas pré-formas produzidas (com interrupção da produção prematuramente).

O insucesso da produção das duas pré-formas pode estar relacionado com 3 motivos principais. O facto da geometria das pré-formas ser de pequenas dimensões leva a que cada camada apresente uma secção transversal pequena e, por isso, a produção de cada camada é realizada rapidamente. Ao serem realizadas rapidamente, atinge-se um momento em que se avança para a produção da camada seguinte sem que a camada anterior tenha solidificado completamente. Caso as préformas fossem de grandes dimensões, no final de depositar uma camada o primeiro material depositado nessa mesma camada já se encontrava no estado sólido e a deposição da camada seguinte já não apresentaria este problema. Outro motivo/solução para este problema está relacionado com a programação dos percursos percorridos pela cabeça de deposição. Durante a programação é possível

aumentar o intervalo de tempo entre a deposição de 2 camadas simultâneas. Assim sendo, quanto maior for esse intervalo mais tempo o material depositado possui para solidificar corretamente. Por fim, o terceiro motivo está relacionado com o substrato utilizado. Quanto maior for a capacidade deste para dissipar o calor gerado, mais rápido será o arrefecimento de cada camada. Assim sendo, utilizar um substrato com maior capacidade para dissipar o calor também poderia solucionar o problema.

7. Considerações Finais

7.1. Conclusões

O equipamento utilizado, em todas as produções efetuadas nesta dissertação, demonstrou que o foco XY não se encontra corretamente calibrado. Os efeitos provocados por essa descalibração correspondem a um acabamento superficial das peças produzidas irregular, rugoso e diferente em diferentes faces. É de salientar que todas as paredes construídas apresentaram gotículas de metal fundido numa das faces e ausência de gotículas na outra face.

Relativamente às duas categorias de substratos utilizadas, nesta dissertação, verificou-se que os substratos grandes apresentam maior capacidade de dissipação térmica, devido à sua maior massa, e, consequentemente, concluiu-se que essa diferença teve influência na geometria das paredes produzidas. Sendo que, as paredes produzidas nos substratos grandes apresentaram uma geometria final mais próxima da esperada do que as paredes produzidas nos substratos pequenos. Com esta análise, apurou-se que a capacidade do substrato utilizado para dissipar energia tem influência na qualidade final das peças produzidas por esta tecnologia. Assim sendo, é importante utilizar um substrato adequado, na produção de peças metálicas, utilizando a tecnologia DED.

Utilizando uma velocidade de avanço de 500 mm/min, uma taxa de deposição de 22,5 g/min e um espaçamento entre passagens do laser de 1,25 mm, na produção de peças metálicas com este equipamento e utilizando o pó metálico Metco 42C da *Oerlikon*, verificou-se que a espessura das camadas formadas é, aproximadamente, 0,7 mm. Além disso, também se concluiu que, para a mesma velocidade de avanço e taxa de deposição, quanto menor for o espaçamento entre passagens do laser maior é a espessura das camadas formadas. Por outro lado, quanto maior for esse espaçamento menor será a espessura das camadas formadas.

Em relação às estratégias de deposição testadas, devido ao reduzido número de provetes tracionados com cada estratégia, não se conseguiu retirar nenhuma conclusão com assertividade sobre qual é a melhor estratégia de deposição. Porém, a estratégia com rotação de 67° entre camadas apresentou indícios de que poderá

ser a estratégia mais indicada para a produção de peças metálicas com esta tecnologia. A parede produzida com esta estratégia apresentou a maior resistência máxima e um tempo de produção curto, quando comparada com as paredes produzidas com as restantes estratégias.

Em relação à microestrutura das peças produzidas, verificou-se que não é homogénea. Devido à acumulação da energia gerada durante a deposição de todas as camadas, a velocidade de arrefecimento das camadas depositadas vai-se tornando cada vez mais lenta. Assim sendo, como diferentes camadas apresentam diferentes velocidades de arrefecimento, os constituintes que se formam também são diferentes.

Todos os ensaios de tração realizados neste trabalho, demonstraram que as peças produzidas, neste equipamento, com este material, apresentam elevada resistência máxima e fratura frágil. Assim sendo, quando forem produzidas peças, com este material e neste equipamento, para qualquer aplicação que requeira um compromisso entre resistência mecânica e ductilidade, é importante realizar-se um tratamento térmico de têmpera e revenido antes da respetiva aplicação.

Na produção em Z, confirmou-se que o calor gerado na deposição de cada camada se vai acumulando, durante a produção. Deste modo, para produzir peças metálicas de grandes dimensões é importante utilizar um substrato adequado (tal como já foi referido) e programar os percursos do laser de modo que todas as camadas depositadas tenham tempo suficiente para solidificar corretamente antes de se iniciar a deposição da camada seguinte.

Em todas as experiências realizadas nesta dissertação, concluiu-se que a remoção das peças produzidas dos substratos utlizados é uma etapa complicada. Durante a remoção, a probabilidade da geometria das peças, nas primeiras camadas depositadas, ficar danificada é elevada. Para isto não constituir um problema, durante a modelação das peças em CAD, deve-se acrescentar sobreespessura suficiente na face que estará em contacto com o substrato, de modo que não haja perigo de danificar a peça pretendida.

7.2. Perspetivas para trabalhos futuros

Antes do CEiiA poder utilizar a máquina ADIRA AM fielmente em novos projetos, ainda existe um logo caminho a percorrer.

Neste momento, é necessário aguardar que seja efetuada a correta calibração do foco XY, para se poder dar continuidade ao trabalho realizado.

Quando o foco XY se encontrar devidamente calibrado, deve-se proceder a novas experiências utilizando o pó Metco 42C, uma velocidade de avanço de 500 mm/min, uma taxa de deposição de 22,5 g/min e variando estrategicamente a espessura das camadas e o espaçamento entre passagens do laser. Com esta experiência é importante descobrir quais são os parâmetros corretos para que a distância de 9 mm entre a superfície da peça produzida e a boquilha seja constante em todas as camadas. De seguida, para garantir que todas as camadas solidifiquem corretamente e que todas as peças produzidas apresentam as dimensões pretendidas, deve-se realizar uma experiência com o objetivo de descobrir qual o intervalo de tempo indicado entre o final da deposição de uma camada e o início da deposição da camada seguinte. É de salientar que, camadas com áreas diferentes podem necessitar de tempos de intervalo diferentes, para solidificar corretamente.

Quando forem atingidos os parâmetros de construção adequados para o pó Metco 42C, no equipamento ADIRA AM, deve-se repetir a experiência em que se variou a estratégia de deposição utilizada e produzir várias paredes com a mesma estratégia. Nesta experiência, o objetivo é comprovar se a estratégia de deposição com rotação de 67° entre camadas é realmente a estratégia que confere melhores propriedades mecânicas e avaliar a repetibilidade do equipamento. Além disso, também é de extrema importância realizar tratamentos térmicos às peças produzidas, para se averiguar quais são os tempos e as temperaturas de estágio adequadas para se melhorar as propriedades mecânicas das peças.

Relativamente à reparação de peças danificadas e ao revestimento de peças com este equipamento, é importante implementar um tabuleiro com coordenadas de fixação das peças bem definidas onde seja possível colocar as peças e programar os percursos percorridos pelo laser de forma coerente com essa posição.

Sempre que se pretender utilizar um novo pó metálico para produzir peças com o equipamento ADIRA AM, todas as etapas realizadas com o pó Metco 42C até se conhecerem os parâmetros de construção indicados, devem ser repetidas utilizando o novo material.

Referências Bibliográficas

- [1] CEiiA. (20-02-18). About Us. Available: www.ceiia.com
- [2] A. Pinto, "A colaboração para a criatividade organizacional: Projeto UAS30," Tese de Mestrado, FEP, UP, 2016.
- [3] S. Davies. (26-02-18). Adira combines both laser-based additive manufacturing technologies in conceptual machine. Available: https://www.tctmagazine.com/3d-printing-news/adira-combines-both-laser-based-additive-manufacturing-techn/
- [4] F. Coutinho, T. Faro, and J. Alves, "Fabrico Aditivo Metálico," *Tecnometal*, vol. 227, 2016.
- [5] ASTM, Standard terminology for additive manufacturing technologies. ASTM International, 2012.
- [6] S. S. Muthu and M. M. Savalani, *Handbook of sustainability in additive manufacturing*. Springer, 2016.
- [7] Eng.deMateriais. (27-06-18). *Manufatura Aditiva de Metais*. Available: http://engenheirodemateriais.com.br/2018/06/21/manufatura-aditiva-demateriais-impressao-3d-com-metais/
- [8] T. DebRoy *et al.*, "Additive manufacturing of metallic components-process, structure and properties," *Progress in Materials Science*, 2017.
- [9] EPMA, "Introduction to Additive Manufacturing Technology," 2018.
- [10] U. DOE, "Quadrennial technology review 2015—Chapter 6: Innovating clean energy technologies in advanced manufacturing," *Washington, DC: US DOE*, 2015.
- [11] I. Gibson, D. Rosen, and B. Stucker, "Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing", 2nd Edition. 2015, p.
- [12] W. Associates, Wohlers Report. 2018.
- [13] J. Džugan and Z. Nový, "Powder Application in Additive Manufacturing of Metallic Parts," in *Powder Metallurgy-Fundamentals and Case Studies*: InTech, 2017.

- [14] E. Oberg, F. D. Jones, H. L. Horton, H. Ryffel, and r. H., "Machinery's Handbook (30th Edition)," ed: Industrial Press, 2016, p. 1450.
- [15] T. Tingskog. (2018 Vol. 4 No. 2) An introduciton to metal powders for AM: Manufacturing process and properties. *Metal AM*.
- [16] J. Debbie. (2017 Vol. 3 No. 4) Beyond particle size: Exploring the influence of particle shape on metal powder performance. *Metal AM*.
- [17] S. M. Thompson, L. Bian, N. Shamsaei, and A. Yadollahi, "An overview of Direct Laser Deposition for additive manufacturing; Part I: Transport phenomena, modeling and diagnostics," *Additive Manufacturing*, vol. 8, pp. 36-62, 2015.
- [18] N. Shamsaei, A. Yadollahi, L. Bian, and S. M. Thompson, "An overview of Direct Laser Deposition for additive manufacturing; Part II: Mechanical behavior, process parameter optimization and control," *Additive Manufacturing*, vol. 8, pp. 12-35, 2015.
- [19] Oerlikon, "Martensitic Stainless Steel Powders for Thermal Spray: Metco," 2017.
- [20] A. Gioia, "Intrinsic flowability: a new technology for powder flowability classification," *Pharm Technol*, vol. 2, pp. 65-68, 1980.
- [21] H. Research. (15-05-18). *Physical Testing Flodex*. Available: https://hansonresearch.com/physical-testing/flodex-2/
- [22] F. Lavoie, L. Cartilier, and R. Thibert, "New methods characterizing avalanche behavior to determine powder flow," *Pharmaceutical research*, vol. 19, no. 6, pp. 887-893, 2002.
- [23] LPW, "Technical Data Sheet," 2018, vol. 316L Stainless Steel.
- [24] A. L. Schaeffler, "Constitution diagram for stainless steel weld metal," *Metal progress*, vol. 56, no. 11, p. 680, 1949.
- [25] G. Krauss, *Steels: processing, structure, and performance*. Asm International, 2015.
- [26] Autodesk. (1-06-18). About PowerMill Additive. Available: https://knowledge.autodesk.com/support/powermill/getting-started/caas/CloudHelp/cloudhelp/2019/ENU/PWRM-Additive/files/GUID-5B32F5CB-8DDC-475C-9450-07285615BF9E-htm.html
- [27] ASTM, "E8/E8M," Standard test methods for tension testing of metallic materials, 2013.

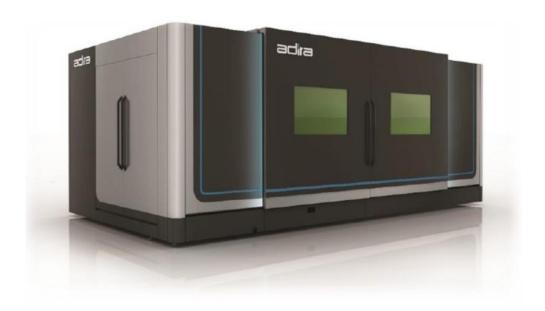
- [28] K. Zhang, S. Wang, W. Liu, and R. Long, "Effects of substrate preheating on the thin-wall part built by laser metal deposition shaping," *Applied Surface Science*, vol. 317, pp. 839-855, 2014.
- [29] W. F. Smith, "Structure and properties of engineering alloys," 1993.
- [30] ASM, "9: Metallography and Microstructures," ASM International, Materials Park, OH, 2004.
- [31] G. F. Vander Voort, *Metallography, principles and practice*. ASM International, 1999.
- [32] Y. Liu, A. Li, X. Cheng, S. Zhang, and H. Wang, "Effects of heat treatment on microstructure and tensile properties of laser melting deposited AISI 431 martensitic stainless steel," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 666, pp. 27-33, 2016.

Anexo A - Guia de Utilização ADIRA AM

GUIA DE UTILIZAÇÃO



ADIRA AM



TECNOLOGIA DED

1. Ligar Máquina ADIRA AM

O equipamento de *Additive Manufacturing* ADIRA AM possui 2 tecnologias acopladas: *Directed Energy Deposition* (DED) e *Powder Bed Fusion* (PBF). Neste manual, apenas estão abordados os procedimentos necessários durante a utilização da tecnologia DED.

1.1. Ligar Equipamento Principal

Para iniciar a máquina ADIRA AM deve-se rodar o *breaker switch*, na zona lateral esquerda do equipamento (na porta do quadro elétrico): *Off -> On*.



Figura 51. Máquina ADIRA AM com indicação a vermelho da porta do quadro elétrico.

1.2. Ligar Equipamentos Periféricos

A tecnologia DED requer a ligação de equipamentos periféricos, nomeadamente o laser Teradiode, o *chiller* Lauda, o *chiller* SMC, o alimentador de pó e o gás de proteção e transporte. Os equipamentos periféricos encontram-se nas traseiras do equipamento principal.

Ligar laser Teradiode: rodar o *breaker switch* traseiro: *Off -> On* **Ligar chiller Lauda:** rodar o *breaker switch* frontal: *Off -> On*

Ligar chiller SMC: ligar disjuntor traseiro: Off -> On

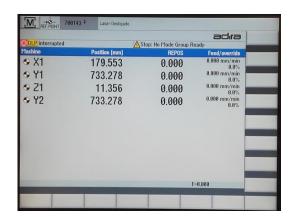
Ligar alimentador de pó: rodar o *breaker switch* frontal: *Off -> On* **Ligar gás:** rodar torneira na saída das garrafas: sentido anti-horário



Figura 52. (a) Laser Teradiode; (b) chiller Lauda; (c) chiller SMC; (d) alimentador de pó.

Após ligar todos os equipamentos, deve-se aguardar pelo aparecimento do menu principal no PC Industrial (menu REF. POINT).

Estando no menu "REF. POINT", utiliza-se a tecla "Channel" sempre que se pretende alterar a tecnologia que se está a controlar através do monitor do PC Industrial. Antes de se iniciar qualquer atividade, deve-se aceder aos menus que controlam cada tecnologia (DED e PBF) e em cada menu deve-se premir o botão "Reset" até eliminar todos os alarmes que surgem quando se liga o equipamento.



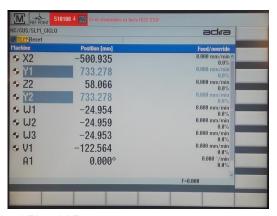


Figura 53. Menu REF.POINT inicial das tecnologias DED e PBF, respetivamente.

De seguida, deve-se rodar a chave que se encontra no monitor do PC industrial duas vezes e aguardar que a luz verde acenda.





Figura 54. Luz verde desligada antes de rodar a chave 2 vezes, e luz verde ligada após rodar a chave.

Por fim, deve-se clicar em "Feed Start", colocar o seletor acima de 0% de forma a conferir velocidade aos eixos e verificar o sincronismo dos eixos W no menu respetivo à tecnologia PBF (este movimento ocorre automaticamente).

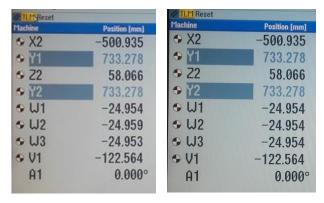


Figura 55. Eixos W dessincronizados no momento do arranque do equipamento e eixos W sincronizados - tecnologia PBF.

Por fim, clica-se no botão "JOG" e o equipamento encontra-se apto a ser utilizado.





Figura 56. Modo JOG e modo AUTO estão ativos quando a luz verde está ligada. Os dois modos não podem estar ativos em simultâneo.

2. Movimentação dos Eixos

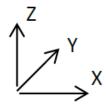


Figura 57. Sistema de eixos do equipamento - tecnologia DED

Ativando o modo "JOG" e ativando "Feed Start" é possível movimentar os eixos manualmente. A velocidade dos movimentos é ajustável rodando o seletor. Por segurança, é aconselhável utilizar uma velocidade baixa para evitar colisões.



Figura 58. Botão FEED STOP e FEED START bloqueia e desbloqueia os eixos respetivamente, e o seletor controla a velocidade dos movimentos.

Para movimentar os eixos, deve-se selecionar o eixo que se pretende movimentar premindo o respetivo botão para cada eixo. De seguida, clicar em "Feed Start", ajustar a velocidade e clicar nos botões "+" ou "-", dependendo do sentido em que se pretende movimentar o eixo.



Figura 59. Botões X, Y e Z servem para selecionar o eixo que se pretende movimentar. O eixo selecionado possui uma luz verde. Nesta imagem pode ver-se o eixo Z selecionado.

Premindo um dos botões incrementais, é possível movimentar os eixos com deslocações fixas de 1, 10, 100, 1000 ou 10000 mícrons em cada movimento. Para voltar a movimentar os eixos sem incrementos, volta-se a premir a tecla "JOG".



Figura 60. Botões incrementais permitem movimentos de 1, 10, 100, 1000 e 10000 mícrons.



Figura 61. Botões "+" e "-" movimentam os eixos no sentido positivo e negativo de acordo com o referencial do equipamento.

Quando o modo "JOG" se encontra selecionado, o laser encontra-se desligado e é possível abrir as portas da máquina.

Quando o modo "AUTO" se encontra selecionado, as portas do equipamento são bloqueadas e o laser liga-se transmitindo um feixe de luz vermelha que serve para calibrar o posicionamento da cabeça de deposição.



Figura 62. Laser guia.

Após a calibração do posicionamento da cabeça de deposição e do carregamento do ficheiro *.mpf, clicando em "Cycle Start" o processo inicia automaticamente. Clicando em "Cycle Stop" o laser desliga e os eixos ficam bloqueados.

Quando se clica em "Cycle Start" inicia-se uma nova produção ou continua-se uma produção interrompida anteriormente em "Cycle Stop".

Quando se clica em "Cycle Start" ativa-se a injeção de gás e a deposição de pó. Quando se interrompe o processo em "Cycle Stop" a injeção de gás e a deposição de pó não é interrompida.

A injeção de gás e a deposição de pó apenas é interrompida no final de cada produção ou quando se prime o botão "Reset".

3. Transferir Ficheiro para o Equipamento

Utilizando uma *pendrive*, transfere-se o ficheiro *.mpf gerado utilizando o pós-processador da Autodesk para o PC Industrial do equipamento.

No menu "Program manager", com a pendrive ligada, abre-se o sub-menu "USB". De seguida, procura-se pelo ficheiro *.mpf que se pretende produzir, seleciona-se o ficheiro e na barra lateral direita clica-se na opção "Copy". Por fim, abre-se o sub-menu "Local drive", seleciona-se a pasta com o nome "LMD", clica-se em "Open" e prime-se a opção "Paste" na barra lateral direita.

Menu Select -> Menu Program manager -> Sub-menu USB -> (Selecionar ficheiro *.mpf) -> Clicar em Copy -> Sub-menu Local drive -> Selecionar pasta LMD -> Clicar em Open -> Clicar em Paste

Após este passo, o ficheiro encontra-se na memória do equipamento e pode ser produzido.

4. Calibração do Sistema

Antes de se iniciar qualquer produção deve-se efetuar uma calibração dos eixos para que não ocorre nenhuma inconformidade.

4.1. Calibração do Eixo Z

Durante a produção, a distância entre a boquilha de deposição e a superfície da peça deve ser constante e igual a 9 mm (distância recomendada pelo fabricante da boquilha). Para tal, utiliza-se um calibre de espessura 9 mm para garantir que a boquilha se encontra a essa distância da plataforma utilizada. Por segurança, até atingir esse valor deve-se movimentar a cabeça de deposição utilizando pequenos incrementos e baixa velocidade.

Quando a distância entre a boquilha e a plataforma estiver igual a 9 mm, clicase em:

Menu Select -> Menu Diagnostics -> Sub-menu DIAGNOSTICO ADIRA -> Sub-menu LMD -> Sub-menu SPOT -> TEACH Z (o valor de standoff é lido automaticamente a partir da posição da boquilha).

4.2. Calibração dos Eixos X e Y

A posição dos eixos X e Y no arranque de cada produção pode ser préprogramada no software de pré-processamento (*Autodesk PowerMill*). Neste caso, o referencial utilizado pelo *software* será definido pelo plano de trabalho escolhido. Porém, existem situações onde é mais vantajoso calibrar os eixos manualmente antes de se iniciar a produção. Nesses casos, o procedimento é o seguinte:

- I. Selecionar o ficheiro que se pretende executar, no menu "Program manager"
- II. Clicar em "Open" e procurar a linha N11
- III. Remover ponto e vírgula (;) antes da função "TRANSF"
- IV. Substituir PX e PY, pelas coordenadas X e Y onde queremos iniciar a produção, respetivamente

Exemplo:

Linha N11 original no ficheiro pós-processado:

N11; TRANSF (PX,PY)

Linha N11 para calibrar a posição inicial em X= 100 e Y=200:

N11 TRANSF (100,200)

5. Configuração dos Parâmetros

Antes de se iniciar qualquer produção deve-se alterar ou verificar quais os parâmetros de construção que o equipamento irá respeitar. Caso não se altere os parâmetros, o sistema assume parâmetros de construção iguais aos da produção anterior.

Para verificar/alterar os parâmetros de construção deve-se aceder ao submenu LMD através dos botões:

Menu Select -> DIAGNOSTICS -> Diagnostico ADIRA -> LMD

Estando no sub-menu LMD é possível alterar manualmente a taxa de deposição de material, o caudal de gás de transporte e proteção utilizado no processo e a velocidade de rotação do misturador de pó.

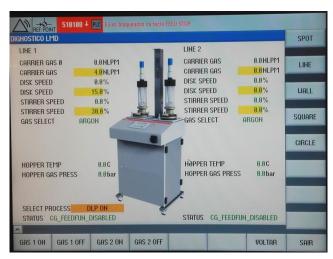


Figura 63. Sub-menu LMD.

No sub-menu LMD também é possível alterar entre as tecnologias de corte laser e fabricação aditiva. A opção "DLP ON" deve estar ligada de modo a produzir peças por fabrico aditivo e a opção "CUT ON" deve estar desligada.

6. Produção

Após transferência do ficheiro para o equipamento, calibração dos eixos e configuração dos parâmetros de construção, pode-se iniciar a produção.

Assim sendo, seleciona-se o ficheiro *.mpf que se pretende produzir no menu "Program manager" e clica-se em "Execute". Após este passo, deve-se confirmar que o programa foi corretamente carregado no menu "Machine" (clica-se no botão "Machine").

De seguida, deve-se selecionar o modo "AUTO" e, por questões de segurança, premir o botão "RESET" a fim de garantir que possíveis erros são corrigidos.

Para iniciar o processo, deve-se clicar 2 vezes em "Cycle Start". Quando se clica a primeira vez o sistema verifica que todos os periféricos estão ligados e quando se clica a segunda vez a produção inicia (os eixos movimentam-se, o fluxo de gás e a injeção de pó são ativados).

O botão BEAM OFF serve para ligar e desligar o laser, mas só pode ser utilizado quando os eixos se encontrarem bloqueados. Recomenda-se iniciar a produção com o botão BEAM OFF ativo e velocidade dos eixos baixa para verificar o sentido do movimenta dos eixos e se a calibração dos eixos foi efetuada corretamente. Caso não haja problemas, deve-se premir "RESET" e repetir o procedimento para iniciar o processo.

7. Limpeza

Deve-se limpar o equipamento no final de cada produção, com a cabeça de deposição numa posição de segurança e com o botão "Feed STOP" ativo. O equipamento não pode ser desligado antes desta etapa porque com o equipamento desligado as portas são bloqueadas e não abrem.

No final de cada produção, além das peças produzidas existe pó residual na plataforma de trabalho que deve ser reaproveitado. Para tal, deve-se varrer cuidadosamente esse pó de forma a que seja reaproveitado pelo recipiente inferior. Quando todo o pó residual estiver varrido, pode-se retirar o recipiente inferior por intermédio de uma gaveta do equipamento colocada junto ao solo e transferir o pó metálico que se encontra nessa gaveta para recipientes apropriados a fim de serem peneirados e reutilizados.

Como o processo de varrimento não é 100% eficaz, deve-se finalizar a limpeza utilizando um aspirador apropriado para aspirar as partículas de pó que ainda se encontram no interior do equipamento.

8. Desligar o Equipamento

Para desligar o equipamento principal e os equipamentos periféricos não existe nenhuma ordem preferencial.

Para desligar o equipamento principal, deve-se clicar no "Menu Select" utilizando o PC Industrial e selecionar a opção "Exit". De seguida, deve-se aguardar que o ecrã se desligue completamente (esperar que o ecrã fique preto) e rodar o breaker switch na porta do quadro elétrico: On -> Off.

Para desligar os equipamentos periféricos o procedimento é semelhante ao processo para os ligar, sendo necessário rodar o *breaker switch* e desligar o disjuntor de cada equipamento no sentido: *On -> Off*. Para desligar o gás deve-se rodar a torneira no sentido horário.

9. Simbologia dos Botões e Menus

Simbologia de Botões	Significado
REF. POINT	Menu REF. POINT onde se pode consultar o sincronismo dos eixos
MACHINE	Menu MACHINE onde se pode consultar o posicionamento dos eixos, verificar se o ficheiro é corretamente carregado e iniciar e parar a produção
1n GROUP CHANNEL	Botão CHANNEL permite alternar entre as tecnologias DED e PBF (dentro do menu MACHINE ou REF. POINT)
MENU SELECT	Menu SELECT permite abrir vários sub-menus
	No menu SELECT, permite rodar a barra inferior e permite que aparecem os restantes sub-menus
₩ Jog	Modo JOG permite movimentar os eixos manualmente
AUTO	Modo AUTO permite arrancar a produção
RESET	Botão RESET permite eliminar/corrigir eventuais erros que surjam durante o processo assim como permite interromper uma produção para iniciar desde o momento 0
NC Ex-	No menu PROGRAM o botão Execute permite transferir o ficheiro que se pretende produzir para a memória do equipamento
CYCLE STOP CYCLE START	Botões CYCLE STOP e CYCLE START permitem iniciar e interromper a produção
→ INPUT	Botão INPUT permite inserir novos valores nos parâmetros de construção



Botões incrementais permitem movimentos de 1, 10, 100, 1000 e 10000 mícron

Simbologia dos Menus	Significado
Program manager	Menu Program manager permite ler USB e transferir ficheiros para a memória do equipamento
Program	Menu Program permite consultar o programa pós- processado e altera-lo se necessário, por exemplo para definir as coordenadas X e Y iniciais
Diag- nostics	Menu Diagnostics permite ver quais os erros encontrados que não permitem o normal funcionamento do equipamento
Setup	Menu Setup permite alterar definições do equipamento, como por exemplo mudar de linguagem
DIAGNOSTICO ADIRA	Menu DIAGNOSTICO ADIRA permite aceder a várias informações sobre o equipamento
LMD	Menu LMD permite consultar e alterar vários parâmetros de construção
EXIT	Botão EXIT serve para desligar o equipamento