



# **Seleção e otimização dos parâmetros do processo de *Laser Cladding* para a reparação de componentes**

**António Borges Correia**

Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Orientador: Elsa Wellenkamp de Sequeiros

03 de setembro de 2018



# Resumo

A tecnologia de *Laser Cladding* é uma poderosa ferramenta na reparação e recuperação de componentes de elevado valor. A sua utilização permite ganhos económicos e um aumento de sustentabilidade aliados à adição de valor no que concerne às propriedades mecânicas dos componentes. Este estudo foi realizado em parceria com a empresa Sermec, que vê nesta tecnologia uma janela de oportunidade para, não só alargar o leque de serviços perante os seus clientes, mas também afirmar-se no mercado, mais concretamente no ramo da reparação de componentes.

Devido à complexidade do processo *Laser Cladding*, é essencial o seu estudo e a otimização de forma a cumprir os requisitos dos componentes a reparar. Neste estudo foram testados diferentes materiais base - MB - (Aço 34CrNiMo6 e 42CrMo4 e Ferro Fundido GJS-500-7) e diferentes materiais de adição - MA - (Metco 42C, Ferro 39, Inconel 625 e Inconel 718) variando parâmetros como potência laser, velocidade de *cladding* e taxa de deposição de pó, com a finalidade de otimizar o processo.

A otimização do processo, consistiu na deposição de cordões para cada condição. Estes cordões foram caracterizados com lupa e recurso a microscopia ótica (MO), de forma a detetar defeitos e avaliar os cordões depositados: diluição, zona termicamente afetada (ZTA) e rácio  $\frac{L}{A}$ . Para cada par (MB, MA), no melhor cordão, foram realizados perfis de dureza HV0.3. Verificou-se que os parâmetros do processo são interdependentes e possuem enorme influência na qualidade e características do cordão depositado. Os melhores resultados são expressos por taxas de diluição entre 6-7 % e alturas de cordão a ultrapassar os 0,7 mm, os quais foram atingidos com o conjunto de materiais (34Cr-NiMo6, Inconel 625) a 1100 W de potência, velocidades entre os 7 e 8 mm/s e taxas de deposição de 23,4 g/min. Seguindo os mesmos parâmetros, foi possível a deposição de multicamadas com resultados igualmente satisfatórios. Porém, constatou-se a presença de defeitos como porosidades e fissuras, que necessitam ser eliminados.

O estudo sugere que a necessidade da reparação de componentes de alto valor é comprometida, não só pela ausência de estudos focados na parametrização, mas principalmente pela influência de vários fatores externos.

# Abstract

Laser Cladding technique is a powerful tool in repairing and recovering high-value components. Its utilization generates economic gains combined with the achievement of a product with excellent properties. The present study was carried out at Sermec wich has the goal of, not only extend the range of services towards its costumers but also to affirm itself in the market, more specifically in the repair sector.

Due to the complexity of the Laser Cladding process it is essential its study and optimization in order to meet the requirements of the components to be repaired. Different base materials - BM - (34CrNiMo6 and 42CrMo4 Steels and GJS-500-7 Iron Cast) and different adition materials - AM - (Metco 42C, Ferro 39, Inconel 625 e Inconel 718) were tested varying process parameters like laser power, clad speed and powder feed rate in order to optimize the process.

The optimization of the process consisted in the deposition of clads for each condition. These clads were analysed by stereo microscope and optical microscopy in order to detect defects and evaluate them: dilution, the Heat-affected zone (HAZ) and  $\frac{L}{A}$  ratio. For each pair (BM, AM), the best clad were subjected to hardness test HV0.3. The parameters are interdependent and have a huge influence on the quality and characteristics of the clad. The best results were achieved for the (34CrNiMo6, Inconel 625) set, where the obtaining dilution rates are between 6-7 % and the clad heights exceeded 0,7 mm with the application of 1100 W of laser power, 7 and 8 mm/s clad speed and powder feed rate of 23,4 g/min. According to the same parameters, at 8mm/s of speed and for the same set of materials, the deposition of one and two layers allows to obtain equally satisfactory results. However, the presence of defects like porosities and cracks need to be eliminated.

The study suggests that the need for repair of high-value components is not only due to the lack of studies focused on parameterization, but mainly due to the influence of several external factors.

# Agradecimentos

Em primeiro lugar, agradecer ao Professor Manuel Vieira que estabeleceu o contacto entre a faculdade e a empresa SERMEC mostrando-se sempre disponível para levar este trabalho a bom porto.

À minha orientadora, Professora Elsa de Sequeiros, por toda a disponibilidade e ajuda prestada na realização deste trabalho.

À Íris por todo o trabalho e dedicação na preparação de inúmeras amostras.

À SERMEC, que me proporcionou o contacto com a técnica de laser, especialmente ao Eng<sup>o</sup> João Cruz e ao Eng<sup>o</sup> João Taveira, pelos ensinamentos e confiança dados.

Um agradecimento ao Marcos pela disponibilidade na formação necessária para operar a máquina.

Finalmente agradecer aos meus: Os de Gondomar, os da FEUP, os da casa Maggiore. À Joana por estar sempre ao meu lado. E à família, que é a base da minha evolução e sucesso como aluno, mas acima de tudo, como pessoa. Um obrigado a todos vós.

António Borges Correia

# Conteúdo

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Estado da Arte</b>	<b>3</b>
2.1	Processo . . . . .	3
2.2	Característica de deposição . . . . .	6
2.3	Parâmetros . . . . .	9
2.4	Materiais . . . . .	13
<b>3</b>	<b>Procedimento Experimental</b>	<b>17</b>
3.1	Sistema de <i>Laser Cladding</i> . . . . .	18
3.2	Parâmetros variados no processo . . . . .	19
3.2.1	34CrNiMo6 . . . . .	19
3.2.2	42CrMo4 . . . . .	23
3.2.3	GJS-500 . . . . .	24
3.2.4	Caracterização das deposições . . . . .	25
<b>4</b>	<b>Resultados e Discussão</b>	<b>27</b>
4.1	34CrNiMo6 . . . . .	27
4.1.1	Conjunto ( $M_B, M_A$ ): (34CrNiMo6, Metco 42C) . . . . .	27
4.1.2	Conjunto ( $M_B, M_A$ ): (34CrNiMo6, Ferro 39) . . . . .	29
4.1.3	Conjunto ( $M_B, M_A$ ): (34CrNiMo6, Inconel 625) . . . . .	30
4.2	42CrMo4 . . . . .	41
4.2.1	Conjunto ( $M_B, M_A$ ): (42CrMo4, Metco 42C) . . . . .	41
4.2.2	Conjunto ( $M_B, M_A$ ): (42CrMo4, Ferro 39) . . . . .	43
4.2.3	Conjunto ( $M_B, M_A$ ): (42CrMo4, Inconel 625) . . . . .	45
4.3	GJS-500 . . . . .	48
4.3.1	Conjunto ( $M_B, M_A$ ): (GJS-500, Ferro 39) . . . . .	48
4.3.2	Conjunto ( $M_B, M_A$ ): (GJS-500, Inconel625) . . . . .	52
4.3.3	Conjunto ( $M_B, M_A$ ): (GJS-500, Inconel 718) . . . . .	57
<b>5</b>	<b>Conclusões</b>	<b>60</b>
5.1	Trabalho Futuro . . . . .	61
	<b>Referências</b>	<b>62</b>
	<b>Anexo A</b>	<b>66</b>
	<b>Anexo B</b>	<b>67</b>
	<b>Anexo C</b>	<b>68</b>
	<b>Anexo D</b>	<b>69</b>
	<b>Anexo E</b>	<b>70</b>

# Lista de Figuras

2.1	Diferentes configurações do injetor: a) injeção lateral; b) injeção coaxial contínua; c) injeção coaxial descontínua . . . . .	5
2.2	Unidade de processamento - (1) Guincho com viga e suporte de equilíbrio; (2) Robô com cabeça de processamento; (3) Unidade linear; (4) Alimentação de energia; (5) Alimentador de pós; (6) Armário distribuidor de substâncias; (7) - Consola de operação . . . . .	6
2.3	Secção de corte da camada depositada onde L - largura do cordão; $A_c$ - Área do cordão; $A_{mix}$ - Área do substrato fundido; ZTA - Zona termicamente afetada . . . . .	6
2.4	Esquema de diferentes perfis de cordão . . . . .	8
2.5	Esquema do <i>offset</i> e <i>overlap</i> e respetivo resultado em caso de sobreposição excessiva . . . . .	8
2.6	Esquema de cordões depositados a diferentes potências, com taxa de deposição constante e velocidades de <i>cladding</i> crescentes . . . . .	10
2.7	Imagens MO de uma camada depositada de CPM 10V num substrato de Vanadis 4 para taxas de deposição de a) 5g/min; b) 15g/min . . . . .	11
2.8	Corte transversal de cordões depositados com taxas de pó de 20, 30 e 40 g/min . . . . .	11
2.9	Valores de tensão residual no substrato, zona termicamente afetada e camada depositada para diferentes temperaturas de pré aquecimento do substrato . . . . .	13
3.1	Fluxograma esquemático do procedimento experimental adotado . . . . .	17
3.2	Esquema de deposição de a) cordões individuais e b) de vários cordões de modo a formar uma ou duas camadas . . . . .	18
4.1	Imagens de MO de corte transversal dos cordões de Metco 42C depositados no Aço 34CrNiMo6 de acordo com as condições de deposição . . . . .	27
4.2	Imagens de MO de corte transversal dos cordões de Metco 42C depositados no Aço 34CrNiMo6 de acordo com as condições de deposição . . . . .	27
4.3	Imagens de MO de corte transversal dos cordões de Metco 42C depositados no Aço 34CrNiMo6 de acordo com as condições de deposição . . . . .	28
4.4	Imagens de MO de corte transversal dos cordões de Ferro 39 depositados no Aço 34CrNiMo6 de acordo com as condições de deposição . . . . .	29
4.5	Imagens de MO de corte transversal dos cordões de Ferro 39 depositados no Aço 34CrNiMo6 de acordo com as condições de deposição . . . . .	29
4.6	Imagens de MO de corte transversal dos cordões de Ferro 39 depositados no Aço 34CrNiMo6 de acordo com as condições de deposição . . . . .	30
4.7	Imagens de MO de corte transversal dos cordões de Inconel 625 depositados no Aço 34CrNiMo6 de acordo com as condições de deposição . . . . .	30
4.8	Imagens de MO de corte transversal dos cordões de Inconel 625 depositados no Aço 34CrNiMo6 de acordo com as condições de deposição . . . . .	31
4.9	Imagens de MO de corte transversal dos cordões de Inconel 625 depositados no Aço 34CrNiMo6 de acordo com as condições de deposição . . . . .	31
4.10	Imagens de MO de corte transversal dos cordões A3.32.1 e A3.36.1 . . . . .	34
4.11	Perfil de durezas do cordão A3.32.1 . . . . .	34
4.12	Perfil de durezas do cordão A3.36.1 . . . . .	34

4.13	Imagens de MO de corte transversal de deposição de duas camadas submetidas a diferentes potências com e sem recurso a pré-aquecimento . . .	37
4.14	Imagem de MO de corte transversal do cordão A3.48.20 com ampliação na zona de mudança de microestrutura . . . . .	38
4.15	a) Imagem MO de corte transversal da amostra A3.46.20 e b) representação da interface entre cordões vizinhos . . . . .	38
4.16	Imagem de MO do cordão A3.46.20 com b) ampliação na zona de transição entre camadas . . . . .	39
4.17	Imagens de MO onde é possível a visualização de porosidades na deposição de duas camadas submetidas a diferentes condições . . . . .	40
4.18	Imagens de MO dos cordões a) A3.47.20, b1) e b2) A3.51.20 . . . . .	41
4.19	Imagens de MO de corte transversal dos cordões de Metco 42C depositados no Aço 42CrMo4 de acordo com as condições de deposição . . . . .	42
4.20	Imagens de MO de corte transversal dos cordões de Metco 42C depositados no Aço 42CrMo4 de acordo com as condições de deposição . . . . .	42
4.21	Perfil de durezas da amostra B1.5.1 . . . . .	43
4.22	Imagens de MO de corte transversal dos cordões de Ferro 39 depositados no Aço 42CrMo4 de acordo com as condições de deposição . . . . .	44
4.23	Imagens de MO de corte transversal dos cordões de Ferro 39 depositados no Aço 42CrMo4 de acordo com as condições de deposição . . . . .	44
4.24	Perfil de durezas da amostra B2.5.1 . . . . .	45
4.25	Imagens de MO de corte transversal dos cordões de Inconel 625 depositados no Aço 42CrMo4 de acordo com as condições de deposição . . . . .	45
4.26	Imagens de MO de corte transversal dos cordões de Inconel 625 depositados no Aço 42CrMo4 de acordo com as condições de deposição . . . . .	46
4.27	Perfil de dureza da amostra B3.5.1 . . . . .	47
4.28	Imagens de MO de corte transversal dos cordões de Ferro 39 depositados no Ferro Fundido GJS-500 de acordo com as condições de deposição . . .	48
4.29	Imagens de MO de corte transversal dos cordões de Ferro 39 depositados no Ferro Fundido GJS-500 de acordo com as condições de deposição . . .	48
4.30	Perfil de durezas da amostra C2.4.1 . . . . .	49
4.31	Imagem de MO de corte transversal da deposição de dez cordões (uma camada) de Ferro 39 em Ferro Fundido GJS-500 . . . . .	50
4.32	Imagem MO de corte transversal em a) campo escuro e em b) campo claro de uma camada de Ferro 39 depositado em Ferro Fundido GJS-500 . . . .	50
4.33	Presença de fissuras em diferentes zonas da camada de Ferro 39 depositado em Ferro Fundido GJS-500 . . . . .	51
4.34	Imagem de MO de corte transversal da deposição de vinte cordões (duas camadas) de Ferro 39 em Ferro Fundido GJS-500 e respectivas ampliações b) e c) das fissuras . . . . .	51
4.35	Imagem de MO de corte transversal dos cordões de Inconel 625 em Ferro Fundido GJS-500 de acordo com as condições de deposição . . . . .	52
4.36	Imagem de MO de corte transversal dos cordões de Inconel 625 em Ferro Fundido GJS-500 de acordo com as condições de deposição . . . . .	53
4.37	Perfil de dureza da amostra C3.4.1 . . . . .	53
4.38	Imagem de MO de secção transversal da deposição de dez cordões (uma camada) de Inconel 625 em Ferro Fundido GJS-500 . . . . .	54

4.39	Imagem de MO de corte transversal da camada depositada do cordão de Inconel 625 de estrutura dendrítica . . . . .	55
4.40	Imagem de MO de corte transversal da deposição de uma camada de Inconel 625 em Ferro Fundido GJS-500 . . . . .	55
4.41	Imagem de MO de corte transversal da deposição de vinte cordões (duas camadas) de Inconel 625 em Ferro Fundido GJS-500 . . . . .	56
4.42	Imagem de MO de corte transversal da deposição de camadas de Inconel 625 depositadas de estrutura dendrítica, evidenciando a presença de b) uma zona de recristalização . . . . .	56
4.43	Imagem de MO de corte transversal dos cordões de Inconel 718 em ferro fundido GJS-500 de acordo com as condições de deposição . . . . .	57
4.44	Imagem de MO de corte transversal dos cordões de Inconel 718 em ferro fundido GJS-500 de acordo com as condições de deposição . . . . .	57
4.45	Perfil de dureza da amostra C4.4.1 . . . . .	59
A.1	Injetor usado para realização das deposições . . . . .	66
C.1	Imagens de MO de corte transversal dos cordões de Metco 42C depositados no aço ferramenta de acordo com as condições de deposição . . . . .	68
C.2	Imagens de MO de corte transversal dos cordões de Metco 42C depositados no aço ferramenta de acordo com as condições de deposição . . . . .	68
D.1	Esquema legendado da direção do fluxo de calor na deposição de um cordão	69
E.1	Diminuição da probabilidade do aparecimento de fissuras com o aumento da temperatura de pré-aquecimento na deposição de Stellite 20 ( $\approx 58$ HRC) em AISI1045 . . . . .	70

# Lista de Tabelas

2.1	Principais características do tipo de lasers mais usados na técnica <i>Laser Cladding</i> ; adaptado de . . . . .	3
2.2	<i>Inputs, outputs</i> e parâmetros do processo envolvidos no <i>Laser Cladding</i> . . . . .	9
2.3	Composição química do Aço 34CrNiMo6 . . . . .	14
2.4	Propriedades mecânicas do Aço 34CrNiMo6 . . . . .	14
2.5	Composição química do Aço 42CrMo4 . . . . .	14
2.6	Propriedades mecânicas do Aço 34CrNiMo6 . . . . .	14
2.7	Composição química do Ferro Fundido GJS-500-7 . . . . .	15
2.8	Propriedades mecânicas do Ferro Fundido GJS 500-7 . . . . .	15
2.9	Composição química do Metco 42C . . . . .	15
2.10	Composição química do Ferro 39 . . . . .	16
2.11	Composição química do Inconel 625 . . . . .	16
2.12	Composição química do Inconel 718 . . . . .	16
3.1	Características do laser do sistema <i>Laser Cladding</i> . . . . .	18
3.2	Nomenclatura utilizada para enumerar as várias deposições . . . . .	19
3.3	Parâmetros usados na deposição de Metco 42C no Aço 34CrNiMo6 . . . . .	20
3.4	Parâmetros usados na deposição de Metco 42 C no Aço 34CrNiMo6 . . . . .	20
3.5	Parâmetros usados na deposição de Ferro 39 no Aço 34CrNiMo6 . . . . .	20
3.6	Parâmetros usados na deposição de Ferro 39 no Aço 34CrNiMo6 . . . . .	20
3.7	Parâmetros usados na deposição de Inconel 625 no Aço 34CrNiMo6 . . . . .	21
3.8	Parâmetros usados na deposição de Inconel 625 no Aço 34CrNiMo6 . . . . .	21
3.9	Parâmetros usados na deposição de Inconel 625 no Aço 34CrNiMo6 . . . . .	22
3.10	Parâmetros usados na deposição de um, dois, três cordões e multicamadas de Inconel 625 no Aço 34CrNiMo6 . . . . .	22
3.11	Parâmetros usados na deposição de um, dois, três cordões e multicamadas de Inconel 625 no Aço 34CrNiMo6 . . . . .	23
3.12	Cordão A3.46.1 com pré aquecimento . . . . .	23
3.13	Parâmetros usados na deposição de multicamadas de Inconel 625 no Aço 34CrNiMo6 a diferentes potências . . . . .	23
3.14	Parâmetros usados na deposição de Metco 42C, Ferro 39 e Inconel 625 no Aço 42CrMo4 . . . . .	24
3.15	Parâmetros usados na deposição de Ferro 39 em Ferro Fundido GJS-500 . . . . .	24
3.16	Parâmetros usados na deposição de multicamadas de Ferro 39 em Ferro Fundido GJS-500 . . . . .	24
3.17	Parâmetros usados na deposição de Inconel 625 em Ferro Fundido GJS-500 . . . . .	25
3.18	Parâmetros usados na deposição de multicamadas de Inconel 625 em Ferro Fundido GJS-500 . . . . .	25
3.19	Parâmetros usados na deposição de Inconel 718 em Ferro Fundido GJS-500 . . . . .	25
4.1	Valores de ZTA, diluição, altura e largura de cordão e respetivo rácio $\frac{L}{A}$ obtidos segundo diferentes parâmetros na deposição de Inconel 625 em Aço 34CrNiMo6 . . . . .	33
4.2	Valores de ZTA, diluição, altura da deposição de diferentes números de cordões de Inconel 625 em Aço 34CrNiMo6 a uma velocidade de 7 mm/s . . . . .	35
4.3	Valores de ZTA, diluição, altura da deposição de diferentes números de cordões de Inconel 625 em Aço 34CrNiMo6 a uma velocidade de 8 mm/s . . . . .	35

C.1 Parâmetros usados na deposição de Metco 42 C no aço ferramenta . . . . 68

# Abreviaturas e Símbolos

MB	Material base
MA	Material de adição
MO	Microscópio ótico
ZTA	Zona Termicamente Afetada
$\frac{L}{A}$	Rácio Largura/Altura
TIG	Soldadura por gás inerte com elétrodo de tungsténio
$A_c$	Área do cordão
$A_{mix}$	Área do substrato fundido

# Capítulo 1

## Introdução

A fabricação aditiva, opostamente aos processos subtrativos, tem como base a deposição de sucessivas camadas de material para fabricação de partes de componentes [1]. Esta pode ser dividida em vários processos. No entanto, a possibilidade de recuperação/reparação de componentes por processos aditivos é atualmente escassa, sendo apenas possível por *Laser Powder Bed Fusion* (LPBF) e mais versatilmente por *Direct Energy Deposition* (DED). Aliado ao desenvolvimento de diversas aplicações laser, o surgimento de tecnologias de processamento metálico por laser representam uma mais valia na produção de revestimentos e na reparação e remodelação de peças [2, 3]. A técnica *Laser Cladding* tem por base um sistema de fusão e consiste na deposição de material de adição num substrato metálico. Apesar do primeiro sistema ter surgido em 1977, pela empresa AeroMet, esta tecnologia apenas ganhou mais pertinência a partir de 2009, devido à criação do primeiro comité estratégico para a certificação do processo [4].

Os paradigmas sócio económicos atuais, exigem que nas mais variadas indústrias, tanto os fatores económicos, como os ambientais relativos à produção de componentes, sejam cada vez mais pertinentes. Neste sentido, a reparação/recuperação dos componentes é crucial e estratégica, permitindo o aumento do ciclo de vida e redução de custos. Comparativamente com outros processos de reparação de componentes, como a soldadura TIG (*Tungsten Inert Gas*), o *Laser Cladding* permite a obtenção de ZTA's e taxas de diluição de reduzida dimensão. Para além disso, é possível melhorar, nas zonas reparadas, algumas propriedades mecânicas: aumento da resistência mecânica, da resistência à corrosão e à fadiga, o que se traduz numa adição de valor [5, 6]. Sendo a técnica de *Laser Cladding* indicada na reparação de componentes, a existência de desafios inerentes ao processo como a falta de produtividade, volumes de trabalho restritos e a necessidade de controlo e certificação do processo, são ainda uma realidade. A certificação do processo é ainda altamente dependente de um grande espectro de parâmetros, tais como: potência de laser, velocidade de *clad* e taxa de deposição de pó, entre outros. Deste modo torna-se difícil prever a exequibilidade dos componentes com garantia de qualidade final, sendo essencial a otimização do processo e avaliação do mesmo para que sejam cumpridos os requisitos da aplicação do componente [4].

Este trabalho foi realizado em parceria com a SERMEC - Indústria, Comércio, S.A.

Esta, situada no concelho da Maia, tem como atividade a produção, reparação e comercialização de ferramentas e componentes de alta precisão. É no setor *Wind Power* que se procede, dentro das instalações, à reparação de peças através da técnica *Laser Cladding*. No entanto, a carência de reprodutibilidade e de investigação sobre ela faz com que seja urgente a criação e estabelecimento de *guidelines* de modo a conceber a qualidade que a técnica tanto promete. Posto isto, o objetivo proposto deste trabalho consiste na definição dos parâmetros ideais com a finalidade da elaboração de protocolos específicos (*WPS - Welding procedure specification*) na reparação de diferentes componentes para várias indústrias como é o caso da indústria eólica, do petróleo e do gás, que possuem uma elevada exigência a nível de requisitos.

Para além da introdução, este trabalho irá conter mais quatro capítulos, onde uma pequena revisão bibliográfica é feita no Capítulo 2. O procedimento experimental é abordado no Capítulo 3, enquanto que os resultados serão abordados no Capítulo 4. Finalmente, no Capítulo 5 serão apresentadas as conclusões retiradas deste trabalho.

# Capítulo 2

## Estado da Arte

Neste capítulo será feita uma breve exposição do processo *Laser Cladding*, abordando o seu funcionamento e os seus componentes. Posteriormente serão descritas as características dos cordões e camadas após deposição de material, bem como os parâmetros que as influenciam.

### 2.1 Processo

O processo de *Laser Cladding* é baseado na produção de um feixe laser através da emissão de radiação num meio ativo, permitindo a transição de um eletrão de um meio ativo para um estado excitado. Este estímulo faz com que ocorra uma emissão de fótons quando o eletrão retorna ao seu estado inicial, ocorrendo a emissão de radiação laser (fótons) [7].

A classificação dos lasers geralmente baseia-se no estado ou nas propriedades físicas do meio ativo onde a produção do feixe laser acontece. Dependendo deste fatores, existem lasers de estado gasoso (laser de  $CO_2$ ), líquido, sólido (laser Nd:YAG) e semicondutor (laser de diodo) [7].

Na tabela 2.1 estão enunciados os lasers mais usados na tecnologia de *Laser Cladding*, assim como as suas principais características.

Tabela 2.1: Principais características do tipo de lasers mais usados na técnica *Laser Cladding*; adaptado de [8, 9].

Tipo de laser	Potência máxima de saída (kW)	Comprimento de onda ( $\mu\text{m}$ )	Eficiência energética (%)	Distribuição do feixe	Qualidade de feixe ( $\text{mm} \times \text{mrad}$ )
$CO_2$	20	10,6	5-10	Espelhos	3,7-12
Nd:YAG	6	1,06	1-12	Fibra	12-54
Díodo de alta potência	4	0,9	30-50	Fibra	20-200
Fibra	50	1,07	30	Fibra	0,33-10

Os lasers de  $CO_2$  foram os primeiros a serem usados nesta técnica, visto que apresentavam um *output* energético e eficiência relativamente elevada. Mais tarde, surgiu o laser de diodo, o laser Nd:YAG e o laser de fibra. Estes, comparando com o laser de  $CO_2$ , exibem um comprimento de onda cerca de dez vezes menor, o que implica uma maior absorvância por parte do substrato e, por consequência, um aumento da eficiência do processo [7]. A qualidade da radiação determina a eficiência do foco do

feixe e a profundidade de focagem. À medida que a qualidade de radiação aumenta, os requisitos do sistema ótico tornam-se menos exigentes [10]. Os lasers de diodo de alta potência e de fibra, para além de terem um baixo custo de manutenção, permitem aliar o baixo comprimento de onda com a elevada eficiência energética [3, 11].

A radiação emitida pelo laser proveniente do meio ativo é caracterizada por ser monocromática e coerente, apresentando comprimentos de onda compreendidos entre as radiações ultravioleta e infravermelhos. É guiada através de um cabo de fibra ótica que posteriormente atravessa espelhos refletores ou um sistema ótico de focagem de modo a focar o laser para que este atinja uma secção transversal do substrato (foco do feixe laser) com uma determinada intensidade. Esta focagem faz com que haja uma densidade energética ( $W/cm^2$ ) suficiente para fundir, tanto o substrato, como o material depositado e assim dar origem a uma ligação metalúrgica [7, 12].

A deposição de material pode ser realizada de três maneiras distintas: pré deposição de pó no substrato, deposição por fio e deposição por injeção de pós, sendo a injeção de pó a técnica de deposição mais utilizada, pelo facto de apresentar maior eficiência e maior versatilidade [2]. Apesar do processo de *Laser Cladding* por injeção de pós apresentar maiores custos associados em relação à deposição por fio, a sua escolha justifica-se pela obtenção de um produto com melhores propriedades. Estes atributos provêm da ausência de contacto direto com o banho de fusão e da inexistência de contaminações. Para além disso, existe uma maior versatilidade na escolha dos materiais depositados, na medida em que a composição dos mesmos poderá ser manipulada [3, 13].

O pó é depositado no substrato através do injetor que pode apresentar diferentes configurações: lateral, coaxial contínua e coaxial descontínua. O injetor lateral, como o próprio nome indica, é posicionado lateralmente em relação à fonte de energia. A sua posição é determinada tendo em conta o seu ângulo com o substrato ( $\alpha$  da figura 2.1 a)) e a distância deste à ponteira do injetor ( $l$  da figura 2.1 a)), sendo os valores típicos para esta distância de 8 a 15 mm. Devido à excelente acessibilidade, a injeção lateral pode ser usada para componentes com formas complexas e de difícil acesso. Ainda assim, o fluxo de pó está dependente da direção e a camada depositada é restrita a uma linha simples e unidirecional, não sendo indicada na fabricação de modelos tridimensionais [7, 14].

A injeção coaxial surgiu posteriormente à lateral e teve um grande impacto na tecnologia de *Laser Cladding* na medida em que confere mais eficiência de deposição do pó [3, 15]. Na coaxial contínua, o fluxo de pó afunila juntamente com o feixe de la-

ser. Este fluxo é guiado para uma câmara em forma de anel dentro do injetor, onde se forma uma “nuvem de pó” que abandona o injetor de forma homogênea - figura 2.1 b). A maior vantagem deste injetor é a potencialidade na fabricação de modelos tridimensionais [7, 16]. Na injeção coaxial descontínua de pó, há a presença de três fluxos contínuos de pó que convergem em apenas um foco com cerca de 1 a 3 mm de diâmetro - figura 2.1 c). Um fluxo de gás é formado em torno do feixe laser de forma a que o pó seja distribuído homogeneamente, sendo essa distribuição um fator importante na obtenção de uma boa ligação. A qualidade da ligação é afetada pelo ângulo de cada fluxo, formato e diâmetro da ponteira do injetor, que conferem diferentes fluxos e diferentes pontos de deposição de pó [3, 17]. Este tipo de injeção é também indicada para o fabrico de modelos tridimensionais e permite a deposição de camadas de maior dimensão devido à possibilidade da potência de laser ser superior (valores superiores a 2000 W), aumentando a produtividade [7, 17].

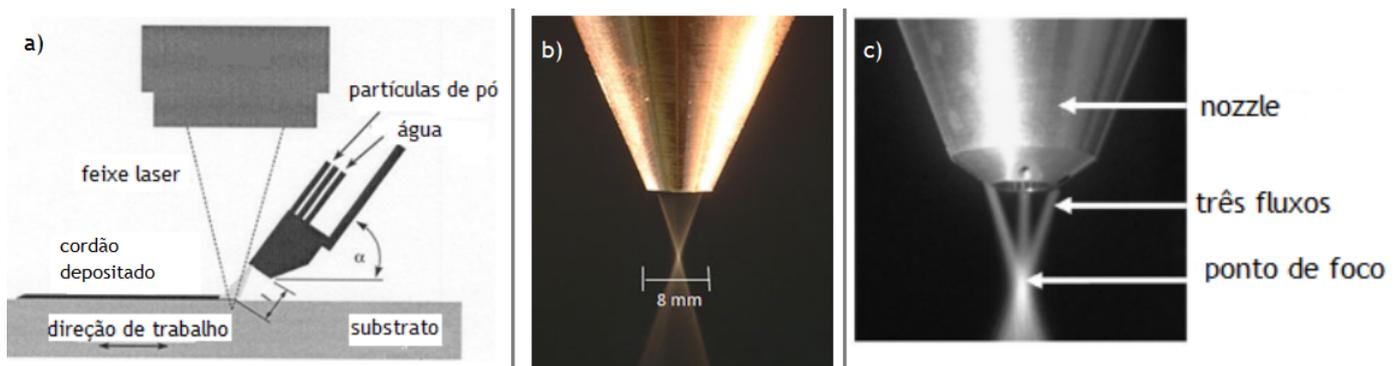


Figura 2.1: Diferentes configurações do injetor: a) injeção lateral; b) injeção coaxial contínua; c) injeção coaxial descontínua; adaptado de [7, 16]

Existem diferentes unidades de processamento e configurações possíveis no que concerne ao processo de *Laser Cladding*. Na figura 2.2 está representada a unidade de processamento da empresa, onde é possível visualizar o (2) robô com cabeça de processamento, que foca o raio laser sobre o componente, (3) a unidade linear que permite o aumento da área de trabalho do robô; (5) - o transportador de pó GTV PF 2/2, que consiste num sistema de armazenamento de partículas de pó que as liberta de uma forma controlada através do gás de transporte (árgon), gás esse que está armazenado no (6) armário de distribuição do gás de proteção. Por fim, a consola de operação (7) permite, para além de controlar a posição e orientação relativa da cabeça de processamento, a localização da deposição do revestimento e o foco do laser. A partir do mesmo estabelece-se a velocidade de *cladding*, potência de laser e taxa de deposição com a finalidade de delinear o cordão a depositar [3, 6, 18].

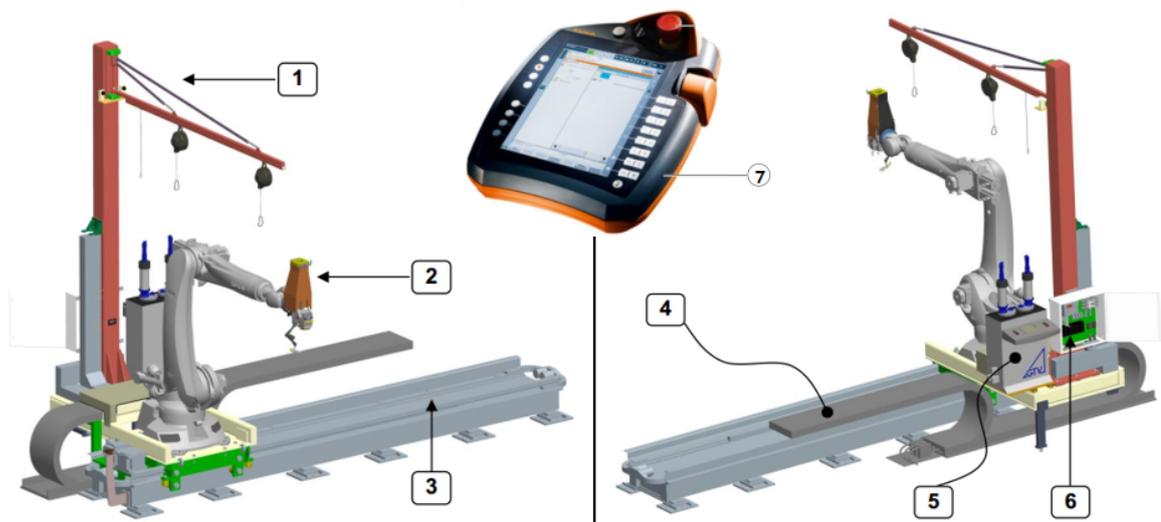


Figura 2.2: Unidade de processamento - (1) Guincho com viga e suporte de equilíbrio; (2) Robô com cabeça de processamento; (3) Unidade linear; (4) Alimentação de energia; (5) Alimentador de pós; (6) Armário distribuidor de substâncias; (7) - Consola de operação; adaptado de [18].

## 2.2 Característica de deposição

Na caracterização de uma deposição, há vários aspetos a ter em conta de modo a avaliar a sua qualidade. Entre eles incluem-se fatores geométricos, como altura do cordão ( $A$ ) e largura do mesmo ( $L$ ) (figura 2.3) [8, 19]. A ZTA é um fator crucial na avaliação do processo, sendo esta a área onde não ocorreu fusão, mas onde o calor induzido e os gradientes térmicos impostos, implicam a ocorrência de transformações de fase no estado sólido [5].

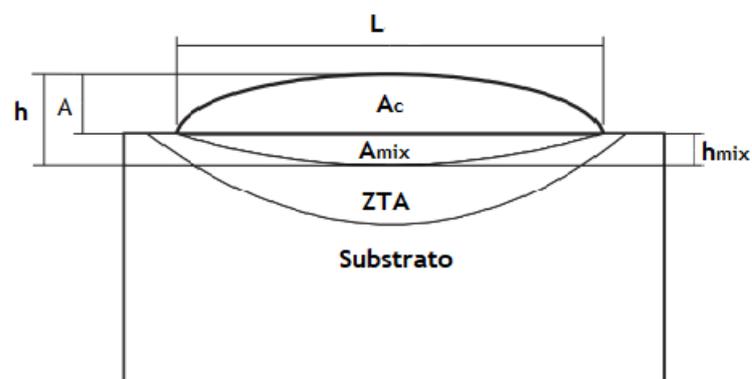


Figura 2.3: Secção de corte da camada depositada onde  $L$  - largura do cordão;  $A_c$  - Área do cordão;  $A_{mix}$  - Área do substrato fundido; ZTA - Zona termicamente afetada; adaptado de [5]

A partir destas características é possível calcular valores de diluição através da equação 2.1 onde ( $A_{mix}$ ) é a área da base fundida e ( $A_c$ ) a área total do cordão depositado:

$$D = \frac{A_{mix}}{(A_{mix} + A_c)} \times 100 \quad (2.1)$$

De modo a obter um cordão que seja dificilmente diluído pelo substrato, a extensão da zona de fusão terá de ser o mais reduzida possível (valor reduzido de D). No entanto, se este rácio for zero, há o risco de não ocorrer fusão e conseqüente ligação metalúrgica. No caso de D ser bastante elevado, o material a depositar pode fundir no substrato e as composições químicas de ambos são afetadas, deteriorando não só as características do cordão, como também as do material base. Valores aceitáveis para a taxa de diluição estão compreendidos entre 2 a 10 % [8]. Porém, existem autores que defendem que uma diluição entre 5 e 10 % já se mostra bastante satisfatória [15].

Na injeção de pós é possível a obtenção de três tipos de perfis do cordão depositado. Estes distinguem-se entre si através do ângulo formado entre o cordão depositado e o substrato ( $\beta$  da figura 2.4) o qual é um indicador da qualidade de deposição. Analisando a figura 2.4, o primeiro perfil (figura 2.4 a)) pode dever-se a uma baixa taxa de deposição de pó, onde apenas uma pequena parte do feixe laser é absorvido pelas partículas de pó, enquanto que a restante radiação incide no substrato, causando uma diluição superior. Ou seja, ângulos superiores (ângulos de molhabilidade mais baixos) são acompanhados de uma maior diluição [3, 5, 20]. O perfil da figura 2.4 b) apresenta o resultado desejado de uma deposição, onde é possível aliar uma baixa diluição com uma altura de cordão considerável. Não sendo consensual, recomenda-se um rácio de largura/altura ( $\frac{L}{A}$ ) do cordão entre 3 e 4 [20, 21]. Por último, o cordão da figura 2.4 c), pode ser causado por elevadas velocidades de *cladding* e potências insuficientes para fundir as partículas de pó [20].

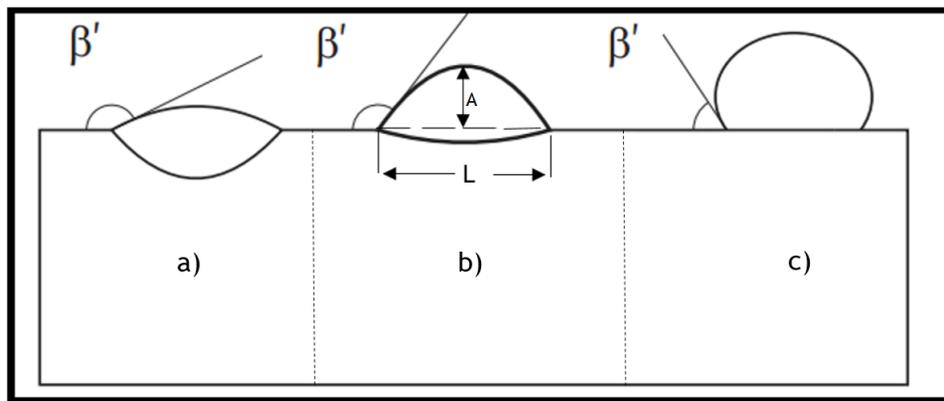


Figura 2.4: Esquema de diferentes perfis de cordão; adaptado de [5]

A junção de vários cordões dá origem a uma camada de material e para isso, os cordões individuais têm de ser sobrepostos - *overlap* (figura 2.5). Assim, um valor de *offset* tem de ser devidamente definido e depende essencialmente da largura do cordão [22]. A obtenção de uma camada mais baixa implica uma sobreposição menor, ou seja um valor de *offset* superior em relação ao *offset* de camadas de maior altura. Estes limites definem-se com base na composição do material depositado, bem como o seu comportamento térmico. Dependendo das suas propriedades, o aparecimento de defeitos como poros ou falta de união ao material base, poderão ocorrer para valores de *offset* baixos - figura 2.5 b) [5, 22].

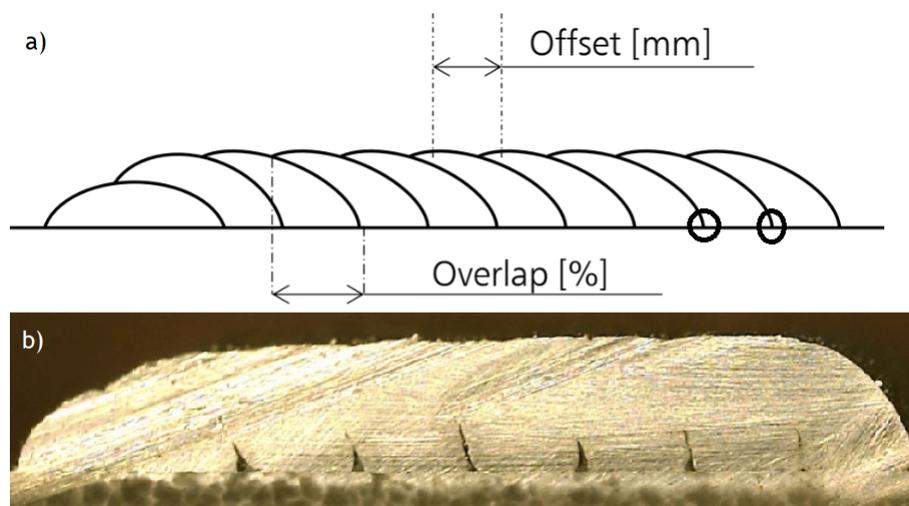


Figura 2.5: Esquema do *offset* e *overlap* e respetivo resultado em caso de sobreposição excessiva [22]

## 2.3 Parâmetros

Vários parâmetros e fenômenos físicos estão envolvidos no processo de *Laser Cladding* sendo essencial, mas no entanto complexo, determinar uma correlação entre eles para atingir a maior qualidade possível de ligação metalúrgica entre o material de adição e o substrato. Na tabela 2.2 encontram-se as principais variáveis do processo que afetam a qualidade da ligação metalúrgica [3].

Tabela 2.2: *Inputs, outputs* e parâmetros do processo envolvidos no *Laser Cladding*; adaptado de [3, 5]

Laser	Input				Processo Fenômenos físicos	Output Resultados de deposição
	Alimentação de pós	Propriedades do material base	Parâmetros de cladding	Condições externas		
.Potência de laser .Perfil do feixe .Comprimento de onda .Polarização .Forma e tamanho do ponto de foco	.Tipo de injetor .Parâmetros de alimentação .Ângulo de alimentação .Tamanho das partículas de pó .Forma das partículas .Composição dos pós .Propriedades termofísicas do pó	.Geometria, .Composição, .Propriedades metalúrgicas .Propriedades termofísicas .Propriedades termoquímicas	.Taxa de alimentação de pó .Gás de proteção .Rácio de overlap .Velocidade de <i>cladding</i> .Direção de <i>cladding</i>	.Pré aquecimento     .Tipo de gás de proteção	.Absorção .Condução .Difusão .Dinâmica da zona de fusão .Convecção .Interação gás/zona de fusão .Atenuação do laser através de partículas de pó .Rapidez da solidificação	.Geometria da linha depositada .Diluição .Microestrutura .Porosidade .Tensão residual .Rugosidade superficial .Dureza .Fissuras

O principal desafio reside na escolha acertada dos parâmetros que afetam em maior escala a diluição [23]. Entre os mencionados na tabela, os mais preponderantes são: a potência de laser, a velocidade de *cladding* e a taxa de deposição de pós [5].

A potência de laser define a quantidade de energia imposta e o seu efeito nas características da ligação são relativamente simples [9]: se os restantes parâmetros se mantiverem constantes, o aumento da potência implica uma maior diluição e um aumento da ZTA, isto porque para a mesma quantidade de material de adição, uma maior energia penetra o substrato. Se a energia for demasiado elevada, na zona fundida pode ocorrer um ligeiro desvio devido a um maior gradiente de temperaturas como pode ser constatado na figura 2.6 quando se comparam cordões depositados segundo a mesma velocidade e potências diferentes - 2000 e 4500 W [9, 24].

No espectro oposto, baixas potências de laser poderão implicar uma falta de fusão entre o substrato e o material de adição, o que resulta numa ligação metalúrgica incompleta [24, 25].

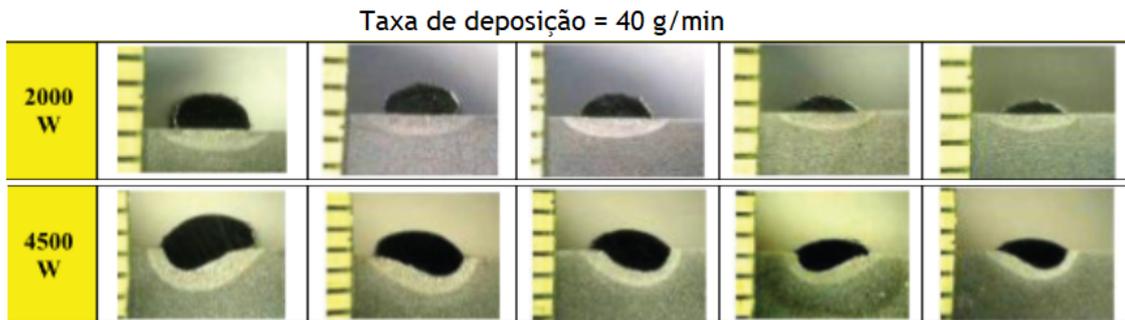


Figura 2.6: Esquema de cordões depositados a diferentes potências, com taxa de deposição constante e velocidades de *cladding* crescentes; adaptado de [24]

*Zhang et al.* [26] estabeleceram relações entre a potência de laser, a distância de focagem e a velocidade nas características da camada depositada com partículas de pó Colmonoy 6 num substrato de aço inoxidável austenítico - AISI 316L. Verifica-se o aumento da altura e do tamanho da camada depositada, pois para potências superiores, maior quantidade de material de adição é fundido, originando assim uma maior eficiência do processo [5, 27].

A taxa de deposição de pó (g/min) pode ser definida como a quantidade de material adicionado que está a ser fundido através do feixe laser por unidade de tempo. Esta taxa irá definir a energia mínima necessária para fundir as partículas de pó a depositar e desta forma define a potência mínima de laser, pois para taxas elevadas, a quantidade de energia do laser pode não ser suficiente para fundir todas as partículas [28].

*Leunda et al.* [27] realizaram a reparação de moldes de aço para trabalho a frio - *vanadis 4 extra tool* - através da deposição de partículas de pó de aço ferramenta CPM 10V. Na figura 2.7 encontram-se presentes as imagens das secção transversais deste estudo para as camadas depositadas, com uma potência de laser fixa de 1,2 KW, velocidades de *cladding* de 5 mm/s e taxas de deposição de 5 e 15 g/min. Aumentando a taxa de deposição, ocorre um aumento do tamanho do cordão depositado (diminuição do rácio  $\frac{L}{A}$ ) aliado à diminuição da zona de fusão, já que, maior fração de energia é absorvida pelas partículas de pó. Esta atenuação do laser faz com que a energia disponível para a fusão do substrato seja menor. No entanto, torna-se difícil para o material de adição depositar-se entre os contornos do cordão anteriormente depositado e o substrato, criando um entalhe por falta de união nesta zona (zonas assinaladas na figura 2.7 b)). Esta falta de união poderá constituir um problema quando submetida a esforços mecânicos, uma vez que é uma zona propícia à acumulação de tensões, funcionando como potencial iniciador de fissura [23, 27, 29].

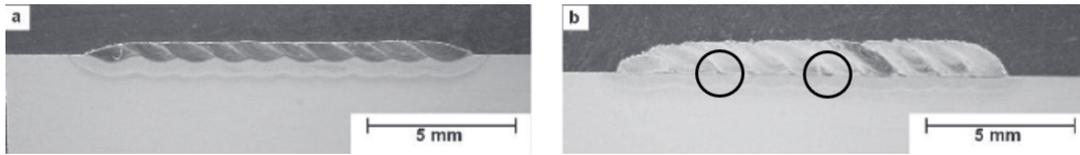


Figura 2.7: Imagens microscopia ótica de uma camada depositada de CPM 10V num substrato de Vanadis 4 para taxas de deposição de a) 5g/min; b) 15g/min; adaptado de [27]

A influência da taxa de deposição de pó foi também alvo de um estudo realizado por *Goodarzi et al.* [24] onde se pode constatar o aumento da altura de cordão e a diminuição da zona fundida do substrato - figura 2.8.

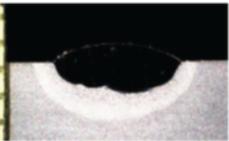
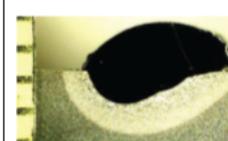
Powder feeding 20 g/min	Powder feeding 30 g/min	Powder feeding 40 g/min
		
Power : 4500 W	Power : 4500 W	Power : 4500 W
Cladding speed: 400 mm/min	Cladding speed: 400 mm/min	Cladding speed: 400 mm/min
Substrate melted area: 4.35 mm <sup>2</sup>	Substrate melted area: 3.17 mm <sup>2</sup>	Substrate melted area: 2.41 mm <sup>2</sup>

Figura 2.8: Corte transversal de cordões depositados com taxas de pó de 20, 30 e 40 g/min [24]

O tempo de interação é determinado pelo foco do feixe laser (forma e tamanho) e da velocidade de *cladding* o que tem implicações no aporte de energia no substrato. Por isso e pelo facto de definir também a quantidade de material depositado num determinado local, a velocidade é um fator multifacetado no que concerne à qualidade dos cordões depositados [5, 9].

A velocidade de *cladding* está, geralmente, compreendida entre 5 e os 25 mm/s. Por norma, um aumento da velocidade de *cladding*, implica uma redução do tempo de processamento e tem de estar acompanhado de um aumento da potência de laser e da taxa de alimentação de pó para que as características da camada depositada se mantenham [8, 30]. No entanto, o efeito da velocidade de *cladding* na diluição não é consensual. Há evidências que o aumento da velocidade tanto pode aumentar, como diminuir a taxa de diluição. Para uma potência de laser e taxa de deposição fixas, um aumento da velocidade de *cladding*, por norma, implica um menor aporte de energia no substrato resultando numa menor energia imposta por milímetro de substrato. Deste modo, o volume da zona fundida do substrato diminui, bem como a diluição [23, 24].

Por outro lado, a velocidades mais baixas, a zona fundida aumenta de tamanho e este aumento faz com que haja uma expansão na direção do *cladding*. Assim, a zona de fusão funciona como uma proteção contra a exposição direta do feixe laser no substrato diminuindo a diluição [5, 28]. Quando a velocidade aumenta, para além de ocorrer uma menor taxa de deposição de pós (diminuição da altura do cordão), a zona de fusão diminui de tamanho e é puxada para trás fazendo com que o feixe laser interaja diretamente com o substrato. Assim, e contraditoriamente à razão mencionada anteriormente, ocorre um aumento da diluição [5, 9, 26, 28].

*Chen et al.* [31] procederam à deposição de camadas de partículas de NiCrBSi num substrato de Ti6Al4V a diferentes velocidades de *cladding* onde foi possível uma ligação metalúrgica ausente de poros e fissuras para todas as condições testadas. Os cordões depositados revelaram-se uniformes e as suas larguras decresceram de 11 para 7 mm com o aumento da velocidade de 5 para 20 mm/s respetivamente. Velocidades superiores implicam uma menor interação entre o feixe laser e o material base. Por consequência este absorve menos quantidade de energia por milímetro e por unidade de tempo e a linha depositada sofre um estreitamento e a taxa de diluição diminui [31].

Para além dos parâmetros supracitados, outros fatores como a temperatura do material base (pré-aquecimento) e o tipo de pós e material base foram alvo de alteração neste estudo, tendo também influência sobre as características finais de deposição [8].

Durante o processo de *Laser Cladding* é inevitável o aparecimento de tensões residuais devido a gradientes térmicos gerados, desajustamento térmico entre diferentes materiais e transformação de fases nos materiais na zona fundida, que poderão levar à fragilização da ligação entre substrato e material base. Uma maneira de ultrapassar este obstáculo é recorrer ao pré aquecimento do substrato [1, 3, 5].

Num estudo realizado por *Jiang et al.* [32] estudou-se a influência da temperatura de pré aquecimento do substrato na deposição de partículas de pó à base de níquel e cobalto. É possível verificar-se na figura 2.9 que para a deposição de Ni60A e do pó à base de Cobalto num substrato de aço ferramenta AISI D3, a tensão residual da camada depositada, representado a cinzento, apresenta-se superior às restantes zonas. Observa-se também que na ZTA, a tensão é inferior ao do substrato. Isto deve-se ao facto da diferença de temperaturas entre o substrato e a camada depositada ser mais acentuada. Para além disso a diferença do coeficiente de expansão térmico entre o material depositado e o substrato, leva a uma maior tensão residual na camada depositada do que no substrato [32].

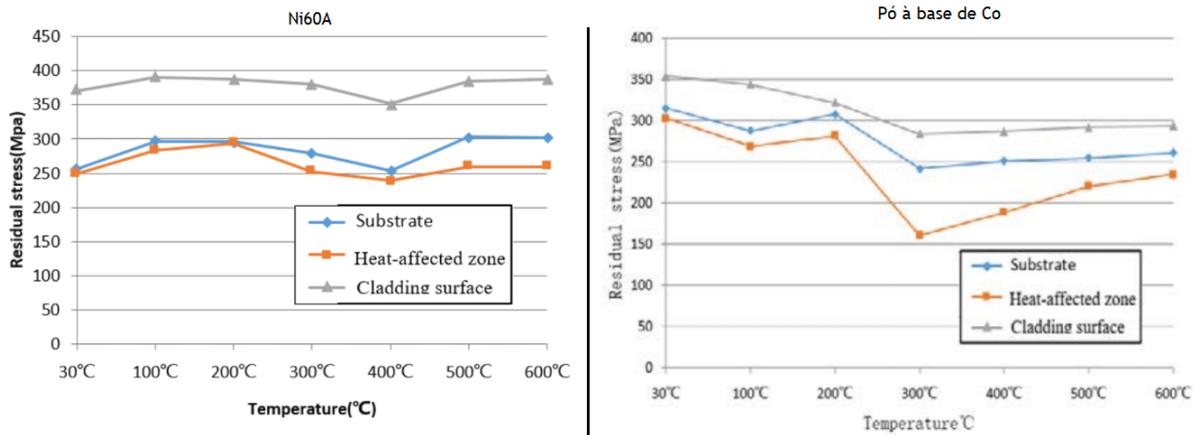


Figura 2.9: Valores de tensão residual no substrato, zona termicamente afetada e camada depositada para diferentes temperaturas de pré aquecimento do substrato [32]

O aumento da temperatura do substrato de 30 para 300/400 °C, condiciona o decréscimo da tensão residual nas três zonas. Este fenómeno deve-se ao aumento da temperatura do substrato implicar um abaixamento da diferença do coeficiente de expansão térmico. Quando o substrato atinge temperaturas superiores (500 e 600 °C), a tensão residual nas três zonas aumenta. As temperaturas excessivamente altas do substrato geram um campo térmico não uniforme que leva a uma deformação plástica parcial. Baseado nestes resultados quando o substrato atinge os 300 °C e os 400 °C para o Ni60A e pó à base de Co, respetivamente, o valor da tensão residual é o mínimo nas três zonas. Deste modo, é esta temperatura que apresenta menor influência nas propriedades de fadiga melhorando a performance do *Laser Cladding* [32].

## 2.4 Materiais

Neste estudo foram utilizados vários materiais, tanto de base como de adição:

- materiais base - Aço 34CrNiMo6, Aço 42CrMo4 e Ferro Fundido GJS-EN-500-7;
- materiais de adição - Metco 42C, Ferro 39, Inconel 625 e Inconel 718.

Neste ponto do estado da arte, serão mencionadas as principais características destes materiais de forma a compreender a sinergia entre eles, o processo e as suas aplicações finais.

O Aço 34CrNiMo6 é um aço ao cromo-níquel-molibdénio (aço ligado de construção) fornecido no estado temperado e revenido. Este é aplicado no eixo principal de um sistema gerador eólico que, para além de estar submetido ao esforço do peso das pás

e do nariz da turbina onde as pás encaixam (possíveis forças de flexão), é também submetido a forças de torção e fricção que poderá, em alguns casos, causar falhas no sistema eólico, o que acarreta consequências financeiras significativas [33].

A composição química e algumas das propriedades mecânicas deste aço encontram-se presentes nas tabelas 2.3 e 2.4, respetivamente.

Tabela 2.3: Composição química do Aço 34CrNiMo6 [34]

Elementos	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
%	0,34	<0,40	0,65	<0,035	<0,035	1,50	0,22	1,50

Tabela 2.4: Propriedades mecânicas do do Aço 34CrNiMo6 [34]

<b>Resistência à tração (MPa)</b>	820
<b>Tensão de cedência (MPa)</b>	610
<b>Alongamento (%)</b>	9
<b>Dureza (<math>HB_{30}</math>)</b>	240-405

O Aço 42CrMo4 é um aço ligado de construção geralmente utilizado no estado tratado (têmpera e revenido). A sua composição química está presente na tabela 2.5.

Tabela 2.5: Composição química do Aço 42CrMo4 [35]

Elementos	C	Si	Mn	Cr	Mo
%	0,42	0,4	0,75	1	0,2

Alia propriedades como resistência à fadiga, à abrasão, ao impacto e resistência à torção, sendo que por essas razões este material também tem aplicação no eixo de um sistema gerador eólico. As suas principais propriedades mecânicas encontram-se na tabela 2.6.

Tabela 2.6: Propriedades mecânicas do Aço 34CrNiMo6 [35]

<b>Resistência à tração (MPa)</b>	770
<b>Tensão de cedência (MPa)</b>	510
<b>Alongamento (%)</b>	10
<b>Dureza (<math>HB_{30}</math>)</b>	225-380

Finalmente, o Ferro Fundido consiste numa liga da classe EN GJS 500-7. Com uma densidade de  $7,2 \text{ kg/m}^3$ , esta tem aplicação nas carcaças das caixas multiplicadoras e no porta satélites de um sistema eólico. É constituída na sua estrutura por grafite do tipo I e maioritariamente grafite do tipo II (grafite nodular esferoidal), segundo a descrição da norma ASTM A247 [36]. A composição química desta classe de material encontra-se descrita na tabela 2.7.

Tabela 2.7: Composição química do Ferro Fundido GJS-500-7 [36]

Elementos	C	Si	Mn	P	S	Cu	Mg	Ni
%	3,25-3,7	2,4-3,0	0,10-0,30	0,0170	0,02	0,5	0,0360	0,0350

A sua matriz no núcleo é ferrítica e perlítica (10 a 50% de perlite). Esta estrutura confere boa resistência à tração e um bom limite superior elástico aliado a uma dureza satisfatória da peça. Algumas características deste material estão presentes na tabela 2.8 [36].

Tabela 2.8: Propriedades mecânicas do Ferro Fundido GJS 500-7 [37]

Resistência à tração (MPa)	500
Tensão de cedência (MPa)	320
Alongamento (%)	7
Dureza ( $HB_{30}$ )	170-230

Existe uma grande variedade de materiais de adição (misturas de pós metálicos) disponíveis no mercado. A sua seleção, para além de depender de parâmetros do processo, depende ainda da constituição do material base e acima de tudo da aplicação do componente final [13]. Existem três tipos principais de ligante para material de adição: cobalto, níquel e ferro. Os pós são habitualmente produzidos através da atomização com gás, permitindo pós com fator de forma esférico e granulometrias finas [5]. Os materiais de adição usados neste estudo são misturas de pós metálicos comerciais para *Laser Cladding*: Metco 42, PLASweld™ Ferro 39, MetcoClad 625 e MetcoClad 718.

O pó Metco 42C comercializado pela empresa *Oerlikon*, é de aço inoxidável martensítico com tamanhos entre 45 e 106  $\mu\text{m}$  e morfologia irregular das suas partículas. Possui alto teor em cromo, semelhante ao aço inoxidável AISI 431 e tem a capacidade de produzir revestimentos que combinam resistência ao desgaste e ao impacto com uma boa resistência à corrosão, superior a dos aços inoxidáveis martensíticos [38]. Com preço de 9,78 €/kg, a sua composição química está presente na tabela 2.9.

Tabela 2.9: Composição química do Metco 42C [38]

Elementos	Fe	Cr	Ni	C
%	80,82	17	2	0,18

Outro pó utilizado é o PLASweld™ Ferro 39 que consiste num pó de partículas esféricas com tamanhos compreendidos entre 50 e 150  $\mu\text{m}$ . Este combina uma excelente resistência à fadiga e boa resistência mecânica. Aplicado em ferramentas e componentes estruturais sujeitos a impacto, compressão e abrasão a elevadas temperaturas, as durezas que este material possui estão na ordem dos 38-42HRC. As adições de cromo e

molibdênio permitem que este estabilize a temperaturas até 500 °C [39]. Por fim o seu preço é superior (17,5 €/kg) ao do Metco 42C e a sua composição química está presente na tabela 2.10.

Tabela 2.10: Composição química do Ferro 39 [39]

Elementos	Fe	Cr	Mo	Si	Mn	C
%	88,76	6,5	3,5	0,3	0,8	0,14

O material de adição Inconel 625 é comercializado pela empresa *Oerlikon*, possuindo um nome comercial de MetcoClad 625. Este consiste num pó de partículas esféricas e de tamanhos compreendidos entre 45 e 90  $\mu\text{m}$  e a sua composição é semelhante à das superligas à base de níquel. Este possui um preço de 19,98 €/kg e é especificamente projetado para aplicações de revestimento a laser. A formação de boretos, como SiB3 ou SiB6, e carbonetos de silício na camada depositada a altas temperaturas conferem resistência à corrosão e ao desgaste até 1000 °C [5, 22, 40]. A sua composição química encontra-se na tabela 2.11

Tabela 2.11: Composição química do Inconel 625 [40]

Elementos	Ni	Cr	Mo	Fe	C	B	Outros
%	58-63	20-23	8-10	≤5	-	3	<2

Tal como o Inconel 625, o Inconel 718 consiste num pó com composição semelhante à das superligas à base de níquel e é também comercializado pela empresa *Oerlikon* de nome comercial MetcoClad 718. Este, apesar de ter o mesmo intervalo de granulometria do Inconel 625, apresenta uma quantidade superior de partículas de menor tamanho. É recomendado para aplicações a altas temperaturas (até 700 °C), ambientes corrosivos e oxidantes. Comparado com o Inconel 625, o seu preço é superior (26,25 €/kg) e é utilizado quando são requeridas solicitações mecânicas mais elevadas, visto possuir dureza e resistência mecânica superiores [40]. A sua composição química encontra-se na tabela 2.12

Tabela 2.12: Composição química do Inconel 718 [40]

Elementos	Ni	Cr	Mo	Nb	Fe	Ti	Si	Mn	C	Outros
%	53,6	19	3	5	18	1	0,2	0,08	0,05	<0,5

Dos parâmetros respeitantes à técnica de *Laser Cladding*, muitos mais estão envolvidos no processo, como citado na tabela 2.2, tornando assim o processo de extrema complexidade, de difícil controlo e de otimização. Para além dos parâmetros do processo, existem condicionantes relativas ao equipamento que aumentam a complexidade do processo.

## Capítulo 3

# Procedimento Experimental

Na figura 3.1 está presente o fluxograma do procedimento adotado neste estudo. A primeira fase do procedimento passou pela deposição de cordões individuais de diferentes materiais de adição em diferentes materiais base variando a potência de laser, a taxa de deposição e a velocidade de *cladding*. De modo a otimizar os parâmetros testados realizou-se, para cada cordão, a caracterização através da lupa e MO e respectiva avaliação dos fatores geométricos. Os cordões com as melhores condições de deposição, foram avaliados mecanicamente através de perfis de dureza HV0.3. Por fim, para cada conjunto (MB, MA), utilizando parâmetros otimizados, realizou-se a deposição de camadas, sempre com a mesma estratégia de deposição, de forma a avaliar o uso desta tecnologia na recuperação de componentes.

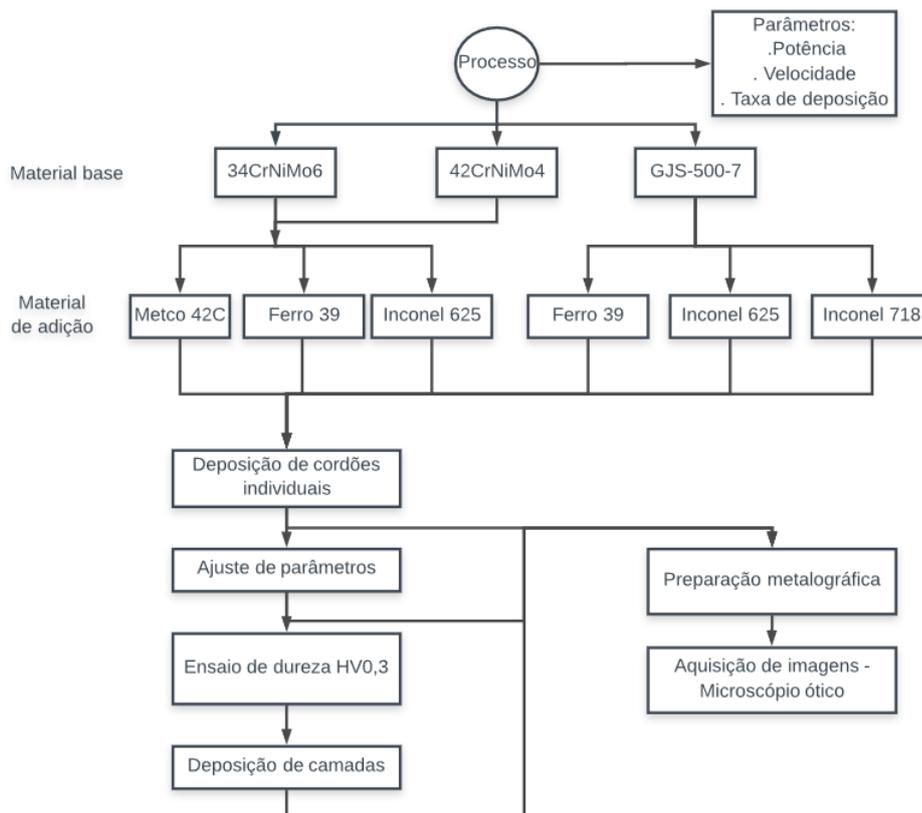


Figura 3.1: Fluxograma esquemático do procedimento experimental adotado

Em todas as deposições os materiais base foram cortados a partir de cilindros com

uma espessura entre 15 a 20 mm. Posteriormente, retificou-se e limpou-se a superfície com um disco preto e isopropanol de modo a eliminar contaminações na superfície dos materiais base. O pré-aquecimento realizado em alguns materiais base foi feito com recurso do maçarico e pirómetro para medição da temperatura. Dependendo do diâmetro das amostras, depositou-se um número de cordões com espaçamento entre eles de, pelo menos, 2 cm como representado na figura 3.2 a). Já na deposição de camadas, estas foram depositadas conforme o esquema representado na figura 3.2 b) em que o passo estabelecido entre cordões é de 1,8 mm.

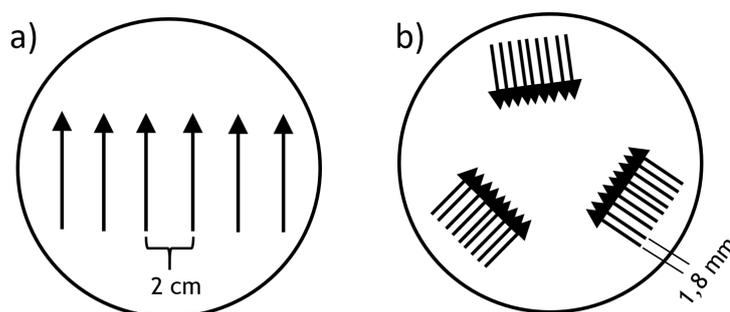


Figura 3.2: Esquema de deposição de a) cordões individuais e b) de vários cordões de modo a formar uma ou duas camadas

### 3.1 Sistema de *Laser Cladding*

O sistema de *Laser Cladding* utilizado neste estudo é constituído por: laser, cabeça de processamento, robô e injetor. O laser é um laser de diódo (onda contínua), modelo Laserline LDF 6000-100, cujas características se encontram na tabela 3.1. O laser encontra-se conectado a um robô de seis eixos: KUKA KR 90 R3100 ultra. Usou-se um injetor coaxial ERLASER® HARD+CLAD, que distancia 12 mm do material base. Este encontra-se na figura A.1 do anexo A. Por fim, o gás de proteção, bem como o gás de transporte usado, foi o Árgon a uma taxa de 14 e 6 l/min respetivamente.

Tabela 3.1: Características do laser do sistema *Laser Cladding*

Componente	Características
Laser	Potência máxima = 3000 W Potência máxima na amostra = 4000 W $\lambda = 900 - 1030 \text{ nm}$ Qualidade de feixe laser = 100 mm.mrad $\varnothing$ feixe na amostra = 3,5 mm $\varnothing$ fibra ótica condutora do feixe = 1 mm

## 3.2 Parâmetros variados no processo

Neste estudo, diferentes materiais de adição foram depositados em diferentes materiais base variando a potência de laser, a velocidade de *cladding* e a taxa de deposição. De forma a facilitar a “classificação dos ensaios” realizados, estabeleceu-se uma nomenclatura onde: a primeira letra representa o material base e o número consequente representa o material de adição de acordo com a tabela 3.2.

Tabela 3.2: Nomenclatura utilizada para enumerar as várias deposições

Letra				1º algarismo			
A	B	C	D	1	2	3	4
34CrNiMo6	42CrMo4	GJS-500-7	Aço ferramenta	Metco 42C	Ferro 39	Inconel 625	Inconel718

O segundo algarismo é referente ao número do ensaio e o último algarismo refere o número de cordões depositados, sendo que o número 10 representa a deposição de uma camada e o número 20 indica a deposição de duas camadas.

O ponto de partida para a definição dos parâmetros (potência, velocidade e taxa de deposição) baseou-se em experiências preliminares realizadas na empresa (ver Anexo B) em aço ferramenta (D).

### 3.2.1 34CrNiMo6

No Aço 34CrNiMo6 foram depositados três tipos de materiais de adição, dando origem aos seguintes conjuntos de materiais: (34CrNiMo6, Metco 42C), (34CrNiMo6, Ferro 39) e (34CrNiMo6, Inconel 625).

#### 3.2.1.1 Conjunto ( $M_B, M_A$ ): (34CrNiMo6, Metco 42C)

Realizou-se um desenho de experiências (*Design of experiments*) nas primeiras deposições sobre o Aço 34CrNiMo6 através do software Minitab.

Com três parâmetros e dois níveis (um mínimo e um máximo), resultaram oito combinações possíveis:

- Potência: 1200, 1400 W;
- Velocidade: 10; 12,5 mm/s;
- Taxa de deposição 9,7; 11,7 g/min.

Na tabela 3.3 estão enumerados os ensaios realizados para este conjunto (34Cr-NiMo6, Metco 42C).

Tabela 3.3: Parâmetros usados na deposição de Metco 42C no Aço 34CrNiMo6

Cordão	Potência (W)	Velocidade (mm/s)	Taxa de deposição (g/min)	Pré aquecimento
A1.1.1	1200	10	9,7	150-200
A1.2.1	1200	12,5	11,7	150-200
A1.3.1	1400	10	9,7	150-200
A1.4.1	1400	12,5	11,7	150-200
A1.5.1	1200	10	11,7	150-200
A1.6.1	1200	12,5	9,7	150-200
A1.7.1	1400	10	11,7	150-200
A1.8.1	1400	12,5	9,7	150-200

De forma a avaliar e comparar as deposições realizadas, efetuaram-se outros quatro ensaios com valores já usados pela empresa na reparação de componentes (tabela 3.4).

Tabela 3.4: Parâmetros usados na deposição de Metco 42 C no Aço 34CrNiMo6

Cordão	Potência (W)	Velocidade (mm/s)	Taxa de deposição (g/min)	Pré aquecimento
A1.9.1	1300	7	15,5	150-200
A1.10.1	1500	12,5	19,4	150-200
A1.11.1	1700	7	19,4	150-200
A1.12.1	1100	7	11,7	150-200

### 3.2.1.2 Conjunto ( $M_B$ , $M_A$ ): (34CrNiMo6, Ferro 39)

Este conjunto de materiais segue as mesmas diretrizes que as deposições do conjunto de materiais anterior (tabelas 3.5 e 3.6).

Tabela 3.5: Parâmetros usados na deposição de Ferro 39 no Aço 34CrNiMo6

Cordão	Potência (W)	Velocidade (mm/s)	Taxa de deposição (g/min)	Pré aquecimento
A2.1.1	1200	10	9,7	150-200
A2.2.1	1200	12,5	11,7	150-200
A2.3.1	1400	10	9,7	150-200
A2.4.1	1400	12,5	11,7	150-200
A2.5.1	1200	10	11,7	150-200
A2.6.1	1200	12,5	9,7	150-200
A2.7.1	1400	10	11,7	150-200
A2.8.1	1400	12,5	9,7	150-200

Tabela 3.6: Parâmetros usados na deposição de Ferro 39 no Aço 34CrNiMo6

Cordão	Potência (W)	Velocidade (mm/s)	Taxa de deposição (g/min)	Pré aquecimento
A2.9.1	1300	7	15,5	150-200
A2.10.1	1500	12,5	19,4	150-200
A2.11.1	1700	7	19,4	150-200
A2.12.1	1100	7	11,7	150-200

### 3.2.1.3 Conjunto ( $M_B$ , $M_A$ ): (34CrNiMo6, Inconel 625)

Realizaram-se novamente deposições segundo os mesmos parâmetros do conjunto de materiais anteriores (tabelas 3.7 e 3.8).

Tabela 3.7: Parâmetros usados na deposição de Inconel 625 no Aço 34CrNiMo6

Cordão	Potência (W)	Velocidade (mm/s)	Taxa de deposição (g/min)	Pré aquecimento
A3.1.1	1200	10	9,7	150-200
A3.2.1	1200	12,5	11,7	150-200
A3.3.1	1400	10	9,7	150-200
A3.4.1	1400	12,5	11,7	150-200
A3.5.1	1200	10	11,7	150-200
A3.6.1	1200	12,5	9,7	150-200
A3.7.1	1400	10	11,7	150-200
A3.8.1	1400	12,5	9,7	150-200

Tabela 3.8: Parâmetros usados na deposição de Inconel 625 no Aço 34CrNiMo6

Cordão	Potência (W)	Velocidade (mm/s)	Taxa de deposição (g/min)	Pré aquecimento
A3.9.1	1300	7	15,5	150-200
A3.10.1	1500	12,5	19,4	150-200
A3.11.1	1700	7	19,4	150-200
A3.12.1	1100	7	11,7	150-200

Posteriormente, procedeu-se a deposições com potências inferiores. Assim, testaram-se três potências, duas velocidades e quatro taxas de deposição, o que resultou num total vinte e quatro experiências. A tabela 3.9 apresenta as condições das deposições.

Tabela 3.9: Parâmetros usados na deposição de Inconel 625 no Aço 34CrNiMo6

Cordão	Potência (W)	Velocidade (mm/s)	Taxa de deposição (g/min)	Pré aquecimento
A3.13.1	1000	7	17,55	-
A3.14.1	1000	7	19,5	-
A3.15.1	1000	7	21,45	-
A3.16.1	1000	7	23,4	-
A3.17.1	1000	8	17,55	-
A3.18.1	1000	8	19,5	-
A3.19.1	1000	8	21,45	-
A3.20.1	1000	8	23,4	-
A3.21.1	1050	7	17,55	-
A3.22.1	1050	7	19,5	-
A3.23.1	1050	7	21,45	-
A3.24.1	1050	7	23,4	-
A3.25.1	1050	8	17,55	-
A3.26.1	1050	8	19,5	-
A3.27.1	1050	8	21,45	-
A3.28.1	1050	8	23,4	-
A3.29.1	1100	7	17,55	-
A3.30.1	1100	7	19,5	-
A3.31.1	1100	7	21,45	-
A3.32.1	1100	7	23,4	-
A3.33.1	1100	8	17,55	-
A3.34.1	1100	8	19,5	-
A3.35.1	1100	8	21,45	-
A3.36.1	1100	8	23,4	-

Escolheram-se os cordões com melhores características (cordão A3.32.1 e A3.36.1) para efetuar a deposição multicamadas. Para isso, depositaram-se um, dois, três, dez cordões (uma camada) e vinte cordões (duas camadas). A deposição de um cordão é feita com o intuito de testar a reprodutibilidade do processo, enquanto que a deposição de dois e três cordões apenas serve como intermediário para a deposição de dez linhas, pois a deposição de dez cordões implica um aporte de energia superior à deposição de apenas um cordão. As condições encontram-se nas tabelas 3.10 e 3.11.

Tabela 3.10: Parâmetros usados na deposição de um, dois, três cordões e multicamadas de Inconel 625 no Aço 34CrNiMo6

Cordão	Potência (W)	Velocidade (mm/s)	Taxa de deposição (g/min)	NºCordões
A3.37.1	1100	7	23,4	1
A3.38.2	1100	7	23,4	2
A3.39.3	1100	7	23,4	3
A3.40.10	1100	7	23,4	10
A3.41.20	1100	7	23,4	10;10

Tabela 3.11: Parâmetros usados na deposição de um, dois, três cordões e multicamadas de Inconel 625 no Aço 34CrNiMo6

Cordão	Potência (W)	Velocidade (mm/s)	Taxa de deposição (g/min)	NºCordões
A3.42.1	1100	8	23,4	1
A3.43.2	1100	8	23,4	2
A3.44.3	1100	8	23,4	3
A3.45.10	1100	8	23,4	10
A3.46.20	1100	8	23,4	10;10

Realizaram-se, posteriormente, deposições segundo os parâmetros das multicamadas A3.46.20, com o objetivo de perceber os efeitos do recurso a pré-aquecimento (tabela 3.12).

Tabela 3.12: Cordão A3.46.1 com pré aquecimento

Cordão	Potência (W)	Velocidade (mm/s)	Taxa de deposição (g/min)	Nºcordões	Pré aquecimento
A3.47.20	1100	8	23,4	10;10	200

Finalmente, realizaram-se deposições de multicamadas com recurso a potências superiores com o objetivo de aumentar a eficiência da deposição. Estes testes foram realizados com e sem pré-aquecimento de acordo com os parâmetros apresentados na tabela 3.13.

Tabela 3.13: Parâmetros usados na deposição de multicamadas de Inconel 625 no Aço 34CrNiMo6 a diferentes potências

Cordão	Potência (W)	Velocidade (mm/s)	Taxa de deposição (g/min)	Nºcordões	Pré aquecimento
A3.48.20	1200	8	23,4	10;10	-
A3.49.20	1200	8	23,4	10;10	200
A3.50.20	1300	8	23,4	10;10	-
A3.51.20	1300	8	23,4	10;10	200

Devido à discrepância de resultados dos conjuntos de materiais (34CrNiMo6, Metco 42C), (34CrNiMo6, Ferro 39) e (34CrNiMo6, Inconel 625), quando comparado com os testes realizados anteriormente no aço ferramenta, realizaram-se deposições no mesmo aço de modo a testar a reprodutibilidade do processo. Os cordões foram depositados segundo os parâmetros presentes na tabela C.1 do anexo C.

### 3.2.2 42CrMo4

No Aço 42CrMo4 depositaram-se três tipos de materiais de adição: Metco 42C, Ferro 39 e Inconel 625. Desse modo, neste ponto serão apresentadas as condições de deposição para os conjuntos ( $M_B$ ,  $M_A$ ): (42CrMo4, Metco42), (42CrMo4, Ferro 39) e (42CrMo4, Inconel 625). Os testes realizados têm como objetivo perceber de que forma é que a velocidade tem influência nas características da deposição, sendo que foram usadas

duas potências, duas velocidades e quatro taxas de deposição. As condições testadas estão presentes na tabela 3.14.

Tabela 3.14: Parâmetros usados na deposição de Metco 42C, Ferro 39 e Inconel 625 no Aço 42CrMo4

Cordão	Potência (W)	Velocidade (mm/s)	Taxa de deposição (g/min)	Pré aquecimento
B1.1.1	1350	7	11,7	250
B1.2.1	1350	7	15,5	250
B1.3.1	1800	7	17,55	250
B1.4.1	1800	7	21,45	250
B1.5.1	1350	12	11,7	250
B1.6.1	1350	12	15,5	250
B1.7.1	1800	12	17,55	250
B1.8.1	1800	12	21,45	250

### 3.2.3 GJS-500

Por fim, no Ferro Fundido, foram depositados três tipos de materiais de adição, dando origem aos seguintes conjuntos de materiais: (GJS-500, Ferro 39), (GJS-500, Inconel 625) e (GJS-500, Inconel 718).

#### 3.2.3.1 Conjunto ( $M_B$ , $M_A$ ): (GJS-500, Ferro 39)

Os testes realizados no conjunto (GJS-500, Ferro 39) estão presentes na tabela 3.15 e não foram submetidos a pré-aquecimento.

Tabela 3.15: Parâmetros usados na deposição de Ferro 39 em Ferro Fundido GJS-500

Cordão	Potência (W)	Velocidade (mm/s)	Taxa de deposição (g/min)
C2.1.1	1000	7	11,70
C2.2.1	1000	7	15,50
C2.3.1	1000	7	17,55
C2.4.1	1000	7	21,45
C2.5.1	1550	12	11,70
C2.6.1	1550	12	15,50
C2.7.1	1550	12	17,55
C2.8.1	1550	12	21,45

Tendo em conta que o melhor resultado foi do cordão C2.4.1, devido à altura de cordão considerável e diluição relativamente baixa, realizaram-se deposições de multicamadas seguindo os parâmetros do mesmo (tabela 3.16).

Tabela 3.16: Parâmetros usados na deposição de multicamadas de Ferro 39 em Ferro Fundido GJS-500

Cordão	Potência (W)	Velocidade (mm/s)	Taxa de deposição (g/min)	Nºcordões	Pré aquecimento
C2.9.10	1000	7	21,45	10	-
C2.10.20	1000	7	21,45	10/10 (2 camadas)	-

### 3.2.3.2 Conjunto ( $M_B$ , $M_A$ ): (GJS-500, Inconel 625)

O procedimento para este conjunto de materiais seguiu as mesmas diretrizes do conjunto anterior (tabela 3.17).

Tabela 3.17: Parâmetros usados na deposição de Inconel 625 em Ferro Fundido GJS-500

Cordão	Potência (W)	Velocidade (mm/s)	Taxa de deposição (g/min)
C3.1.1	1000	7	11,70
C3.2.1	1000	7	15,50
C3.3.1	1000	7	17,55
C3.4.1	1000	7	21,45
C3.5.1	1550	12	11,70
C3.6.1	1550	12	15,50
C3.7.1	1550	12	17,55
C3.8.1	1550	12	21,45

Assim, o cordão selecionado para as deposições de multicamadas rege-se também pelos mesmos parâmetros que o conjunto de materiais anterior (tabela 3.18).

Tabela 3.18: Parâmetros usados na deposição de multicamadas de Inconel 625 em Ferro Fundido GJS-500

Cordão	Potência (W)	Velocidade (mm/s)	Taxa de deposição (g/min)	Nºcordões	Pré aquecimento
C3.9.10	1000	7	21,45	10	-
C3.10.20	1000	7	21,45	10/10 (2 camadas)	-

### 3.2.3.3 Conjunto ( $M_B$ , $M_A$ ): (GJS-500, Inconel 718)

Finalmente a deposição do Inconel 718 foi feita segundo as deposições feitas inicialmente para os restantes materiais de adição no Ferro Fundido (tabela 3.19)

Tabela 3.19: Parâmetros usados na deposição de Inconel 718 em Ferro Fundido GJS-500

Cordão	Potência (W)	Velocidade (mm/s)	Taxa de deposição (g/min)
C4.1.1	1000	7	11,70
C4.2.1	1000	7	15,50
C4.3.1	1000	7	17,55
C4.4.1	1000	7	21,45
C4.5.1	1550	12	11,70
C4.6.1	1550	12	15,50
C4.7.1	1550	12	17,55
C4.8.1	1550	12	21,45

## 3.2.4 Caracterização das deposições

Todos as deposições foram analisadas em secção transversal por lupa e MO. Para isso foi necessário uma preparação metalográfica. Esta preparação consistiu no corte,

montagem, polimento e ataque das amostras. Estas foram cortadas através de serra-fita ou de disco de corte no sentido transversal e longitudinal dos cordões depositados e de seguida foram montadas a frio em resina epóxi. No polimento, a etapa de desbaste foi realizada com lixas de SiC na sequência de 200, 400, 600 e 1000 mesh a 300 rpm usando água como lubrificante. Posteriormente, após limpeza em ultra sons, a etapa de acabamento foi realizada com panos e suspensões de diamante com granulometrias de 6 e 1  $\mu\text{m}$  a 150 rpm. Após polimento, todas as amostras foram atacadas com Nital 4%. Estas foram analisadas por lupa com o auxílio de câmara Leica Microsystems e por MO. Através desta análise com recurso ao software LasLeica, foram medidos e calculados os principais fatores dos cordões e camadas depositadas: altura e largura do cordão, área da zona fundida e área da ZTA.

O cordão com melhores características de cada conjunto de materiais (MB, MA) foi sujeito à realização de perfis de dureza HV0.3 utilizando o equipamento Streurs Duramin de acordo com a norma ISO 6507-1 [41].

# Capítulo 4

## Resultados e Discussão

Este capítulo apresenta os resultados das deposições realizadas com diferentes materiais de adição em diferentes materiais base, variando parâmetros do processo (potência laser, velocidade e taxa de deposição).

### 4.1 34CrNiMo6

Neste ponto serão apresentados os resultados das deposições dos conjuntos ( $M_B$ ,  $M_A$ ): (34CrNiMo6, Metco 42C), (34CrNiMo6, Ferro 39) e (34CrNiMo6, Inconel 625).

#### 4.1.1 Conjunto ( $M_B$ , $M_A$ ): (34CrNiMo6, Metco 42C)

Na figura 4.1 estão presentes as imagens de MO das secções transversais para cada cordão depositado no conjunto (34CrNiMo6, Metco 42) com os valores da ZTA, diluição e o rácio  $\frac{L}{A}$ .

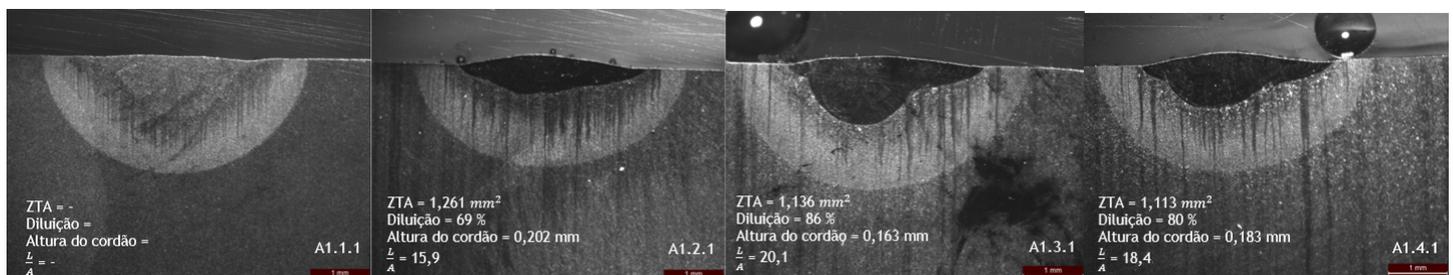


Figura 4.1: Imagens de MO de corte transversal dos cordões de Metco 42C depositados no Aço 34CrNiMo6 de acordo com as condições de deposição

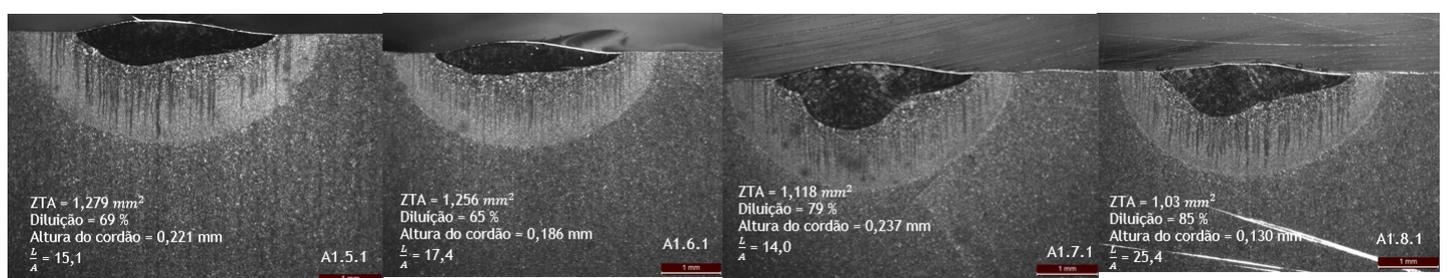


Figura 4.2: Imagens de MO de corte transversal dos cordões de Metco 42C depositados no Aço 34CrNiMo6 de acordo com as condições de deposição

Através da análise das figuras 4.1 e 4.2 é possível aferir, para todas as condições de deposição testadas para este par de materiais, a obtenção de relações  $\frac{L}{A}$  e taxas de diluição elevadas. A ausência do valor de  $\frac{L}{A}$  para o cordão A1.1.1 deve-se ao facto deste não apresentar altura, comprovado pela observação da imagem em MO deste cordão presente na figura 4.1. Verifica-se, também, que para maiores potências e velocidade com taxas de deposição constantes, a taxa de diluição aumenta. No caso dos cordões A1.2.1 e A1.4.1, A1.6.1 e A1.8.1 o aumento da potência dá origem a cordões com elevada razão  $\frac{L}{A}$  (menor altura) sugerindo que a quantidade de pó depositada poderá ser insuficiente. Embora os materiais não fossem os mesmos, num estudo feito por *Gusev et al.* [42] onde se depositou Eutroloy 16233 em ferro fundido cinzento, verificou-se uma diminuição na altura dos cordões quando a potência de laser foi aumentada de 2100 para 2800 W, especialmente a baixas velocidades (9 e 12 mm/s). Este facto poderá ser explicado pelo excesso de calor imposto originando uma zona de fusão de maior temperatura e dimensões fazendo com que o material de adição seja adicionado à zona de fusão, não formando o cordão. Já o aumento da taxa de deposição, de uma maneira geral, permite o aumento da altura de cordão bem como a diminuição da ZTA e da taxa de diluição. No entanto, esta diferença de valores não se apresenta significativa visto que o aumento da taxa é igualmente reduzido.

Os resultados das deposições realizadas com os parâmetros que eram utilizados anteriormente na reparação de componentes, encontram-se na figura 4.3.

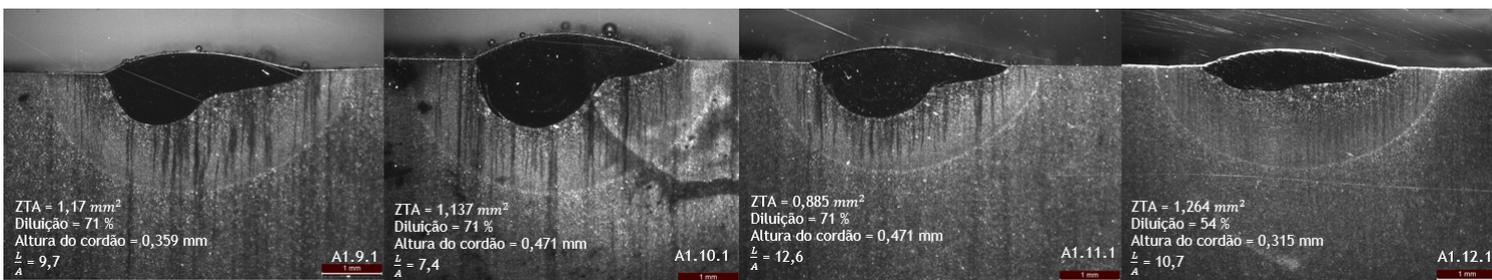


Figura 4.3: Imagens de MO de corte transversal dos cordões de Metco 42C depositados no Aço 34CrNiMo6 de acordo com as condições de deposição

Através da análise da figura, a obtenção de taxas de diluição e rácio  $\frac{L}{A}$  acima do que é aceitável para este processo, é evidente. No entanto, o cordão A.12.1 revela ser um ponto de partida, pois de entre todos os valores de taxa de diluição, é ele que o apresenta mais baixo (54%). De realçar que o cordão A1.10.1 é o que apresenta uma maior altura, sendo que o aumento das taxas de deposição para 19,4 g/min poderá ser uma das estratégias a ter em consideração.

### 4.1.2 Conjunto ( $M_B$ , $M_A$ ): (34CrNiMo6, Ferro 39)

Nas figuras 4.4 e 4.5 estão presentes as imagens MO das secções transversais dos cordões depositados para o conjunto (34CrNiMo6, Ferro 39) e os respetivos valores: área da ZTA, diluição, altura do cordão e respetivo rácio  $\frac{L}{A}$ .

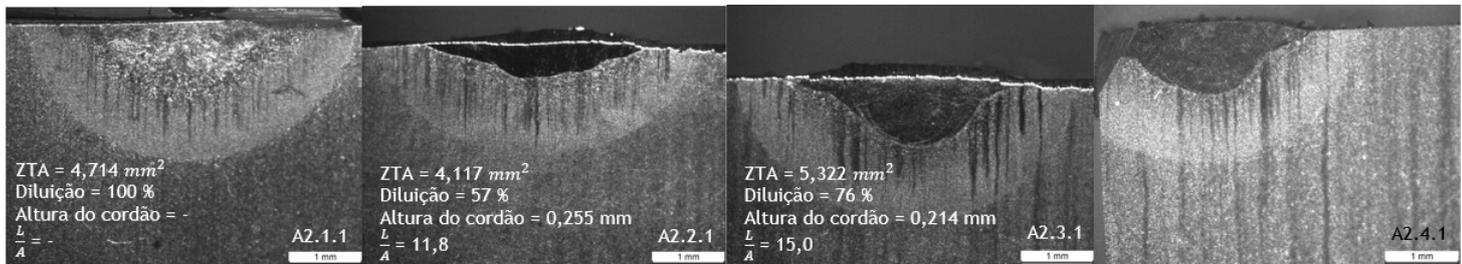


Figura 4.4: Imagens de MO de corte transversal dos cordões de Ferro 39 depositados no Aço 34CrNiMo6 de acordo com as condições de deposição

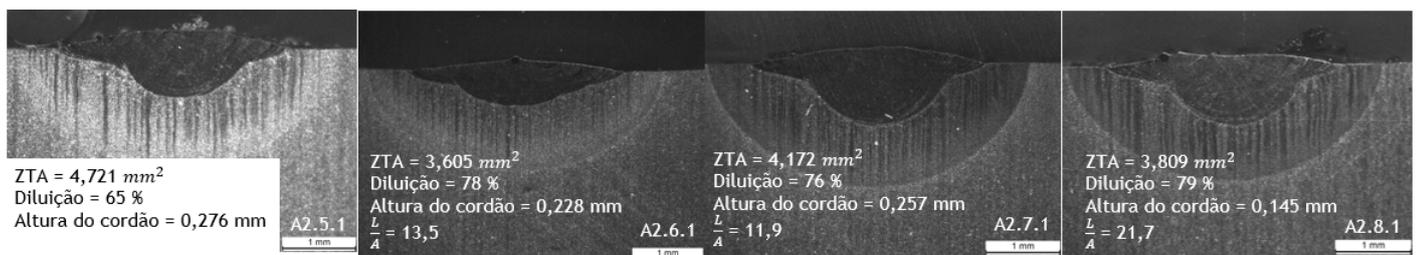


Figura 4.5: Imagens de MO de corte transversal dos cordões de Ferro 39 depositados no Aço 34CrNiMo6 de acordo com as condições de deposição

Verifica-se novamente, como no par de materiais (34CrNiMo6, metco 42C), alturas de cordão extremamente reduzidas e elevadas taxas de diluição. O cordão A2.1.1 que é depositado segundo os parâmetros do cordão A1.1.1 (ver tabela 3.3) e D1.1.1 (ver tabela C.1 do Anexo C) não apresenta altura e dessa forma não se efetuou o cálculo dos vários fatores geométricos, facto corroborado pela a imagem de MO do cordão presente na figura 4.4. Já no cordão A2.4.1, a imagem da microscopia sugere algo de errado na preparação da amostra, pelo que este cordão não é válido.

De forma a comparar as deposições realizadas no par (34CrNiMo6, Metco 42C) segundo as condições usadas na empresa na reparação de componentes, encontram-se na figura 4.6, os resultados de deposição para cada condição testada anteriormente.

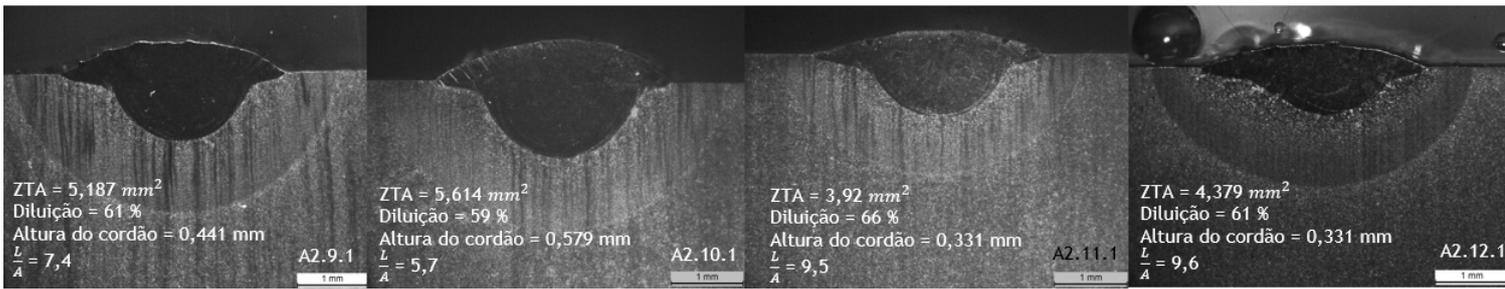


Figura 4.6: Imagens de MO de corte transversal dos cordões de Ferro 39 depositados no Aço 34CrNiMo6 de acordo com as condições de deposição

Também para a deposição de Ferro 39 e com base na figura 4.6, os valores de diluição e razão  $\frac{L}{A}$  estão aquém do pretendido. No entanto, o cordão A2.10.1 é aquele que apresenta um rácio  $\frac{L}{A}$  mais próximo do ideal (entre 3 a 4) e a estratégia poderá passar pelo uso de taxas de deposição superiores como já mencionado no par (34CrNiMo6, Metco 42C) [20, 21]. De uma maneira geral o par (34CrNiMo6, Metco 42C) possui características de deposição semelhantes para as mesmas condições de processamento, sendo que a deposição de Ferro 39 revela valores de altura de cordão e taxas de diluição ligeiramente maiores e menores, respetivamente.

#### 4.1.3 Conjunto ( $M_B$ , $M_A$ ): (34CrNiMo6, Inconel 625)

Nas figuras 4.7 e 4.8 estão presentes as imagens MO das secções transversais dos cordões depositados para o conjunto (34CrNiMo6, Inconel 625) e respetivos resultados: área da ZTA, diluição, altura de cordão e respetivo rácio  $\frac{L}{A}$ .

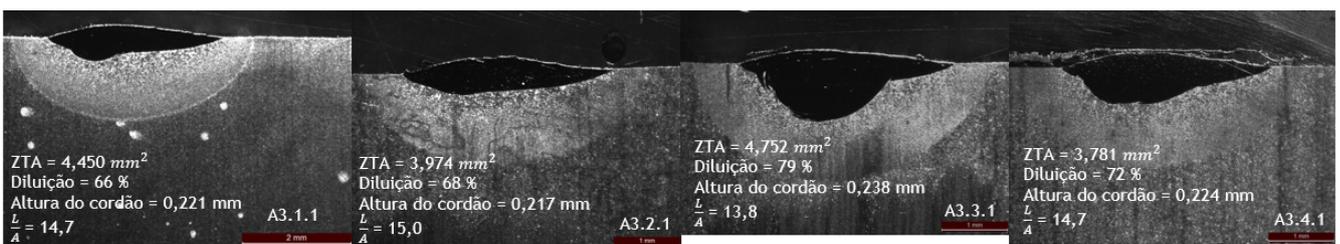


Figura 4.7: Imagens de MO de corte transversal dos cordões de Inconel 625 depositados no Aço 34CrNiMo6 de acordo com as condições de deposição

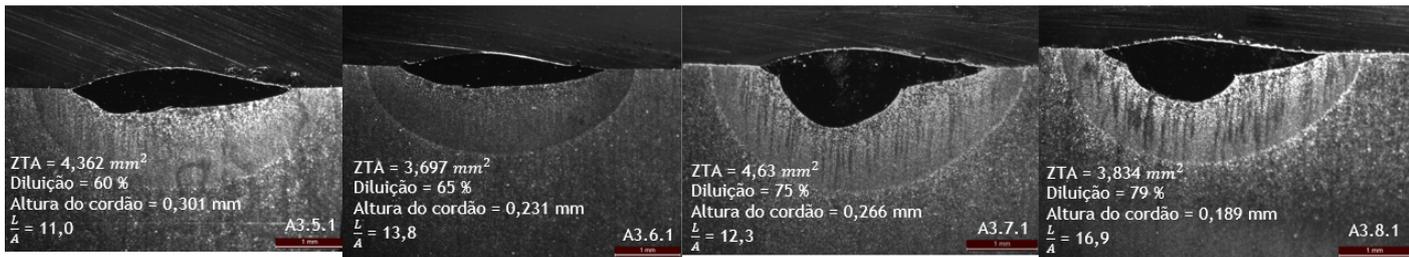


Figura 4.8: Imagens de MO de corte transversal dos cordões de Inconel 625 depositados no Aço 34CrNiMo6 de acordo com as condições de deposição

De um modo geral, analisando as figuras 4.7 e 4.8, os resultados da deposição de Inconel 625 no Aço 34CrNiMo6 seguem a tendência dos pares de materiais testados anteriormente (34CrNiMo6, Ferro 39) e (34CrNiMo6, Metco 42C): o aumento da potência permite o aumento da diluição e da ZTA, enquanto que o aumento da taxa de deposição permite o aumento da altura (menor rácio  $\frac{L}{A}$ ) de cordão e a diminuição da taxa de diluição.

Os resultados das deposições segundo os parâmetros usados propostos pela empresa encontram-se na figura 4.9.

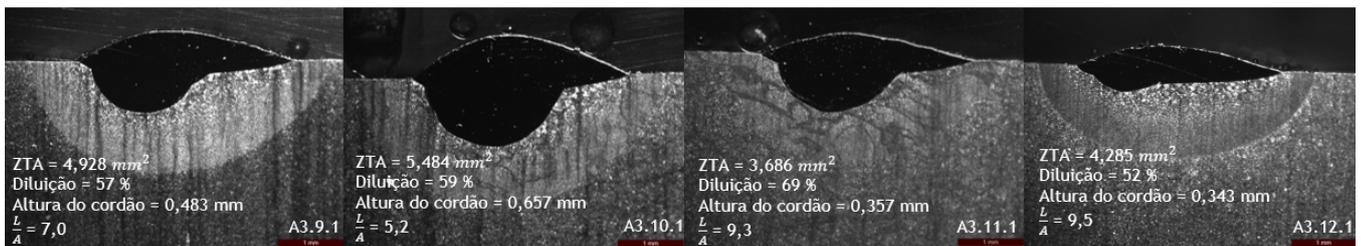


Figura 4.9: Imagens de MO de corte transversal dos cordões de Inconel 625 depositados no Aço 34CrNiMo6 de acordo com as condições de deposição

Analisando os resultados presentes na figura 4.9 verifica-se que as condições de deposição do cordão A3.12.1 mostram-se as melhores no que toca a taxas de diluição menores, sendo que o cordão A3.10.1 é o que apresenta melhor rácio  $\frac{L}{A}$ .

Em suma, das deposições entre os três materiais de adição, o Inconel 625 foi aquele que permitiu uma deposição com melhores características. O Ferro 39 permitiu a obtenção de maiores alturas de cordão e menores taxas de diluição quando comparado com o Metco 42C, enquanto que o Inconel 625 é superior no que toca a estas características. A maior altura de cordão permite consequentes  $\frac{L}{A}$ 's mais próximos do ideal.

Em relação às oito deposições iniciais dos conjuntos (34CrNiMo6, Metco 42C), (34CrNiMo6, Ferro 39) e (34CrNiMo6, Inconel 625), estas revelaram taxas de diluição e rácios de  $\frac{L}{A}$  elevados. Assim, de maneira a testar a reprodutibilidade, realizou-se deposições de Metco 42C em Aço Ferramenta. Comparando os três resultados do Anexo B com os

resultados das figuras C.1 e C.2 do Anexo C e apesar dos parâmetros serem os mesmos, a diferença de resultados é evidente. Isto poderá ser indicativo de que fatores relacionados com o estado da máquina poderão estar na origem de tais diferenças.

De forma a otimizar o processo para este material base, a estratégia a implementar será recorrer a parâmetros afetos aos dois cordões (cordão A3.10.1 e A3.12.1). A otimização passa por reduzir à potência de forma a diminuir a diluição, pois caso contrário poderão comprometer-se as propriedades mecânicas e corrosivas da ligação entre material base e material de adição [24]. Outro fator a ser considerado é o rácio  $\frac{L}{A}$  do cordão. Este deve ser menor para que a altura do cordão seja maior e dessa forma aumentar a eficiência do processo de *Laser Cladding*, implicando menores tempos de processamento na reparação de componentes. Os resultados desta otimização encontram-se apresentados no ponto seguinte.

#### 4.1.3.1 Otimização do conjunto ( $M_B$ , $M_A$ ): (34CrNiMo6, Inconel 625)

Considerando a análise anterior, realizaram-se deposições com menores potências e maiores taxas de deposição sem recurso a pré-aquecimento. Os ensaios efetuados para esta otimização foram realizados após melhorias de condições e práticas inerentes ao processo: aquisição de um armário para armazenamento dos pós, permitindo a remoção/eliminação de humidade deste e o alinhamento do laser. Estes fatores são extremamente importantes no controlo do processo.

A análise de alguns pós por SEM/EDS (*Scanning Electron Microscope/Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy*), utilizados neste trabalho, permitiu aferir a presença de carbono (%C) e silício (%Si) acima do estipulado pelo fornecedor. Ainda que não se tenha verificado a presença de oxigénio neste pó, há o risco da humidade aprisionar algum tipo de gases como oxigénio e hidrogénio, que poderão originar o aparecimento de maior quantidade de poros, comprometendo as propriedades finais de deposição [43, 44]. Foi neste sentido que se realizou a implementação do armário para manutenção e armazenamento dos pós/materiais de adição.

Outra melhoria realizada consistiu no alinhamento do laser. O método para o alinhamento é relativamente simples: encostou-se a ponta do injetor a uma folha de papel com a luz do laser piloto ligada e através da transparência do papel constatou-se desde logo que a luz não se encontrava centrada em relação ao centro do injetor. Assim procedeu-se à centralização do injetor. Deste modo, todo o pó expulso através do injetor é fundido e há a deposição de um cordão de forma homogénea bem como uma zona fundida devidamente centrada [45].

Na tabela 4.1 estão presentes os resultados para a otimização da deposição no conjunto (34CrNiMo6, Inconel 625) para cada condição de deposição após algumas melhorias implementadas.

Tabela 4.1: Valores de ZTA, diluição, altura e largura de cordão e respetivo rácio  $\frac{L}{A}$  obtidos segundo diferentes parâmetros na deposição de Inconel 625 em Aço 34CrNiMo6

Cordão	Potência (W)	Velocidade (mm/s)	Taxa de deposição (g/min)	Área ZTA (mm <sup>2</sup> )	Diluição (%)	Altura cordão (mm)	Largura do cordão (mm)	L/A
A3.13.1	1000	7	17,55	2,521	8	0,565	3,109	5,5
A3.14.1	1000	7	19,5	2,524	15	0,544	3,136	5,8
A3.15.1	1000	7	21,45	2,455	17	0,537	3,136	5,8
A3.16.1	1000	7	23,4	2,354	14	0,66	3,17	4,8
A3.17.1	1000	8	17,55	2,39	10	0,605	3,123	5,2
A3.18.1	1000	8	19,5	2,516	15	0,449	3,123	7,0
A3.19.1	1000	8	21,45	2,224	10	0,585	3,103	5,3
A3.20.1	1000	8	23,4	2,44	11	0,599	3,075	5,1
A3.21.1	1050	7	17,55	2,64	9	0,592	3,179	5,4
A3.22.1	1050	7	19,5	2,622	11	0,571	3,169	5,5
A3.23.1	1050	7	21,45	2,449	7	0,678	3,185	4,7
A3.24.1	1050	7	23,4	2,582	6	0,687	3,164	4,6
A3.25.1	1050	8	17,55	2,583	21	0,49	3,186	6,5
A3.26.1	1050	8	19,5	2,498	15	0,524	3,137	6,0
A3.27.1	1050	8	21,45	2,405	19	0,49	3,137	6,4
A3.28.1	1050	8	23,4	2,422	10	0,605	3,123	5,2
A3.29.1	1100	7	17,55	2,543	13	0,585	3,2	5,5
A3.30.1	1100	7	19,5	2,628	8	0,653	3,22	4,9
A3.31.1	1100	7	21,45	2,703	12	0,653	3,218	4,9
A3.32.1	1100	7	23,4	2,511	7	0,721	3,191	4,4
A3.33.1	1100	8	17,55	2,523	17	0,49	3,158	6,4
A3.34.1	1100	8	19,5	2,571	14	0,558	3,131	5,6
A3.35.1	1100	8	21,45	2,397	17	0,456	3,089	6,8
A3.36.1	1100	8	23,4	2,424	6	0,643	3,041	4,7

Verifica-se a obtenção de taxas de diluição muito inferiores associadas ao aumento da taxa de deposição e diminuição da potência. Os parâmetros selecionados para as deposições consequentes foram os dos cordões A3.32.1 e o A3.36.1, pelo facto de conciliarem uma baixa taxa de diluição com uma altura de cordão considerável. Na figura 4.10 estão presentes as imagens de MO dos cordões acima mencionados assim como os resultados dos seus fatores geométricos.

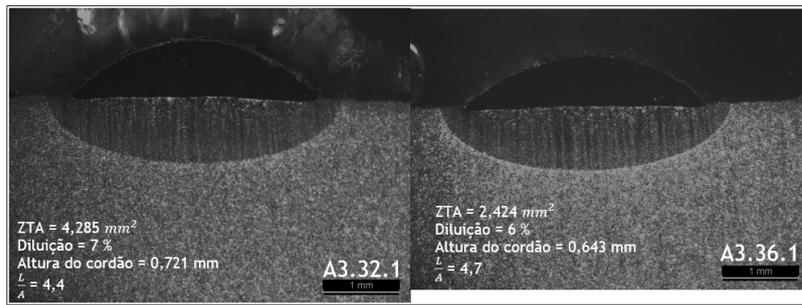


Figura 4.10: Imagens de MO de corte transversal dos cordões A3.32.1 e A3.36.1

Para cada um destes cordões foram realizados perfis de dureza de forma a complementar a sua caracterização. Nas figuras 4.11 e 4.12 apresentam-se os respectivos perfis de dureza.

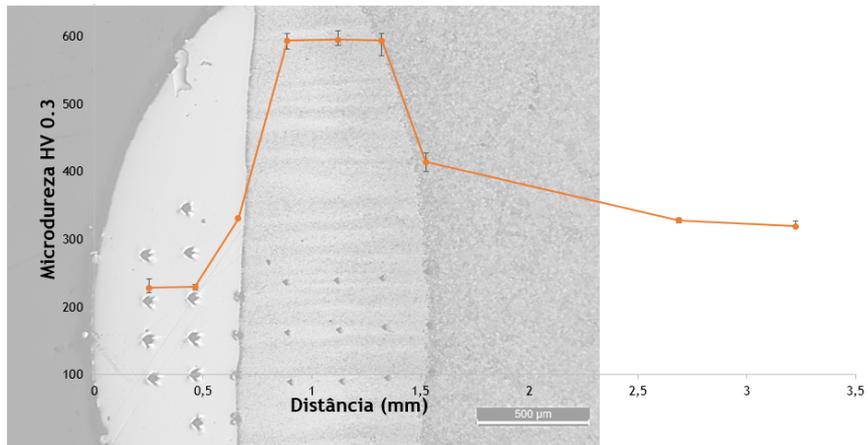


Figura 4.11: Perfil de durezas do cordão A3.32.1

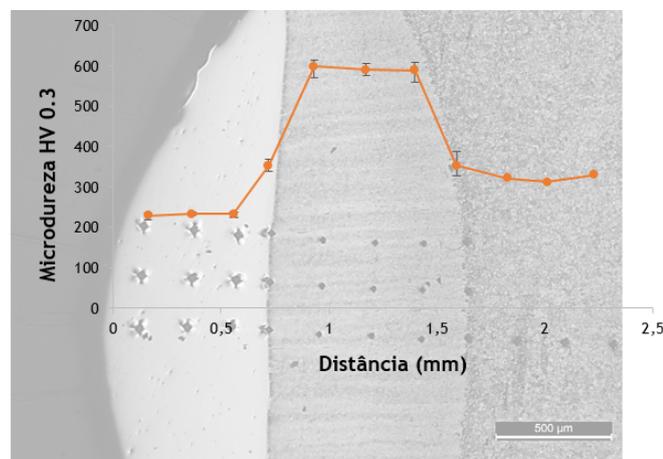


Figura 4.12: Perfil de durezas do cordão A3.36.1

Por análise dos perfis de dureza, é possível verificar que as durezas no cordão depositado de Inconel 625 mostram-se constantes ( $231\pm 11$ ) HV0.3. A dureza aumenta ligeiramente na linha de fusão - para cerca de ( $340\pm 11$ ) HV0.3 em ambos os cordões. Já na ZTA, como esperado e devido ao rápido arrefecimento, as durezas aumentam para cerca de ( $593\pm 27$ ) HV0.3. Este aumento poderá ocorrer devido à formação de martensite propiciada pelos gradientes térmicos elevados e a composição química do material base. Este facto foi observado por *Kattire et al.* [29], onde se constatou a presença de carbonetos de cromo retidos numa matriz de martensite na ZTA com uma dureza média de 576 HV, aquando da deposição de CPM 9V por *Laser Cladding* em aço ferramenta AISI H13 (aço similar ao utilizado neste caso). Por fim, na zona de transição entre a ZTA e o material base, verifica-se uma redução da dureza, sendo ele mais acentuado no cordão A3.36.1 (maiores velocidades de processamento). Através da imagem a microscópio e através da estagnação dos valores de durezas, começa-se a atingir o substrato, onde estas apresentam valores de cerca de ( $320\pm 18$ ) HV0.3.

Como não existem diferenças significativas entre estes dois cordões, no que concerne aos perfis de dureza, realizaram-se deposições de um, dois, três cordões, uma camada e duas camadas para as mesmas condições de processamento do cordão A3.32.1 (tabela 4.2) e A3.36.1 (tabela 4.3).

Tabela 4.2: Valores de ZTA, diluição, altura da deposição de diferentes números de cordões de Inconel 625 em Aço 34CrNiMo6 a uma velocidade de 7 mm/s

Cordão	Potência (W)	Velocidade (mm/s)	Taxa de deposição (g/min)	Nº de Cordões	Área ZTA (mm <sup>2</sup> )	Diluição (%)	Altura cordão (mm)
A3.37.1	1100	7	23,4	1	2,673	22,4	0,694
A3.38.2	1100	7	23,4	2	4,416	17,1	0,647
A3.39.3	1100	7	23,4	3	5,896	21,2	0,624
A3.40.10	1100	7	23,4	10	15,51	21,2	0,605
A3.41.20	1100	7	23,4	10;10	16,68	10,7	1,203

Tabela 4.3: Valores de ZTA, diluição, altura da deposição de diferentes números de cordões de Inconel 625 em Aço 34CrNiMo6 a uma velocidade de 8 mm/s

Cordão	Potência (W)	Velocidade (mm/s)	Taxa de deposição (g/min)	Nº de Cordões	Área ZTA (mm <sup>2</sup> )	Diluição (%)	Altura cordão (mm)
A3.42.1	1100	8	23,4	1	2,758	21,3	0,514
A3.43.2	1100	8	23,4	2	3,742	13,7	0,672
A3.44.3	1100	8	23,4	3	5,4	18,8	0,616
A3.45.10	1100	8	23,4	10	18,02	14,6	0,575
A3.46.20	1100	8	23,4	10;10	16,68	2,9	1,958

Analisando os resultados das tabelas, verifica-se que, de uma forma geral, a altura dos cordões para a deposição de um, dois, três e dez cordões mantém-se relativamente

constante. Para além disso observa-se que na deposição de duas camadas (A3.41.20 e A3.46.20) a diluição diminui comparativamente à deposição de apenas uma camada. De acordo com a bibliografia [46], a deposição de apenas uma camada implica o contacto direto do feixe laser no material base e a zona fundida é de tamanho superior, ao contrário da deposição de duas camadas, que implica que a deposição da segunda camada funda apenas parcialmente o substrato pois o porte térmico é distribuído por um maior volume de material depositado. É ainda possível verificar que, a altura da deposição de multicamadas (A3.46.20) é de quase o quádruplo da deposição de apenas uma camada. Os cordões A3.46.20 foram depositados em alturas distintas do resto das deposições. O desconhecimento da manutenção dos vários componentes afetos ao sistema de *Laser Cladding* pode estar na base da falta de reprodutibilidade verificada neste caso. A título de exemplo, por vezes a saída de pó só se verificava em apenas dois orifícios do injetor. Isto poderia acontecer porque a limpeza da tubagem, do prato e disco do sistema de alimentação não era realizada e nenhum destes componentes alguma vez fora substituído. Para além disso, a utilização de diferentes pós com granulometrias, geometrias e tamanhos distintos num curto espaço de tempo sem recurso a limpeza do sistema de alimentação, poderia estar na base do aparecimento de algumas destas dificuldades. Todo este desconhecimento do funcionamento, bem como manutenção da máquina pode estar na origem de alguns resultados incoerentes.

Posteriormente, realizou-se a deposição de duas camadas com e sem pré-aquecimento segundo as condições do cordão A3.46.20 da tabela 4.3 e com potências superiores (1200 e 1300 W) de modo a perceber o efeito do pré-aquecimento bem como o efeito da potência na eficiência de deposição. Na figura 4.13 estão presentes as variáveis de deposição para cada cordão assim como os seus resultados: ZTA, diluição e altura do cordão.

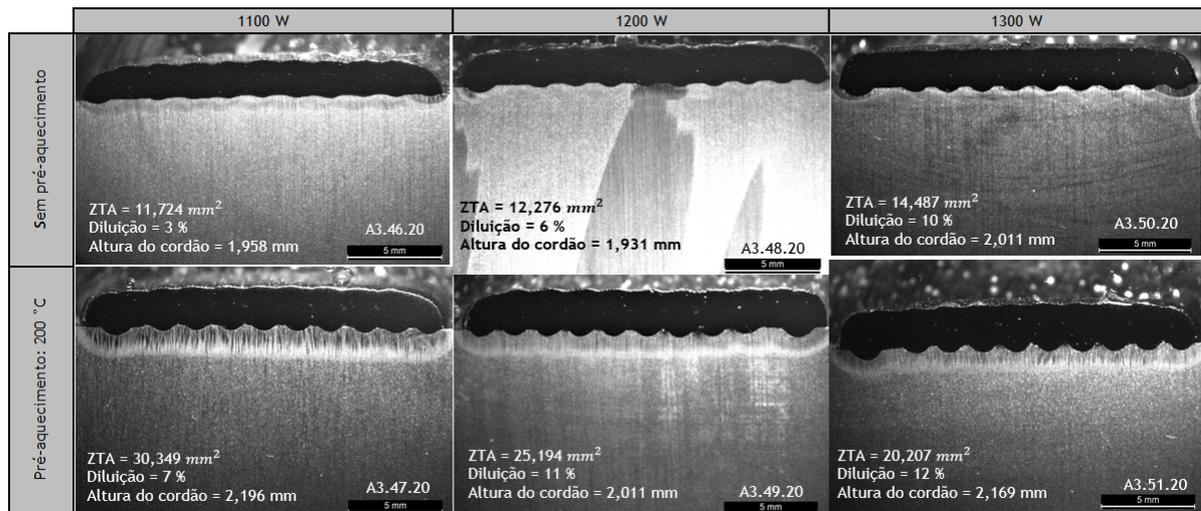


Figura 4.13: Imagens de MO de corte transversal de deposição de duas camadas submetidas a diferentes potências com e sem recurso a pré-aquecimento

Através da sua análise, o aumento da potência não permitiu o aumento da altura do cordão como expectável. Apenas o cordão A3.50.20 possui uma altura superior em relação aos cordões depositados segundo potências inferiores. Já a diluição, aumentou em função da potência.

O recurso ao pré-aquecimento originou ZTA's e taxas de diluição superiores às amostras não submetidas a pré-aquecimento. Este fenómeno foi verificado por *Ramiro et al.* [47], onde se depositou Eutroloy e Colmonoy num substrato de 42CrMoS4 com e sem pré-aquecimento. O uso de pré-aquecimento implica tempos de convecção superiores sendo que a difusão e penetração de calor sejam também superiores. Isto resulta em maiores taxas de diluição quando comparado com substratos não submetidos a pré-aquecimento [48].

Observa-se que, além da maior taxa de diluição relativamente às imagens anteriores de uma só camada, na imagem das camadas A3.48.20 observa-se uma mudança microestrutural no substrato (figura 4.14).

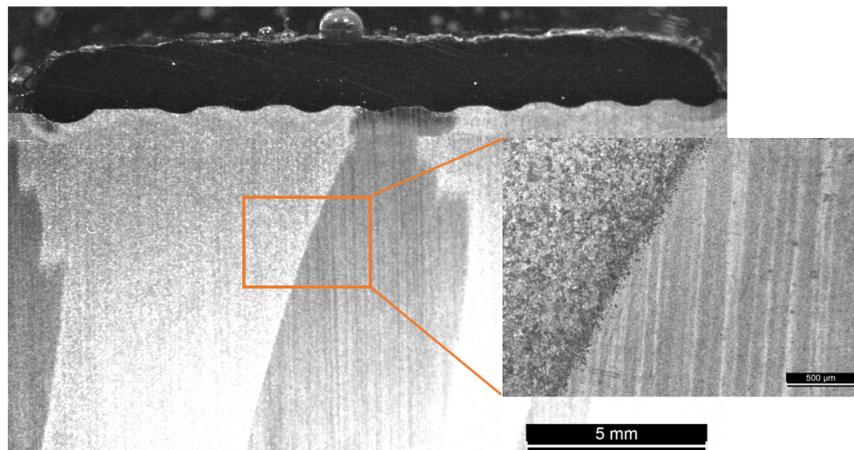


Figura 4.14: Imagem de MO de corte transversal do cordão A3.48.20 com ampliação na zona de mudança de microestrutura

Esta diferença poderá ter sido originada não pelo processo de *Laser Cladding*, mas por uma possível diferença no material base fornecido. De modo a entender o que originou esta mudança seria necessário efetuar mais análises da amostra bem como de outro material do mesmo lote que não tivesse sido submetido ao processo.

Relativamente à estrutura do cordão depositado é possível visualizar na figura 4.15, a interface entre deposição de cordões, bem como a presença de dendrites e algumas porosidades.

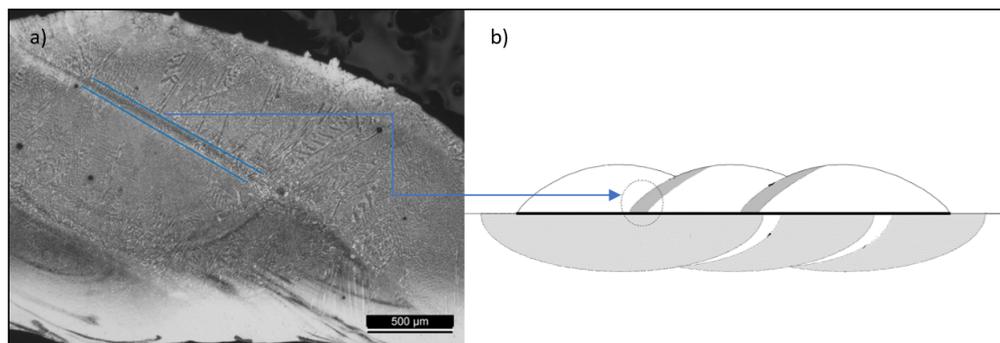


Figura 4.15: a) Imagem MO de corte transversal da amostra A3.46.20 e b) representação da interface entre cordões vizinhos

Uma clara zona de transição assinalada com linhas azuis indica que ocorreu uma recristalização parcial devido à deposição do segundo cordão.

A microestrutura do cordão de Inconel 625 é uma matriz essencialmente dendrítica, onde estas são ligeiramente enriquecidas em ferro, níquel e crómio, onde as regiões

interdendríticas são enriquecidas com silício e molibdênio [49]. Estas dendrites apresentam orientações um pouco distintas. Nesse sentido, e como o gradiente de temperaturas tem origem no substrato e nos cordões depositados adjacentes e/ou da camada depositada, é possível ver pelo esquema da figura D.1 presente no anexo D que a direção de crescimento das dendrites se dá no sentido do maior gradiente de temperatura [50].

Durante uma investigação conduzida por *Abioye et al.* [51] constatou-se a presença de dendrites praticamente colunares na microestrutura do Inconel 625 depositado por *Laser Cladding* que cresceram a partir do substrato. Verificou-se também uma mudança de orientação das mesmas nas dendrites localizadas no topo do cordão [51].

Através da observação da figura 4.16 é possível visualizar a presença de impurezas na fronteira entre camadas. A falta de limpeza entre deposição de camadas poderá estar na origem deste fenómeno. É notável também a presença de porosidades.

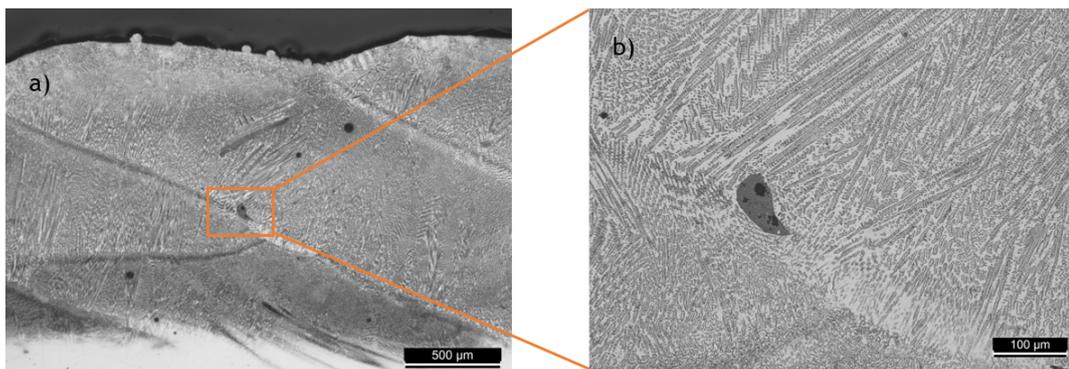


Figura 4.16: Imagem de MO do cordão A3.46.20 com b) ampliação na zona de transição entre camadas

Aliás, todos os cordões apresentaram este defeito tanto na primeira camada depositada como na segunda. No entanto, verifica-se porosidades de maior tamanho nas camadas submetidas a pré-aquecimento como se pode verificar nas imagens da figura 4.17.

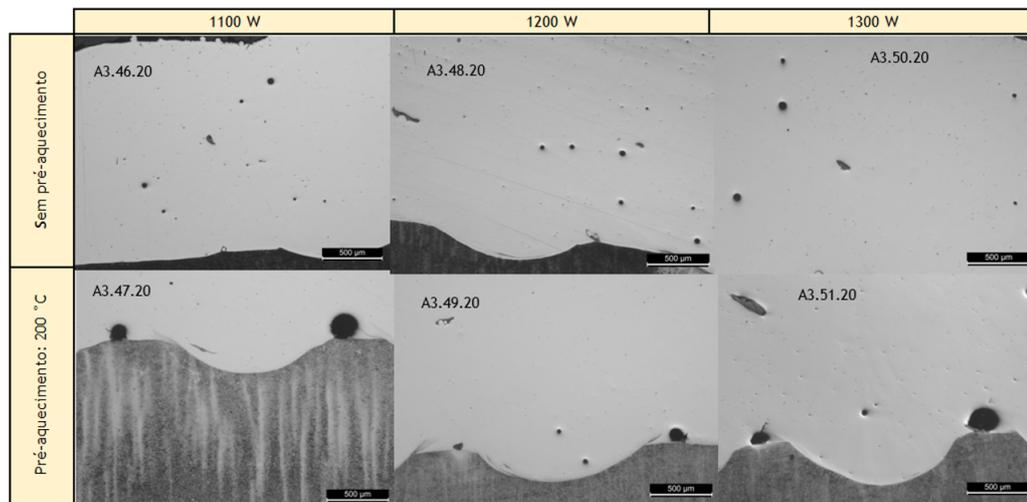


Figura 4.17: Imagens de MO onde é possível a visualização de porosidades na deposição de duas camadas submetidas a diferentes condições

Em todas as condições, a presença de poros verifica-se nas várias zonas do cordão, no entanto, nas amostras submetidas a pré-aquecimento, é possível verificar poros de maiores dimensões na interface entre a primeira camada e o substrato. Os poros de menor dimensão estão presentes nas amostras não submetidas a pré-aquecimento e têm tamanhos entre 48-64  $\mu\text{m}$ . Enquanto que, nas amostras submetidas a pré-aquecimento, estes possuem um tamanho de 113 - 255  $\mu\text{m}$ . A porosidade pode ser originada por diversas razões. Esta poderá ocorrer por falta de fusão e tem, geralmente, origem nas fronteiras entre camadas estando associadas à ausência de fusão de algumas partículas de pó. As porosidades advindas do aprisionamento de gás, têm origem devido ao gás de transporte dos pós e de proteção (árgon). Este pode não ser capaz de abandonar num curto período de tempo a zona fundida, se a distância da partícula de gás e a superfície mais externa do cordão for muito distante. Outro motivo para que ocorra porosidade é a solidificação do cordão suceder-se em diversas direções, tornando algumas regiões do cordão inclusas. Esta contração causa tensões de tração que poderão levar à formação de poros [52-54]. Existem também porosidades que podem surgir na interface entre o material base e o material de adição depositado. A primeira causa deve-se à presença de gordura e à limpeza insuficiente da superfície que posteriormente poderá ter influência na ligação metalúrgica. Como mencionado no estado da arte (capítulo 2 ponto 2.2), caso o *offset* seja reduzido, irá haver falta de união ou presença de poros [13]. Este facto poderá estar relacionado com o aparecimento de tensões residuais, apesar destes cordões terem sido depositados com pré-aquecimento. Por fim, este fe-

nómeno poderá estar relacionada com os pós. Num estudo realizado por *Nakki et al.* [49] analisou-se a influência de vários tipos de pó Inconel 625 de diferentes fornecedores no aparecimento de fissuras. Constatou-se que os pós que continham uma percentagem média de 0,4 % de silício (%Si) na sua composição apresentavam maior quantidade de fissuras comparativamente com níveis inferiores de %Si. Está comprovado que o silício e o ferro permitem a presença de fases Laves que muitas vezes está relacionada com o aparecimento de fissuras [49].

Além da porosidade é observável a presença de microfissuras na interface substrato/camada nos cordões A3.47.20 e A3.51.20, figura 4.18.

Num estudo realizado por Borges [15] verificou-se o mesmo fenómeno na interface da deposição por fio, usando como material base um aço ferramenta ASI H13. A presença de porosidades origina a concentração de tensões o que poderá originar o aparecimento de fissuras como representado na figura 4.18 b2) [15].

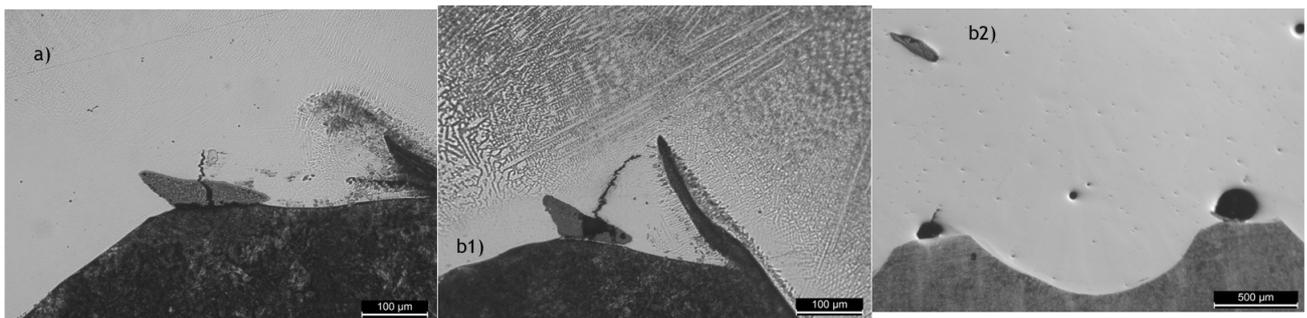


Figura 4.18: Imagens de MO dos cordões a) A3.47.20, b1) e b2) A3.51.20

## 4.2 42CrMo4

No material base 42CrMo4 foram igualmente depositados três tipos de material de adição. Neste ponto serão apresentados os resultados das deposições nos conjuntos ( $M_B$ ,  $M_A$ ): (42CrMo4, Metco 42C), (42CrMo4, Ferro 39) e (42CrMo4, Inconel 625), onde as melhorias realizadas no ponto 4.1.3.1 ainda não tinham sido aplicadas.

### 4.2.1 Conjunto ( $M_B$ , $M_A$ ): (42CrMo4, Metco 42C)

Nas figuras 4.19 e 4.20 estão presentes as imagens MO das secções transversais dos cordões depositados para o conjunto (42CrMo4, Metco 42C) e respetivos valores de ZTA, diluição, altura do cordão e respetivo rácio  $\frac{L}{A}$ .

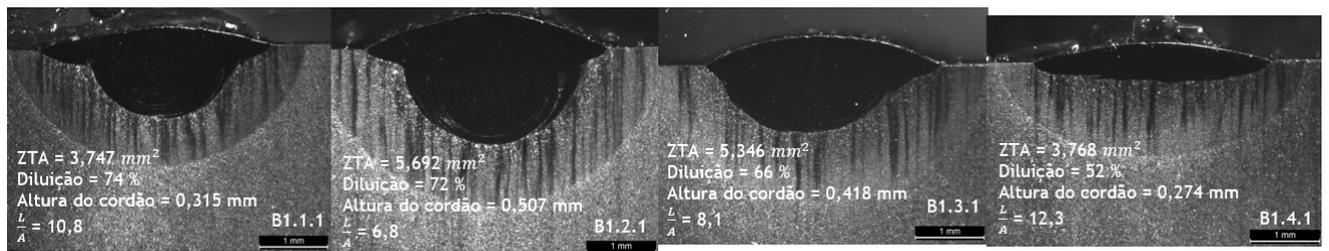


Figura 4.19: Imagens de MO de corte transversal dos cordões de Metco 42C depositados no Aço 42CrMo4 de acordo com as condições de deposição

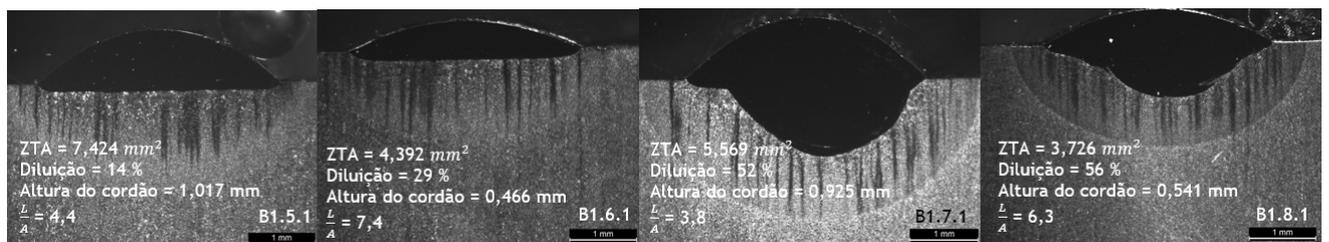


Figura 4.20: Imagens de MO de corte transversal dos cordões de Metco 42C depositados no Aço 42CrMo4 de acordo com as condições de deposição

Através da análise das figuras é possível verificar que a influência da velocidade de *cladding* é notória: este permite uma maior eficiência na deposição de material, visto que aumentando este parâmetro a altura de cordão aumenta (Do cordão B1.1.1 ao cordão B1.5.1; do cordão B1.2.1 ao cordão B1.6.1 e assim sucessivamente). Para além disso, a diluição diminui pelo facto da energia laser incidir num menor intervalo de tempo sobre o material base. Contudo, é notória uma ligeira assimetria na zona de fusão em grande parte dos cordões das figuras 4.19 e 4.20.

Dos cordões apresentados, o cordão B1.5.1 é aquele que apresenta melhores características, apresentando uma zona de fusão simétrica e um rácio  $\frac{L}{A}$  de 4,4 aliado à melhor taxa de diluição (cerca de 14%), apesar da sua ZTA ser de maior dimensão. Devido a estes resultados, realizaram-se perfis de dureza HV0.3 nesta amostra (figura 4.21).

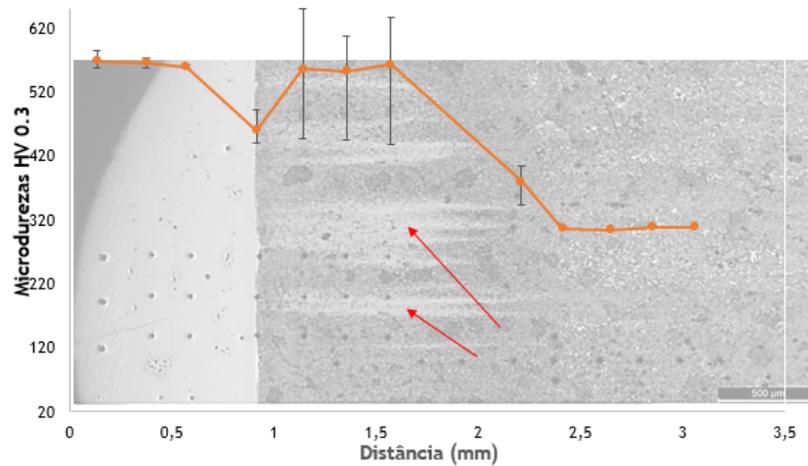


Figura 4.21: Perfil de durezas da amostra B1.5.1

Com base no perfil de durezas apresentado, é possível concluir que o material de adição Metco 42C apresenta durezas constantes (cerca de  $564 \pm 14$  HV0.3). Verifica-se ainda que, quando se atinge a linha de fusão, a dureza diminui para cerca de  $460 \pm 26$  HV0.3, enquanto na ZTA, os valores mostram-se bastante amplos, atingindo valores médios de  $623 \pm 22$  HV0.3 nas zonas a branco e  $444 \pm 4$  HV0.3 na restante ZTA, sendo a sua média de  $557 \pm 106$  HV0.3.

*Ocelík et al.* [55] depositaram Eutroloy 16012 no Aço 42CrMo4, onde chegou a atingir durezas de cerca de 620 HV0.4 a uma velocidade de 7,5 mm/s. Os autores justificam este aumento de dureza devido às taxas de arrefecimento acentuadas e à composição química do aço, que permitem a formação de maior quantidade de martensite [55]. Partindo deste pressuposto, as zonas assinaladas com setas vermelhas na figura 4.21 foram, possivelmente, submetidas a uma menor temperatura de pré-aquecimento visto que o uso de maçarico não garante um pré aquecimento homogéneo do material base. Desta forma, a sua dureza é superior à restante ZTA. Se as zonas mais endurecidas fossem descartadas, a dureza diminuiria na ZTA. Já na transição entre a ZTA e o material base, a dureza volta a diminuir ( $380 \pm 31$ ) HV0.3, ficando constante para identações efetuadas ao longo do eixo dos xx no substrato ( $307 \pm 3$ ) HV0.3.

#### 4.2.2 Conjunto ( $M_B$ , $M_A$ ): (42CrMo4, Ferro 39)

Nas figuras 4.22 e 4.23 estão presentes as imagens MO das secções transversais dos cordões depositados para o conjunto (42CrMo4, Ferro 39) e valores de ZTA, diluição, altura do cordão e respetivo rácio  $\frac{L}{A}$ .

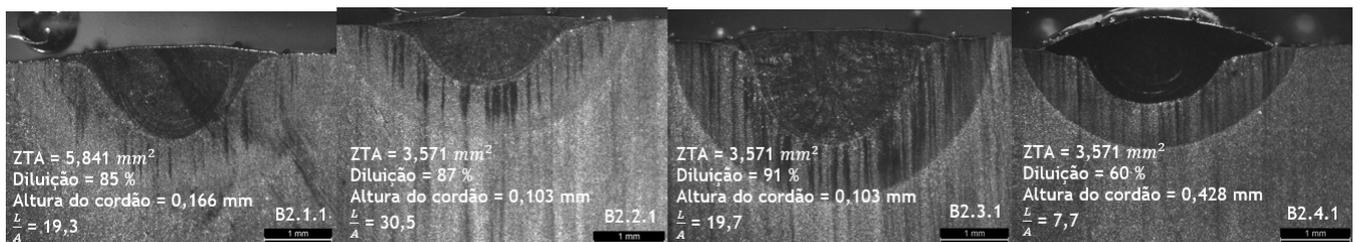


Figura 4.22: Imagens de MO de corte transversal dos cordões de Ferro 39 depositados no Aço 42CrMo4 de acordo com as condições de deposição

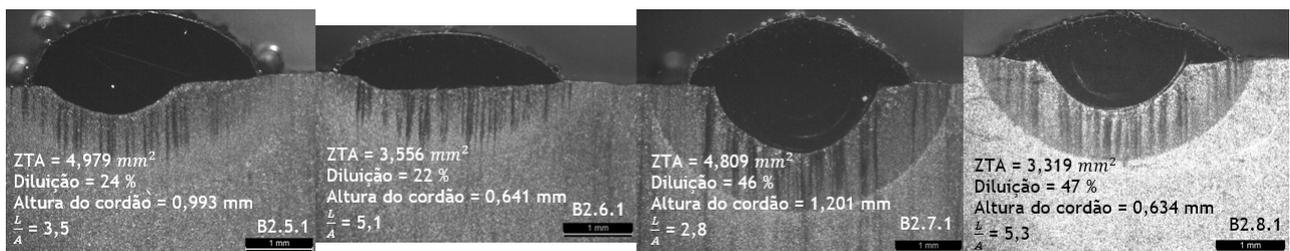


Figura 4.23: Imagens de MO de corte transversal dos cordões de Ferro 39 depositados no Aço 42CrMo4 de acordo com as condições de deposição

O aumento da velocidade, de *cladding* de 7 para 12 mm/s, mostrou-se vantajoso nas condições testadas, já que de uma maneira geral, ocorre diminuição da ZTA, bem como da diluição, pelo facto do feixe laser incidir em menor tempo no substrato. Para além disso, a altura do cordão aumenta quando a velocidade é superior.

Partindo destes pressupostos, o cordão que apresentou melhores características foi o cordão B2.5.1 pois é o que possui, apesar de ainda elevada, a menor diluição (23%) e o valor do rácio  $\frac{L}{A}$  mais próximo do ideal.

Na amostra B2.5.1 foi realizado um perfil de durezas presente na figura 4.24.

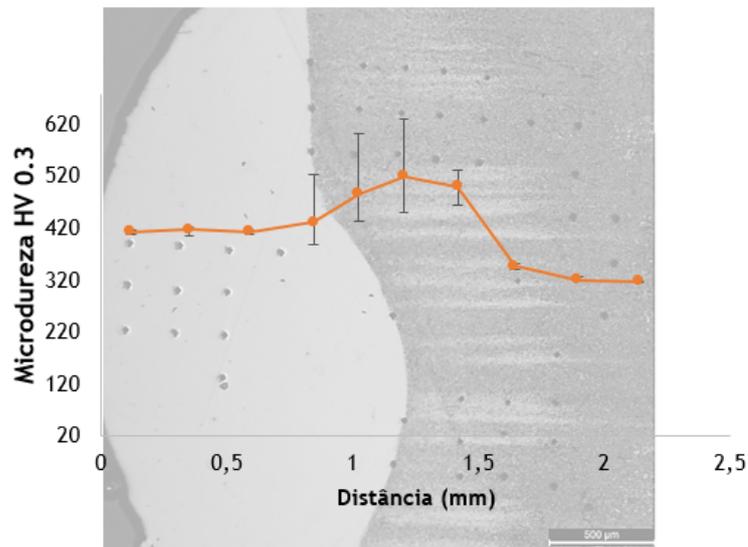


Figura 4.24: Perfil de durezas da amostra B2.5.1

Apesar de se verificar uma ligeira assimetria da zona de fusão, realizaram-se identificações tanto na linha de fusão, como na ZTA das duas regiões, sendo que a distância medida no eixo dos xx considerada é da zona sem o desvio. A dureza do material de adição Ferro 39 é constante ao longo do cordão ( $415,7 \pm 13$ ) HV0.3. Verifica-se heterogeneidades de dureza na linha de fusão ( $432 \pm 68$ ) HV0.3, sendo que atinge o seu máximo na ZTA ( $503 \pm 98$ ) HV0.3. A amplitude de valores de dureza na ZTA é novamente elevada devido às zonas mais aclaradas visíveis na figura 4.24.

#### 4.2.3 Conjunto ( $M_B$ , $M_A$ ): (42CrMo4, Inconel 625)

Nas figuras 4.25 e 4.26 estão presentes as imagens de MO das secções transversais para cada cordão depositado no conjunto (42CrMo4, Inconel 625) com valores da área da ZTA, diluição, altura do cordão e respetivo rácio  $\frac{L}{A}$ .

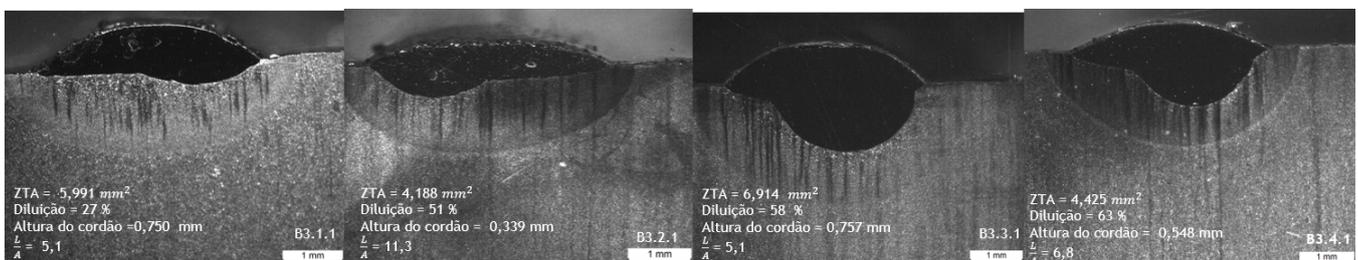


Figura 4.25: Imagens de MO de corte transversal dos cordões de Inconel 625 depositados no Aço 42CrMo4 de acordo com as condições de deposição

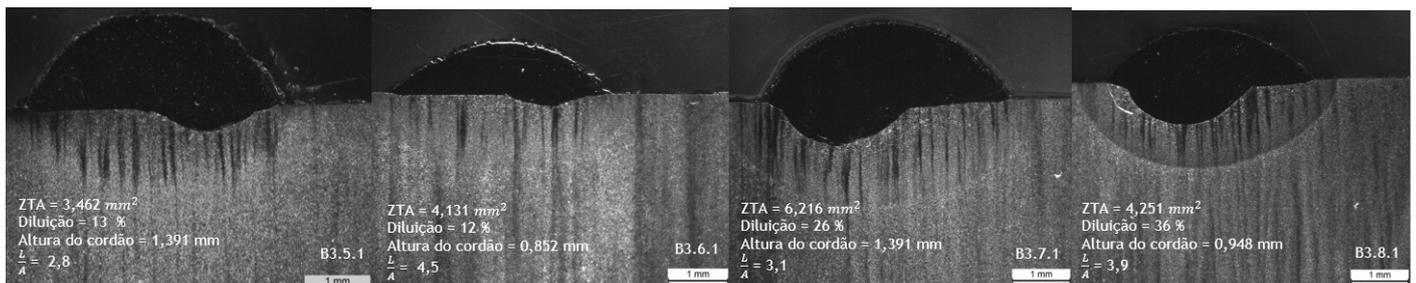


Figura 4.26: Imagens de MO de corte transversal dos cordões de Inconel 625 depositados no Aço 42CrMo4 de acordo com as condições de deposição

Mais uma vez o aumento da velocidade de *cladding* mostra-se vantajoso nas condições testadas agora para a deposição de Inconel 625. É de notar a diminuição da ZTA, bem como da diluição com o aumento deste parâmetro, pelo facto do feixe laser incidir em menor tempo no material base. Para além disso, a altura do cordão aumenta com o aumento da velocidade. De realçar a presença de um perfil assimétrico da zona de fusão em todas as amostras com uma, aparente, maior penetração de laser de um dos lados em relação ao centro.

Se o injetor fosse lateral, este fenómeno poderia ser explicado pelo facto do material de adição depositar-se mais de um lado do que do outro. Descartada esta hipótese, este fenómeno poderá ser explicado por um ligeiro desvio do feixe laser já relatado no conjunto (34CrNiMo6, Inconel 625) no ponto ??.

Porém, outro motivo poderá estar por detrás deste fenómeno que foi relatado por *Goodarzi et al.* [24], onde devido à presença de elevados gradientes de temperatura presentes na zona de fusão, dá-se origem a forças de convecção de Marangoni. Estas causam a circulação do metal fundido na zona de fusão e, como consequência, as forças de Marangoni originam a formação deste tipo de perfil. Estas forças estão dependentes da composição química do material, do gradiente da temperatura da superfície tangente e da temperatura superficial da zona de fusão [24, 25].

Analisando os resultados, o cordão que revela melhores características é o cordão B3.5.1. Este é caracterizado por uma diluição de 13% e uma área de ZTA menor em relação aos restantes. Para além disso, é este que possui uma maior altura. Por esse motivo, este cordão foi avaliado mecanicamente, o seu perfil de durezas está presente na figura 4.27.

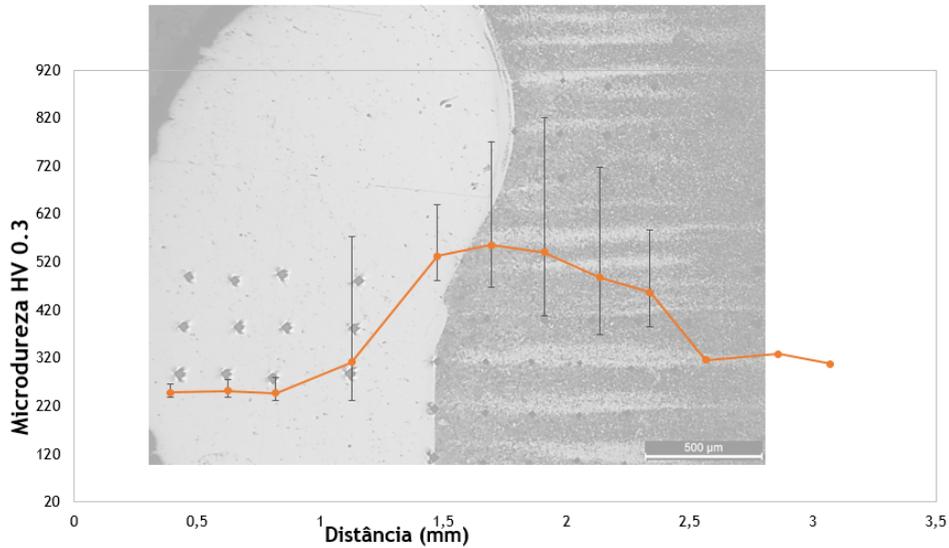


Figura 4.27: Perfil de dureza da amostra B3.5.1

Através do gráfico da figura pode constatar-se que a dureza ao longo do cordão de Inconel 625 se mantém constante ( $249 \pm 16$ ) HV0.3. Contudo, na linha de fusão, como há um claro desvio da zona fundida, as indentações foram realizadas tanto na zona do desvio como na zona menos distanciada do topo do cordão, traduzindo-se numa amplitude elevada ( $312 \pm 170$ ) HV0.3. Também na ZTA a amplitude de resultados revela-se bastante elevada, com dureza média de  $514 \pm 160$  HV0.3, devido à presença das zonas a branco que revelam maior dureza. Finalmente as durezas estabilizam para valores de dureza do material base ( $317 \pm 1$ ) HV0.3.

Concluindo, a avaliação e otimização da deposição dos três materiais de adição no material base 42CrMo4, o Inconel 625 foi novamente o material de adição que permitiu melhores resultados de deposição. As condições que permitiram estes resultados foram: potência a 1350 W, velocidade de 12 mm/s e taxa de deposição de 11,7 g/min. As durezas do Metco 42C mostram-se superiores, sendo que decrescem após e na linha de fusão. Na deposição de Ferro 39 e Inconel 625, a dureza da ZTA é superior à do cordão, sendo que esta mostra-se semelhante para os três materiais de adição. A escolha do material de adição, entre os três em estudo, depende dos requisitos da aplicação sendo necessário um estudo mais profundo destas.

### 4.3 GJS-500

Finalmente, neste ponto serão apresentados os resultados das deposições nos conjuntos ( $M_B$ ,  $M_A$ ): (GJS-500, Ferro 39), (GJS-500, Inconel 625) e (GJS-500, Inconel 718).

#### 4.3.1 Conjunto ( $M_B$ , $M_A$ ): (GJS-500, Ferro 39)

Nas figuras 4.28 e 4.29 estão presentes as imagens de MO das secções transversais para cada cordão depositado no conjunto (GJS-500, Ferro 39) com valores da área da ZTA, diluição, altura do cordão e respetivo rácio  $\frac{L}{A}$ .

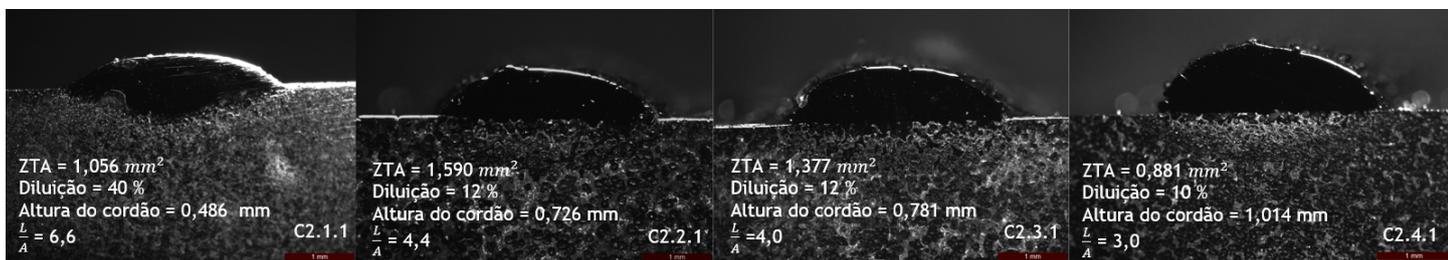


Figura 4.28: Imagens de MO de corte transversal dos cordões de Ferro 39 depositados no Ferro Fundido GJS-500 de acordo com as condições de deposição

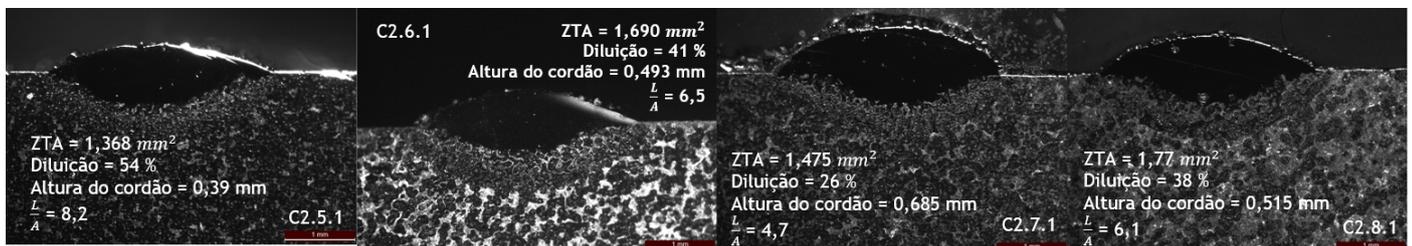


Figura 4.29: Imagens de MO de corte transversal dos cordões de Ferro 39 depositados no Ferro Fundido GJS-500 de acordo com as condições de deposição

A aplicação de taxas de deposição crescentes da amostra C2.1.1 até à C2.4.1 na figura 4.28 e da amostra C2.5.1 até à C2.8.1 na figura 4.29, permite, de maneira geral, concluir que a ZTA apresenta um decréscimo da sua área. Os cordões depositados segundo potências e velocidades mais elevadas (C2.5.1 - C2.8.1) apresentaram valores superiores de diluição quando comparado com os quatro iniciais. Para além de se revelarem resultados menos favoráveis, dificulta também a comparação com os primeiros quatro cordões. Já a altura do cordão, como expectável, apresenta um aumento já que maior quantidade de material é depositada, por unidade de tempo. Como consequência, o rácio  $\frac{L}{A}$  diminui. Desta forma atingem-se valores ideais de  $\frac{L}{A}$  nos cordões C2.3.1 e C2.4.1. Deste modo, e por apresentar altura de 1 mm e uma taxa de diluição de 10%,

os parâmetros do cordão C2.4.1 foram selecionados como os melhores neste conjunto de materiais. Na figura 4.30 encontra-se presente o perfil de durezas deste cordão de forma a avaliar o seu comportamento mecânico.

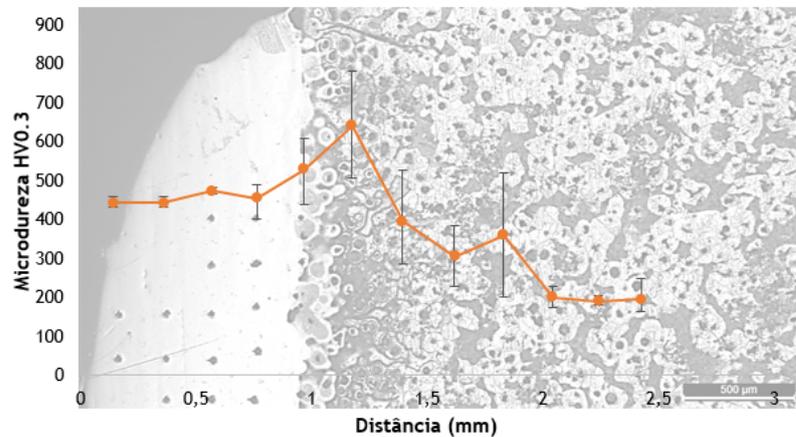


Figura 4.30: Perfil de durezas da amostra C2.4.1

Por observação da figura, verifica-se que a dureza ao longo do cordão é relativamente constante ( $453 \pm 51$ ) HV0.3 e mostra-se superior em relação ao material base. Verifica-se também que ocorre um aumento da dureza junto da linha de fusão. Esta linha é apenas identificável com base nas durezas. Esta encontra-se algures entre o 3º e 5º ponto do gráfico e é representado pelo 4º ponto com uma média de dureza de ( $529 \pm 84$ ) HV0.3. Este aumento pode ser indicativo da formação de martensite. Na ZTA a dureza do material chega a um pico de ( $606 \pm 138$ ) HV0.3, sendo que decresce logo de seguida até cerca de ( $350 \pm 161$ ) HV0.3 em média. Pelo facto do ferro fundido nodular possuir uma estrutura heterogénea, na ZTA há distribuição de ferrite e martensite e desse modo as durezas mostram-se bastante amplas entre si para uma mesma distância [52].

Como o perfil de durezas é satisfatório para este tipo de processamento, procedeu-se à deposição de dez cordões (uma camada) segundo os mesmos parâmetros do cordão C2.4.1. Na figura 4.31 está presente a imagem MO da secção transversal desta amostra e os respetivos valores da deposição.

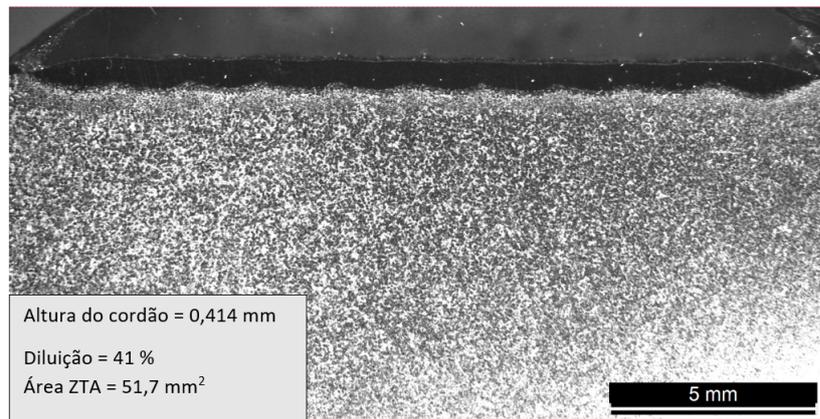


Figura 4.31: Imagem de MO de corte transversal da deposição de dez cordões (uma camada) de Ferro 39 em Ferro Fundido GJS-500

Com uma altura de cordão de 0,41 mm e uma diluição de 41%, este apresenta uma menor altura e um maior valor de diluição comparativamente com o cordão individual depositado segundo os mesmos parâmetros. O aporte térmico na deposição de dez cordões é superior ao aporte térmico na deposição de apenas um cordão e por essa razão verifica-se um aumento da diluição. A disparidade de alturas das camadas é uma situação já relatada em ensaios anteriores como na deposição do cordão A3.46.20 no conjunto (34CrNiMo6, Inconel 625), podendo indicar alterações nas condições de processamento. Para além disso, a camada revela a presença de defeitos como porosidades - figura 4.32 - e fissuras visíveis na figura 4.33.

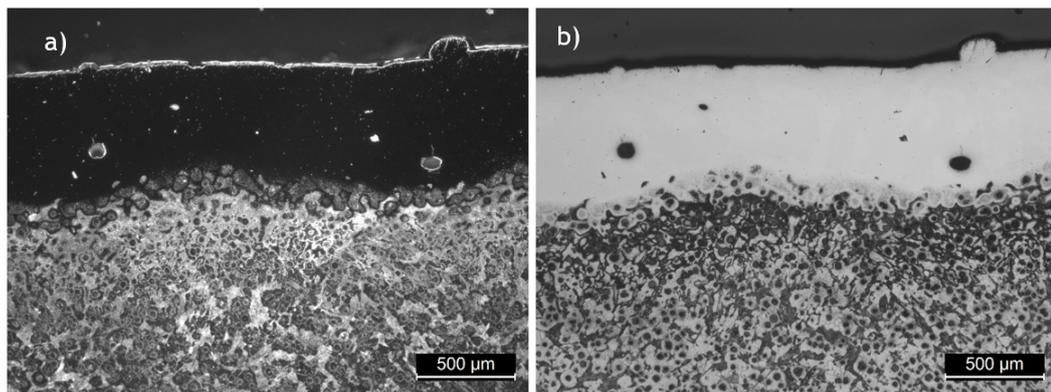


Figura 4.32: Imagem MO de corte transversal em a) campo escuro e em b) campo claro de uma camada de Ferro 39 depositado em Ferro Fundido GJS-500

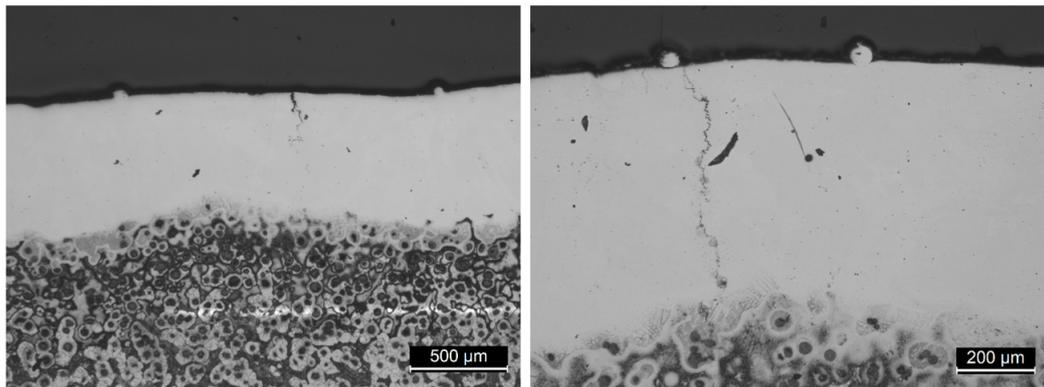


Figura 4.33: Presença de fissuras em diferentes zonas da camada de Ferro 39 depositado em Ferro Fundido GJS-500

Na figura 4.34, estão presentes imagens de MO da secção transversal da deposição de duas camadas e os referentes resultados.

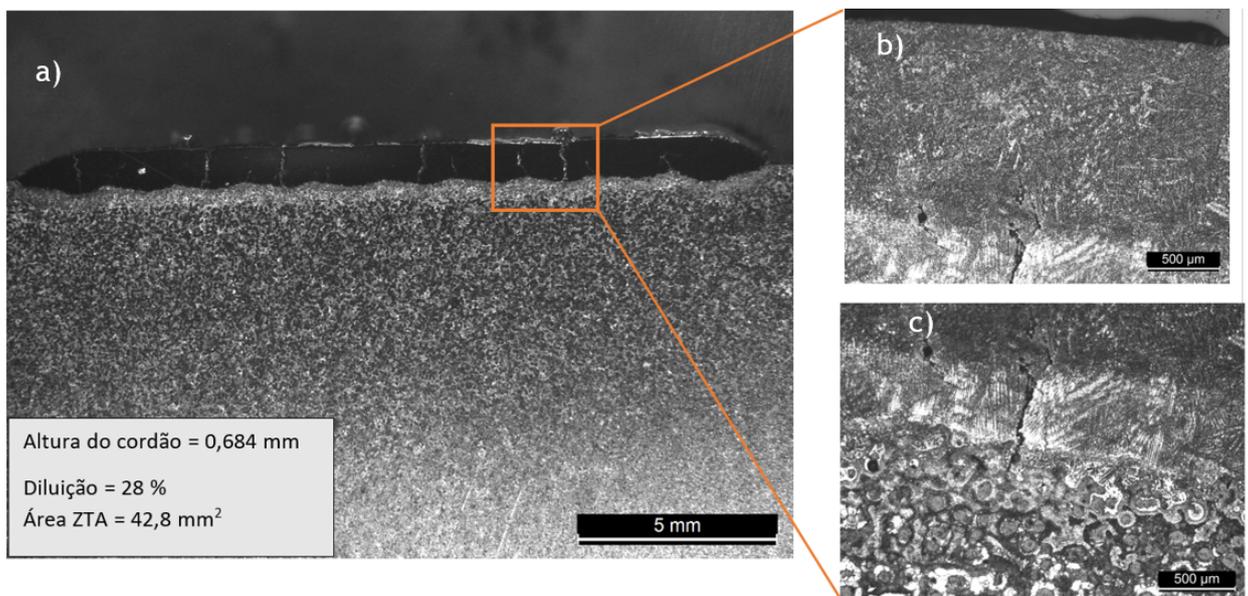


Figura 4.34: Imagem de MO de corte transversal da deposição de vinte cordões (duas camadas) de Ferro 39 em Ferro Fundido GJS-500 e respetivas ampliações b) e c) das fissuras

A altura do cordão foi de apenas 0,684 mm e a diluição de 28 %, o que se revela ser um resultado pouco promissor. No entanto a deposição de duas camadas de Ferro 39 dá origem a uma taxa de diluição menor do que na deposição de apenas uma camada. Isto porque a deposição de duas camadas implica que a deposição desta funda apenas parcialmente o substrato pois o porte térmico é distribuído por um maior volume de material depositado [46]. Na deposição de vinte cordões (duas camadas), defeitos como fissuras, são ainda mais visíveis como se pode verificar na figura 4.34.

*Ghaini et al.* [56] constataram que quanto maior a altura do material depositado em ferro fundido nodular, maior número de fissuras originadas por unidade de medida, devido à criação de maiores tensões residuais. Os mesmos autores afirmaram que na ZTA, por norma, não ocorre formação de ledeburite e carbonetos mas sim martensite [56]. A deposição de multicamadas faz com que o gradiente térmico seja maior e a diferença entre os coeficientes de expansão entre os dois materiais poderá ser tal, que seja inevitável o aparecimento tensões residuais, o que conseqüentemente leva à nucleação de fissuras no cordão. Para além disso, materiais de adição com durezas elevadas (Ferro 39 tem dureza de 453 HV) possuem maior dificuldade na acomodação de tensões termo-mecânicas [20, 57-59]. O fornecedor do pó refere a necessidade do uso de pré-aquecimento de modo a evitar o aparecimento de fissuras [39]. Num estudo realizado por *Lepski et al.* [60] depositaram-se quatro camadas de Stellite 20 num aço AISI1045 sendo possível verificar a supressão de fissuras a uma temperatura de 700 °C como se pode constatar pela figura E.1 do Anexo E. Segundo *Yang et al.* [58], a aplicação de um tratamento de recozimento imediatamente após *cladding* pode também mostrar-se benéfico [58]. Já a presença de porosidades também poderia ser eliminada através do recurso a pré-aquecimento, visto que este permite que a zona de fusão se mantenha no estado líquido por mais tempo e dessa forma, os gases aprisionados (árgon) têm mais hipóteses de a abandonarem [52].

#### 4.3.2 Conjunto ( $M_B$ , $M_A$ ): (GJS-500, Inconel625)

Nas figuras 4.35 e 4.36 estão presentes as imagens de MO das secções transversais para cada cordão depositado no conjunto (GJS-500, Inconel 625) com valores da área da ZTA, diluição, altura do cordão e respetivo rácio  $\frac{L}{A}$ .

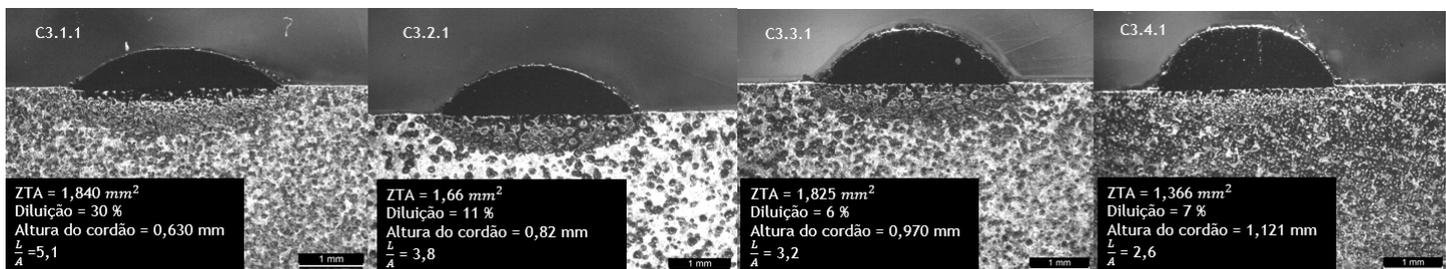


Figura 4.35: Imagem de MO de corte transversal dos cordões de Inconel 625 em Ferro Fundido GJS-500 de acordo com as condições de deposição

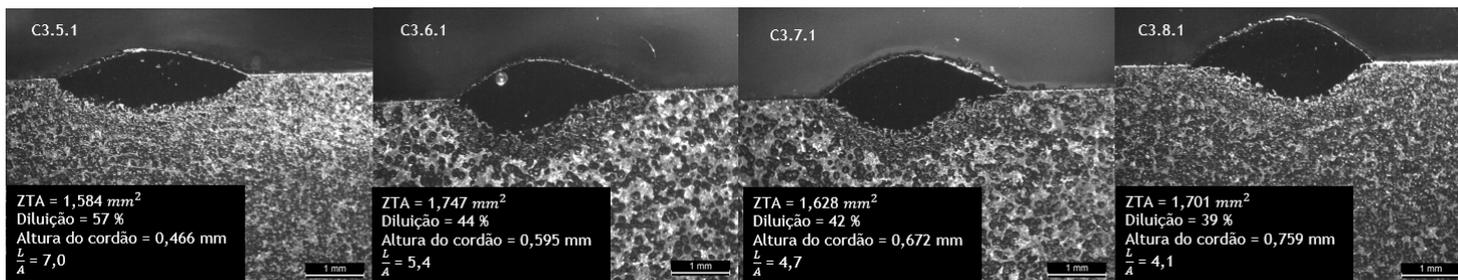


Figura 4.36: Imagem de MO de corte transversal dos cordões de Inconel 625 em Ferro Fundido GJS-500 de acordo com as condições de deposição

Por análise dos resultados, mais uma vez, tendo em conta os cordões C3.1.1 ao C3.4.1 e do C3.5.1 ao C3.6.1, verifica-se o aumento do tamanho do cordão, já que maior quantidade de material é depositado por unidade de tempo e por consequência a diluição também diminui. A altura máxima atingida é obtida no cordão C3.4.1, já que maior quantidade de material é depositado por unidade de tempo. A diluição atinge valores mínimos no cordão C3.3.1 que se revela semelhante à do cordão C3.4.1. Já a ZTA, de uma forma geral, também reduz com o aumento da taxa de deposição. Por fim o rácio  $\frac{L}{A}$  revela-se dentro dos parâmetros aceitáveis nos cordões C3.3.1 e C3.4.1. Estes podem ser vistos na figura 4.35.

Atendendo aos resultados selecionou-se os parâmetros do cordão C3.4.1 para deposições de multicamadas e de forma a avaliar este cordão, procedeu-se à realização do perfil de durezas. Este encontra-se na figura 4.37.

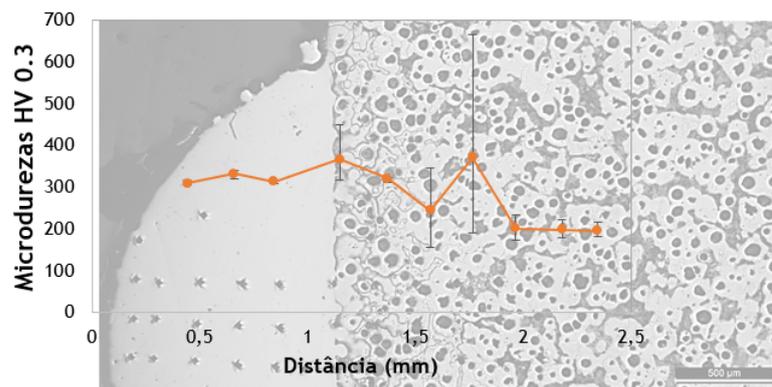


Figura 4.37: Perfil de dureza da amostra C3.4.1

Por análise do perfil de durezas, o cordão apresenta durezas constantes, enquanto que o material base não, como já observado no ponto anterior. Na linha de fusão a dureza mostra-se ligeiramente superior em média à do cordão ( $366 \pm 66 > 318 \pm 7$ ) HV0.3. Já os

valores de dureza na ZTA revelam-se bastante heterogéneos - valores médios e amplitudes dissimilares. Ainda assim a média de durezas da ZTA é de  $(311 \pm 112)$  HV0.3 sendo ligeiramente inferior à dureza do cordão e da linha de fusão. As durezas estabilizam quando se abandona a ZTA e se atinge o material base não afetado. Este possui uma dureza média de  $(198 \pm 23)$  HV0.3.

Considerando a análise acima, realizou-se a deposição de apenas dez linhas (uma camada) cujo resultado está presente na figura 4.38.

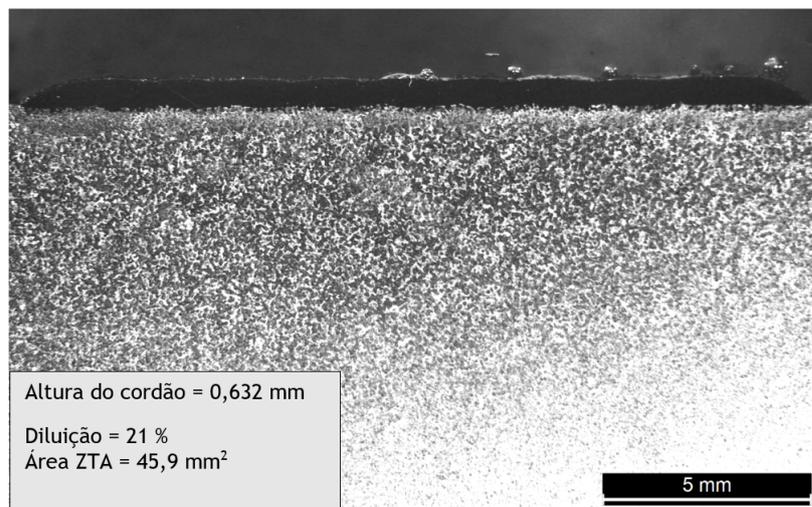


Figura 4.38: Imagem de MO de secção transversal da deposição de dez cordões (uma camada) de Inconel 625 em Ferro Fundido GJS-500

Comparando este resultado com a deposição de Ferro 39, a camada de Inconel 625 possui uma altura superior e uma taxa de diluição inferior (altura: 0,414 mm; Diluição: 41%).

É possível visualizar através da figura 4.39, que a matriz do cordão é essencialmente constituída por dendrites finas devido ao rápido arrefecimento do material depositado, o que seria expectável de acordo com a bibliografia [61].

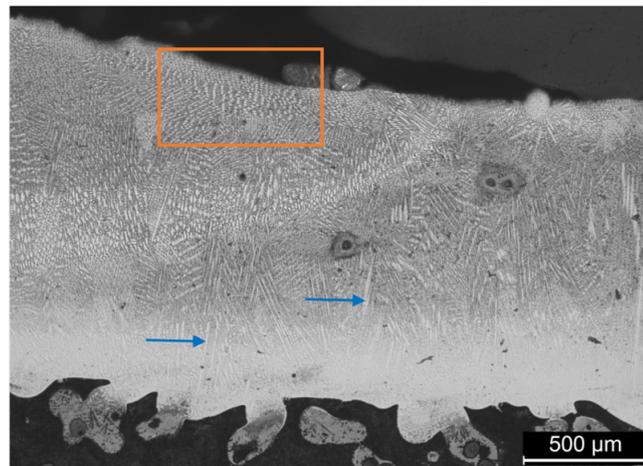


Figura 4.39: Imagem de MO de corte transversal da camada depositada do cordão de Inconel 625 de estrutura dendrítica

No topo do cordão as dendrites não apresentam uma orientação específica e são mais finas, comparando com as que se encontram mais perto da linha de fusão. As dendrites têm tendência a crescer em direção ao maior gradiente de temperatura, apresentando uma orientação quase vertical perto do material base (assinalada com setas azuis na figura 4.39), visto que este atua como um dissipador de calor devido à zona de fusão formada durante a deposição [61]. Ainda que em menor quantidade e comparativamente com a deposição de Ferro 39, a presença de poros é notória na deposição de Inconel 625 (figura 4.40).

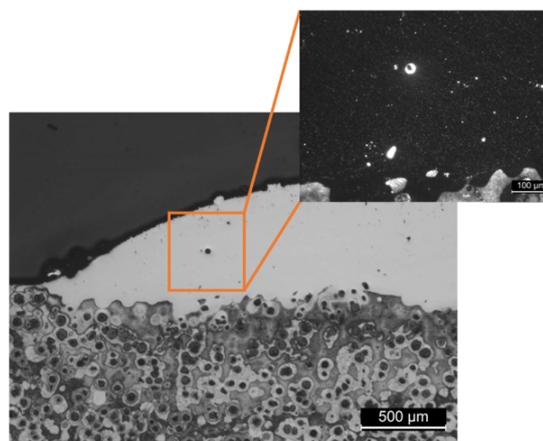


Figura 4.40: Imagem de MO de corte transversal da deposição de uma camada de Inconel 625 em Ferro Fundido GJS-500

Posteriormente, e seguindo as mesmas condições anteriores, depositaram-se vinte cordões (duas camadas) segundo as mesmas condições. O resultado desta deposição encontra-se na imagem de MO presente na figura 4.41, com os respectivos resultados

presentes. Analisando esta imagem, observa-se a ausência de fissuras contrariamente ao verificado na deposição de Ferro 39. A altura das camadas depositadas é de 1,342 mm no total e a diluição é inferior em relação à deposição de apenas uma camada (cerca de 13%).

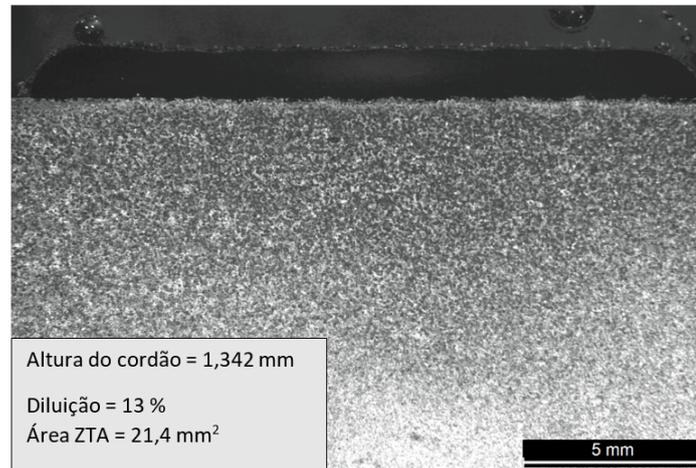


Figura 4.41: Imagem de MO de corte transversal da deposição de vinte cordões (duas camadas) de Inconel 625 em Ferro Fundido GJS-500

Na figura 4.42 estão presentes imagens de uma zona das camadas depositadas e respetiva ampliação.

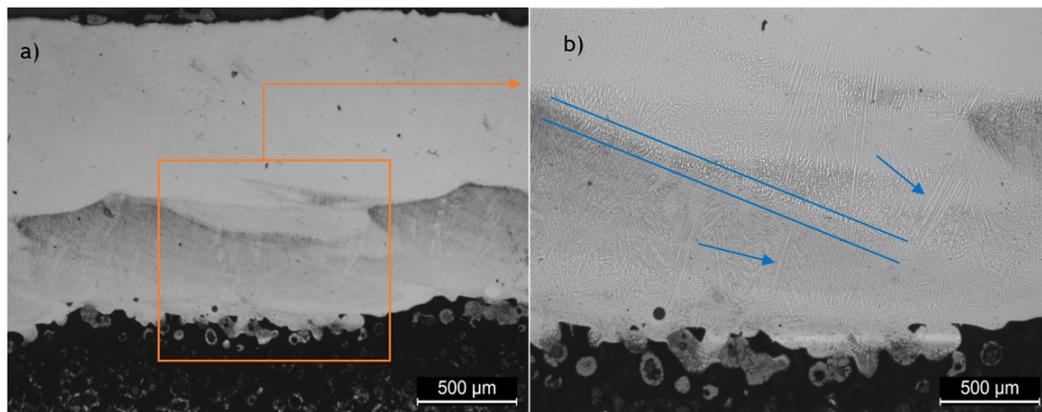


Figura 4.42: Imagem de MO de corte transversal da deposição de camadas de Inconel 625 depositadas de estrutura dendrítica, evidenciando a presença de b) uma zona de recristalização

Verifica-se novamente uma orientação das dendrites na direção da linha de fusão. É possível visualizar também a presença de uma faixa que sofreu uma recristalização (figura 4.42 b)) que se encontra na interface entre deposição de camadas adjacentes.

### 4.3.3 Conjunto ( $M_B$ , $M_A$ ): (GJS-500, Inconel 718)

Nas figuras 4.43 e 4.44 estão presentes as imagens de MO das secções transversais para cada cordão depositado no conjunto (GJS-500, Inconel 718) com valores da área da ZTA, diluição, altura do cordão e respetivo rácio  $\frac{L}{A}$ .

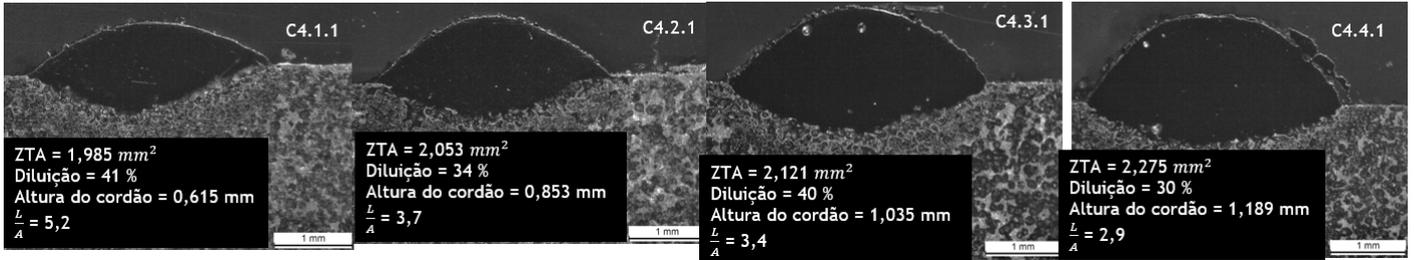


Figura 4.43: Imagem de MO de corte transversal dos cordões de Inconel 718 em ferro fundido GJS-500 de acordo com as condições de deposição

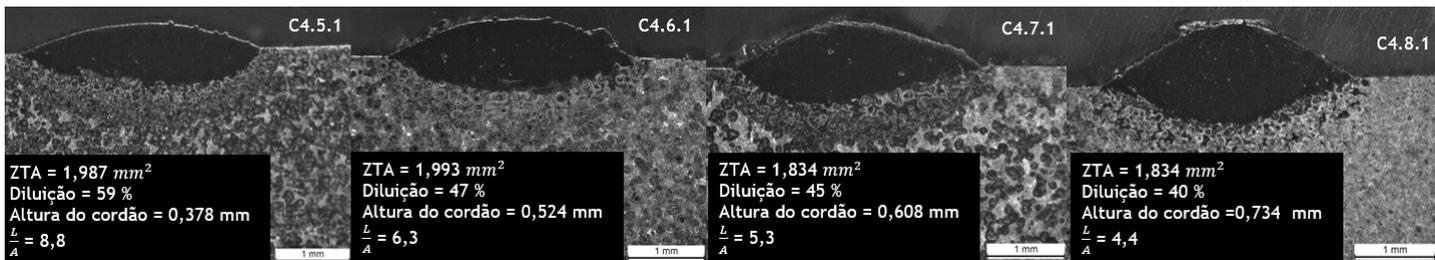


Figura 4.44: Imagem de MO de corte transversal dos cordões de Inconel 718 em ferro fundido GJS-500 de acordo com as condições de deposição

Analisando os resultados, pode-se afirmar que o aumento da taxa de deposição segue a mesma tendência que os testes realizados nos conjuntos (GJS-500, Ferro 39) e (GJS-500, Inconel 625) no que toca a valores de diluição, altura do cordão e ZTA. No entanto, na deposição do Inconel 718, a diluição revela-se superior em relação à deposição do Inconel 625 para potências mais baixas. A título de exemplo, a diluição do cordão com melhores características (C4.4.1) é superior à deposição de Inconel 625 (7% - cordão C.3.4.1). Na ficha técnica do fabricante do pó [40], a granulometria do pó de Inconel 718 é ligeiramente mais fina do que a do Inconel 625, e por essa razão, poderá ocorrer uma menor atenuação do feixe laser e por consequente o material base é atingido com maior quantidade de energia. Para além disso, outras propriedades associadas a cada pó como condutividade térmica, calor específico, densidade e temperatura de fusão, têm influência sobre as características de deposição [8, 13].

Observa-se também que os cordões depositados segundo taxas de deposição mais elevadas (17,55 e 21,45 g/min) revelam a presença de porosidades. A porosidade poderá

dever-se a uma fusão insuficiente do material de adição, o que significa que a taxa de deposição poderá estar elevada para a potência aplicada.

Porém, apesar da diluição se mostrar relativamente elevada (30%), o cordão com melhores características, é, mais uma vez, o cordão depositado segundo os mesmos parâmetros que os conjuntos de materiais anteriores (cordão C4.4.1 figura 4.43). No entanto, em futuras deposições com recurso a Inconel 718 como material de adição, os parâmetros adotados deverão ser repensados para que não se verifique a presença de poros no cordão e uma tamanha interferência no material base como verificado.

No cordão C4.4.1 foi realizado um perfil de durezas visto que este foi, para este conjunto de materiais, aquele que melhores resultados apresentou. O seu perfil de durezas encontra-se presenta na figura 4.45. Por análise deste, verifica-se que ocorre um decréscimo da dureza ao longo do cordão de dureza média de  $(266\pm 39)$  HV0.3. O facto do topo do cordão sofrer um arrefecimento mais acentuado que as zonas mais interiores do cordão poderá explicar este abaixamento da dureza em função da distância. Este fenómeno ocorreu num estudo realizado por *Jiang et al.* [32] em que se depositou Ni60A em aço Cr12 (Aço ferramenta AISI D3). Outros investigadores reportaram também variações de durezas ao longo do cordão. *Sun et al.*[62] realizaram a deposição de Stellite 6 num substrato de aço inoxidável AISI 420. Estes verificaram que a dureza do cordão é linearmente dependente da percentagem de diluição: a dureza diminui ao longo do cordão com o aumento da diluição, devido a alterações na composição química do mesmo [62]. Contrariamente ao que o fornecedor dos pós descreve [40], a dureza do cordão de Inconel 718 mostrou-se inferior à dureza dos cordão de Inconel 625 possivelmente devido influência da taxa de diluição nas propriedades do cordão. Na linha de fusão ocorre um aumento da dureza que se mostra superior à dureza da ZTA ( $402\pm 48 > 247\pm 58$ ) HV0.3. Para este conjunto de materiais verifica-se uma grande amplitude de resultado a partir da linha de fusão, devido às razões já mencionadas no conjunto de materiais (GJS-500, Ferro 39).

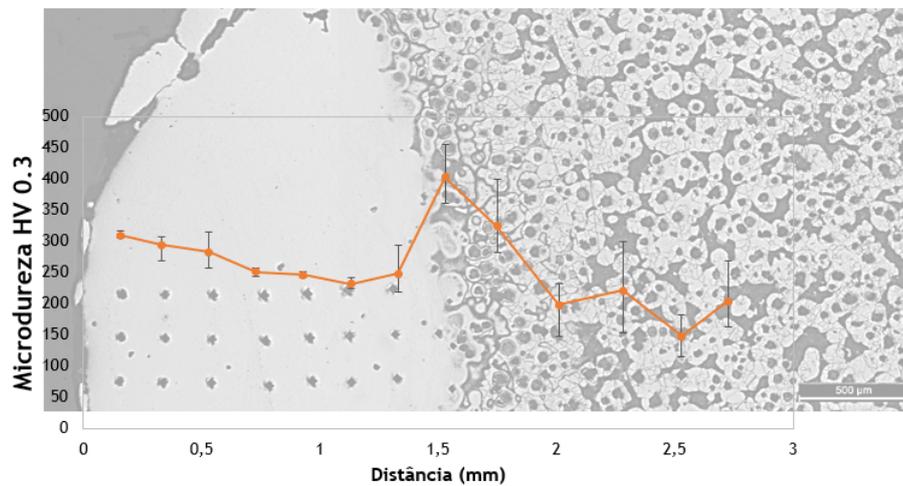


Figura 4.45: Perfil de dureza da amostra C4.4.1

Para o ferro fundido, de entre as condições testadas, potência de 1000 W, velocidade de 7 mm/s e taxas de deposição de 21,45 g/min, permitiram a obtenção de cordões com as melhores características na deposição de Ferro 39 e Inconel 625. Já os valores de Inconel 718 ficaram um pouco aquém dos restantes dois materiais de adição.

# Capítulo 5

## Conclusões

Inicialmente, os resultados apresentaram-se insuficientes para atingir a meta pretendida em relação à qualidade de deposição. A este fenómeno está associada a falta de reprodutibilidade que está de mãos dadas com o desconhecimento do funcionamento e manutenção de todos os elementos constituintes do sistema de *Laser Cladding*. O seu conhecimento representa uma mais valia na obtenção de uma deposição com melhores características e produção mais eficiente. Este trabalho foi essencial para a obtenção de *know how*, e as melhorias implementadas, assim como as otimizações realizadas, permitiram obtenção de deposições de cordões com qualidade.

Das diferentes deposições realizadas durante este estudo, foi possível aferir:

- que a diminuição da potência laser permite a diminuição da diluição, bem como da ZTA;
- um aumento na velocidade permite, por norma, a diminuição da diluição, na medida em que menor quantidade de energia incide no material base;
- o aumento da taxa de deposição, implica maior quantidade de material depositado e conseqüentemente a diluição, a ZTA e o rácio  $\frac{L}{A}$  diminuem.

Os melhores resultados são expressos por taxas de diluição entre 6-7 % e alturas de cordão a ultrapassar os 0,7 mm, os quais foram atingidos com o conjunto de materiais (34CrNiMo6, Inconel 625) a 1100 W de potência, velocidades entre os 7 e 8 mm/s e taxas de deposição de 23,4 g/min. Seguindo os mesmos parâmetros, foi possível a deposição de multicamadas com resultados igualmente satisfatórios. Comparando os diferentes materiais de adição, o Inconel 625 foi o material que permitiu a obtenção dos melhores resultados não só no aço, mas também no ferro fundido. Também na deposição de multicamadas no Aço 34CrNiMo6 e Ferro Fundido GJS-500, este material mostrou a sua superioridade em relação aos restantes. No entanto, o Inconel 625 é o que se apresenta economicamente mais dispendioso (se descartado o Inconel 718), sendo necessário considerar o custo/qualidade na reparação de futuros componentes.

Em relação aos restantes materiais de adição, os parâmetros deverão ser repensados na medida em que as características de deposição dependem também das propriedades dos diferentes pós. No entanto, o surgimento de defeitos como porosidades é comum

a quase todas as deposições. Já fissuras têm maior predominância na deposição de multicamadas resultado de tensões residuais superiores. Também foi possível verificar, contra o que seria expectável, a presença de microfissuras na deposição de multicamadas de Inconel 625 em substrato submetido a pré-aquecimento. Estes resultados são o ponto de partida para novos estudos/otimizações a serem realizados, cujo o objetivo será, não só minimizar os defeitos nas deposições, mas também aumentar a eficiência do processo cumprindo os requisitos requeridos na recuperação de componentes.

## 5.1 Trabalho Futuro

Ao longo deste trabalho algumas melhorias foram sendo implementadas devido aos resultados iniciais se revelarem tão discrepantes dos testes realizados previamente. O primeiro passo foi a aquisição de um armário para secagem de pós. Outra melhoria realizada foi o alinhamento do feixe laser.

Existem ainda vários pontos a serem melhorados no processo. A garantia de que a máquina está em pleno funcionamento é basilar para que a reprodutibilidade do processo se mantenha. Assim, a elaboração e cumprimento de um plano de manutenção da máquina laser é necessária.

De modo a prevenir o aparecimento de fissuras e porosidades é necessário, para além da utilização dos parâmetros adequados, seguir um procedimento adequado. A limpeza da superfície do material base, bem como o uso de pré-aquecimento, são ações a ter em conta antes e durante o processo. O uso de maçarico não garante a homogeneidade de temperaturas ao longo da peça, pelo que a aquisição de um indutor de calor com recurso a pirómetro pode ser uma mais valia para garantir um produto final de qualidade superior.

Para além do estudo da influência de diferentes materiais de adição, o que se impõe é o aumento da produtividade. Cumpridos os objetivos propostos neste trabalho, a diminuição do tempo de processamento é o próximo passo a efetuar.

Por fim, e devido à complexidade da técnica de *Laser Cladding* o estudo da influência de outros parâmetros como o passo (*offset*), a trajetória delineada, a quantidade de gás de transporte e proteção, entre muitos outros, é de extrema importância na obtenção de melhores resultados.

# Referências

- [1] Dongdong Gu. *Laser additive manufacturing of high-performance materials*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 01 2015.
- [2] C. Leyens and E. Beyer. 8 - innovations in laser cladding and direct laser metal deposition. In J. Lawrence and D.G. Waugh, editors, *Laser Surface Engineering*, Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials, pages 181 - 192. Woodhead Publishing, 2015. ISBN 978-1-78242-074-3.
- [3] Ehsan Toyserkani, Amir Khajepour, and Stephen F Corbin. *Laser cladding*. CRC press, 2005. ISBN 0-8493-2172-7.
- [4] Tiago Brito e Faro; José Lino Alves Filipe Rosas Coutinho. Fabrico aditivo metálico - desenvolvimento de uma solução industrial para peças de grandes dimensões. *Tecno Metal*, (227):10-12, nov 2016.
- [5] Wei Ya. *Laser materials interactions during cladding: analyses on clad formation, thermal cycles, residual stress and defects*. PhD thesis, University of Twente, 10 2015.
- [6] T Torims. The application of laser cladding to mechanical component repair, renovation and regeneration. *DAAAM International Scientific Book*, 12:587-608, 2013.
- [7] Jyotsna Dutta Majumdar and Indranil Manna. *Laser-assisted fabrication of materials*, volume 161. Springer Science & Business Media, 2012.
- [8] Johannes Tjaard Hofman. Development of an observation and control system for industrial laser cladding, 2 2009.
- [9] Joonas Pekkarinen et al. *Laser cladding with scanning optics*. PhD thesis, Lappeenranta University of Technology, 08 2014.
- [10] EM Birger, GV Moskvitin, AN Polyakov, and VE Arkhipov. Industrial laser cladding: current state and future. *Welding International*, 25(03):234-243, 2011.
- [11] Steffen Nowotny, Siegfried Scharek, Eckhard Beyer, and Karl-Hermann Richter. Laser beam build-up welding: precision in repair, surface cladding, and direct 3d metal deposition. *Journal of Thermal Spray Technology*, 16(3):344-348, 2007.
- [12] *ERLASER® HARD+CLAD Manual de Instruções- Capítulo 2 Descrição*. ERLAS GmbH - light as a tool, .
- [13] M.F. Schneider and Marcel Fredrik Schneider. *Laser cladding with powder*. PhD thesis, Universiteit Twente, 03 1998.
- [14] Fraunhofer IWS. Powder nozzles for lateral feed, . URL [https://www.iws.fraunhofer.de/en/business\\_fields/surface\\_treatment/laser\\_cladding/system\\_technology/cyclone\\_powder\\_nozzle.html](https://www.iws.fraunhofer.de/en/business_fields/surface_treatment/laser_cladding/system_technology/cyclone_powder_nozzle.html). Acesso em 2018-05-30.
- [15] Borges BMFDCA. *Laser cladding using filler powder and wire: productivity and quality*. PhD thesis, Dissertation, Universidade Tecnica de Lisboa, Lisbon, 2008.
- [16] A Weisheit, G Backes, R Stromeyer, A Gasser, K Wissenbach, and R Poprawe. Powder injection: the key to reconditioning and generating components using laser cladding. In *Proceedings of International Congress on Advanced Materials, Their Processes and Applications*, pages 1-7, 2001.
- [17] Fraunhofer IWS. System engineering for powder-based laser cladding, . URL [https://www.ilt.fraunhofer.de/content/dam/ilt/en/documents/product\\_and\\_services/laser\\_material\\_processing/B\\_System\\_Engineering\\_for\\_Powder-Based\\_Laser\\_Cladding\\_2013.pdf](https://www.ilt.fraunhofer.de/content/dam/ilt/en/documents/product_and_services/laser_material_processing/B_System_Engineering_for_Powder-Based_Laser_Cladding_2013.pdf). Acesso em 2018-05-30.
- [18] *ERLASER® HARD+CLAD Manual de Instruções- Capítulo 3 Estrutura e funcionamento*. ERLAS GmbH - light as a tool, .
- [19] U De Oliveira, V Ocelik, and J Th M De Hosson. Analysis of coaxial laser cladding processing conditions. *Surface and Coatings Technology*, 197(2-3):127-136, 2005.

- [20] Mona Soodi. *Investigation of laser deposited wear resistant coatings on railway axle steels*. PhD thesis, RMIT University, 07 2013.
- [21] *ERLASER® HARD+CLAD Part III:Cladding*. ERLAS GmbH - light as a tool, .
- [22] Dr.-Ing. Roland Dierken. *Training ERLASER® HARD+CLAD PART III: CLADDING*. ERLAS GmbH - light as a tool.
- [23] Yuwen Sun and Mingzhong Hao. Statistical analysis and optimization of process parameters in ti6al4v laser cladding using nd: Yag laser. *Optics and Lasers in Engineering*, 50(7):985-995, 2012.
- [24] Dara Moazami Goodarzi, Joonas Pekkarinen, and Antti Salminen. Effect of process parameters in laser cladding on substrate melted areas and the substrate melted shape. *Journal of Laser Applications*, 27(S2):S29201, 2015.
- [25] DF de Lange, JT Hofman, and J Meijer. Influence of intensity distribution on the meltpool and clad shape for laser cladding. In *Proceedings of the third International WLT-conference on Lasers in Manufacturing, 14-17 June 2005, Munich, Germany*. AT-Fachverlag GmbH Stuttgart, 2005.
- [26] H Zhang, Y Shi, M Kutsuna, and GJ Xu. Laser cladding of colmonoy 6 powder on aisi316l austenitic stainless steel. *Nuclear engineering and design*, 240(10):2691-2696, 2010.
- [27] J Leunda, C Soriano, C Sanz, and V García Navas. Laser cladding of vanadium-carbide tool steels for die repair. *Physics Procedia*, 12:345-352, 2011.
- [28] Joonas Pekkarinen. Scanning optics enabled possibilities and challenges in laser cladding. *Physics Procedia*, 78:285-295, 2015.
- [29] Prakash Kattire, Santanu Paul, Ramesh Singh, and Wenyi Yan. Experimental characterization of laser cladding of cpm 9v on h13 tool steel for die repair applications. *Journal of Manufacturing Processes*, 20:492-499, 2015.
- [30] I Hemmati, V Ocelik, and J Th M De Hosson. The effect of cladding speed on phase constitution and properties of aisi 431 stainless steel laser deposited coatings. *Surface and Coatings Technology*, 205(21):5235-5239, 2011.
- [31] JL Chen, J Li, R Song, LL Bai, JZ Shao, and CC Qu. Effect of the scanning speed on microstructural evolution and wear behaviors of laser cladding nicrbsi composite coatings. *Optics & Laser Technology*, 72:86-99, 2015.
- [32] Jibin Jiang, Guofu Lian, Mingsan Xu, Chunyu Li, Bingsan Chen, and Bingbing Li. Influence of preheating temperature on mechanical properties of laser cladding layer. In *ASME 2016 11th International Manufacturing Science and Engineering Conference*, pages V001T02A031-V001T02A031. American Society of Mechanical Engineers, 2016.
- [33] Zhanqi Zhang, Zhongjun Yin, Tian Han, and Andy CC Tan. Fracture analysis of wind turbine main shaft. *Engineering Failure Analysis*, 34:129-139, 2013.
- [34] *ESPECIFICAÇÕES - BOZD*. Universal Afir, Av. 1º de Maio - Marinha Grande, 05 2016.
- [35] *VCL 140 - Universal AFIR*. Universal Afir, Av. 1º de Maio - Marinha Grande, 05 2016.
- [36] Gebefe. En(-1563)-gjs-500-7 (ggg50) continuously cast spheroidal graphite iron. URL <http://www.gebefe.com/pdf/EN-GJS-500-7.pdf>. Acesso em 2018-01-12.
- [37] Dijkkamp. Characteristics of ggg50. URL <http://www.dijkkamp.nl/en/materials/ggg50-en-gjs-500-7/>. Acesso em 2018-01-11.
- [38] *Material Product Data Sheet - Martensitic Stainless Steel Powders for Thermal Spray*. Oerlikon Metco, 2017.
- [39] *PLASweld™ Ferro 39 - Powder for laser and plasma arc surfacing*. UTP Maintenance by voestalpine, 12 2016.

- [40] *Material Product Data Sheet Nickel-Based Superalloy Powders for Laser Cladding and Laser-Additive Manufacturing*. Oerlikon Metco, 2017.
- [41] ISO 6507-1:2018(E). Metallic materials – Vickers hardness test. Standard, International Organization for Standardization, Geneva, CH, 2018.
- [42] DS Gusev and AB Lyukhter. Influence of technological parameters on the geometry of single-track laser clad nickel based alloy on grey cast iron substrate. In *Journal of Physics: Conference Series*, volume 941, page 012037. IOP Publishing, 2017.
- [43] Laura Cordova, Mónica Campos, and Tiedo Tinga. Assessment of moisture content and its influence on laser beam melting feedstock. 10 2017. URL <https://www.europm2017.com/>. Euro PM2017 Congress amp; Exhibition : European Annual Powder Metallurgy congress and exhibition, EuroPM2017 ; Conference date: 01-10-2017 Through 05-10-2017.
- [44] XP Li, KM O'Donnell, and TB Sercombe. Selective laser melting of al-12si alloy: Enhanced densification via powder drying. *Additive Manufacturing*, 10:10-14, 2016.
- [45] Feng Jie Tian, Wei Jun Liu, Xiao Feng Shang, and Guang Yang. Study on misalignment of focus position in laser metal deposition shaping processing. In *Applied Mechanics and Materials*, volume 16, pages 1218-1222. Trans Tech Publ, 2009.
- [46] Tanaji Paul, S Habib Alavi, Sourabh Biswas, and Sandip P Harimkar. Microstructure and wear behavior of laser clad multi-layered fe-based amorphous coatings on steel substrates. *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*, 2(4):231-241, 2015.
- [47] Pedro Ramiro, Amaia Alberdi, Mikel Ortiz, Aitzol Lamikiz, Eneko Ukar, et al. Characteristics of fe-, ni-and co-based powder coatings fabricated by laser metal deposition without preheating the base material. *Procedia CIRP*, 2018.
- [48] Peng Yi, Pengyun Xu, Changfeng Fan, Chengkai Li, and Yongjun Shi. The effect of dynamic local self-preheating in laser cladding on grey cast iron. *Strojniski Vestnik/Journal of Mechanical Engineering*, 61(1), 2015.
- [49] Jonne Näkki, Jari Tuominen, and Petri Vuoristo. A comparison of hot cracking sensibility of some alloy 625 powders on laser cladding. In *The International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO) paper ft*, volume 505, 2012.
- [50] GP Dinda, AK Dasgupta, and J Mazumder. Laser aided direct metal deposition of inconel 625 superalloy: Microstructural evolution and thermal stability. *Materials Science and Engineering: A*, 509(1-2): 98-104, 2009.
- [51] TE Abioye, DG McCartney, and AT Clare. Laser cladding of inconel 625 wire for corrosion protection. *Journal of Materials Processing Technology*, 217:232-240, 2015.
- [52] Yongjian Li, Shiyun Dong, Shixing Yan, Peng He, and Binshi Xu. Phase evolution of ductile iron during laser cladding processing. *Surface and Coatings Technology*, 339:37-47, 2018.
- [53] Hakan Paydas, Anne Mertens, Raoul Carrus, Jacqueline Lecomte-Beckers, and J Tchoufang Tchoundjang. Laser cladding as repair technology for ti-6al-4v alloy: Influence of building strategy on microstructure and hardness. *Materials & Design*, 85:497-510, 2015.
- [54] Chao Zeng, Wei Tian, Wen He Liao, and Liang Hua. Microstructure and porosity evaluation in laser-cladding deposited ni-based coatings. *Surface and Coatings Technology*, 294:122-130, 2016.
- [55] V Ocelík, I Furár, and J Th M De Hosson. Microstructure and properties of laser clad coatings studied by orientation imaging microscopy. *Acta materialia*, 58(20):6763-6772, 2010.
- [56] F Malek Ghaini, M Ebrahimnia, and Sh Gholizade. Characteristics of cracks in heat affected zone of ductile cast iron in powder welding process. *Engineering Failure Analysis*, 18(1):47-51, 2011.
- [57] Changmin Lee, Hyungkwon Park, Jaehong Yoo, Changhee Lee, WanChuck Woo, and Sunhong Park. Residual stress and crack initiation in laser clad composite layer with co-based alloy and wc+ ncr. *Applied Surface Science*, 345:286-294, 2015.

- [58] Yongqiang Yang and HC Man. Microstructure evolution of laser clad layers of w-c-co alloy powders1. *Surface and Coatings technology*, 132(2-3):130-136, 2000.
- [59] Zhikun Weng, Aihua Wang, Yuying Wang, Dahui Xiong, and Huiqun Tang. Diode laser cladding of fe-based alloy on ductile cast iron and related interfacial behavior. *Surface and Coatings Technology*, 286:64-71, 2016.
- [60] Dietrich Lepski and Frank Brückner. Laser cladding. In *The Theory of Laser Materials Processing*, pages 235-279. Springer, 2009.
- [61] YN Zhang, X Cao, and P Wanjara. Microstructure and hardness of fiber laser deposited inconel 718 using filler wire. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 69(9-12):2569-2581, 2013.
- [62] S Sun, Y Durandet, and M Brandt. Parametric investigation of pulsed nd: Yag laser cladding of stellite 6 on stainless steel. *Surface and Coatings Technology*, 194(2-3):225-231, 2005.

# Anexo A

Pó fornecido através do canal 1 da figura A.1 que abandona o injetor através de três orifícios (3 da figura A.1). O gás de proteção e transporte têm passagem no canal 2 da figura A.1, enquanto que a passagem da radiação laser, dá-se através do furo central (4 figura A.1).

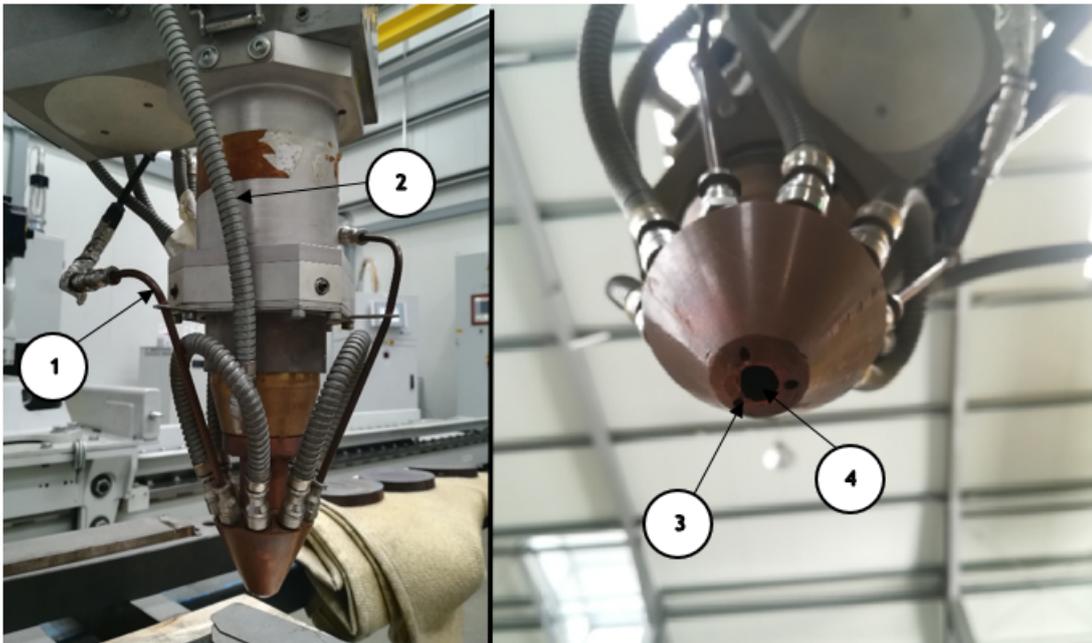


Figura A.1: Injetor usado para realização das deposições

## Anexo B

Dos testes realizados anteriormente no aço ferramenta (D), partiu-se dos parâmetros que permitiriam as menores taxas de diluição obtidas na deposição de cordões únicos:

- Diluição: 18,75% - P= 1400 W; v=10 mm/s; t= 11,7 g/min;
- Diluição: 20,37% - P= 1400 W; v=12,5 mm/s; t= 9,7 g/min;
- Diluição: 22,8% - P= 1200 W; v=10 mm/s; t= 9,7 g/min.

# Anexo C

Tabela C.1: Parâmetros usados na deposição de Metco 42 C no aço ferramenta

Cordão	Potência (W)	Velocidade (mm/s)	Taxa de deposição (g/min)	Pré aquecimento
D1.1.1	1200	10	9,7	150-200
D1.2.1	1200	12,5	11,7	150-200
D1.3.1	1400	10	9,7	150-200
D1.4.1	1400	12,5	11,7	150-200
D1.5.1	1200	10	11,7	150-200
D1.6.1	1200	12,5	9,7	150-200
D1.7.1	1400	10	11,7	150-200
D1.8.1	1400	12,5	9,7	150-200

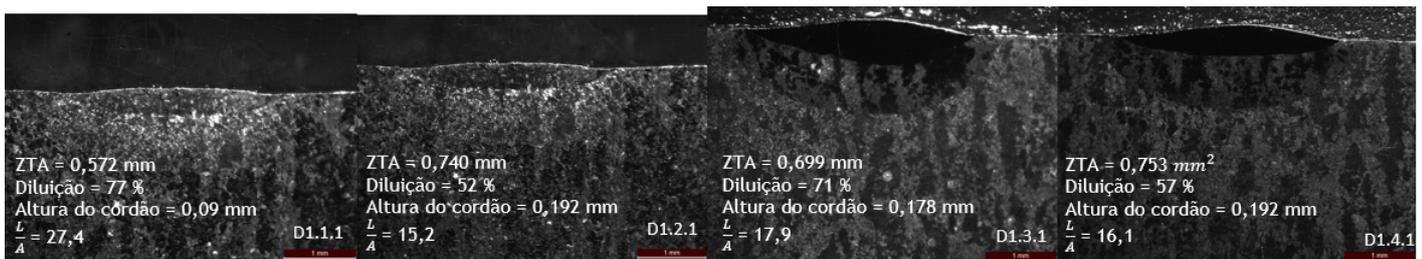


Figura C.1: Imagens de MO de corte transversal dos cordões de Metco 42C depositados no aço ferramenta de acordo com as condições de deposição

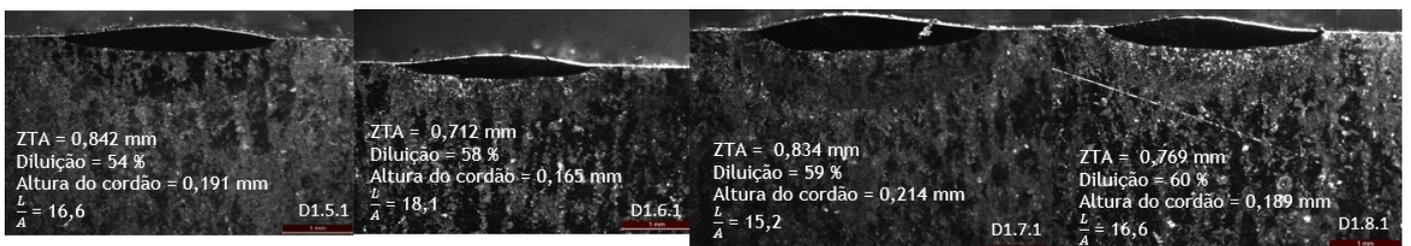


Figura C.2: Imagens de MO de corte transversal dos cordões de Metco 42C depositados no aço ferramenta de acordo com as condições de deposição

## Anexo D

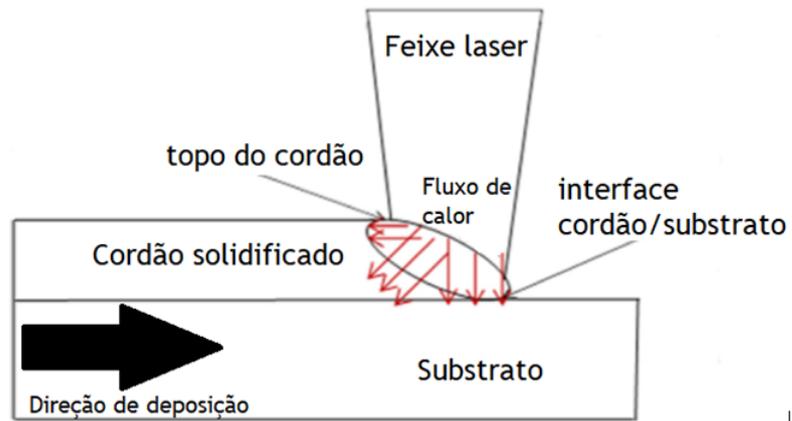


Figura D.1: Esquema legendado da direção do fluxo de calor na deposição de um cordão; adaptado de [51]

## Anexo E

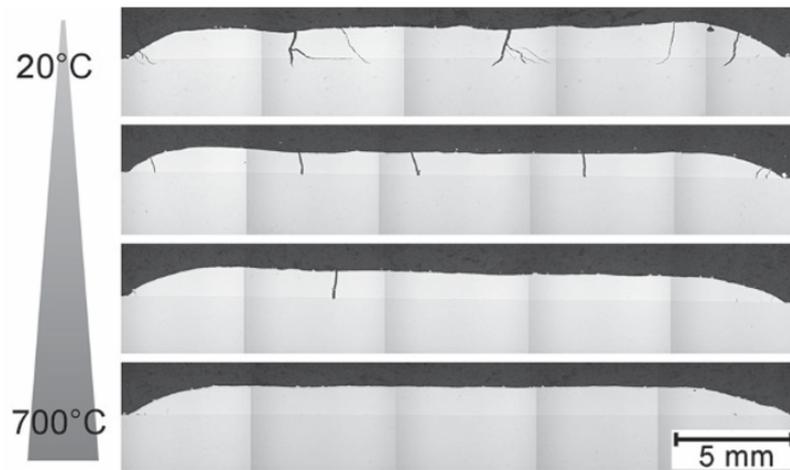


Figura E.1: Diminuição da probabilidade do aparecimento de fissuras com o aumento da temperatura de pré-aquecimento na deposição de Stellite 20 ( $\approx 58$  HRC) em AISI1045 [60]