

José Carlos Barbosa Pires

Licenciado em Ciências da Engenharia Mecânica



**Produção de peças com gradiente funcional de
Inconel 625/aço inoxidável 316L através de Wire and
Arc Additive Manufacturing (WAAM)**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
[Engenharia Mecânica]

Orientador: Professora Doutora Rosa Maria Miranda,
Professora Associada e com agregação
Aposentada, Faculdade Ciências e Tecno-
logia da Universidade Nova de Lisboa

Co-orientadores: Prof. Doutor João Oliveira, Professor Auxi-
liar Convidado, Faculdade Ciências e Tec-
nologia da Universidade Nova de Lisboa

Setembro, 2019



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Production of functionally graded Inconel 625/316L stainless steel parts by Wire and Arc Additive Manufacturing

Copyright © José Carlos Barbosa Pires, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

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

Para a minha família

Agradecimentos

Primeiro e mais importante, gostava de expressar o meu sincero agradecimento à minha orientadora Professora Rosa Miranda pela confiança depositada em mim num momento mais difícil, pela oportunidade de ingressar neste grupo de trabalho e desenvolver este tema e pelas lições que me deu que vou guardar para a vida.

Quero expressar o meu agradecimento ao meu coorientador, o Professor João Oliveira pela disponibilidade, por todas as dúvidas tiradas e pela orientação ao longo deste processo. A sua ajuda na análise de microestruturas e a sua recomendação da literatura permitiu que este trabalho fosse possível.

Posteriormente gostava de reconhecer todo o apoio fornecido pelo Valdemar Duarte e pelo Tiago Rodrigues. Foram incansáveis durante a processo experimental, acompanhando-me ao longo do caminho, explicando-me o funcionamento de diversos equipamentos e respondendo a inúmeras questões, inclusive fora do horário de expediente, sempre com o maior profissionalismo.

O meu obrigado ao Sr. António Campos e ao Sr. Paulo Magalhães por partilharem comigo o conhecimento que advém da experiência de trabalhar no laboratório e pela ajuda durante o trabalho experimental.

Um especial obrigado ao meu avô, Patrício Pires por tornar esta realidade possível e por toda a confiança demonstrada em mim durante a minha vida. É graças a um gesto de bondade da parte dele que tenho a oportunidade de escrever este documento.

Aos meus pais, Fátima e Carlos, por nunca duvidarem de mim e por toda a ajuda prestada durante a minha vida. A educação que me forneceram tornou-me no homem que sou e o seu apoio incondicional permite-me apontar para objetivos maiores.

Gostava de agradecer aos meus amigos Mário Fernandes, Filipe Ferreira e Rodrigo Pessoa por me acompanharem durante o curso, pelo apoio nas piores alturas e por todas as experiências partilhadas. Aos meus colegas de laboratório, mas particularmente ao João Lopes, que realizou a tese simultaneamente por todos os “está tudo bem” que me dirigiu e pelo apoio nos momentos de cansaço.

Finalmente um agradecimento especial à Maria João, pela compreensão e companheirismo demonstrados nos meses passados. Por toda a calma que me transmitiu nos momentos de aflição e por todos os momentos maravilhosos que me proporcionou nos últimos anos. Sem ela, nada do que atingi num passado recente seria possível.

O fabrico de materiais com gradiente de funcionalidade reveste-se de algumas dificuldades pelo que as tecnologias de Fabrico Aditivo constituem uma alternativa interessante. A tecnologia de deposição directa de energia usando arco eléctrico e fio (WAAM - Wire and Arc Additive Manufacturing) apresenta algumas vantagens, como sejam: baixos custos de equipamento inicial, de funcionamento e de manutenção, elevada taxa de deposição elevada e capacidade de produzir peças com geometria complexa sem defeitos internos.

Este trabalho teve como objectivo geral estudar a viabilidade do WAAM para a produção de peças com gradiente funcional depositando alternadamente aço inoxidável 316L e Inconel 625, dois materiais com excelente resistência à corrosão e boas propriedades mecânicas a alta temperatura. Para isso adaptou-se o equipamento de WAAM existente no NTI/DEMI de modo a poder alimentar dois fios na direcção do arco eléctrico. Foram feitas deposições com percentagens variáveis de cada um dos materiais e variando os parâmetros de processo e estudou-se o efeito destes na qualidade dos cordões depositados.

Com parâmetros otimizados, fizeram-se múltiplas deposições sucessivas em altura de modo a construir uma “parede” com gradiente de composição química. Analisou-se a microestrutura face ao diagrama de equilíbrio de fases e a dureza das amostras.

Confirmou-se a viabilidade da utilização do sistema desenvolvido para a deposição de dois fios simultaneamente bem como para a criação de um gradiente de microestruturas ao longo do eixo vertical. Observou-se a existência de carbonetos dispersos confirmados pelos valores de dureza medidos. Na zona mais rica em Inconel, com cerca de 70 at. %, foi detetada uma fissura devida aos diferentes coeficientes de expansão linear do Inconel e do aço inoxidável.

Este foi o primeiro estudo deste tipo realizado no NTI, e requer como trabalho futuro a avaliação das propriedades mecânicas e da resistência à corrosão a alta temperatura, entre outras propriedades relevantes para aplicações industriais.

Palavras-chave: Material com gradiente de funcionalidade, MIG, TIG, Fabrico aditivo, arco eléctrico, WAAM, AISI 316L, Inconel

The production of functionally graded materials presents some difficulties, what brands additive manufacturing technologies an interesting alternative Direct deposition technologies that use electric arc and wire (WAAM - Wire and Arc Additive Manufacturing) presents some advantages such as: low cost on initial equipment, functioning and maintenance, high deposition rate and the ability to produce complex geometries without internal defects.

This study aims to research the feasibility of WAAM to produce functional graded components alternating between 316L stainless steel and Inconel 625, two materials known for their excellent corrosion resistance and great mechanical properties at high temperatures. With that purpose, the WAAM equipment present on NTI/DEMI was adapted to feed two wires using an electric arc as an energy source (Tungsten Inert Gas). Depositions with variable percentages of each of the materials were made and by changing the parameters was possible to study the effect on the quality of the deposited welds.

With the optimized parameters, multiple depositions were made in height to create a “wall” with a chemical gradient through its height. The microstructure was analyzed taking into consideration the phase diagram and the hardness of the samples.

The feasibility of the utilization of the developed system was confirmed to the deposition of two wires simultaneously as well as to the creation of a microstructural gradient through the vertical axis. It was observed the existence of dispersed carbides, which was confirmed by the micro hardness values measured. In the Inconel-rich area, about 70 at. %, a crack was detected due to the significantly different expansion coefficient of the two deposited materials.

This was the first study of this kind on the NTI and requires further studies on the evaluation of the mechanical properties and corrosion resistance at high temperatures, amongst other relevant properties to industrial applications.

Keywords: Functionally graded materials, GTAW, Additive manufacturing, WAAM, AISI 316L, Inconel

LISTA DE ABREVIATURAS

ASTM	American Society for Testing and Materials
CAD	Computer aided design
EBM	Electron Beam Melting
FA	Fabrico aditivo
FGM	Materiais de gradiente funcional
GMAW	Gas Metal Arc Welding
GTAW	Gas Tungsten Arc Welding
HIP	Hot Isostatic Pressure
HV	Dureza de Vickers
I	Corrente
LMD	Laser Metal Deposition
MIG	Tungsten Inert Gas
MoC	Carboneto de molibdenio
NbC	Carboneto de nióbio
NDT	Ensaio não destrutivo
PAW	Plasma Arc Welding
RP	Prototipagem rápida
SLM	Selective Laser Melting
SLS	Selective Laser Sintering
TS	Velocidade de avanço
TIG	Metal Inert Gas
U	Voltagem
WAAM	Wire Arc Addictive Metal
WFS	Velocidade de alimentação do fio
WLAM	Wire and Laser Addictive Metal

CONTEÚDO

AGRADECIMENTOS.....	I
RESUMO	III
ABSTRACT.....	IV
INTRODUÇÃO.....	1
1.1 - MOTIVAÇÃO	1
1.2 - OBJETIVOS	2
1.3 – ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	2
REVISÃO DA LITERATURA.....	3
2.1 – FABRICO ADITIVO COM METAIS	5
2.1.1 - <i>Em cama de pó</i>	5
2.1.2 - <i>Alimentação por Pó</i>	7
2.1.3 - <i>Alimentação por Fio</i>	7
2.2 - WAAM COM DUPLO FIO.....	9
2.3 – MONITORIZAÇÃO E CONTROLO DO PROCESSO.....	11
2.4 - PLANEAMENTO DAS DEPOSIÇÕES	12
2.5 – MATERIAIS DE GRADIENTE FUNCIONAL	12
2.6 – LIGAS COM INTERESSE PARA A INDÚSTRIA	14
PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	19
3.1 - REQUISITOS E ESPECIFICAÇÕES.....	20
3.2 - COMPONENTES	20
3.3 - ESTRATÉGIA DE DEPOSIÇÃO	23
3.4 - ENTREGA TÉRMICA E RÁCIO DE DEPOSIÇÃO	24
3.5 – COMPOSIÇÃO DE CADA CAMADA.....	25
3.6 - INSPEÇÃO VISUAL	25
3.7 - PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS.....	25
3.8 - MICRODUREZAS	26
RESULTADOS	27
4.1 - INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS.....	27
4.2 - MICROESTRUTURA DOS CORDÕES.....	34
4.3 - MICROESTRUTURA DA PAREDE	36
4.4 - FISSURA.....	39
4.5 - DUREZAS	42
CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHO FUTURO.....	45
REFERÊNCIAS	47

ÍNDICE DE IMAGENS

FIGURA 1 - ESQUEMA DE UM SISTEMA DE CAMA DE PÓ [3].....	6
FIGURA 2 - ESQUEMA DE UM SISTEMA GMAW [3]	9
FIGURA 3 - COMPARAÇÃO ENTRE SISTEMAS DE ALIMENTAÇÃO DE DUPLO FIO A) COM OS BOCAIS À MESMA ALTURA [23] E B) ALTURAS DIFERENTES [22]	10
FIGURA 4 - EXEMPLO DO SUPORTE CRIADO COM VÁRIOS ÂNGULOS ENTRE BOCAIS (60° E 180°)	22
FIGURA 5 - ESTRATÉGIA DE DEPOSIÇÃO EM ZIG - ZAG [39].....	23
FIGURA 6 - EXEMPLO DE UMA AMOSTRA CONTRASTADA.....	26
FIGURA 7 - PORMENOR DO CRESCIMENTO GRANULAR NO SUBSTRATO.....	34
FIGURA 8 -INTERFACE ZONA FUNDIDA/CHAPA PARA: A) 30% 316L - 70% IN625 B) 70% 316L - 30% IN625	35
FIGURA 9 - DETALHE DAS AGULHAS DE FERRITE COM O AUMENTO DA QUANTIDADE DE AÇO: A) 80% 316L - 20% IN625 E B) 20% 316L - 80% IN625	35
FIGURA 10 - EFEITO DO AUMENTO DA PENETRAÇÃO COM O AUMENTO DE CORRENTE PARA UMA COMPOSIÇÃO CONSTANTE (40% 316L - 60% IN625).....	36
FIGURA 11-MATRIZ AUSTENITICA DE ESTRUTURA COLUNAR	36
FIGURA 12 - INTERFACE ENTRE DUAS CAMADAS NA ZONA DE 18% DE INCONEL A) AMPLIAÇÃO 100x B) AMPLIAÇÃO 200x.....	37
FIGURA 13- INTERFACE ENTRE DUAS CAMADAS NA ZONA DE 32% DE INCONEL.....	37
FIGURA 14 - ESTRUTURA A MEIO DA PAREDE PRODUZIDA NA ZONA DE 56% DE INCONEL.....	38
FIGURA 15-DETALHE DOS PRECIPITADOS OBSERVADOS NA PENÚLTIMA CAMADA DEPOSITADA	38
FIGURA 16 - ASPETO DAS FISSURAS OBSERVADAS NA PAREDE PRODUZIDA A CERCA DE 70% DE INCONEL.....	39
FIGURA 17 - DIAGRAMA DE FASE ESTIMADO PARA A MISTURA AISI 316L/INCONEL [35]	41
FIGURA 18 - ASPETO DOS PRECIPITADOS OBSERVADAS NA PAREDE PRODUZIDA A CERCA DE 70% DE INCONEL.....	42
FIGURA 19 - VARIAÇÃO DA DUREZA COM A ALTURA DA PAREDE PRODUZIDA.....	43
FIGURA 20 - RELAÇÃO ENTRE A DUREZA E A LARGURA DA PAREDE NA ZONA DA FISSURA.....	44

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - COMPARAÇÃO DAS PROPRIEDADES DAS PEÇAS PRODUZIDAS POR DIFERENTES PROCESSOS DE FABRICO ADITIVO.....	11
TABELA 2 - INFORMAÇÃO RETIRADA DA LITERATURA EXISTENTE PARA WAAM DE DUPLO FIO COM MATERIAIS DISTINTOS	16
TABELA 3 - COMPOSIÇÃO DO FIO IN625 DA DRATEC	19
TABELA 4 - COMPOSIÇÃO DO FIO DE AÇO INOXIDÁVEL 316L DA DRATEC	20
TABELA 5 - PARÂMETROS OPERACIONAIS ESCOLHIDOS PARA A CRIAÇÃO DA "PAREDE"	20
TABELA 6 - VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS NA DEPOSIÇÃO DE CORDÕES DE AÇO INOXIDÁVEL 316L.....	29
TABELA 7 - VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS NA DEPOSIÇÃO DE CORDÕES DE IN625	30
TABELA 8 - VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS NA DEPOSIÇÃO DE CORDÕES DE AÇO INOXIDÁVEL 316L E IN625.....	32



Introdução

1.1 - Motivação

O interesse no fabrico aditivo tem vindo a crescer muito rapidamente uma vez que apresenta algumas potencialidades interessantes, como sejam: a redução do tempo e dos custos de produção, a menor quantidade de material desperdiçado, a facilidade de automação, entre outras.

Este tipo de processo e, particularmente o WAAM, têm vindo a ser investigados com o objetivo de perceber a influência dos parâmetros operatórios nas propriedades mecânicas das peças produzidas e como evitar eventuais defeitos. Embora sejam comercializados fios de diversas ligas, para a produção de materiais multifuncionais em que são requeridos mais do que um fio há todo um trabalho de investigação a desenvolver.

A possibilidade da utilização do WAAM alimentado por dois fios para a criação de ligas customizadas modificando unicamente parâmetros de processo têm um enorme interesse para a indústria, pois permite aliar as melhores propriedades mecânicas de uma liga (em comparação com um material unicamente) com as vantagens do processo como a possibilidade de criação de peças com qualquer geometria, com elevada taxa de deposição e custo inicial reduzido de equipamento.

Adicionalmente, o estudo de materiais com gradientes de composição e funcionalidade tem adquirido maior relevância industrial devido às inúmeras novas aplicações que têm surgido em sectores de elevado valor acrescentado. O insipiente conhecimento destes materiais produzidos por WAAM e a sua implementação na indústria, justificam o interesse deste tema numa dissertação.

1.2 - Objetivos

O presente trabalho visa desenvolver uma variante do processo de fabrico aditivo designado por Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM). Este processo é baseado na deposição de camadas sucessivas de um fio fundido por arco elétrico de modo a produzir uma peça com a geometria e dimensões pretendidas. A variante que se pretende desenvolver consiste em alimentar dois fios de composição igual ou diferente. A utilização de dois (ou mais) fios permite a produção de ligas quimicamente mais complexas, ou mesmo com gradientes de composição, e consequentemente funcionalidade. Para isso foi necessário adaptar o sistema de alimentação existente no equipamento do Núcleo de Tecnologia Industrial (NTI), otimizar os parâmetros operatórios e analisar as características das peças produzidas.

Os objetivos específicos são:

1. Conceção e fabrico de um sistema para alimentação de dois fios a adaptar ao equipamento de WAAM existente no NTI/DEMI.
2. Selecionar os materiais de forma a entender quais as combinações mais interessantes do ponto de vista industrial e tecnológico.
3. Produzir peças com gradiente composicional de aço inoxidável 316L até Inconel 625 por WAAM e fazer a sua caracterização estrutural, microestrutural.
4. Correlacionar os resultados obtidos com a literatura existente.

1.3 – Estrutura da dissertação

Esta dissertação organiza-se em 5 capítulos: O primeiro dedicado à motivação e objetivos, o segundo à pesquisa bibliográfica realizada sobre este tema. No terceiro capítulo são descritos os procedimentos usados na experimentação realizada. No capítulo quatro são apresentados e discutidos os resultados e finalmente a conclusão e as sugestões de trabalho futuro são apresentadas no capítulo 5.



Revisão da Literatura

O conceito de fabrico aditivo surge em 1987 sob o nome de prototipagem rápida (RP) para designar processos de criação de componentes que seriam estudados com o intuito de gerar um novo componente melhorado até chegar à versão final. Consequentemente, com a implementação destes processos, houve reduções no tempo de desenvolvimento do produto e aumento no controlo de erros. Ao adicionar características necessárias e retirar outras não solicitadas ao longo do processo, é possível garantir um aumento do tempo de vida dos componentes [1].

Estas características adequam-se, por exemplo, à indústria aeroespacial, automóvel e biomédica. A possibilidade da criação de montagens de peso reduzido implica um consumo de combustível menor e a geometria complexa associada às peças produzidas por FA elimina a necessidade de processos de ligação, uniformizando o processo de criação das diversas peças [2]. Uma montagem que implicasse a criação de vários componentes através de métodos convencionais como o forjamento, maquiagem e fundição requer processos de ligação, em contraste Fabrico Aditivo permite a criação de um componente com a mesma funcionalidade evitando uma variedade de processos intermediários.

Adicionalmente qualquer alteração no design de produto não afeta negativamente o fabricante (evita a reorganização da linha de produção ou a obtenção de novos processos de criação) e não existe a necessidade de produção de peças numa determinada ordem (são independentes de processos de ligação). Esta característica em particular impõe uma limitação no tamanho máximo das peças, ou seja, a zona de construção da máquina é limitada pelo espaço de trabalho fornecido e determinadas configurações não permitem alterações. Certos processos de FA são caracteriza-

dos por velocidades de deposição baixas ou acabamento superficial deficitário. O aperfeiçoamento do acabamento superficial tem como consequência a redução da velocidade de avanço da tocha sendo necessário uma análise de prioridades e tentativa de compromisso entre ambos.

Os materiais utilizados na indústria e os processos de criação utilizados apresentam uma relação de mutual desenvolvimento. Devido às características enumeradas, o fabrico aditivo permite a criação de peças de geometria complexas em ligas de titânio e níquel o que não seria economicamente viável com os processos convencionais. A tecnologia WAAM tem especial interesse para as ligas referidas previamente, pois em comparação com os processos típicos reduz o tempo de fabrico e de pós processamento significativamente (40 – 60% e 15 – 20% respectivamente) [2,3]. Os benefícios de utilização das ligas citadas são a sua tensão de cedência e compatibilidade térmica e eletroquímica com os materiais compósitos, objetos de estudo na atualidade e já em utilização na indústria Aeroespacial [4]. Uma vez que surge esta oportunidade de utilização de componentes de ligas mais complexas surge também o interesse de aprimorar e desenvolver os processos de criação que tornaram estas peças possíveis. A maior dificuldade do processo atualmente é a escassez de diretrizes e ferramentas o que constitui um obstáculo à utilização de todos os benefícios que FA proporciona [3,4]. Isto foi um impulsionador para o interesse e a pesquisa neste campo permitindo várias avanços e melhorias nos processos existentes. O desenvolvimento de novas tecnologias e processos implica a sua patenteação e consequentemente a quebra dos direitos de propriedade intelectual e limitações relacionadas com garantias e maquinaria é um fator a considerar.

O conceito básico é a deposição camada a camada o que representa uma grande variedade de escolha a termos de equipamentos, processos e materiais. A geometria do componente influencia a escolha do processo uma vez que geometrias mais complexas requerem taxas de deposição reduzidas ao contrário de geometrias simplificadas onde as taxas de deposição são mais elevadas. Esta variedade de processos implica também um leque de preços e complexidade. Enquanto que uma das vantagens da FA é a facilidade de impressão de peças desenhadas em CAD, a desvantagem associada à sua utilização é a importância de mão de obra especializada e a experiência necessária para trabalhar com este tipo de configuração.

Com o objetivo de padronizar a terminologia que descreve FA e os processos que a constituem, a ASTM (American Society for Testing and Materials) definiu o processo e criou categorias onde quer os processos atuais quer os processos futuros podem ser inseridos [5]. Esta terminologia vai evitar quaisquer problemas de comunicação e facilitar a escolha de configurações técnicas. A ASTM define o Fabrico Aditivo como *“process of joining materials to make objects*

from three-dimensional (3D) model data, usually layer upon layer, as opposed to subtractive manufacturing methodologies” e as categorias são as que se seguem:

- **binder jetting** – um processo de fabrico aditivo em que um líquido de ligação é depositado seletivamente de forma a unir partículas de pó.
- **directed energy deposition** – um processo de fabrico aditivo em que uma fonte concentrada de energia térmica é utilizada para fundir materiais enquanto estes são depositados
- **material extrusion** – um processo de fabrico aditivo em que o material é expelido seletivamente por um orifício.
- **material jetting** – um processo de fabrico aditivo em que gotículas de material de adição são depositadas.
- **powder bed fusion** – um processo de fabrico aditivo em que a energia térmica funde seletivamente uma região da cama de pó.
- **sheet lamination** – um processo de fabrico aditivo em que chapas de metal são unidas com o objetivo de lhes impor uma forma.
- **Photopolymerization** – um processo de fabrico aditivo em que um foto polímero líquido numa cuba é curado através de polimerização ativada por luz

2.1 – Fabrico Aditivo com metais

Embora existam diversos parâmetros a considerar no processo, a diferenciação dos diversos métodos reside no sistema de alimentação e na fonte de energia. O sistema de alimentação pode fornecer o material em forma de pó ou fio e o método utilizado para a fundição do material varia entre Feixe de Eletrões, Laser ou Arco elétrico [3].

2.1.1 - Em cama de pó

Neste sistema é criada uma cama de metal em pó na área de fabrico, que é submetida a um laser ou feixe de eletrões programado para percorrer a sua superfície, sinterizando ou fundindo o pó na geometria pretendida. Cada passagem da fonte de energia corresponde à criação de uma nova camada. Precedendo uma nova passagem, a zona de trabalho é descida o equivalente à espessura da camada anteriormente criada e um novo estrato de metal em pó é depositado como é visível na figura 1. Este processo é repetido até as dimensões da peça requeridas serem atingidas. Este sistema tem como vantagens a capacidade de produzir pormenores de elevada resolução, passagens internas e manter o controlo dimensional [3].

Dentro deste sistema existem alguns processos utilizados para produzir peças metálicas, tal como o SLS (Selective Laser Sintering), SLM (*Selective Laser Melting*) e EBM (*Electron Beam Melting*). O SLS e o SLM utilizam um feixe concentrado de luz onde a energia dos fotões é absorvida pelas partículas de pó.

O processo SLS utiliza um feixe de laser para sinterizar as partículas. Sinterização é uma operação que consiste na aglomeração e compactação de pós ou partículas de tamanho reduzido, a temperaturas elevadas sem que seja atingido o ponto de fusão do material. Este processo possui uma alta precisão dimensional, um rápido processamento e uma taxa de deposição reduzida. O SLS pode produzir componentes a partir de uma vasta gama de materiais, incluindo cera, polímeros, compósitos polímero/vidro, compósitos polímero/pó metálico, metais e cerâmicos. Devido às partículas não fundirem totalmente, este processo é associado a problemas de porosidade e falta de densidade, o que implica a necessidade de pós processamento das peças produzidas, normalmente através de Hot isostatic pressing [6,7].

O processo SLM é uma derivação do processo SLS, sendo a principal diferença a fusão completa do metal em pó, em vez da sinterização do mesmo. Os componentes produzidos com recurso a SLM apresentam propriedades mecânicas iguais às chapas metálicas laminadas e em casos pontuais verifica-se até um pequeno aumento das mesmas. Derivado das particularidades do processo, não requer pós processamento. Existem dificuldades no controlo do processo devido à elevada quantidade de energia necessária para fundir as partículas metálicas, o que pode desenvolver tensões residuais e deformações na peça [8–10].

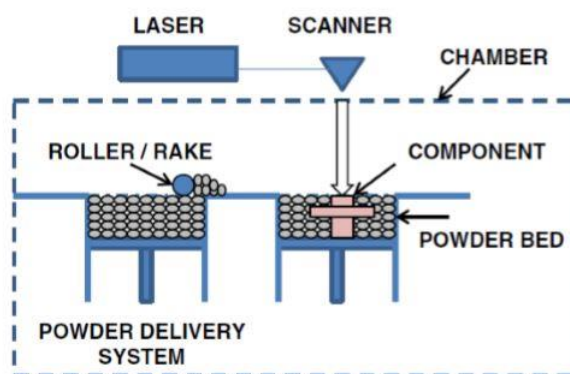


Figura 1 - Esquema de um sistema de cama de pó [3]

O processo EBM utiliza um feixe de elétrons de alta densidade de energia para fundir o pó presente na zona de trabalho. A energia cinética dos elétrons é transferida para as partículas,

permitindo aquecimento para além da temperatura de fusão. Pelos constrangimentos eletromagnéticos, o EBM só labora com condutores elétricos e dentro de uma camara de vácuo, de forma a evitar interações entre eletrões e atmosfera. Este processo apresenta uma taxa de produção mais elevado do que o SLM graças à sua alta densidade energética e maior velocidade no *scanning*, no entanto, produz peças com um acabamento superficial inferior [6,11–13].

2.1.2 - Alimentação por Pó

No sistema de alimentação por pó, os pós metálicos são transportados através de um bocal para a superfície de fabricação, onde um laser é utilizado para fundir uma ou mais camadas, formando a geometria desejada. O processo é repetido até ser formada uma peça tridimensional sólida. Existem dois tipos de sistemas no mercado, o que coloca a peça de fabrico estática e move o bocal de deposição e, um outro, onde o bocal fica estático e a peça é movida. As principais vantagens deste tipo de sistema são o maior volume de fabrico e a capacidade para reabilitar peças desgastadas ou danificadas [3].

Dentro deste sistema, o processo mais utilizado para metais é o LMD (*Laser Metal Deposition*)[14–19], onde tal como no SLM, o pó metálico é completamente fundido por um feixe de laser, fabricando peças sem necessidade de pós-processamento. O LMD permite o fabrico de paredes muito finas, graças à sua reduzida zona termicamente afetada gerada durante o processo [3]. Este processo permite ainda a construção de camadas de material diretamente na superfície de peças tridimensionais, o que potencia o seu uso para aplicações de reparação e proteção contra desgaste e corrosão [14].

2.1.3 - Alimentação por Fio

Neste sistema de alimentação a matéria-prima é adicionada por fio através de um bocal. A fonte de energia utilizada para fundir o material pode ser o feixe de eletrões, feixe de laser ou plasma. Dentro das possíveis fontes de energia para este sistema o feixe laser é a mais popular graças à sua precisão. No entanto, a sua eficiência energética é muito baixa, entre 2% a 5% [20]. O feixe de eletrões apresenta uma eficiência ligeiramente superior, 15% a 20%, mas requer um ambiente de trabalho em vácuo, tornando-o adequado para trabalhos aeroespaciais. Em contraposição, a eficiência energética de processos por soldadura de arco como GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) ou GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*) podem chegar a cerca de 90%, em algumas circunstâncias. Adicionalmente, o custo associado aos equipamentos tradicionalmente utilizados

na soldadura por arco elétrico são relativamente baixos quando comparados com os custos associados aos equipamentos de laser e feixe de elétrons [4].

Os sistemas de alimentação por fio são adequados para processamento de alta taxa de deposição, no entanto, as peças resultantes requerem, geralmente processos de maquinagem mais extensa do que os sistemas *powder bed* e alimentação por pó [3].

Os dois principais processos utilizados em alimentação por fio para o fabrico aditivo de metais são o WAAM (*Wire and Arc Additive Manufacturing*), que é assim designado por utilizar arco elétrico como fonte de energia e o WLAM (*Wire and Laser Additive Manufacturing*) que, apesar da semelhança com o WAAM, utiliza um feixe de radiação laser como fonte de energia. Para além desta é necessário para construir um sistema de FA funcional os equipamentos de fornecimento de fio, sistemas de gás de protecção e sistemas de controlo de movimento da fonte de calor.

Sendo um processo automatizado de alimentação por fio, com arco elétrico como fonte de energia, a fabricação de peças por WAAM obedece a três etapas principais: plano de processo, deposição e pós-processamento. Para um modelo CAD dado, o software de programação 3D gera os movimentos robotizados e os parâmetros de soldadura necessários para a deposição, com o objetivo de produzir sem defeitos e com elevada precisão geométrica. Durante a fabricação o braço robotizado oferece a cadência correta à tocha de soldadura para produzir, camada por camada, a peça pretendida. A figura 2 ilustra o método de deposição de uma sistema de alimentação por fio.

A fonte de energia escolhida vai influenciar os parâmetros de fabrico podendo-se identificar o GMAW (Gas Metal Arc Welding), o GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) e o PAW (Plasma Arc Welding).

2.1.3.1 - GMAW

No GMAW o arco elétrico é formado entre o eléctrodo consumível do material a adicionar e o substrato, sob acção de uma corrente de alta voltagem e baixa intensidade sob a protecção de um gás inerte ou ativo. Existem três principais métodos de transferência:

- Globular, em que a deposição do material é feita através da gravidade, tendo como características uma voltagem baixa e corrente média;
- Curto-circuito, ocorrendo quando o eléctrodo funde no banho de fusão, com alta voltagem e baixa corrente, tendo uma taxa de deposição baixa;
- Spray, que é obtido por uma voltagem e intensidade elevada, o que se traduz numa maior taxa de deposição;

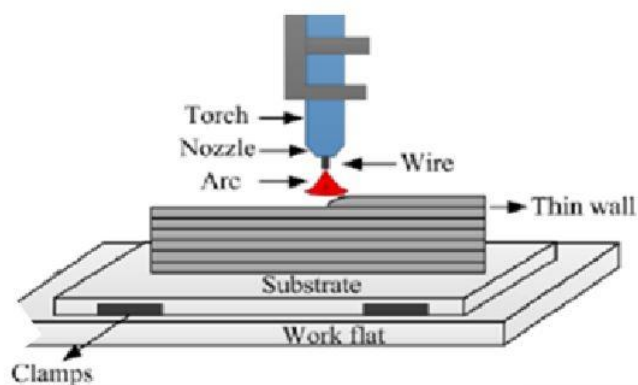


Figura 2 - Esquema de um sistema GMAW [3]

2.1.3.2 - GTAW e PAW

Nestes processos, o cordão de soldadura é assegurado por um elétrodo não consumível de Tungsténio. A diferença entre estas duas configurações e o GMAW reside na zona de alimentação do fio que, neste caso, será exterior à zona de deposição o que afeta negativamente a qualidade da soldadura e implica um planeamento mais cuidado [4].

A densidade de energia no PAW tende a ser cerca de 3 vezes superior, o que anula parte da distorção típica noutros processos. Esta diferença na densidade permite ao calor ser transmitido em profundidade, contrariamente a processo de baixa densidade onde o calor se propaga maioritariamente à superfície. Esta característica reflete-se na largura dos cordões, sendo estes mais estreitos.

2.2 - WAAM com duplo fio

A utilização de dois fios como materiais a depositar tira partido do conhecimento do MIG em tandem que surgiu pela necessidade de aumentar a taxa de deposição. Esta variante em WAAM é recente e embora as vantagens sejam conhecidas, ainda não existem estudos suficientes sobre as interações que possam existir entre os dois materiais com propriedades termo-físicas distintas. Com a utilização de dois fios pode-se duplicar a taxa de deposição e, portanto, a eficiência de produção. Para além desta vantagem, os primeiros estudos mostram melhorias de até 10% nas propriedades mecânicas neste tipo de configuração [21].

Cada metal a ser depositado necessita de parâmetros de processo específicos de forma a atingir as melhores características mecânicas possíveis. Embora com dois fios exista a possibilidade de aumentar a produção, não existe a noção dos parâmetros de processo mais adequados para cada combinação. Em estudos recentes provou-se que a adição de magnésio numa liga de alumínio e cobre aumenta as propriedades mecânicas, no entanto os parâmetros escolhidos proporcionaram fendas e um aumento da fragilidade da peça. Para evitar defeitos em peças recentemente produzidas é necessária uma análise pormenorizada dos estudos atuais de forma a prevenir os erros já cometidos e alargar o conhecimento a características ainda não estudadas [21,22].

Na literatura apresentada posteriormente destacam-se 2 tipos de montagem, onde a única diferença é a posição relativa dos bocais que alimentam o fio. Na primeira opção [23–25] os bocais apresentam um ângulo de 30° com o substrato e 60° entre eles enquanto que na segunda [22] apresentam ângulos com o substrato diferentes e 0° entre eles (construção em altura). A diferença é visível na figura 3 onde é visível a diferença entre os dois métodos. Com o objetivo de privilegiar a estabilidade do banho de fusão e a distribuição uniforme da energia do arco, a primeira opção foi adotada na fase de testes da realização deste trabalho.

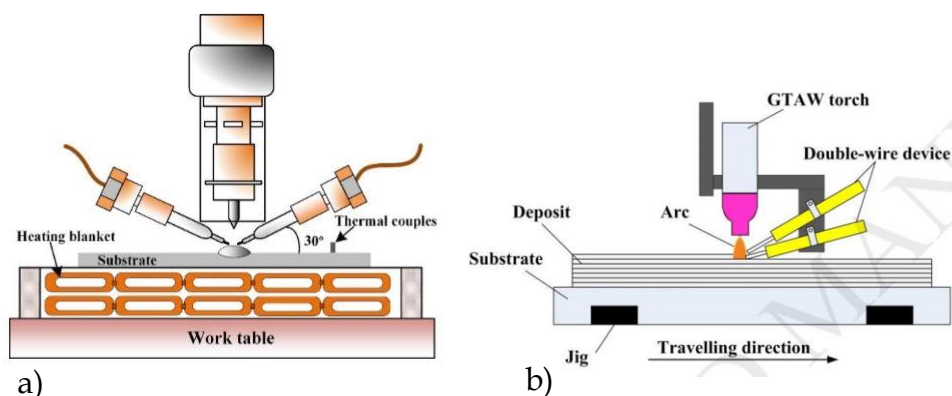


Figura 3 - Comparação entre sistemas de alimentação de duplo fio a) com os bocais à mesma altura [23] e b) alturas diferentes [22]

A tabela 1 apresenta um resumo dos processos, características das peças fabricadas e rácio de deposição da literatura estudada.

Tabela 1 - Comparação das propriedades das peças produzidas por diferentes processos de Fabrico Aditivo

Processo	Rugosidade da superfície (μm)	Espessura da camada (μm)	Rácio de deposição [cm^3/h]	Precisão dimensional [mm]
SLM	5-20	20-100	50-171	0.04-0.2
SLS	7-15	30-120	5-20	N. A
EBM	10-46	50-200	0-80	0.04-0.2
LMD	30-60	10-400	240-300	0.5-1.0
WLAM	8-50	N. A	250	1.0-1.5
WAAM	Min 180	900	330	Min 0.5

2.3 – Monitorização e controlo do processo

Para um modelo CAD dado, o *software* de programação 3D gera os movimentos robotizados e os parâmetros de soldadura necessários para a deposição, com o objetivo de produzir sem defeitos e com elevada precisão geométrica. Durante a fabricação, o braço robotizado controla a cadência da tocha de forma a depositar camadas sucessivas sem variação de parâmetros operacionais. Sistemas avançados de WAAM são equipados com avaliação não destrutiva como sensores de medição de sinais da soldadura [26], geometria do banho de fusão, comportamento da transferência de metal e temperatura [27] contribuindo para uma monitorização in-process e controlo, conseguindo alcançar melhor qualidade do produto final [28].

A utilização de um sistema de controlo integrado no equipamento está a ser estudado e desenvolvido. O protótipo tem em consideração variáveis como a corrente, voltagem e dissipação de calor com o objetivo de especular a largura do cordão a partir da velocidade de avanço. Num

futuro próximo, o objetivo será que o algoritmo possa fazer alterações durante o próprio processo de forma a garantir os parâmetros inicialmente impostos.

2.4 - Planeamento das deposições

O planeamento do trajeto da tocha influencia a distribuição do calor, as tensões residuais e as propriedades mecânicas da peça final. Uma investigação dedicada ao controlo de processo e uniformidade de deposição [29] propôs um método para através da variação dos parâmetros reduzir a diferença de espessura entre o início e o final do cordão. A dissipação de calor no início da passagem, impede uma penetração adequada resultando num cordão mais alto. À medida que o arco prossegue, a temperatura do substrato aumenta e dificulta a dissipação de calor, promovendo um banho de fusão mais fluido e uma altura de cordão menor. A solução descoberta resume-se à diminuição da velocidade de avanço no início do cordão e um aumento quando o final se aproxima.

Estudos posteriores [30] empenharam-se em definir um modelo de sobreposição das gotas de metal depositadas, suprimindo os vales criados entre elas e progredindo nas tolerâncias requeridas, precisão geométrica e acabamento superficial.

Yunyong et al. [31] desenvolveu um software que visa fornecer uma trajetória e parâmetros de processo ideais tendo em conta todos os fenómenos e estudos referidos previamente. Utilizando o CURAENGINE (powerful, fast and robust engine for processing 3D models into 3D printing instruction) associado a linguagem G-code, foram estudados os diversos critérios quer teóricos quer práticos e comparados de forma a ser possível compilar a informação e produzir um código que concretize peças funcionais. Atualmente inserindo a espessura da camada, diâmetro do fio, espaço de produção e o modelo 3D o programa MOSTMETALCURA recomenda a voltagem, a velocidade de alimentação do fio e fornece o código G a ser inserido na máquina.

2.5 – Materiais de Gradiente Funcional

As ligas metálicas são combinações de pelo menos dois elementos químicos, conferindo propriedades distintas dos materiais base. Os requisitos funcionais nos projetos de engenharia podem apresentar características incoerentes o que invalida a utilização de metais no estado puro. A utilização de ligas foi implementada quando descobertas as vantagens na utilização de bronze, latão e outras ligas de cobre [32].

Existe um limite na quantidade de material possível de dissolver noutro, sendo os processos tradicionais incapazes de dar resposta a este problema. Outra inaptidão é revelada quando existe uma diferença elevada nas temperaturas de fusão, o que impulsiona o uso de novas tecnologias como a utilização de pós metálicos. Estes métodos proporcionam uma forma viável de criação de ligas para aplicações não estruturais uma vez que as partes produzidas apresentam porosidade e pouca tensão de compressão relativamente aos materiais em separado, obrigando a pós tratamentos [32,33].

Esta separação é expectável, por exemplo, quando os coeficientes de expansão são drasticamente diferentes. Quando confrontados com este problema em meados dos anos 80, cientistas japoneses criaram com sucesso FGM. Já tinha sido levantada a hipótese de criação de FGM em 1972, mas consequência da falta de recursos para a prova dos mesmos, os artigos em questão não tiveram impacto considerável na comunidade científica [32,34].

Materiais com gradiente sofrem alterações químicas ou microestruturais em função da posição traduzindo-se em alterações nas propriedades físicas e mecânicas específicas da localização e consequentemente mudanças no comportamento da peça ao longo de um eixo. Um exemplo presente na natureza são os ossos ou os dentes, que ao invés de apresentar uma separação nítida dos diversos componentes, apresenta uma transição suave entre os vários materiais. Esta característica proporciona um grau de personalização para qualquer situação [23,32,34].

A sua aplicabilidade estende-se a diversas indústrias nomeadamente:

- Aeroespacial: Suporte de grandes gradientes de temperatura e com a continuação da evolução dos processos de criação possibilidade de troca de inúmeras peças reduzindo montagens, processos de ligação e consequentemente fontes de falha.
- Medicina: Uma vez que ossos e dentes apresentam gradientes de concentração, possibilidade de replicação e substituição dos mesmo. Para além disso a promissora utilização de titânio nestas ligas que é conhecido devido a sua biocompatibilidade.
- Defesa: Uma das características mais desejáveis dos FGM é a dificuldade com que as fendas se propagam, quando comprado com outros materiais e ligas. Isto proporciona, se utilizada em combinação com materiais resistentes à penetração, uma janela de desenvolvimento para aplicações defensivas nomeadamente blindagem de carros armados ou proteção de estruturas.
- Aplicações estruturais: Devido à dificuldade de propagação de fendas, permite o atraso nas reparações sem comprometer a integridade.

- Diversos: Desde a sua aplicação em motores, reatores nucleares, pás de turbinas, sensores, portas de atraso de propagação de fogo entre muitos outros devido às qualidades enumeradas anteriormente.

Durante a união de dois metais é importante prevenir o aparecimento de fissuras e a fragilização da peça final. Estes problemas são comuns a qualquer processo de produção, contudo podem ser evitados com escolha de critérios de processo adequados. Como causas para estes acontecimentos destacam-se a falta de solubilidade, incompatibilidade na estrutura cristalina, variações significativas dos coeficientes de expansão térmica e a formação de compostos intermetálicos frágeis no gradiente da composição [35].

Para um gradiente criado a partir da variação da concentração entre dois metais, processos como o double-wire WAAM permitem facilmente controlar a velocidade de deposição e consequentemente as concentrações dos metais criando uma peça com gradiente de propriedades. [23]

A utilização de GTAW em detrimento de GMAW na criação de FGM tem sido justificada devido a maior estabilidade de arco. A ausência de salpicos visíveis durante a deposição e um banho de fusão estável, de avanço regular privilegiam a consistência e, por conseguinte, o controlo na deposição e na percentagem de cada fio [33].

O efeito da diluição durante a fabricação e a falta de exploração dos diversos parâmetros, bem como dos diferentes materiais, torna complicado o controlo do processo. Para a aplicação e produção em massa será necessário o estudo de gradientes específicos ou um estudo alargado de combinações particulares com vista a possibilitar a sua reprodução de forma viável. [33] Os objetos de estudo futuros visam garantir a adaptação dos parâmetros de forma a viabilizar a produção em massa, reduzir os erros e fatores externos ou desconhecidos, melhorar o rácio de custo-eficiência eliminando a necessidade de pós processamento e implementando processos de controlo de qualidade embutidos no sistema [34].

2.6 – Ligas com interesse para a indústria

Destacam-se algumas ligas que, devido à sua grande aplicabilidade na indústria, foram os primeiros alvos de estudo na deposição de 2 fios simultaneamente, nomeadamente titânio-alumínio (Ti-Al), alumínio-cobre-magnésio Al-Cu-Mg e ferro-alumino (Fe-Al). As ligas Ti-Al apresentam elevada resistência térmica, elevada condutividade térmica e baixa densidade o que a torna ideal para rotores de turbinas ou canos de escape [23].

As ligas de Al-6.3Cu não apresentam os requisitos necessários quando são produzidas por WAAM, nomeadamente a tensão de cedência e extensão apresentados após a sua produção

por processos convencionais. O acréscimo de um fio de magnésio no sistema de alimentação permite a criação de uma liga de Al-Cu-Mg que, para além de apresentar todas as características desejáveis de uma liga de alumínio e cobre, revela melhorias significativas na tenção de rotura e cedência suportada em comparação com processos típicos, sem acréscimos significativos de custo [22].

Finalmente, as ligas de Fe-Al apresentam como característica mais desejável a resistência a oxidação e corrosão, baixa densidade e reduzido custo de materiais. A sua utilização ainda não está disseminada na indústria devido à fragilidade apresentada à temperatura ambiente, consequência dos compostos intermetálicos formados durante o arrefecimento. Os processos convencionais implicam um pós-tratamento na criação de peças desta composição que não seria necessário, teoricamente, devido à reduzida taxa de arrefecimento característica do WAAM. A possibilidade de utilização de um cobertor de aquecimento durante o processo e a aplicação de um gradiente entre Fe até Fe-Al, como mostrado no estudo [33], melhora as propriedades e mitiga alguma da fragilidade da peça à temperatura ambiente. O maior defeito apresentado nos processos convencionais são as porosidades, portanto, pós tratamento como HIP necessitam de ser aplicados para conceder à peça total densidade. [24,25]

A tabela 2 é a condensação da informação retirada da literatura existente para WAAM de duplo fio com materiais distintos. A análise da tabela torna perceptível os parâmetros utilizados nos vários processos de fabrico dos estudos em questão. Cada artigo referenciado forneceu informação que foi considerada durante a fase inicial deste estudo. Adicionalmente a tabela reforça a ideia apresentada anteriormente que a utilização de 2 fios de composição química distinta no processo de GTAW, ainda se encontra numa fase embrionária, não havendo literatura disponível suficiente para diversas aplicações e ligas de interesse.

Tabela 2 - informação retirada da literatura existente para WAAM de duplo fio com materiais distintos

Referência	Processo	Gás de proteção	Fios utilizados	Velocidade de alimentação do fio [mm/min]	Velocidade de avanço [mm/min]	Corrente [A]	Observações
23	GTAW	Árgon	Titânio Alumínio	200-1050	100	120	Sucesso na criação de um gradiente
36	GTAW	Árgon	ER5087(Al-5Mg) ER4043(Al-5Si)	2400 1500	300	120	Criação de uma liga de 3 Metais a partir de duas ligas bimetálicas
22	GTAW	Árgon	ER2319(Al-6.3Cu) ER5087(Al-5Mg)	1050-2400	300	120	Adicionar magnésio a uma liga de Alumínio Cobre para melhorar propriedades
25	GTAW	Árgon	Alumínio Ferro	695 100	100	140	Comparação entre peças desta liga produzidas por WAAM e processos convencionais
24	GTAW	Árgon	Alumínio Ferro	689 1000	95	140	Estudo das características desta liga
33	GTAW	Árgon	Alumínio Ferro	254 1175	95	140	Estudo se o gradiente pode não apresentar os mesmos defeitos típicos que a liga de Fe-Al
37	PAM	Árgon	H00Cr21Ni10 Stainless steel	1500	30-60	130	Comparação das características de single wire feed e double wire feed PAM
21	GMAW		ER2319(Al-6.3Cu) ER5087(Al-1.5Mg)	2000-10000	10-18.3		Estudo da propagação de fendas

O Inconel é uma superliga de níquel cujas propriedades suscitam interesse na aplicação em reatores nucleares, componentes aeroespaciais e turbinas de gás. Apresenta elevada resistência a tensões, destacável a temperaturas moderadas, resistência a oxidação e resistência à fadiga. Os estudos [35–37] referem o Inconel 625 e 718 como objeto de estudo, sendo a única diferença de destaque entre eles a aplicação de um tratamento de envelhecimento no 718 o que quase duplica a tensão de cedência através do refinamento dos grãos durante o arrefecimento. O aço 304L e 316L, usados nos estudos referidos, apresentam propriedades mecânicas semelhantes ao Inconel, destacando-se a resistência a oxidação, elevada tensão de cedência e resistência a corrosão, o que o torna ideal para aplicações em motores. Os principais interesses na junção destas ligas são a adição das características particulares das duas matérias base e a redução de custos, uma vez que o aço apresenta uma densidade e custo menor, possibilitando novas aplicações.

O Inconel, quando soldado, apresenta tendência a formar precipitados ricos em crómio e fases ricas de Nióbio. Esta fase, notória entre dendrites e considerada frágil, é responsável pela diminuição das propriedades mecânicas do material soldado e deve ser tida em consideração na junção dos materiais. No caso particular do 718, esta característica obriga a tratamentos térmicos adicionais após a conclusão da soldadura. Para evitar pós tratamentos foi adicionado um material de enchimento com elevada temperatura de fusão em pó, entre a substrato e a deposição de material. Esta adição é dispendiosa e complicada de realizar, o que impulsionou o uso de FA, aproveitando a maior densidade de energia do feixe [36].

Hinojos et all [36] depositou sobre um substrato de 304L dois cordões, primeiramente um de 308L seguido de um de Inconel 600. Em 12mm de altura, desde o final do substrato até ao topo do segundo cordão, verificou-se uma fase de 0.19mm onde as concentrações de ferro e níquel foram totalmente alteradas. As percentagens de ferro na zona de Inconel são cerca de 30% mais elevadas que no fio desse mesmo material, justificado somente se existir diluição entre os dois cordões. Foram testadas a dureza de VICKERS e aplicado um ensaio de tração e ambos os resultados permaneceram dentro do limite aceitável e espetável, concluindo que esta alteração química não afeta a integridade da peça, unicamente a sua composição e propriedades de corrosão e oxidação. Foi desenvolvido ainda um sistema de deposição dissimilar de metal e construído um protótipo onde a corrente foi diminuída de forma a evitar excesso de diluição e a preservação das propriedades de cada material em vez de uma mistura [37].

Abe et all [37] estudaram a deposição de um cordão de aço 304L sobre um substrato de Inconel 718 seguido de um cordão de Inconel sobre um substrato de aço para comparação. EBM obteve melhores resultados que GTAW, uma vez que a zona onde abunda NbC é reduzida em comparação com estudos anteriores. Esta acumulação de Nióbio e molibdênio na fase austenítica

pode corresponder a uma perda de propriedades mecânicas e de resistência a corrosão na zona de transição. Neste estudo em particular foi provado que a deposição de Inconel sobre aço inoxidável não apresenta problemas relevantes. Por contraste a deposição de aço inoxidável sobre um substrato de Inconel, devido a restrições de deformação impostas pelo substrato, apresentou uma fissuras [36]. Em qualquer mistura de 2 ligas a formação de intermetálicos pode afetar as características finais e impedir o material de atingir as propriedades desejadas, como referido anteriormente. Carrol et al [35] baseou a escolha dos materiais de forma a tentar evitar a formação de intermetálicos e potenciais problemas no gradiente. Como justificado no estudo, quer o aço 304L quer o Inconel 625 apresentam uma estrutura cristalina cúbica de faces centradas durante o arrefecimento, sem transformações de fase alotrópicas e partilham os principais componentes, ferro, níquel e crómio. A privação de tratamentos térmicos no Inconel 625, em comparação com o 718, pode facilitar a solubilidade e problemas até agora considerados característicos. Adicionalmente ambas as ligas e a sua deposição por FA já estão documentadas, o que proporciona uma base de informação relevante e permite identificar os parâmetros que melhor se adequam [35].

3

Procedimento experimental

Com o objetivo de criar um gradiente de concentrações ao longo da peça, decidiu-se adaptar a máquina de forma a suportar a alimentação de dois fios em simultâneo. Os materiais a depositar selecionados foram 2 fios de 1mm de diâmetro da DRATEC, um de IN625 e um de SS316L cujas composições estão descritas nas tabelas 3 e 4.

Os cordões foram depositados sempre no mesmo sentido sobre placas de aço com dimensões 200x100x10 mm.

A fonte de energia utilizada foi uma TELWIN technology TIG em modo de corrente alternada e os parâmetros impostos durante a deposição são apresentados na tabela 5.

De modo a criar um gradiente de composição nas peças produzidas, após a deposição de 2 camadas, alteravam-se as velocidades de alimentação de cada fio de forma a aumentar em 5% a composição em percentagem em peso de IN625 e reduzir no mesmo valor a composição de aço.

Tabela 3 - Composição do fio IN625 da DRATEC

In625	Ni e Co	C	Si	Mn	Al	Co	Cr	Cu	Fe	Mo	Nb	Ti
%	+58	0.1	0.5	0.5	0.4	1	21.5	0.5	5.0	9	3.5	0.4

Tabela 4 - Composição do fio de aço inoxidável 316L da DRATEC

SS316L	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Fe
%	0.03	1.8	0.85	18.5	12.5	2.6	

Tabela 5 - Parâmetros operacionais escolhidos para a criação da "parede"

Parâmetros operacionais	Corrente	Velocidade de avanço	WFS	Gás de proteção
Valores	100 A	100 mm/min	1 m/s	Árgon 18 L/min

3.1 - Requisitos e especificações

Rodrigues [38] projetou e construiu um sistema de alimentação WAAM para utilização no núcleo de tecnologia industrial, possibilitando a análise das propriedades de peças produzidas pelo mesmo. O equipamento é constituído por 3 componentes principais: a componente mecânica que permite o movimento relativo tocha/substrato, o sistema elétrico e o controlador. Os requisitos funcionais dos equipamentos foram delineados com futuros estudos e alterações em vista, destacando-se a facilidade de adaptação para o uso de diferentes tochas ou equipamentos para ensaios não destrutivos (NDT). A fonte de energia é independente do corpo da máquina viabilizando a alteração desta, caso seja de interesse (MIG, MAG, TIG).

3.2 - Componentes

Armação: É indispensável uma armação que mitigue as vibrações criadas pelo movimento das diversas peças sem comprometer a robustez e estabilidade da estrutura. As principais vantagens dos perfis 80x80 mm *Bosch Rexroth* são a rigidez e a versatilidade. A sua secção transversal concede-lhe um momento de inércia elevado e permite uma fixação acessível de novos componentes.

Sistema de movimento: A criação de peças 3D envolve movimentações da tocha em 3 direções ortogonais (X, Y, Z). Com esse objetivo estão instaladas duas guias lineares em X, uma em Y e quatro em Z, perfazendo um total de sete.

O modelo de guias *Drylin ZLW-1040 Standart-02* é responsável pelo controlo dos movimentos em X e Y. O sistema é movido através de um cinto que garante um desvio máximo de ± 0.2 mm e apresenta um rácio de 70mm/rot.

Para as guias lineares responsáveis pelo movimento em Z, acresce a necessidade de suportar o peso dos componentes que formam a cabeça móvel como a tocha e o sistema de alimentação de fio. As guias escolhidas *Drylin SLW-1040* transformam a rotação do motor em movimento linear utilizando um fuso de potência de passo 2mm e suportam cargas axiais de 700 N cada uma.

Motores: O movimento é imposto nas guias graças a motores elétricos. Os Stepper motors 57STH56 NEMA-23 Bipolar possuem um sistema de engrenagens planetárias com rácio de redução 4.25/1 e uma imprecisão de 5%. A velocidade de 375 rot/min foi delineada como máxima implicando 200 incrementos por rotação.

Drivers: PiBot Stepper Motor Driver Ver2.2 Chip controlam os motores regulando a Intensidade transmitida a cada bobina e detêm a capacidade de dividir os incrementos até 16 vezes.

Placa de controlo: A placa de controlo permite a comunicação entre os elementos da máquina e possibilita o funcionamento destes em uníssimo de forma a conceber peças através de FA. O módulo Arduino Mega 2560 em sincronia com a Ramps 1.4 shield já se provou eficaz no controlo de maquinaria FA e, portanto, foi aplicado neste sistema.

Multiplicador de sinal: Dependendo de diversos conjuntos de motor + guia para atingir a posição desejada nos eixos X e Z é necessário multiplicar o sinal proveniente da placa de controlo para que haja uniformidade no movimento.

Software: A linguagem de programação G-code permite em conjunto com o programa Repetier Host, conferir movimentação da tocha. O programa publicita-se como sendo intuitivo e controla os parâmetros de processo como a velocidade de avanço, velocidade de alimentação do fio e estratégias de deposição. Através da exploração do código G são exequíveis interpolações circulares, trajetórias complexas, definir tempos de espera, alterações dos parâmetros de processo entre passagens entre outros. Neste empreendimento recorre-se à utilização de scripts que permitem diferenciar a velocidade de alimentação do fio quando estão presentes vários extrusores.

Fonte de alimentação: A instalação elétrica é alimentada por uma fonte de tensão que transmite 12V e 25A ao sistema.

Adaptações para o duplo fio: Foi projetado em SolidWorks e fabricado numas das impressoras 3D existentes no laboratório os suportes para os bocais que expelem os fios na direção do arco elétrico. Pretendia-se que este suporte, criado em PLA, fosse capaz de:

- Adaptar o ângulo entre os dois bocais
- Adaptar o angulo entre os bocais e o substrato
- Adaptar a altura entre os bocais e o substrato

Capítulo 3 - Procedimento experimental

- Adaptar a distância entre os bocais e o eletrodo

A solução desenvolvida e implementada está representada na figura 4 e permite a simples variação de todos os parâmetros apresentados, sem comprometer a estabilidade da deposição dos fios.



Figura 4 - Exemplo do suporte criado com vários ângulos entre bocais (60° e 180°)

Extrator: De forma a recolher e expelir os gases indesejáveis, consequência da deposição do material, o extrator TD MIXVENT associado a uma mangueira maleável foi instalado. A mangueira movimenta-se em conjunto com a tocha de forma a acompanhar o cordão de soldadura e apresenta uma capacidade de extração de 160 m³/h.

Botão de emergência: De acordo com as normas europeias EN 418 (ISO13850), foi acrescentado um sistema de emergência acionado por um botão vermelho que quando pressionado interrompe a passagem de eletricidade e consequentemente a deposição de material.

3.3 - Estratégia de deposição

A trajetória seguida pela tocha influencia o gradiente térmico, as condições de solidificação e as tensões residuais geradas. À medida que uma parede é erguida, a temperatura à superfície aumenta e a taxa de arrefecimento reduz-se [37]. Com esta informação, as paragens entre cada camada foram escolhidas mediante a temperatura apresentada contrariamente a definir um intervalo de tempo como em estudos prévios. Utilizando um termómetro laser, cada camada só era depositada quando a camada anterior atingia uma temperatura inferior a 70°C.

A informação relativa aos parâmetros de processo que seriam utilizados na criação da parede foi retirada de cordões fabricados através uma única passagem da tocha sobre uma placa de aço 316L com 10 mm de espessura. Fixados os parâmetros, sobre um substrato do mesmo material foram depositadas consecutivas camadas. Entre cada passagem a tocha era elevada o equivalente a espessura de uma camada depositada de forma a manter consistente a altura do arco e regressava à sua posição inicial. As deposições foram realizadas sempre no mesmo sentido o que resultou em instabilidade na altura da parede como discutido anteriormente.

Primeiramente utilizou-se uma estratégia de deposição em ZIG-ZAG (figura 5), traduzindo-se numa variação da posição inicial da tocha. Como os problemas do início, excesso de altura, e final de deposição, falta de altura, apresentam resultados complementares, teoricamente este tipo de deposição ia mitigar as diferenças de altura. Este processo resultou e apresentou os efeitos pretendidos nas camadas iniciais, no entanto com a acumulação de passagens a diferença de altura entre o centro e os extremos aumentou demasiado o que suscitou um novo problema.



Figura 5 - Estratégia de deposição em ZIG - ZAG [39]

Por isso, decidiu-se manter as deposições no mesmo sentido mesmo que significasse uma redução da altura no final da parede. O comprimento das passagens foi reduzido gradualmente com o aumento do número de camada de forma a evitar que o defeito em causa intervesse na

altura do arco e na qualidade de deposição. Sem esta redução, o arco no final apresentaria uma altura bastante superior ao início, aumentando entrega térmica e consequentemente haveria propagação da diferença de altura em direção ao centro.

Uma alternativa possível seria a variação da velocidade de avanço da tocha como discutido previamente e aplicado por Rodrigues et al [38]. A escolha da estratégia usada em detrimento desta opção baseia-se no facto de o princípio ter sempre uma altura constante em vez do ligeiro aumento constatado em estudos acerca de GMAW. Esta conservação do valor em direção da altura (Z) garante para além da criação do arco, uma altura do mesmo igual no começo de todas as camadas. A aplicação da variação de velocidade requeria um estudo da aceleração e abrandamento ideal de forma a que não se verificassem os mesmos resultados que na deposição em ZIG-ZAG.

3.4 - Entrega térmica e rácio de deposição

Nos processos de soldadura por arco, a entrega térmica é a quantidade de energia fornecida à peça e é definida por:

$$\text{Entrega térmica (J/mm)} = \frac{U \times I}{v} \eta \quad (3.1)$$

onde U (V) é a tensão, I (A) é a intensidade de corrente, v (mm/s) é a velocidade de avanço e η representa a eficiência do processo, isto é a quantidade de energia efetivamente transferida para a peça (geralmente admitido como 0.8 para processos de arco elétrico [40]).

A taxa de deposição expressa a quantidade de material de adição consumida numa deposição ininterrupta durante um intervalo de tempo. MUDAR O DELTA PARA O TEMPO

$$\text{taxa de deposição} = \frac{L \times W \times H}{\Delta t} (m^3/h) = \frac{L \times \pi D^2 \times \rho}{4 \Delta t} \quad (3.2)$$

Destacam-se duas formas distintas de o calcular, sendo que a primeira calcula o volume do cordão através dos resultados obtidos experimentalmente sendo L (m) o comprimento do cordão, W (m) a largura e H (m) a altura. Esta opção apresenta o resultado em (m^3/h). Na segunda opção o rácio de deposição é calculado pelo peso teórico do cordão, sendo D (m) o diâmetro do fio e ρ (kg/m^3) a densidade do material consumível. Esta opção apresenta o resultado em (Kg/h). Em ambos os casos Δt representa o tempo de deposição da camada.

3.5 – Composição de cada camada

A composição de cada camada é um aspeto essencial para a análise dos resultados. A percentagem das ligas de aço inoxidável e Inconel utilizadas em cada camada depositada podem ser determinadas com relativa exatidão, uma vez que se sabe que existe uma variação de 5% a cada duas camadas e a sua densidade é semelhante, no entanto para saber com exatidão a percentagem mássica de cada liga ou para calcular a percentagem mássica de um elemento básico é possível utilizar a expressão seguinte. A expressão relaciona a percentagem de um dado elemento em cada fio com o volume de fio que está a ser depositado.

$$\% \text{ de um elemento} = \frac{WFS_1 \times D_1^2 \times \rho_1 \times E_1 + WFS_2 \times D_2^2 \times \rho_2 \times E_2}{WFS_1 \times D_1^2 \times \rho_1 + WFS_2 \times D_2^2 \times \rho_2} \quad (3.3)$$

Da expressão anterior WFS representa a velocidade de alimentação do fio (mm/min), D (mm) o diâmetro do fio, ρ (g/mm³) a densidade do material e E representa a percentagem do elemento em estudo presente no cordão. Para transformar a percentagem mássica em atómica seria necessário um cálculo adicional onde é necessário dividir a percentagem mássica de todos os elementos presentes na liga pelo seu peso atómico e somar os resultados. A divisão de percentagem atómica, pela soma, revela a percentagem atómica.

$$\% \text{ atómica} = \frac{\% \text{ mássica de um elemento}}{\sum \frac{\% \text{ mássica de todos os elementos de liga}}{\text{peso atómico desses elementos respetivamente}}} \quad (3.4)$$

3.6 - Inspeção visual

O primeiro ensaio não destrutivo aplicado a qualquer peça é a inspeção visual. Representa uma análise simples, sem necessidade de qualquer equipamento adicional e permite detetar defeitos macroscópicos ou problemas na deposição. Entre esses defeitos destacam-se a falta de perpendicularidade da parede com o substrato, excesso ou falta de fusão nalguma secção, desvio de uma camada em relação ao resto ou em casos mais graves, porosidade ou fissuras.

3.7 - Preparação de amostras

Para observação da microestrutura das paredes produzidas através de microscopia ótica, foram feitos dois cortes paralelos na secção transversal na parede, distanciados de cerca de 5 mm

no centro de maquinagem MELDAS VMC 50. As amostras resultantes destes cortes foram embebidas em resina seguindo-se o polimento e contraste.

Para revelar a microestrutura as amostras foram contrastadas quimicamente com uma solução de 15 partes de ácido clorídrico (HCl), 10 partes de ácido acético (CH₃COOH) e 10 partes de ácido nítrico (HNO₃) durante alguns segundos. As amostras contrastadas foram observadas e fotografadas num microscópio de geometria invertida Leica DMI 5000 M e posteriormente compiladas numa só imagem aqui presente como figura 6.

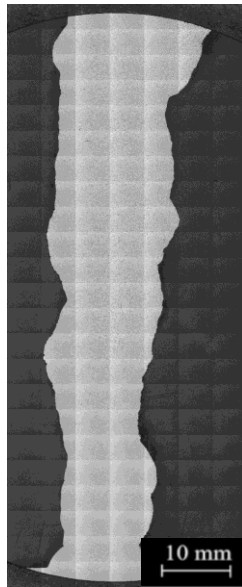


Figura 6 - Exemplo de uma amostra contrastada

3.8 - Microdurezas

Após a microscopia ótica, foram realizados ensaios de durezas Vickers, ao longo de uma linha vertical, espaçadas de 0.2mm utilizando o equipamento Mitutoyo HM-112. As indentações foram realizadas com a ponta de um diamante e uma carga aplicada de 0.5N. Estas medições permitiram estudar a evolução das durezas ao longo da altura da amostra e as consequências dos ciclos térmicos impostos pela deposição de camadas sucessivas. Foram também realizadas medições perpendiculares à altura, na zona onde um defeito se originou com o objetivo de perceber as implicações de uma fissura nas durezas ao longo de uma zona com a mesma composição química. Estas medições utilizaram uma carga de 0. 2N.



Resultados

Numa fase inicial do projeto foram depositados cordões dos materiais individualmente (INC625 e aço inoxidável), variando apenas os parâmetros de processo, com o propósito de estabelecer um intervalo de parâmetros operatórios ótimos para a deposição. Os parâmetros principais a ter em conta foram os indicados na tabela 5 (procedimento experimental). De salientar que a variação de parâmetros foi feita variando um parâmetro de cada vez, mantendo todos os outros constantes. Os valores iniciais usados basearam-se na bibliografia disponível e a variação destes serviu para estudar o efeito dos mesmos no cordão.

4.1 - Influência dos parâmetros

A escolha dos parâmetros de processo começa com a escolha do fio a utilizar. O diâmetro influencia a escolha da corrente que por sua vez influencia a espessura do cordão, portanto a escolha de corrente e de posição de soldadura deve ter este fator em conta. Para os mesmos valores de corrente, a utilização de um diâmetro superior pode levar a defeitos na soldadura devido à falta de penetração, enquanto que o sub dimensionamento leva a um excesso de penetração e alterações no material base. O aumento ou diminuição do WFS está diretamente relacionado com o diâmetro, isto é, as consequências da variação do WFS são as mesmas que a variação do diâmetro do fio uma vez que ambas traduzem um aumento ou diminuição do material a ser depositado.

A escolha de valores para intensidade de corrente e o comprimento do arco refletem-se no banho de fusão. Para intensidades superiores existe o risco de deteriorar o material de adição, havendo perdas na resistência mecânica do material bem como excesso de penetração. Com o uso de corrente alternada, a penetração e taxa de fusão não são tão elevadas como polaridade inversa

ou regular, no entanto reduz-se a probabilidade de desvio do arco por sopro magnético. Esta característica possibilita a utilização de maiores correntes e diâmetros de fio mais elevados. O comprimento do arco deve ser mantido ao longo da soldadura e o valor escolhido deve garantir estabilidade no mesmo, tendo sempre em conta os valores de corrente e diâmetro do fio. Um cumprimento de arco demasiado elevado origina transferências de material erráticas e uma proteção do banho de fusão deficiente, aumentando os erros de dimensionamento associados a deposição camada por camada. A falta de espaço entre o eléctrodo e o substrato origina o contacto entre o fio e o eléctrodo, o que interrompe o arco e adiciona uma camada de material soldado na ponta do eléctrodo [40].

A velocidade de avanço deve ser suficiente para que o arco se mantenha ligeiramente adiantado em relação ao banho de fusão. A uma baixa de velocidade origina banhos de fusão largos e difíceis de controlar, em contraste uma velocidade demasiado elevada origina cordões finos e menor penetração.

Dos cordões realizados e posteriormente apresentados foram retiradas várias conclusões. A largura do cordão é sensível a variações na corrente, velocidade de avanço e WFS. A largura do cordão é mais afetada que a altura do cordão quando existem alterações nestes parâmetros. Se houver vontade de reduzir a altura do cordão um aumento de corrente e de velocidade de avanço podem ser considerados. A penetração é bastante sensível ao aumento da corrente, contudo não se verificam alterações significativas em relação à velocidade de avanço. Os ensaios que corroboram estas afirmações foram realizados tanto com um só fio, tabela 6 e 7, como com uma mistura dos dois fio visível na tabela 8.

Tabela 6 - Variação dos Parâmetros na deposição de cordões de aço inoxidável 316L

Corrente (A)	V. A. (mm/min)	WFS (m/min)	Imagem
50	100	1	
60	100	1	
70	100	1	
80	100	1	
90	100	1	
100	100	1	
80	100	0.5	
80	100	1.5	
80	100	2	
80	100	2.5	

Tabela 7 - Variação dos Parâmetros na deposição de cordões de IN625

Corrente (A)	V. A. (mm/min)	WFS (m/min)	Imagem
60	100	1	
70	100	1	
80	100	1	
90	100	1	
100	100	1	
110	100	1	
120	100	1	
100	100	0.5	
100	100	0.75	
100	100	1.25	

100	100	1.5	
100	100	2	
100	100	2.5	
100	50	1	
100	75	1	
100	125	1	
100	150	1	

Tabela 8 - Variação dos Parâmetros na deposição de cordões de aço inoxidável 316L e IN625

Percentagem Inconel / Aço	Corrente (A)	V. A. (mm/min)	WFS (m/min)	Imagem
20/80	90	100	1	
30/70	75	100	1	
30/70	95	100	1	
30/70	95	100	1	
30/70	125	100	1	
40/60	75	100	1	
40/60	100	100	1	
40/60	125	100	1	
50/50	95	100	1	

50/50	95	100	1	
50/50	105	100	1	
60/40	75	100	1	
60/40	106	100	1	
60/40	125	100	1	
70/30	75	100	1	
70/30	75	100	1	
70/30	107	100	1	
70/30	125	100	1	
80/20	108	100	1	
90/10	109	75	1	
90/10	109	100	1	



4.2 - Microestrutura dos cordões

As microestruturas de todos os cordões são semelhantes, no entanto a variação da percentagem de IN625 e 316L, bem como a variação da corrente originaram pequenas variações na penetração da soldadura e na microestrutura. A zona do substrato revelou um crescimento de grão devido ao reaquecimento na deposição de camadas sucessivas. Existe um desenvolvimento mais acentuado nos grãos do substrato mais próximos da interface, o arrefecimento mais lento proporciona o tempo necessário para o seu crescimento. Uma zona seguinte, mais distante da interface, mas ainda afetada pelo reaquecimento apresenta grãos refinados, contudo devido às diferenças de condições de arrefecimento, não são tão desenvolvidos como é visível na figura 7.

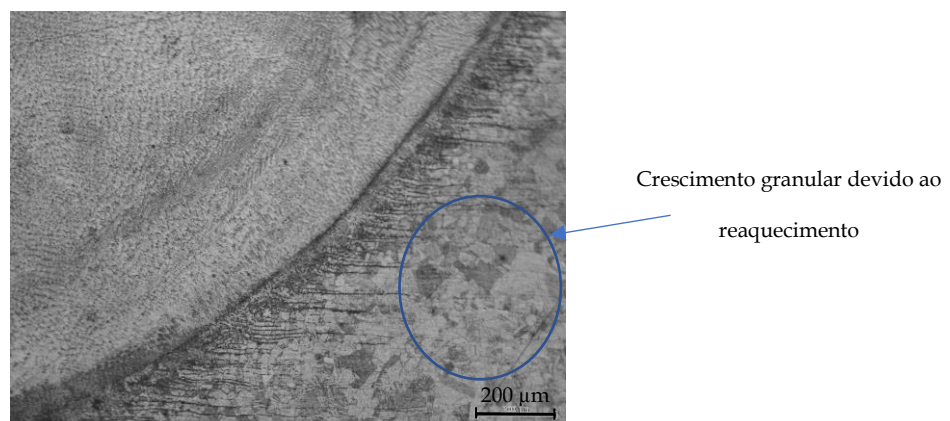


Figura 7- Pormenor do crescimento granular no substrato

No geral todos os cordões apresentaram uma zona termicamente afetada bem definida, com crescimento colunar em direção ao centro e topo do cordão, perto da interface. O centro do cordão apresenta crescimento celular com zonas onde se destacam dendrites de crescimento colunar. Nas amostras que contem maior percentagem de Inconel, os grãos de crescimento colunar são mais perceptíveis, não sendo necessário uma maior ampliação para serem detetados. Nestes casos, como o material predominante é o Inconel, faz sentido que a microestrutura seja semelhante (dendrites de crescimento colunar) em vez da matriz de austenite e ferrite característica do aço como destacado na figura 8.

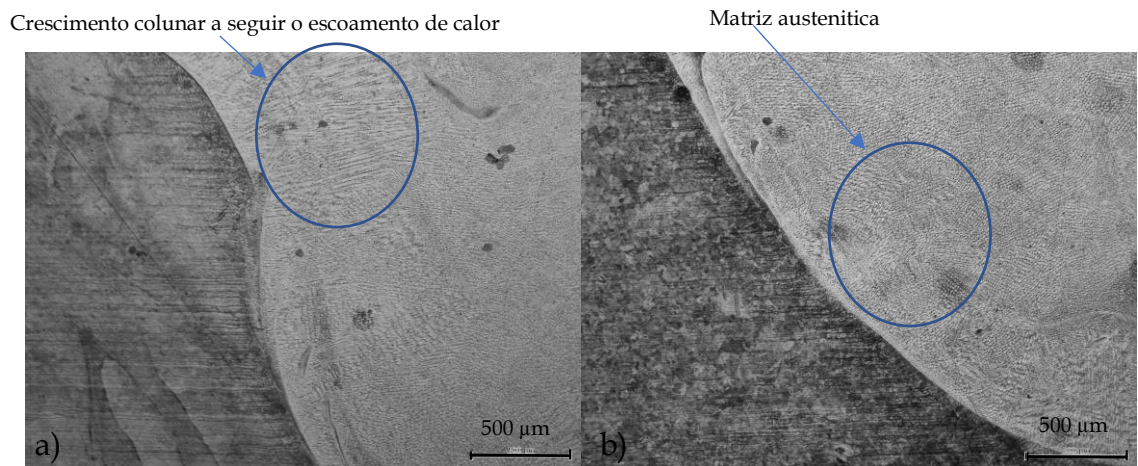


Figura 8 -Interface Zona Fundida/Chapa para: a) 30% 316L - 70% IN625 b) 70% 316L - 30% IN625

Nas amostras em que existe aço em maior percentagem, é de destacar a existência de agulhas de ferrite na zona da interface, com crescimento paralelo à base do substrato, típicas da soldadura que utilizam aço como material de adição, como está presente na comparação da figura 9. Esta característica não é visível nas amostras com menos de 30% de 316L.

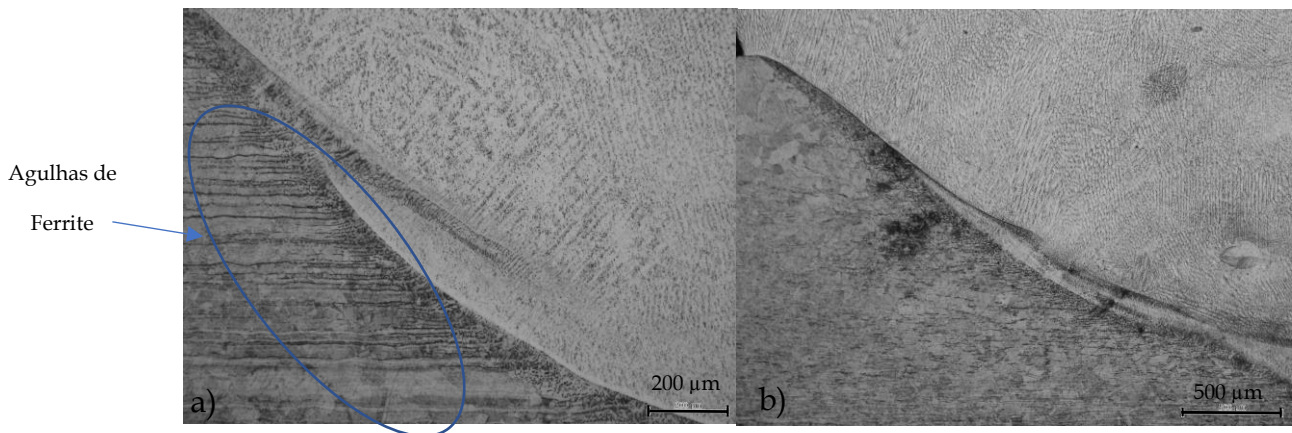


Figura 9 - Detalhe das agulhas de ferrite com o aumento da quantidade de aço: a) 80% 316L - 20% IN625 e b) 20% 316L - 80% IN625

Finalmente foram comparados cordões com a mesma composição química, contudo a corrente utilizada durante a deposição foi diferente e é perceptível que para além de uma maior penetração quando existe aumento da corrente, os grãos de crescimento colunar ficam também mais visíveis, facilmente identificados, mesmo com percentagens de IN625 mais baixas como é visível na figura 10. O aumento de corrente justifica um crescimento colunar uma vez que a amostra apresenta um tempo de arrefecimento mais longo e permite o desenvolvimento deste tipo de estruturas.

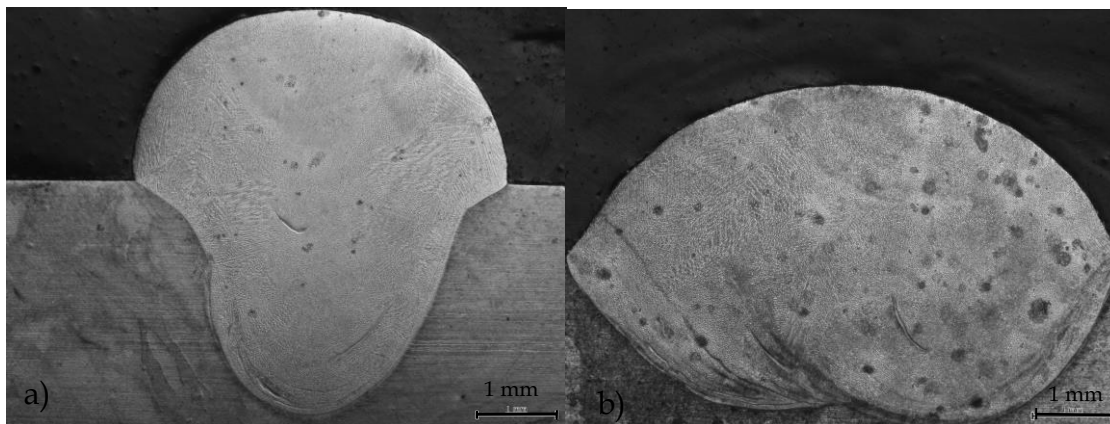


Figura 10 - Efeito do aumento da penetração com o aumento de corrente para uma composição constante (40% 316L - 60% IN625)

4.3 - Microestrutura da parede

Entre o substrato e a zona de composição 18% de IN625, onde a composição é puramente 316L, a microestrutura visível é a típica de um aço inoxidável como destacado na figura 11. Na interface entre o cordão e o substrato existe uma zona onde o crescimento do grão é notório consequência do calor produzido durante o processo. Entre a zona referida e o resto do substrato é ainda visível uma zona de refinamento de grão, consequência de um aquecimento menos intenso. Na zona termicamente afetada do material de adição é possível identificar uma matriz de austenite e grãos de ferrite visíveis. Caracteristicamente e como é visível na imagem correspondente, existe uma tendência de crescimento colunar, em direção à fonte de calor. Ainda nesta zona é possível identificar alguns precipitados, representativos da adição de Inconel ao longo de altura Z.

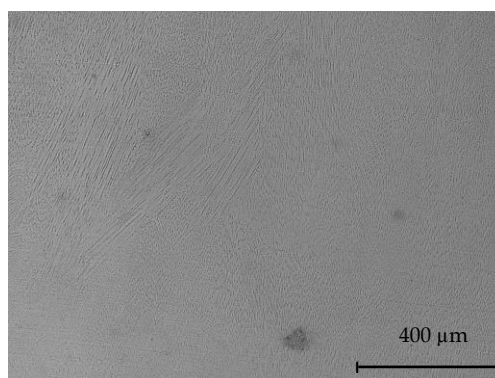
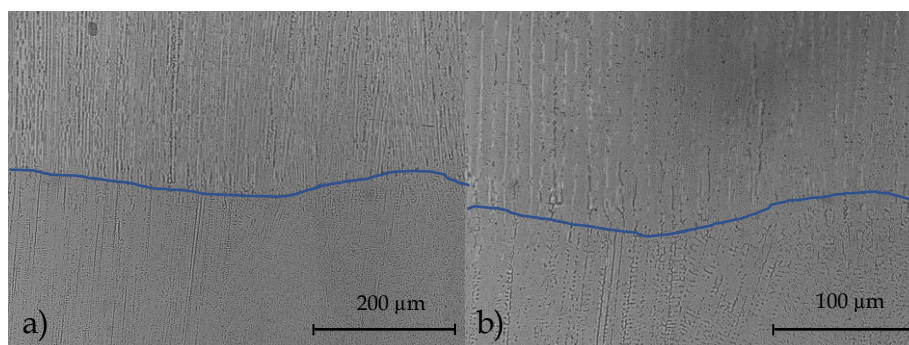


Figura 11-Matriz austenitica de estrutura colunar

Na zona de composição 18% de IN625 existem dendrites de crescimento colunar visíveis na figura 12, no entanto devido ao gradiente criado ao longo da altura da parede, é perceptível uma interface onde as dendrites se apresentam melhor definidas e o espaço entre elas diminui. Nesta zona não foram encontrados precipitados nem problemas de solubilidade.



**Figura 12 - Interface entre duas camadas na zona de 18% de Inconel a) ampliação 100x
b) ampliação 200x**

Na zona da parede correspondente a zona de composição 32% de IN625 continua a existir uma microestrutura composta por dendrites de crescimento colunar visível na figura 13 e embora seja identificável outra interface onde o espaço entre dendrites diminui, esta diminuição não é tão abrupta como na zona anterior e, portanto, a interface não é tão visível.

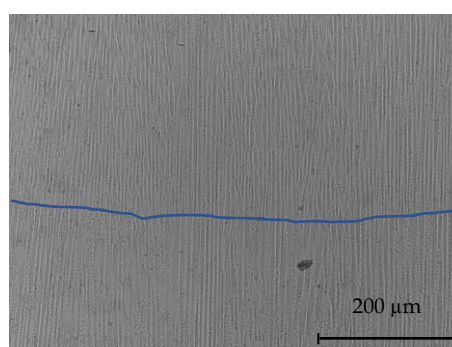


Figura 13- Interface entre duas camadas na zona de 32% de Inconel

A zona de composição 56% de IN625 é a única zona da parede que apresenta um crescimento granular único, destacado na figura 14, sendo notório zonas de crescimento celular distribuídas entre as zonas de dendrites de crescimento colunar, constantes ao longo da amostra.

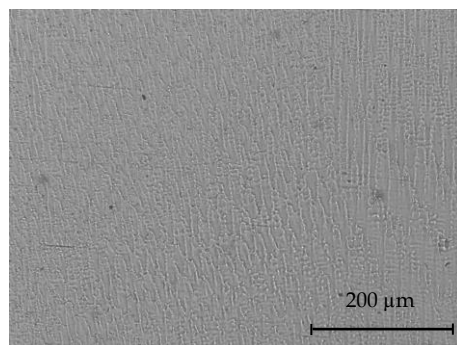


Figura 14 - Estrutura a meio da parede produzida na zona de 56% de Inconel

A partir da zona de composição 68% de IN625e até ao final da parede, a composição já é minoritariamente aço inoxidável e a microestrutura reflete esse facto apresentando de novo um crescimento dendrítico colunar que se assemelha ao do Inconel. A cerca de 75% da altura da parede é visível uma fissura e um acumular de precipitados à sua volta, responsáveis pela fragilidade desta zona. Nas zonas de composição 87% e 94% de IN625 é visível um aumento da quantidade de precipitados, destacados na figura 15, em comparação com os apresentados nas zonas abaixo.

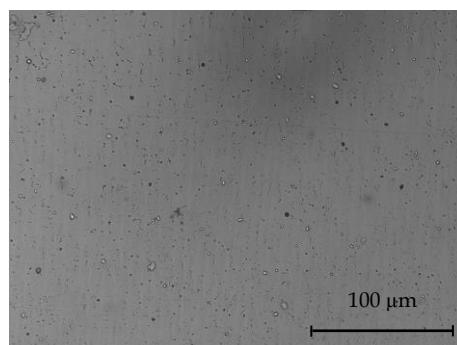


Figura 15-Detalhe dos precipitados observados na penúltima camada depositada

No geral, as dendrites de crescimento colunar prevalecem ao longo da parede, resultando de crescimento do grão sobre grãos com orientação cristalográfica favorável, já existentes de camadas anteriores. Isto é, o crescimento de dendrites não é interrompido com a deposição seguinte, o seu crescimento é contínuo entre camadas. Nas laterais da secção transversal é notório um crescimento celular, comum a toda a altura da peça, que à medida que se aproxima do centro transita para colunar. Esta diferença na microestrutura acontece uma vez que a taxa de arrefecimento nas laterais é superior e o gradiente térmico é mais significativo que no centro da parede. A melhor definição das dendrites e o aumento do espaço entre os braços secundários das mesmas deve-se ao decréscimo do rácio de arrefecimento que proporciona tempo suficiente para os braços secundários mais pequenos fundirem e dissiparem bem como para os grãos das dendrites se desenvolverem, tornando-se mais visíveis.

4.4 - Fissura

Em geral, estruturas de grão equiaxiais são preferenciais uma vez que tendem a promover propriedades isotrópicas no material. No WAAM o repetido reaquecimento do material depositado quando existe a deposição de um novo cordão permite o crescimento de grãos previamente depositados e reduz a taxa de arrefecimento, à semelhança dos processos usados em pós-processamento. Portanto, nas peças produzidas por WAAM o crescimento de grão é altamente direcional e o crescimento dendrítico não é interrompido entre camadas. A peça produzida apresentou uma fissura como referido anteriormente. Essa fissura é pouco perceptível a olho nu mas esta visível na figura 16 com ampliação.

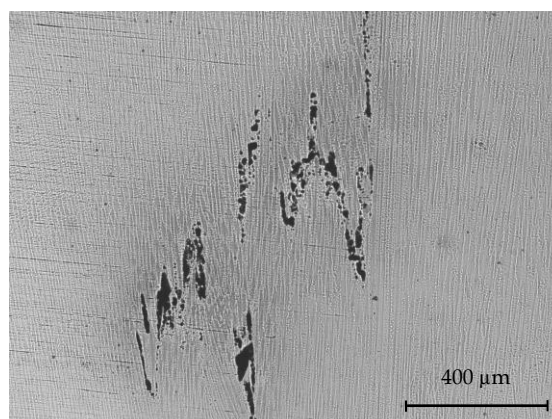


Figura 16 - Aspeto das fissuras observadas na parede produzida a cerca de 70% de Inconel

Nos processos tradicionais de fabrico de peças existe um constrangimento físico que origina tensões residuais adicionais, o que não se verifica na deposição camada por camada. Contudo na junção de duas ligas com coeficientes de expansão diferentes, este é um aspeto a ter em conta porque tal como reportado por Hinojos et al [36], esta diferença de propriedades pode impor constrangimentos que conduzam a deformações significativas ou mesmo fissuração. Enquanto que a deposição de um cordão de Inconel sobre um substrato de aço inoxidável não apresentou qualquer defeito de soldadura como fissuras ou falta de solubilidade, a criação de um cordão de aço sobre um substrato de Inconel revelou fissuras. Este defeito é justificado com a diferença dos coeficientes de expansão térmicos ($7.2 \text{ cm/cm} \times ^\circ\text{G}$ para o Inconel e $18 \text{ cm/cm} \times ^\circ\text{G}$ para o aço), que em última análise justifica a fissura. No caso em estudo a fissura encontra-se numa zona a cerca de 75% da altura da parede, o que se traduz numa percentagem de Inconel semelhante em percentagem atómica. A explicação encontrada por Hinojos et al pode ajudar a justificar o facto da fissura se ter dado próxima do topo e não da base da peça criada, no entanto devido a complexidade de micro-estruturas e fases criadas ao longo de um gradiente com sucessivas deposições, um estudo mais intensivo foi efetuado por Carrol et al [35] Para o desenvolvimento de peças funcionais para a indústria é essencial perceber a relação entre fases ao longo da peça segundo o gradiente de composição. Foi criado um modelo termodinâmico para melhor entender esta relação, contudo existem limitações a ter em conta antes da análise do resultado final. Os cálculos e aproximações feitas consideram uma situação de arrefecimento em equilíbrio enquanto que o processo de deposição tal não ocorre. Este fator realça a importância de testes prévios e da escolha apropriadas das temperaturas de deposição e mantidas entre deposições a considerar para o aparecimento de certas fases. Adicionalmente o modelo imposto não têm em consideração efeitos cinéticos como a variação do coeficiente de diluição com a composição dos cordões. Outra característica do modelo é excluir precipitados meta-estáveis como a martensite em ligas ferrosas. São necessários alguns cuidados antes de atingir o resultado final, no entanto o modelo apresentado constitui uma boa aproximação e revela informação pertinente para a explicação de certos defeitos ou para a escolha de certas composições em detrimento de outras. No trabalho citado [35], os cálculos abrangeram um leque de temperaturas entre os $950 - 1100 \text{ }^\circ\text{C}$ uma vez que baseados em estudos anteriores, estas são as temperaturas em que existe a formação de carbonetos do tipo (MC) como NbC e MoC. As percentagens apresentadas no diagrama de fase e discutidas aqui são percentagens mássicas de Inconel.

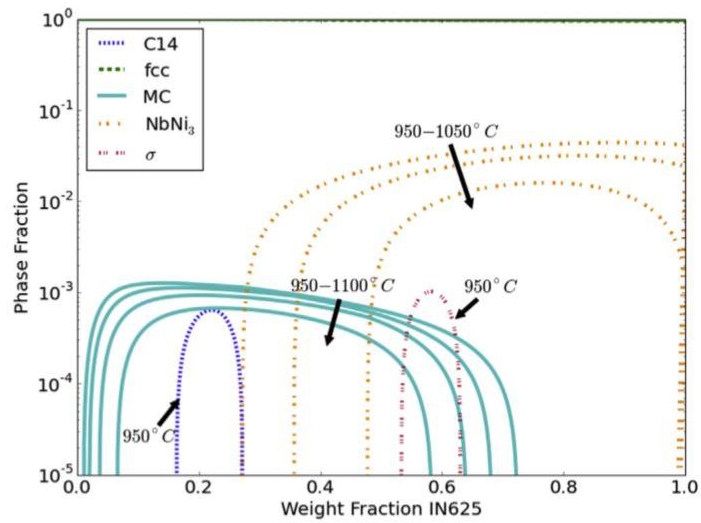


Figura 17 - Diagrama de Fase estimado para a mistura AISI 316L/Inconel [35]

Nesta gama de temperaturas a matriz é cubica de faces centradas quer no aço inoxidável quer no Inconel. A concentração máxima de precipitados MC é da ordem de 23% de IN625, no entanto a sua zona de estabilidade estende-se desde 1 até aos 72% de IN625. Como é possível ver na imagem, existe ainda uma fase de NbNi₃ que se estende desde os 30% até praticamente ao final. As fases de C14 e símbolo apresentam uma região de estabilidade muito reduzida a 950 graus, no entanto a sua presença na peça é prejudicial para as características mecânicas. Tendo em conta a zona da parede onde a fissura se encontra e seguindo a análise desta imagem é perceptível que a fissura se localiza numa zona onde podem existir precipitados quer de NbC como de MoC. A zona sujeita à fissura é extensa uma vez que a criação de precipitados deste tipo é quase constante até aos 72%, no entanto esta análise permite perceber que não foi um defeito criado devido aos parâmetros escolhidos ou ao processo, mas algo inerente à mistura destas duas ligas e que poderá sempre acontecer a não ser que sejam tomadas precauções. O IN625 apresenta concentrações elevadas o suficiente de Nb e Mo enquanto que o 316L apresenta concentrações elevadas de C, o que aliado a uma grande janela de estabilidade implica que a concentração critica vai sempre ser excedida e consequentemente a formação destas fases é inevitável.

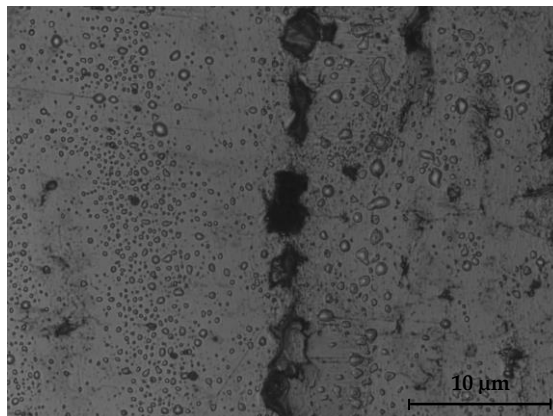


Figura 18 - Aspeto dos precipitados observados na parede produzida a cerca de 70% de Inconel

Uma sugestão de Carrol et al [35] é o controlo das quantidades de Mo e Nb através da utilização de pós elementares, o que no caso do GTAW se traduz na utilização de diferentes fios de Inconel ao longo da criação da parede, com variação na sua composição de forma a gerir a percentagem destes materiais depositada ao longo da parede. Embora o IN718 não tenha a mesma matriz de FCC, seja sujeito a tratamentos térmicos e existam estudos que comprovem que existe uma incompatibilidade com o WAAM que obriga a pós tratamentos para a modificação da microestrutura e propriedades mecânicas, a sua composição apresenta menos de metade de Mo presente nos IN625 e não apresenta problemas de fissuras devido aos precipitados de MoC como constatado por Hinojos et al [36]

Este diagrama de fase só tem em consideração as fases que possivelmente causam a fissura na peça, no entanto no trabalho de Hinojos et al [36] é visível através da técnica de difração de raios X a presença de Fe_2Nb . Com esta informação é possível afirmar que os precipitados encontrados em grande número do traço 7 para cima, são NbC e Fe_2Nb corroborando o estudo.[41]

4.5 - Durezas

Os resultados das microdurezas retiradas estão expostos na figura 19. Começando a análise no substrato, existe uma diminuição dos valores até cerca de 25 mm de altura. Os primeiros 4 pontos retirados encontram-se na zona do substrato e apresentam valores de dureza esperados para o material (215 HV), verificando-se depois a descida progressiva. O acréscimo de IN625, embora com uma dureza superior (240 HV) não apresenta uma sobreposição das durezas dos dois materiais, isto é, não se traduz num aumento linear. Esta diminuição segue as tendências já estudadas em processos de deposição direta anteriormente e deve-se ao constante reaquecimento das camadas previamente depositadas. A partir dos 25 mm, existe um aumento dos valores constante

até próximo do final da parede. Este aumento pode ser justificado inicialmente pelo aparecimento de estrutura celular [35], o que melhora quer as propriedades mecânicas quer a dureza do material, no entanto a manutenção desta tendência é justificada pelo aparecimento de precipitados de NbC e F₂Nb. Estes precipitados melhoram as tensões máximas suportadas pelo material bem como a sua dureza. Na metade da parede onde existe Inconel em maiores quantidades existe um aumento constante, ao contrário da diminuição que acontece no aço porque o aumento da quantidade de IN625 implica um maior número de precipitados, o que contraria o efeito térmico da deposição de camadas sucessivas e o reaquecimento dos cordões anteriores. [36]O aumento abrupto a partir dos 42.2mm de altura deve-se ao facto de a última camada não sofrer esse mesmo reaquecimento, mantendo a dureza que possuía depois da sua deposição. Estudando unicamente o início e o final da parede, os valores de dureza apresentados pelos fios antes da deposição foram mantidos após a soldadura.

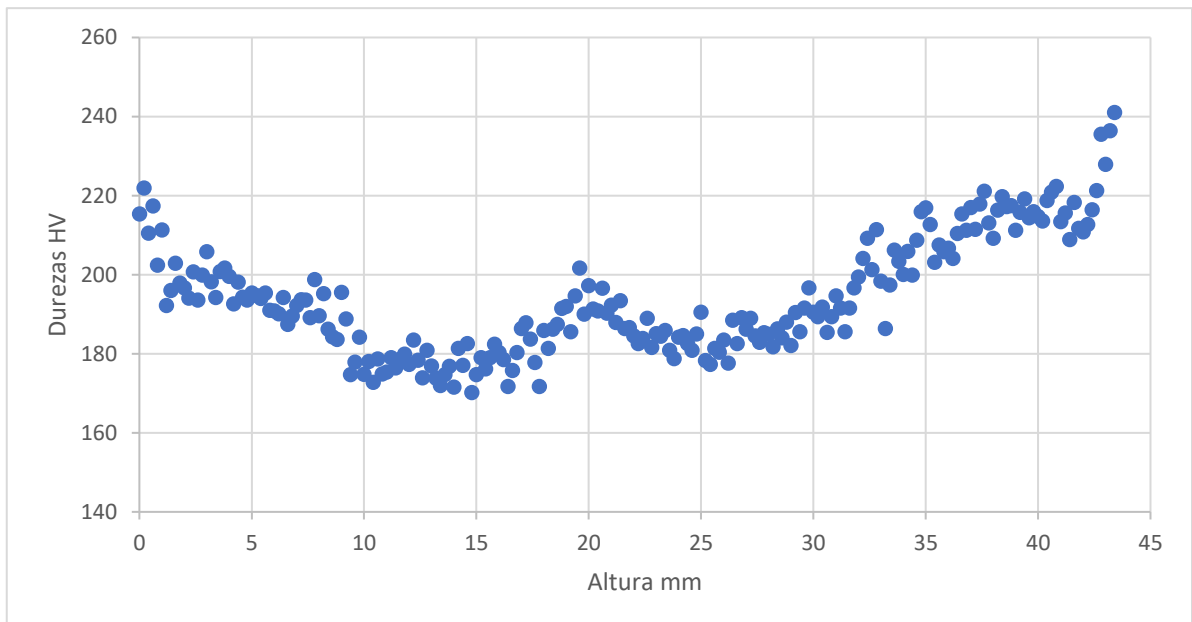


Figura 19 - Variação da dureza com a altura da parede produzida

Para análise da fissura foram efetuadas medições ao longo da largura da amostra com o objetivo de investigar as variações de durezas numa zona com a mesma composição química e as consequências da fissura na zona referida. As durezas ao longo da linha mantiveram-se estáveis, havendo alterações mais acentuadas nas medições mais próximas da fissura. Para complementar, foram efetuadas medições em torno da fissura e em cima dos precipitados de maior dimensão. As durezas medidas em volta e próximos do defeito apresentam variações significativas, sendo 50 HV a maior disparidade entre 2 pontos. Não é possível definir um aumento ou diminuição de

durezas com a proximidade da fissura como é notório na figura 20. Embora os pontos analisados apresentem uma média semelhante ao resto das medições efetuadas a mesma altura, apresentam variações mais acentuadas, justificado pela presença de precipitados, ou não, na zona onde a indentação foi realizada. Em relação às medições realizadas em cima de poros, é perceptível um aumento considerável de durezas, entre 270 e 282 HV.

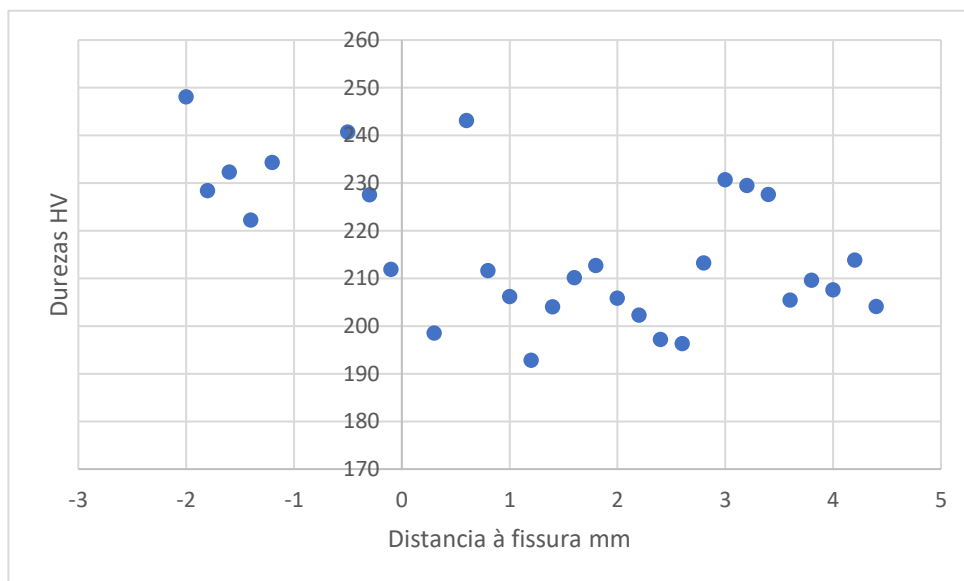


Figura 20 - Relação entre a dureza e a largura da parede na zona da fissura

Conclusão e sugestões para trabalho futuro

Este estudo teve como objetivo desenvolver e validar um sistema para a alimentação de dois fios em simultâneo de modo a criar um gradiente de composição químico e microestrutural entre um aço inoxidável 316L e Inconel 625. Baseado nos resultados obtidos, foi possível concluir o seguinte:

- O processo de fabrico aditivo por arco elétrico com duplo fio consumível é um processo adequado para a produção de um gradiente de composição devido às características de deposição e à facilidade de junção de duas ligas de composição química distinta.
- Os cordões realizados numa primeira fase para teste e otimização de parâmetros operatórios eram regulares e não apresentavam defeitos.
- Foram realizadas deposições variando a percentagem de Inconel 625 entre 10% e 90 wt. %, com variações de 10 wt. % e não se verificaram defeitos.
- Produziu-se uma “parede” com 48 camadas depositadas em altura que foi analisada.
- Observou-se gradiente microestrutural coerente com as durezas medidas. Suspeita-se que a fissura seja devida à formação de carbonetos do tipo MoC e NbC de acordo com os diagramas de fase aplicáveis, no entanto existe a necessidade de sujeitar a amostra a EBS para confirmação.

- É exequível a produção de peças com gradiente composicional e microestrutural com o sistema de alimentação de dois fios que foi adaptado ao equipamento WAAM existente no NTI/DEMI.

Sendo este o primeiro estudo deste tipo realizado no NTI surgiram numerosas questões que suscitam questões e trabalho de investigação a desenvolver futuramente, como sejam:

- Estudar a estratégia de deposição e o modo de transferência do fio desde o bocal até ao substrato.
- Analisar a composição das camadas depositadas segundo o eixo vertical para quantificar o gradiente de composição
- Analisar mais detalhadamente as causas da fissuração observada. Uma vez que os carbonetos de Molibdénio e de Nióbio se consideraram os responsáveis pela fragilidade da peça em certas zonas, era interessante fazer novas deposições evitando a gama de concentração destes elementos, variando as condições de escoamento térmico.
- Finalmente analisar as propriedades mecânicas e de resistência à corrosão.
- Estudar outros materiais a depositar.



Referências

- [1] Mawale MB, Kuthe AM, Dahake SW. Additive layered manufacturing: State-of-the-art applications in product innovation. *Concurr Eng* 2016;24:94–102. doi:10.1177/1063293X15613111.
- [2] King D, Tansey T. Rapid tooling: selective laser sintering injection tooling. *J Mater Process Technol* 2003;132:42–8. doi:https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00257-1.
- [3] Frazier WE. Metal Additive Manufacturing: A Review. *J Mater Eng Perform* 2014;23:1917–28. doi:10.1007/s11665-014-0958-z.
- [4] Ding D, Pan Z, Cuiuri D, Li H. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests. *Int J Adv Manuf Technol* 2015;81:465–81. doi:10.1007/s00170-015-7077-3.
- [5] ASTM. [1] ASTM. ASTM F2792–12a Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies n.d.
- [6] Guo N, Leu MC. Additive manufacturing: technology, applications and research needs. *Front Mech Eng* 2013;8:215–43. doi:10.1007/s11465-013-0248-8.
- [7] Kumar S. Selective laser sintering: A qualitative and objective approach. *JOM* 2003;55:43–7. doi:10.1007/s11837-003-0175-y.
- [8] Kruth JP, Froyen L, Vaerenbergh J Van, Mercelis P, Rombouts M, Lauwers B. Selective laser melting of iron-based powder. *J Mater Process Technol* 2004;149:616–22. doi:https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2003.11.051.
- [9] Abe F, Osakada K, Shiomi M, Uematsu K, Matsumoto M. The manufacturing of hard tools from metallic powders by selective laser melting. *J Mater Process Technol* 2001;111:210–3. doi:https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00522-2.
- [10] Lu L, Fuh JYH, Chen ZD, Leong CC, Wong YS. In situ formation of TiC composite using selective laser melting. *Mater Res Bull* 2000;35:1555–61. doi:https://doi.org/10.1016/S0025-5408(00)00339-1.
- [11] Harrysson OLA, Cansizoglu O, Marcellin-Little DJ, Cormier DR, West HA. Direct metal fabrication of titanium implants with tailored materials and mechanical properties using electron beam melting technology. *Mater Sci Eng C* 2008;28:366–73. doi:https://doi.org/10.1016/j.msec.2007.04.022.

- [12] Heintl P, Rottmair A, Körner C, Singer RF. Cellular Titanium by Selective Electron Beam Melting. *Adv Eng Mater* 2007;9:360–4. doi:10.1002/adem.200700025.
- [13] Heintl P, Müller L, Körner C, Singer RF, Müller FA. Cellular Ti–6Al–4V structures with interconnected macro porosity for bone implants fabricated by selective electron beam melting. *Acta Biomater* 2008;4:1536–44. doi:https://doi.org/10.1016/j.actbio.2008.03.013.
- [14] Gasser A, Backes G, Kelbassa I, Weisheit A, Wissenbach K. Laser Additive Manufacturing. *Laser Tech J* 2010;7:58–63. doi:10.1002/latj.201090029.
- [15] Balla VK, DeVasConCellos PD, Xue W, Bose S, Bandyopadhyay A. Fabrication of compositionally and structurally graded Ti–TiO₂ structures using laser engineered net shaping (LENS). *Acta Biomater* 2009;5:1831–7. doi:https://doi.org/10.1016/j.actbio.2009.01.011.
- [16] Lewis GK, Schlienger E. Practical considerations and capabilities for laser assisted direct metal deposition. *Mater Des* 2000;21:417–23. doi:https://doi.org/10.1016/S0261-3069(99)00078-3.
- [17] Zhang K, Liu W, Shang X. Research on the processing experiments of laser metal deposition shaping. *Opt Laser Technol* 2007;39:549–57. doi:https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2005.10.009.
- [18] Lewis G. Direct Laser Metal Deposition Process Fabricates Near-Net-Shape Components Rapidly. *Mater Technol* 1995;10:51–4. doi:10.1080/10667857.1995.11752590.
- [19] Hofmeister W, Griffith M. Solidification in direct metal deposition by LENS processing. *JOM* 2001;53:30–4. doi:10.1007/s11837-001-0066-z.
- [20] Unocic RR, DuPont JN. Process efficiency measurements in the laser engineered net shaping process. *Metall Mater Trans B* 2004;35:143–52. doi:10.1007/s11663-004-0104-7.
- [21] Gu J, Bai J, Ding J, Williams S, Wang L, Liu K. Design and cracking susceptibility of additively manufactured Al–Cu–Mg alloys with tandem wires and pulsed arc. *J Mater Process Technol* 2018;262:210–20. doi:https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.06.030.
- [22] Qi Z, Qi B, Cong B, Zhang R. Microstructure and mechanical properties of wire + arc additively manufactured Al–Cu–Mg aluminum alloy. *Mater Lett* 2018;233:348–50. doi:https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.09.048.
- [23] Wang J, Pan Z, Ma Y, Lu Y, Shen C, Cuiuri D, et al. Characterization of wire arc additively manufactured titanium aluminide functionally graded material: Microstructure, mechanical properties and oxidation behaviour. *Mater Sci Eng A* 2018;734:110–9. doi:https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.07.097.
- [24] Shen C, Pan Z, Cuiuri D, Dong B, Li H. In-depth study of the mechanical properties for Fe₃Al based iron aluminide fabricated using the wire-arc additive manufacturing process. *Mater Sci Eng A* 2016;669:118–26. doi:https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.05.047.
- [25] Shen C, Pan Z, Ma Y, Cuiuri D, Li H. Fabrication of iron-rich Fe–Al intermetallics using the wire-arc additive manufacturing process. *Addit Manuf* 2015;7:20–6. doi:https://doi.org/10.1016/j.addma.2015.06.001.
- [26] Williams SW, Martina F, Addison AC, Ding J, Pardal G, Colegrove P. Wire + Arc Additive Manufacturing. *Mater Sci Technol* 2016;32:641–7. doi:10.1179/1743284715Y.0000000073.
- [27] Baufeld B, Brandl E, van der Biest O. Wire based additive layer manufacturing:

- Comparison of microstructure and mechanical properties of Ti–6Al–4V components fabricated by laser-beam deposition and shaped metal deposition. *J Mater Process Technol* 2011;211:1146–58. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.01.018>.
- [28] DebRoy T, Wei HL, Zuback JS, Mukherjee T, Elmer JW, Milewski JO, et al. Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. *Prog Mater Sci* 2018;92:112–224. doi:<https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.001>.
- [29] Zhang Y, Chen Y, Li P, Male A. Weld deposition-based rapid prototyping: A preliminary study. *J Mater Process Technol* 2003;135:347–57. doi:10.1016/S0924-0136(02)00867-1.
- [30] Ding D, Pan Z, Cuiuri D, Li H. A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM). *Robot Comput Integr Manuf* 2015;31:101–10. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rcim.2014.08.008>.
- [31] Nilsiam Y, Sanders P, Pearce JM. Slicer and process improvements for open-source GMAW-based metal 3-D printing. *Addit Manuf* 2017;18:110–20. doi:<https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.10.007>.
- [32] Ao SI, International Association of Engineers. E, Shukla M, Pityana S. World Congress on Engineering : WCE 2012 : 4-6 July, 2012, Imperial College London, London, U.K. 2012;III:2065.
- [33] Shen C, Pan Z, Cuiuri D, Roberts J, Li H. Fabrication of Fe-FeAl Functionally Graded Material Using the Wire-Arc Additive Manufacturing Process. *Metall Mater Trans B Process Metall Mater Process Sci* 2016;47:763–72. doi:10.1007/s11663-015-0509-5.
- [34] Kieback B, Neubrand A, Riedel H. Processing techniques for functionally graded materials. *Mater Sci Eng A* 2003;362:81–106. doi:10.1016/S0921-5093(03)00578-1.
- [35] Carroll BE, Otis RA, Borgonia JP, Suh JO, Dillon RP, Shapiro AA, et al. Functionally graded material of 304L stainless steel and inconel 625 fabricated by directed energy deposition: Characterization and thermodynamic modeling. *Acta Mater* 2016;108:46–54. doi:10.1016/j.actamat.2016.02.019.
- [36] Hinojos A, Mireles J, Reichardt A, Frigola P, Hosemann P, Murr LE, et al. Joining of Inconel 718 and 316 Stainless Steel using electron beam melting additive manufacturing technology. *Mater Des* 2016;94:17–27. doi:10.1016/j.matdes.2016.01.041.
- [37] Abe T, Sasahara H. Dissimilar metal deposition with a stainless steel and nickel-based alloy using wire and arc-based additive manufacturing. *Precis Eng* 2016;45:387–95. doi:10.1016/j.precisioneng.2016.03.016.
- [38] Rodrigues TMA. Wire and arc additive manufacturing : equipment development and parts characterization 2018.
- [39] Duarte VR. Additive manufacturing of a high resistance steel by MIG / MAG 2016:1–83.
- [40] Santos JFO, Quintino L. Processos de soldadura volume II. n.d.
- [41] Pryadko EL, Reuther H, Shevchenko N, Markov AB, Kolitsch A. Phase Composition of 316L Stainless Steel after Electron-Beam Irradiation Followed by Chromium Ion Implantation 1 n.d.:153–5.