



UNIVERSIDADE D  
COIMBRA

Dalila Teixeira Gomes

**FABRICAÇÃO ADITIVA POR TIG DE  
COMPONENTES EM AÇO INOXIDÁVEL**

**VOLUME 1**

**Dissertação no âmbito do Mestrado integrado em Engenharia Mecânica, na área de produção e projeto orientada pela Professora Doutora Dulce Maria Esteves Rodrigues e pelo Professor Doutor Rui Manuel Ferreira Leal e apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica, da Universidade de Coimbra.**

Setembro de 2022



1 2



9 0

FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE  
COIMBRA

# **Fabricação aditiva por TIG de componentes em aço inoxidável**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia  
Mecânica na Especialidade de Produção e Projeto

## **Additive manufacturing of stainless steel parts using TIG**

**Autor**

**Dalila Teixeira Gomes**

**Orientadores**

**Professora Doutora Dulce Maria Esteves Rodrigues**

**Professor Doutor Rui Manuel Ferreira Leal**

**Júri**

<b>Presidente</b>	<b>Doutor David Gomes Andrade</b> Investigador na Universidade de Coimbra
<b>Orientador</b>	<b>Professora Doutora Dulce Maria Esteves Rodrigues</b> Professora Associada com Agregação da Universidade de Coimbra
<b>Vogal</b>	<b>Professor Doutor Hélio Cordeiro de Miranda</b> Professor Titular da Universidade Federal do Ceará

**Coimbra, setembro, 2022**



## Agradecimentos

O trabalho desenvolvido nesta tese só foi possível graças ao apoio de algumas pessoas, às quais não posso deixar de agradecer.

À Professora Doutora Dulce Rodrigues e ao Professor Doutor Rui Leal pela partilha de conhecimento, pelo apoio e pela disponibilidade.

Ao Professor Doutor Hélio pela disponibilidade, pelo conhecimento que me transmitiu e pelo apoio laboratorial.

Ao Senhor Fernando pela disponibilidade e pela ajuda durante o trabalho na oficina.

Aos meus colegas de laboratório pela entreaajuda.

Aos meus pais, Anabela e Paulo, ao meu irmão André, à minha cunhada Rute e à minha sobrinha Júlia, pelo apoio incondicional e pela motivação que me deram durante os momentos mais difíceis. Sem eles este percurso teria sido muito mais difícil.

À Denise e ao Frederico pela amizade e apoio emocional que me deram ao longo destes longos anos.

Aos meus amigos pela entreaajuda e amizade durante todo o curso.



## Resumo

Nesta dissertação analisa-se a influência dos parâmetros e procedimentos de deposição sobre a morfologia e as propriedades mecânicas e microestruturais de componentes, em aço inoxidável (AISI 316L), produzidos por fabricação aditiva, com recurso à tecnologia *Tungsten Inert Gas* (TIG). Com o objetivo de realizar uma análise comparativa, foram produzidos oito componentes monocamada e três componentes multicamada, utilizando TIG em corrente contínua pulsada e não pulsada, e alimentação automática de material de adição. As deposições foram efetuadas em modo automático, através do acoplamento da tocha TIG a um sistema de transporte, que consiste num carro que permite a movimentação linear da mesma com velocidade pré-estabelecida. O substrato utilizado para todas as deposições foi uma chapa de aço inoxidável AISI 316L.

A análise comparativa consistiu na realização de inspeção visual e de testes de caracterização mecânica e microestrutural. A caracterização microestrutural assentou na análise, por microscopia ótica, de secções transversais de todas as amostras. A caracterização mecânica compreendeu a realização de ensaios de dureza nas mesmas secções transversais. Para os componentes multicamada foi ainda realizada uma análise morfológica quantitativa. Para isso foram utilizadas técnicas de Correlação Digital de Imagem (DIC).

A inspeção visual dos componentes revelou que todos estavam isentos de defeitos superficiais relevantes. Foram ainda medidas as dimensões dos componentes monocamada, tendo sido feita uma análise comparativa da evolução das suas dimensões em função dos parâmetros de deposição. Estes resultados demonstram que a utilização de corrente contínua, não pulsada, com polaridade negativa, conduz à obtenção de monocamadas com maior largura e penetração, assim como com menor altura, do que as produzidas com corrente pulsada. A análise comparativa dos componentes monocamada produzidos com corrente pulsada permitiu ainda concluir que, para a mesma frequência da corrente, quanto maior for a velocidade de alimentação do arame de adição, maior será a largura do componente produzido. Para a mesma intensidade de corrente, foi observado que, quanto menor for a velocidade de alimentação do arame de adição, maior será a quantidade de energia fornecida ao banho de fusão e conseqüentemente, maior será a penetração e menor a altura das monocamadas. No entanto, deve ressaltar-se que todas estas características estão fortemente

dependentes da temperatura do substrato, a qual, neste trabalho, foi fortemente dependente da sequência de deposição das monocamadas.

A inspeção visual dos componentes multicamada permitiu identificar variações na geometria e na posição relativa das diferentes camadas, as quais foram atribuídas à ausência de um sistema de deslocamento da tocha TIG com maior precisão. A análise das condições de deposição permitiu ainda constatar que o componente produzido utilizando corrente não-pulsada foi o que apresentou o tempo de produção mais longo, sendo também o que apresentou a maior espessura do componente depositado e a maior deformação do substrato, comparativamente aos componentes depositados com corrente pulsada. A análise morfológica destes componentes possibilitou a comparação do relevo superficial das amostras, permitindo constatar que o componente produzido com os valores de energia mais reduzidos, foi aquele que apresentou a menor variação de profundidade entre camadas.

A análise microestrutural permitiu identificar diferentes estruturas nas zonas fundidas, quer dos componentes monocamada, quer dos componentes multicamada. No entanto, na generalidade, poderá afirmar-se que todos os materiais depositados apresentavam uma matriz austenítica, com inclusões de ferrite.

Por fim, a caracterização mecânica revelou que os todos os materiais depositados por fabrico aditivo apresentavam dureza superior à do substrato. A análise dos resultados de dureza permitiu ainda concluir que o aumento da energia fornecida ao banho de fusão diminui a dureza do material depositado.

**Palavras-chave:** *Wire Arc Additive Manufacturing, TIG, Aço inoxidável austenítico.*

## Abstract

In this dissertation the effect of different parameters and deposition procedures on the morphology, mechanical and microstructural properties of stainless steel (AISI 316 L) components produced by additive manufacturing resorting to Tungsten Inert Gas technology (TIG). With a goal of performing a comparative analysis eight single layered components and three multilayer components were produced both using pulsed and non-pulsed TIG with automatic wire feeding. The components were deposited in automatic mode by coupling the TIG torch to a transportation system that allows the linear movement with a constant pre-established speed. The substrate used in all the depositions was a plate of austenitic AISI 316L stainless steel.

The comparative analysis consisted in a visual inspection, mechanical and microstructural characterization. For the microstructural characterization the transversal sections of all the samples were observed under the optical microscope. For the mechanical characterization hardness tests were performed. A quantitative morphological analysis was performed only on the multilayer components. To perform the analysis, it was used Digital Image Correlation (DIC) technics.

The visual inspection of the components showed that all of them were free of relevant superficial defects. The dimensions of the single layer components were also measured and a comparative analysis between those dimensions and the parameters used was made. These results showed that the usage of non-pulsed direct current with negative polarity generates wider components with a deeper penetration and shorter weld beads than those produce with pulsed current. The comparative analysis of the single layer components produced with pulsed current has allowed to conclude that using the same frequency, for faster wire feeding speeds the wider the deposited component would be. Using the same amount of current intensity, it was observed that a slower wire feeding speed would result in greater amount of energy added to the fusion bath resulting in a deeper penetration and a shorter single layer component. However, it should be noted that all these characteristics are highly influenced by the substrate temperature which in this study was heavily influenced by the sequence of the deposition of the single layered components.

The visual inspection of the multilayer components allowed to identify deviations on the geometry and on the relative position of the different layers which were attributed to the fact that a torch transportation system with low precision was used. An analysis to the deposition conditions has also allowed to note that the component produced using non pulsed current presented the longest production time also being the widest and presenting the biggest substrate deformation compared to the components deposited using pulsed current. The morphological analysis of these components permitted the comparison of the surface height between the samples, allowing to conclude that the component produced with lower values of energy was the one that presented the smallest variation of depth between layers.

The microstructural analysis enabled the identification of different structures of the fusion zones of both single layer and multilayer components. However, in general, all of them presented an austenitic matrix with ferrite inclusions.

Finally, the mechanical characterization revealed that all the materials deposited using additive manufacturing presented a small increase of hardness compared to the substrate material. It was also concluded that the energy increase applied to the fusion bath leads to a decrease of hardness in the deposited material.

**Keywords:** Wire Arc Additive Manufacturing, TIG, Austenitic Stainless Steel.

---

## Índice

Índice de Figuras .....	ix
Índice de Tabelas .....	xi
Siglas .....	xiii
Siglas .....	xiii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1. <i>Wire Arc Additive Manufacturing</i> .....	3
2.2. Processo TIG.....	4
2.3. TIG com Corrente Pulsada.....	6
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	7
3.1. Substrato .....	7
3.2. Material de Adição.....	8
3.3. Parâmetros do Processo .....	9
3.4. Estratégia de Deposição.....	10
3.5. Análise Metalográfica.....	11
3.6. Caracterização Mecânica .....	12
3.7. Análise Morfológica .....	13
4. ANÁLISE DE RESULTADOS.....	15
4.1. Componentes Monocamada.....	15
4.1.1. Inspeção Visual .....	15
4.1.2. Análise Metalográfica.....	21
4.1.3. Caracterização Mecânica.....	24
4.2. Componentes Multicamadas.....	29
4.2.1. Inspeção Visual .....	29
4.2.2. Análise Morfológica.....	31
4.2.3. Análise Metalográfica.....	35
4.2.4. Caracterização Mecânica.....	38
5. CONCLUSÕES.....	43
6. PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS.....	45
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	47
APÊNDICE A .....	51



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Esquema representativo do processo TIG. [13] .....	5
Figura 2.2. Representação do comportamento da corrente no processo TIG corrente pulsada.[15] .....	6
Figura 3.1. Posicionamento do substrato.....	8
Figura 3.2.Carrinho de soldadura, SAF, e tocha de soldadura com alimentação automática. ....	11
Figura 3.3. Posicionamento do eletrodo de tungstênio e do arame de adição em relação ao componente. ....	11
Figura 3.4.Esquema do posicionamento das indentações nos componentes monocamada, amostra #8. ....	12
Figura 3.5.Sentido da realização das indentações nos componentes P1, P2 e P3. ....	13
Figura 3.6. Superfície do componente multicamadas P1, com padrão aleatório de pontos negros. ....	13
Figura 4.1. Medição das dimensões dos componentes monocamada.....	17
Figura 4.2. Gráfico dos valores da largura dos componentes monocamada. ....	18
Figura 4.3. Gráfico dos valores da penetração máxima dos componentes monocamada. ..	19
Figura 4.4. Gráfico dos valores da altura dos componentes monocamada.....	20
Figura 4.5. Micrografia evidenciando as diferentes morfologias da ferrite $\delta$ , amostra #8..	23
Figura 4.6. Micrografia evidenciando as estruturas de arrefecimento rápido, amostra #3..	23
Figura 4.7. Gráfico dos valores das durezas do material base.....	25
Figura 4.8. Gráfico dos valores das durezas dos componentes #4, #7 e #8. ....	26
Figura 4.9. Gráfico dos valores das durezas dos componentes com frequência igual a 4 Hz, #2, #3, #4 e #5. ....	27
Figura 4.10. Gráfico dos valores das durezas dos componentes com frequência igual a 5 Hz, #6 e #7.....	28
Figura 4.11. Gráfico dos valores das durezas dos componentes com frequência igual a 2 Hz, 4 Hz e 5 Hz. ....	28
Figura 4.12. Distorções dos substratos, componentes multicamada P1, P2 e P3 (da esquerda para a direita).....	29
Figura 4.13. Componentes multicamada, P1, P2 e P3 (de cima para baixo).....	30
Figura 4.16. Representação da posição relativa dos cordões, componente P1.....	32
Figura 4.17. Gráfico dos valores da posição relativa dos cordões, componente P1.....	32
Figura 4.18. Representação da posição relativa dos cordões, componente P2.....	33

Figura 4.19. Gráfico dos valores da posição relativa dos cordões, componente P2. ....	34
Figura 4.20. Representação da posição relativa dos cordões, componente P3. ....	34
Figura 4.21. Gráfico dos valores da posição relativa dos cordões, componente P3. ....	35
Figura 4.22. Zona da base dos componentes multicamada, P1, P2 e P3, evidenciando as zonas das quais foram retiradas as micrografias. Ampliação 1,25x. ....	36
Figura 4.23. Micrografia retiradas da zona da base dos componentes multicamada. ....	36
Figura 4.24. Zona do meio dos componentes multicamada, com linhas de fusão evidenciadas, componentes P1, P2 e P3. Ampliação 1,25x. ....	36
Figura 4.25. Micrografia retiradas da zona do meio dos componentes multicamada, componentes P1, P2 e P3. ....	37
Figura 4.26. Zona do topo dos componentes multicamada, P1, P2 e P3, evidenciando as zonas das quais foram retiradas as micrografias. Ampliação 1,25x. ....	37
Figura 4.27. Micrografia retiradas da zona do topo dos componentes multicamada, P1, P2 e P3. ....	37
Figura 4.28. Durezas médias de P1, P2 e P3. ....	39
Figura 4.29. Perfil de durezas de P1. ....	39
Figura 4.30. Perfil de durezas de P2. ....	40
Figura 4.31. Perfil de durezas de P3. ....	41
Figura 6.1. Equipamento de soldadura Fronius KD 4000 D-1. ....	51
Figura 6.2. Parte inferior do componente multicamada P1 (sentido da deposição, da esquerda para a direita). ....	51
Figura 6.3. Parte inferior da chapa de substrato do componente multicamada P2 e parâmetros de deposição, sentido da deposição da esquerda para a direita. ....	51
Figura 6.4. Parte inferior da chapa de substrato do componente multicamada P3 e parâmetros de deposição, sentido da soldadura da esquerda para a direita. ....	52

---

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1. Composição química do material base, [wt %] [17].....	7
Tabela 3.2. Propriedades mecânicas do aço inoxidável 316L [17]. .....	7
Tabela 3.3. Composição química do material de adição [wt %] [18] . .....	8
Tabela 3.4. Propriedades mecânicas do material de adição [18].....	8
Tabela 3.5. Parâmetros de deposição dos componentes monocamada.....	9
Tabela 3.6. Parâmetros de deposição dos componentes multicamada. ....	10
Tabela 4.1. Macrografias da superfície dos componentes monocamada, sentido de deposição da esquerda para a direita, ampliação 1×. ....	17
Tabela 4.2. Micrografias dos componentes monocamada #1 a #8. ....	22
Tabela 4.3. Número de camadas e altura da parede. ....	30



## **SIGLAS**

### **Siglas**

ASTM – American Society for Testing and Materials

TIG – *Tungsten Inert Gas*

CMT – *Cold Metal Transfer*

MIG – *Metal Inert Gas*

GTAW – *Gas Tungsten Arc Welding*

PAW – *Plasma Arc Welding*

WAAM – *Wire Arc Additive Manufacturing*

ZF – Zona fundida

ZTA – Zona termicamente afetada

MB – Material base



## 1. INTRODUÇÃO

A procura de métodos de produção cada vez mais sustentáveis levou ao cada vez maior interesse e desenvolvimento dos processos de fabricação aditiva. Estes processos produzem menos desperdício de matérias-primas, comparativamente aos processos convencionais de fabricação subtrativa.

Os processos *Wire Arc Additive Manufacturing* (WAAM), são processos de fabricação aditiva, que utilizam arame como material de adição e arco elétrico como fonte de energia, utilizando comumente equipamentos de soldadura por arco elétrico para a deposição. Estes processos têm recebido cada vez mais atenção, devido à sua capacidade de produzir componentes com elevado nível de complexidade, e de grande dimensão, a um custo inferior, comparativamente a outros processos de fabricação aditiva.

Neste trabalho foram produzidos oito componentes monocamada e três componentes multicamada, em aço inoxidável, utilizando para tal um equipamento de soldadura TIG. O objetivo da investigação consistiu em determinar, através da comparação de resultados, os parâmetros de processo ótimos para a deposição de material de forma rápida e com um controlo aceitável da precisão dimensional. Para tal, foram produzidos componentes monocamada e multicamada, com parâmetros de deposição diferentes. No caso dos componente multicamada, por exemplo, enquanto o primeiro (P1) foi depositado utilizando corrente contínua não pulsada, o segundo (P2) e o terceiro (P3), foram depositados utilizando corrente contínua pulsada. De modo a estabelecer o conjunto de parâmetros mais adequado para a deposição do aço inoxidável, foi efetuada a análise metalográfica do material depositado em todos os componentes, assim como medições de dureza, com o objetivo de aferir a resistência mecânica. No caso dos componente multicamada, o acabamento superficial das amostras, assim como a precisão dimensional, foram analisados com recurso a um sistema de Correlação Digital de Imagem (CDI).

De modo a melhor descrever e enquadrar o trabalho realizado, esta dissertação está dividida em cinco capítulos, nos quais são descritos de forma sintética, o estado da arte, o trabalho realizado e as conclusões obtidas. Mais concretamente, no presente capítulo, faz-se o enquadramento do tema a ser abordado e apresenta-se a estrutura da tese. No segundo capítulo será exposta a revisão bibliográfica, onde se encontram descritos os processos

WAAM, dando maior ênfase ao que utiliza a tecnologia TIG como fonte de energia. No terceiro capítulo serão apresentados os materiais utilizados e os procedimentos experimentais. No quarto capítulo proceder-se-á à apresentação e discussão dos resultados da análise metalográfica, da caracterização mecânica e da análise dimensional e do acabamento superficial. No capítulo cinco serão expostas as conclusões do trabalho efetuado e, no capítulo seis, serão apresentadas as sugestões para trabalhos futuros.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O capítulo que agora se inicia pretende enquadrar o trabalho realizado no estado da arte em fabricação aditiva por arco elétrico, usualmente designado em língua inglesa por *Wire Arc Additive Manufacturing*. Atendendo à utilização generalizada da sigla associada à designação em língua inglesa (WAAM) na generalidade da literatura, nesta dissertação, a mesma será adotada em detrimento da designação em português.

### 2.1. *Wire Arc Additive Manufacturing*

A *American Society for Testing and Materials* (ASTM) definiu fabricação aditiva como um “processo de adicionar materiais, camada a camada, para fabricar objetos, a partir de modelos 3D”. De acordo com a literatura, os processos de fabricação aditiva podem ser divididos em várias categorias, que de um modo geral se distinguem pelo material de adição (pós ou arames) e pela fonte de energia (arco elétrico ou energia focalizada) utilizados na deposição [1], [2],[3], [4].

Os processos WAAM combinam a deposição de material de adição em formato de arame, com a utilização do arco elétrico como fonte de energia, pelo que fazem uso das tecnologias e equipamentos de soldadura por arco elétrico, para a fabricação aditiva, e ainda, de um substrato sobre o qual o material de adição é depositado [5], [6]. Algumas das tecnologias comumente utilizados em WAAM são a tecnologia MIG (*Metal Inert Gas*), utilizando a técnica CMT (*Cold Metal Transfer*), TIG (*Tungsten Inert Gas*) e ainda, a tecnologia Plasma [5], [4].

Na generalidade, os processos WAAM têm vantagens em relação a outros processos de fabricação aditiva que utilizam pós metálicos como material de adição. A primeira vantagem é o material de adição, que pelo facto de ser um arame se torna mais fácil de manusear, mais barato e, apresenta ainda, uma maior facilidade de aquisição relativamente aos pós metálicos. A segunda vantagem reside no facto de permitir taxas de deposição superiores às obtidas pelos processos que utilizam pós metálicos [1], [5], [7]. Deve ainda referir-se que os processos WAAM utilizam equipamentos comumente utilizados em

soldadura, e, portanto, são facilmente acessíveis e com um investimento inicial mais baixo do que os equipamentos exclusivamente dedicados à fabricação aditiva. Assim, os processos WAAM, acarretam um menor custo e são os mais adequados para a fabricação de peças de grandes dimensões [5].

No entanto os processos WAAM também têm algumas desvantagens, tais como a ocorrência de concentrações de tensões e distorções nos componentes fabricados, fenômenos estes causados pela elevada quantidade de energia utilizada nestes processos e também pela sua elevada taxa de deposição [8]. As elevadas taxas de deposição conduzem ainda a que os componentes fabricados por WAAM necessitem de maquinagem posterior para garantir elevada precisão dimensional e excelente acabamento superficial [5]. Outra das desvantagens dos componentes fabricados por WAAM é a possível anisotropia de propriedades mecânicas que estes apresentam relativamente à trajetória de deposição [8].

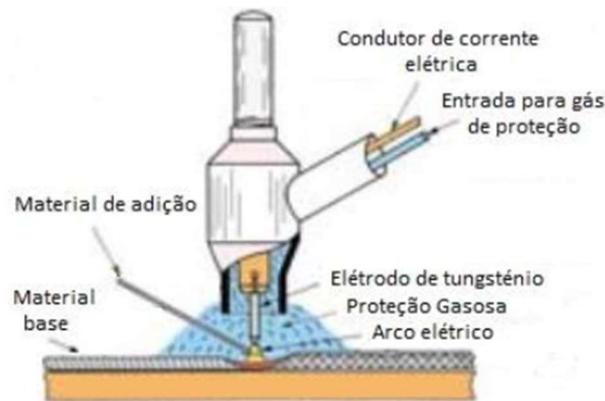
Apesar das desvantagens enunciadas, os componentes fabricados através de WAAM continuam a ser mais económicos do que os fabricados pelos processos de fabricação aditiva com recurso a pós metálicos, ou aos processos de fabrico subtrativo, por haver um menor desperdício de material [7]

## 2.2. Processo TIG

No processo TIG ou GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*), o arco elétrico, que é escorvado entre um eletrodo de tungsténio, não consumível, e o metal base, gera o calor que funde o metal base e o metal de adição. Na Figura 2.1 está representado o processo de soldadura TIG. No esquema apresentado na figura é possível observar o eletrodo de tungsténio, o material de adição, o material base, a proteção gasosa e o arco elétrico. Neste processo, o gás utilizado na proteção do banho de fusão é inerte e, tem como funções, para além da proteção ao material fundido, conferir estabilidade ao arco elétrico. Os gases de proteção utilizados em TIG são, geralmente, o Argon, o Hélio ou misturas de ambos [9], [10], [11]. Neste processo, o material de adição pode ser alimentado manual ou automaticamente.

Os parâmetros do processo TIG têm grande influência nas propriedades dos componentes produzidos, pois condicionam a forma e tamanho do banho de fusão, o acabamento do cordão depositado e, também, a microestrutura [7]. Os principais parâmetros deste processo são, o tipo de eletrodo de tungsténio, e a geometria da sua ponta, o gás de

proteção, o material de adição, a intensidade da corrente, o tipo de corrente, a velocidade de alimentação do arame de adição, quando utilizados, e a velocidade de soldadura [12]. Tal como referido anteriormente, os elétrodos utilizados no processo TIG são feitos em tungsténio ou em ligas de tungsténio. O elétrodo mais utilizado, quando é utilizada corrente contínua com polaridade negativa é o elétrodo de tungsténio com adição de 2% de tório.



**Figura 2.1.** Esquema representativo do processo TIG. [13]

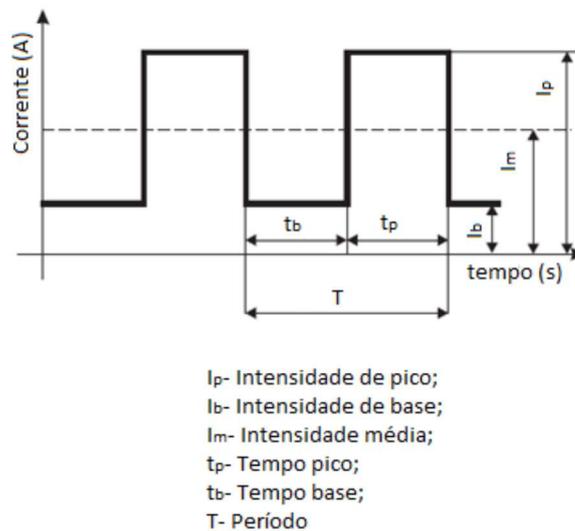
A corrente de soldadura é um dos parâmetros mais importantes do processo, pois tem influência direta na quantidade de calor gerado, e assim, na profundidade da penetração, na velocidade de deposição, na taxa de deposição e nas características do metal depositado. A corrente utilizada em TIG pode ser alternada (CA) ou contínua (CC). No processo TIG, a polaridade negativa é a mais utilizada pois, para além de permitir a utilização de materiais com maior temperatura de fusão, também proporciona uma maior estabilidade ao arco elétrico [10].

A tecnologia TIG permite a produção de componentes com boas propriedades mecânicas e soldaduras isentas de defeitos. Por esta razão, este processo pode ser utilizado para produzir componentes de média e elevada dimensão, de forma pouco dispendiosa [14].

Como foi demonstrado anteriormente por Taberner *et al.* [5], os componentes produzidos em AISI 316L, por TIG, apresentam melhores propriedades mecânicas, e também, uma menor anisotropia, do que os produzidos por CMT ou PAW (*Plasma Arc Welding*).

### 2.3. TIG com Corrente Pulsada

Nesta variante do processo TIG a intensidade da corrente varia de forma cíclica entre um valor de pico e um valor de base, conforme é representado na Figura 2.2. Devido à variação da intensidade da corrente, a utilização de corrente pulsada resulta na obtenção de uma intensidade média inferior às utilizadas no processo TIG com corrente contínua e, por isso, o resultado é uma menor adição de calor à peça durante a deposição [10], [15].



**Figura 2.2.** Representação do comportamento da corrente no processo TIG corrente pulsada.[15]

De acordo com trabalhos anteriores, no caso da utilização de corrente pulsada, a corrente de pico, a corrente de base e a frequência de pulso são os parâmetros com maior influência na geometria do cordão de soldadura e no tamanho de grão da zona fundida [16].

Na literatura, quando é utilizada corrente pulsada, é frequentemente reportada a ocorrência de refinamento do grão na zona fundida, de redução da dimensão da ZTA e diminuição da deformação da peça soldada [11].

### 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

#### 3.1. Substrato

Todas as deposições realizadas neste estudo foram feitas utilizando como substrato uma chapa de aço inoxidável 316 L (austenítico), com uma espessura de 3 mm. A composição química deste material está representada na Tabela 3.1 e as propriedades mecânicas estão representadas na Tabela 3.2.

**Tabela 3.1.** Composição química do material base, [wt %] [17].

Material	C%	Cr%	Fe%	Mn%	Mo%	Ni%	P%	Si%	S%
<b>Aço inoxidável 316 L</b>	≤0,030	16-18	61,9-72	≤2	2-3	10-14	≤0,045	≤1	≤0,030

**Tabela 3.2.** Propriedades mecânicas do aço inoxidável 316L [17].

Propriedade [unidade]	Valor
Limite de elasticidade [MPa]	290
Resistência à tração/resistência máxima [MPa]	560
Enlongamento [%]	50

O substrato foi cortado de acordo com as dimensões pretendidas (200x50x3) mm e, posteriormente, foi limpo com uma lixa, para eliminar óxidos e outras impurezas da sua superfície. Antes de proceder à deposição de material, o substrato foi ainda limpo com um pano e acetona. Na Figura 3.1 é possível observar o posicionamento do substrato e a forma como este foi fixado.



**Figura 3.1.** Posicionamento do substrato.

### 3.2. Material de Adição

O material de adição utilizado neste trabalho foi um arame de aço inoxidável austenítico 316L, com 1,2 mm de diâmetro. A composição química deste material é apresentada na Tabela 3.3 as propriedades mecânicas previstas para o material depositado estão representadas na Tabela 3.4.

**Tabela 3.3.** Composição química do material de adição [wt %] [18].

Material	C %	Cr %	Fe %	Mn %	Mo %	Ni %	P %	Si %	S %	Cu %
<b>Aço inoxidável 316 L</b>	0,017	18,3 70	Bal.	1,710	2,560	11,2 70	0,026	0,81 0	0,006	0,07

**Tabela 3.4.** Propriedades mecânicas do material de adição [18].

Propriedade [unidade]	Valor
Limite de elasticidade [MPa]	320
Resistência à tração/resistência máxima [MPa]	510
Enlongamento [%]	25

### 3.3. Parâmetros do Processo

Neste trabalho foram produzidos oito componentes monocamada e três componentes multicamada, utilizando corrente contínua, com polaridade negativa, pulsada e não pulsada. Na Tabela 3.5 são apresentados os parâmetros de deposição dos componentes monocamada e na Tabela 3.6 os parâmetros de deposição dos componentes multicamada.

**Tabela 3.5.** Parâmetros de deposição dos componentes monocamada.

Nomenclatura	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
Frequência [Hz]	2	4	4	4	4	5	5	NA
Corrente no pico [A]	150	150	150	150	195	150	150	110
Corrente na base [A]	75	75	75	75	97,5	75	60	110
Tempo em pico [%]	50	50	50	50	50	50	40	NA
Tempo em base [%]	50	50	50	50	50	50	60	NA
Intensidade média [A]	112,5	112,5	112,5	112,5	146,25	112,5	96	110
Velocidade do arame no pico [m/minuto]	2	1,4	1,8	1,9	2,4	1,6	1,8	1
Velocidade do arame na base [m/minuto]	1	0,7	0,9	0,95	1,2	1,6	0,72	1
Velocidade média do arame [m/minuto]	1,5	1,05	1,35	1,43	1,8	1,6	1,15	1
Velocidade do carro de soldadura [cm/minuto]	22	22	22	22	32	22	22	17
Energia [kJ/mm]	0,46	0,46	0,46	0,46	0,41	0,46	0,39	0,58

**Tabela 3.6.** Parâmetros de deposição dos componentes multicamada.

Nomenclatura	P1	P2	P3
Frequência [Hz]	NA	4	5
Corrente no pico [A]	NA	150	150
Corrente na base [A]	NA	75	60
Tempo em pico [%]	NA	50	40
Tempo em base [%]	NA	50	60
Intensidade média [A]	110	112,5	96
Velocidade do arame no pico [m/minuto]	1	1,9	2
Velocidade do arame na base [m/minuto]	NA	0,95	1,2
Velocidade do carro de soldadura [cm/minuto]	17	22	22

Os parâmetros de deposição dos componentes monocamada #8, #4 e #7 foram também utilizados para a deposição dos componentes multicamada P1, P2 e P3, respetivamente. No caso do componente P3, a velocidade inicial do arame era de 1,8 m/minuto. No entanto, após a deposição de alguns cordões foi possível perceber que a velocidade de alimentação do arame poderia ser aumentada, tendo-se optado por adotar o valor de 2 m/minuto.

### 3.4. Estratégia de Deposição

Neste trabalho foi utilizado o equipamento Fronius KD 4000 D-1 como fonte de energia TIG. Para o suporte e movimentação da tocha, com alimentação de arame automática, foi utilizado o sistema que se mostra na Figura 3.2. Durante a deposição, observou-se que o carro sofre pequenos desvios da sua trajetória, que devem ser corrigidos durante o processo, de modo a evitar variações na posição de deposição das várias camadas.



**Figura 3.2.** Carrinho de soldadura, SAF, e tocha de soldadura com alimentação automática.

O posicionamento do eléctrodo e do arame de adição pode ser observado Figura 3.3. A distância entre eléctrodo de tungsténio e o substrato ou a camada depositada foi constante e de aproximadamente 3 mm. É, também, importante referir que o eléctrodo foi afiado várias vezes, com ângulo de ponta entre 60° e 70°, para garantir o escorvamento do arco e a sua estabilidade.



**Figura 3.3.** Posicionamento do eléctrodo de tungsténio e do arame de adição em relação ao componente.

### 3.5. Análise Metalográfica

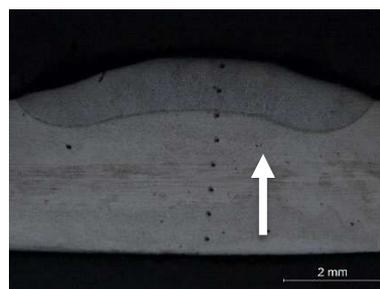
A preparação das amostras para a análise metalográfica começou efetuando-se o corte dos componentes, mono e multicamada, na direção transversal à direção de deposição, por meio de uma serra elétrica, por forma a obter amostras com aproximadamente 20mm de largura. De seguida, todas as amostras, com exceção das correspondentes aos componentes P1, P2 e

P3, foram colocadas numa solução de resina, de forma a facilitar o manuseamento das mesmas durante as operações de polimento subsequentes.

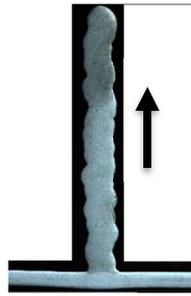
As amostras foram polidas, numa primeira fase, utilizando lixas com granulometrias P320, P600, P1000, P2500 e, de seguida, com panos apropriados para aço inoxidável e com suspensões de diamante de 6  $\mu\text{m}$  e 3  $\mu\text{m}$ , em operações sucessivas. Por fim, as amostras foram submetidas a ataque químico, com uma mistura de 30ml de água destilada ( $\text{H}_2\text{O}$ ), 20 ml de ácido clorídrico ( $\text{HCl}$ ) e 15 ml de ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ). A análise metalográfica foi efetuada com recurso ao microscópio LEICA DM 4000 M LED, com câmara LEICA MC 120 HD acoplada, e à lupa ZEISS STEMI 2000-C, com câmara CANON POWERSHOT G5 acoplada.

### 3.6. Caracterização Mecânica

A caracterização mecânica foi feita, nos componentes mono e multicamadas, com recurso a ensaios de medição de dureza. As medições foram efetuadas na direção da espessura da amostra, tal como se exemplifica na Figura 3.4, para uma amostra monocamada, e no sentido ascendente, a meio da espessura, para as amostras multicamada, tal como se exemplifica na Figura 3.5. Para efetuar as medições foi utilizado o equipamento SHIMADZU HMV-G, com uma carga de 500 g, 15 s de tempo de aplicação da carga e com um espaçamento entre indentações de 0,5 mm.



**Figura 3.4.** Esquema do posicionamento das indentações nos componentes monocamada, amostra #8.



**Figura 3.5.** Sentido da realização das indentações nos componentes P1, P2 e P3.

### 3.7. Análise Morfológica

Para a análise da qualidade da superfície dos componentes multicamada e registo da evolução da espessura, em função da posição relativa dos cordões, foi utilizado o sistema de aquisição digital de imagem ARAMIS GOM 5G. Para o tratamento da imagem, com vista à aquisição do relevo das superfícies, através de Correlação Digital de Imagem, foi necessário preparar as amostras através da aplicação de uma camada uniforme de tinta branca nas superfícies a analisar. Posteriormente, foi aplicado sobre essa superfície, um padrão aleatório de pontos negros, tal como se mostra na Figura 3.6.



**Figura 3.6.** Superfície do componente multicamadas P1, com padrão aleatório de pontos negros.



## 4. ANÁLISE DE RESULTADOS

O presente capítulo encontra-se dividido em dois subcapítulos. No primeiro subcapítulo analisam-se os resultados da inspeção visual, da análise metalográfica e da caracterização mecânica dos componentes monocamada. No segundo subcapítulo são apresentados e discutidos os resultados da análise morfológica, análise metalográfica e caracterização mecânica dos componentes multicamada.

### 4.1. Componentes Monocamada

#### 4.1.1. Inspeção Visual

Tal como se mostra nas figuras presentes na Tabela 4.1, os componentes monocamada apresentavam todos uma superfície regular. No entanto, a comparação do aspeto superficial permitiu detetar diferenças perceptíveis entre as monocamadas depositadas utilizando corrente pulsada, e a monocamada depositada utilizando corrente não-pulsada. Mais precisamente, enquanto as monocamadas #1 a #7, depositados utilizando corrente pulsada, apresentam na sua superfície um efeito escamado, o cordão #8, depositado utilizando corrente não-pulsada, apresenta uma superfície uniforme e lisa. A comparação das superfícies dos cordões produzidos com corrente pulsada permite também perceber que a espessura das escamas diminui com o aumento do valor de frequência da corrente pulsada.

Efetuuou-se a medição da largura, penetração e altura dos cordões dos componentes monocamada #1 a #8, como mostrado na Figura 4.1. Os resultados dessas medições são apresentados no gráfico da Figura 4.2. Através da comparação dos valores de largura dos componentes, apresentados no gráfico é possível aferir que a amostra #8, cordão com parâmetros de deposição iguais aos do componente multicamada P1, tem o maior valor de largura. Este resultado poderá ser justificado pelo facto de ter sido utilizada corrente contínua não pulsada, com uma intensidade de corrente elevada, na produção desta monocamada.

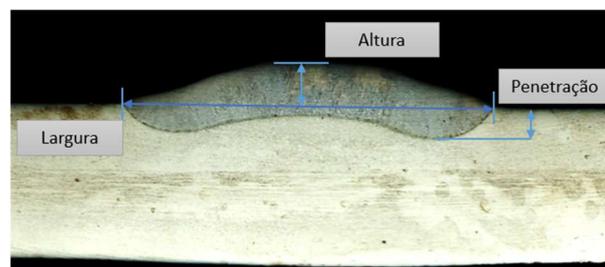
A comparação da largura dos componentes #2, #3, #4 e #5, produzidos utilizando corrente contínua pulsada com frequência de 4 Hz, permite estabelecer uma relação entre a velocidade de alimentação do metal de adição e a largura do cordão. Ou seja, a figura permite

concluir que à medida que a velocidade de alimentação do arame de adição aumenta, aumenta também a largura do cordão, sendo o cordão #5, depositado com a maior velocidade de alimentação do arame, o cordão com a maior largura. A comparação da largura dos componentes #6 e #7, produzidos através da utilização de corrente contínua pulsada com frequência de 5 Hz, confirma esta conclusão.

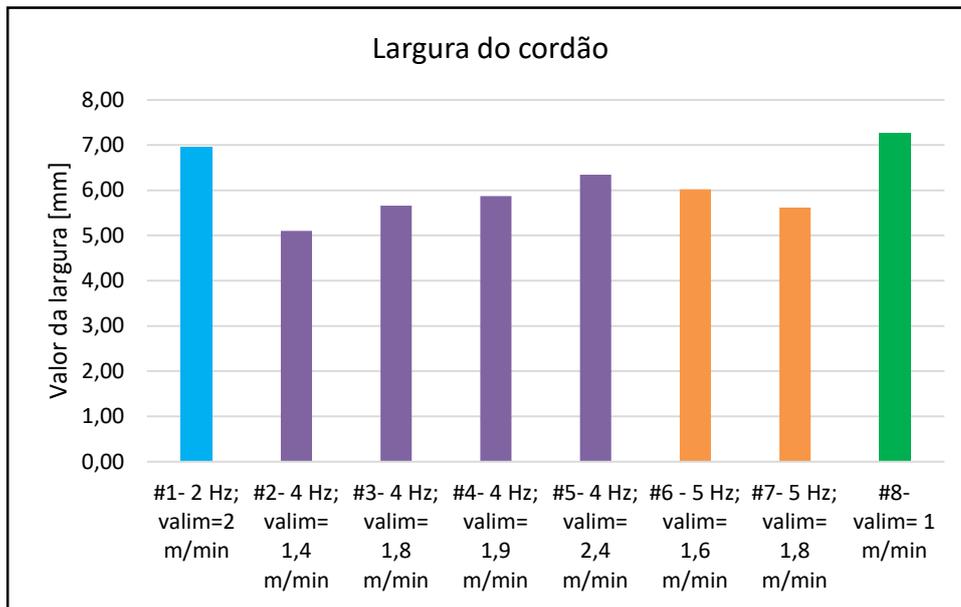
A comparação da largura dos componentes #1, #4 e #6 permite, por outro lado, perceber a forma como a largura dos cordões varia em função da frequência da corrente pulsada. Ou seja, a figura mostra que a largura das monocamadas diminui com o aumento da frequência. No entanto, deve-se realçar que a diferença na frequência da corrente entre a amostra com frequência igual a 2 Hz e 4 Hz é superior à diferença de frequência entre as amostras produzidas com frequências 4 Hz e 5 Hz, e que, além da frequência, foram alterados outros parâmetros, o que se reflete na evolução da largura. Por fim, a comparação da largura das monocamadas #4, #7 e #8, que são as monocamadas depositadas com os mesmos parâmetros dos componentes multicamada P2, P3 e P1, respetivamente, permite notar que, a diferença entre as larguras das monocamadas #4 e #7 não é muito acentuada. No entanto, o componente #8 apresenta uma largura superior à dos restantes componentes. Este aumento de largura pode ser justificado pelo aumento da energia fornecida ao banho de fusão [19],[20].

**Tabela 4.1.** Macrografias da superfície dos componentes monocamada, sentido de deposição da esquerda para a direita, ampliação 1x.

Nomenclatura	Macrografia	Nomenclatura	Macrografia
#1	a) 	#5	f) 
#2	b) 	#6	g) 
#3	c) 	#7	h) 
#4	d) 	#8	i) 



**Figura 4.1.** Medição das dimensões dos componentes monocamada.



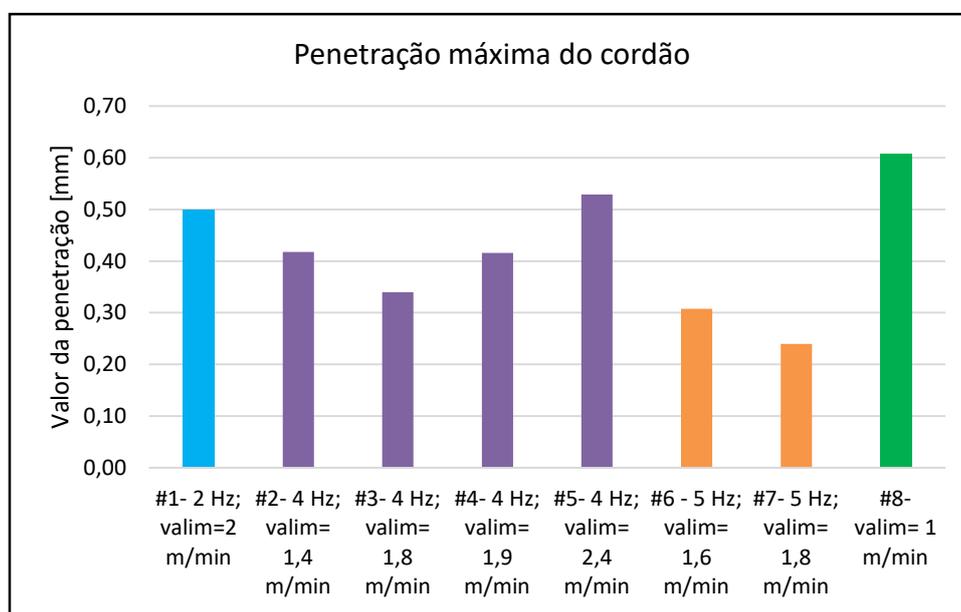
**Figura 4.2.** Gráfico dos valores da largura dos componentes monocamada.

Na Figura 4.3 mostra-se agora a evolução da penetração máxima das monocamadas em função dos parâmetros do processo. Comparando os resultados expostos no gráfico é possível concluir que o cordão #8 é aquele que apresenta a maior penetração, podendo este resultado ser, novamente, justificado pela utilização de corrente contínua não pulsada e de uma velocidade de alimentação do arame baixa, relativamente aos outros componentes.

Analisando agora os resultados relativos aos componentes #2, #3, #4 e #5, é possível constatar que, o componente com maior valor de penetração é o #5, que é o componente produzido com maior valor de intensidade média da corrente, assim como o maior valor da velocidade de alimentação do arame de adição. Os componentes #3 e #4, por outro lado, apresentam valores idênticos de penetração. No entanto, o valor de penetração do cordão #3 deveria ser superior ao valor de penetração do cordão #4, uma vez que a velocidade de alimentação do arame de adição da monocamada #4 é superior. Uma possível justificação para esta contradição é a sequência segundo a qual as monocamadas foram depositadas no substrato. A monocamada #4 foi a última a ser depositada no substrato, que já estaria a uma temperatura elevada, devido à deposição das monocamadas anteriores, influenciando deste modo penetração. Também a monocamada #2 deveria ter uma penetração superior às restantes, devido a uma baixa velocidade de alimentação do arame de adição. No entanto,

por ter sido a primeira a ser depositada, a rápida dissipação de calor no substrato terá contribuído para minimizar a penetração.

Comparando os valores de penetração registados para os componentes com corrente pulsada com frequências 2 Hz, 4 Hz e 5 Hz, é possível perceber a forma como o valor da penetração dos cordões varia em função da variação da frequência da corrente pulsada. O valor de penetração da monocamada #1 é o mais elevado, seguido da penetração da monocamada #5 e, por fim, da monocamada #6. Esta evolução permite concluir que o valor da penetração diminui com o aumento da frequência.



**Figura 4.3.** Gráfico dos valores da penetração máxima dos componentes monocamada.

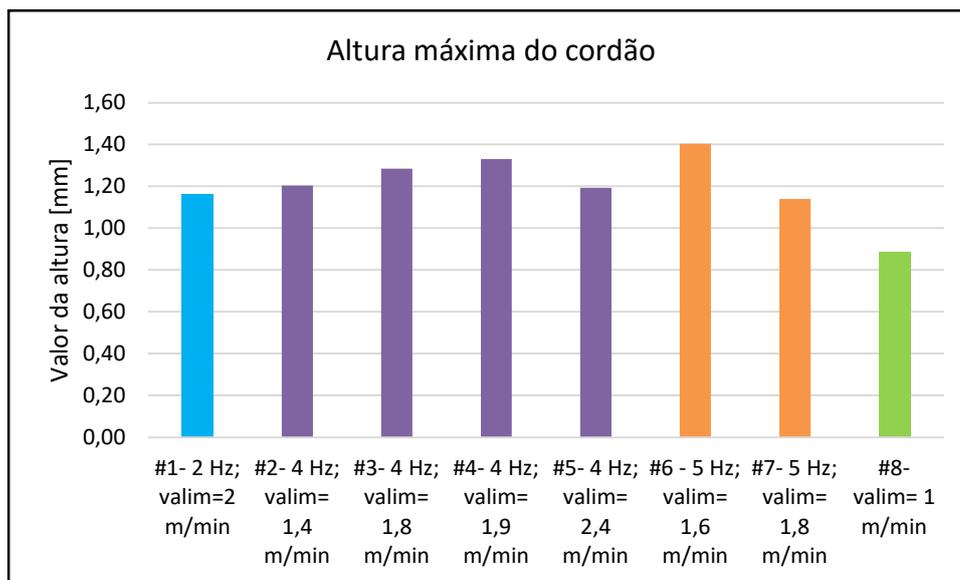
Finalmente, na Figura 4.4 mostra-se a evolução da altura das monocamadas em função dos parâmetros do processo. A figura permite constatar que, se o valor da altura do cordão #6 é superior à dos restantes, por outro lado, a altura do cordão #8 é a menor. Este resultado pode ser justificado pela elevada intensidade de corrente, 110 A, que resulta num aumento da fluidez do material de adição, fazendo com que este se espalhe antes de solidificar [21].

A Figura 4.4 permite constatar também que todas as monocamadas depositadas com corrente contínua pulsada, com frequência igual a 4 Hz, apresentam todos valores de altura idênticos. Apesar de a monocamada #5 ter sido produzida com uma velocidade de alimentação superior à das restantes monocamadas, foi também utilizada corrente com intensidade média da corrente superior, e, portanto, a energia fornecida ao banho de fusão

terá sido superior, fazendo com que a sua altura não seja superior às restantes, como seria esperado.

Comparando agora as monocamadas #1, #4 e #6, produzidas com correntes pulsadas com diferentes frequências, é possível perceber que, ao aumentar o valor da frequência, ocorra um aumento da altura do cordão. No entanto, para além da alteração dos valores da frequência, também foram alterados outros parâmetros que influenciam os valores de altura das monocamadas.

Por fim, no caso dos componentes #4, #7 e #8, o componente com o menor valor de altura é o componente #8, a justificação deste resultado já foi feita anteriormente. Por outro lado, o componente com maior valor de altura é o #4. O componente #4 foi depositado com uma intensidade de corrente ligeiramente superior, 112,5 A, no entanto a velocidade de alimentação do arame de adição é superior, fazendo com que a energia fornecida ao banho de fusão seja inferior e por isso, a sua fluidez seja menor, resultando numa altura superior.



**Figura 4.4.** Gráfico dos valores da altura dos componentes monocamada.

De acordo com a literatura, os valores da largura e penetração dos cordões de soldadura são tanto maiores quanto maior for a adição de calor, porém, o aumento da adição de material, diminui a quantidade de calor fornecida ao banho de fusão, levando a uma diminuição destas dimensões. O valor da altura dos cordões, por outro lado, diminui com o aumento da adição de calor ao cordão, que provoca um aumento da fluidez do material de adição, fazendo com que este se espalhe no substrato [19],[20][21].

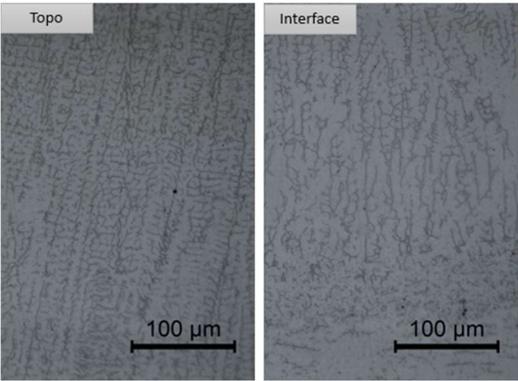
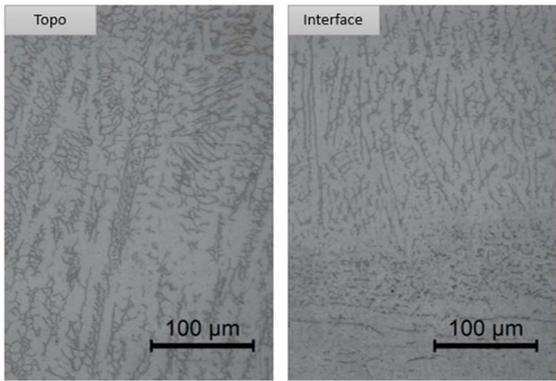
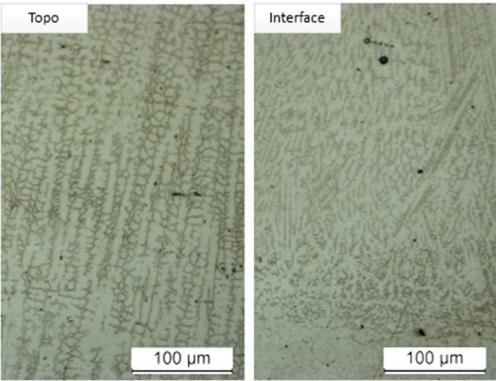
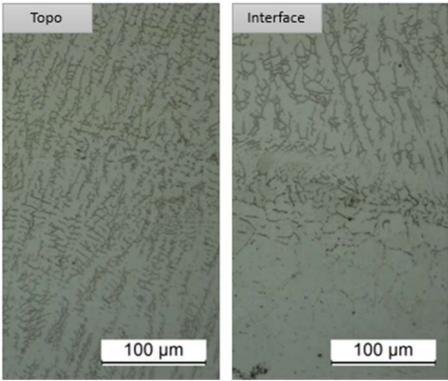
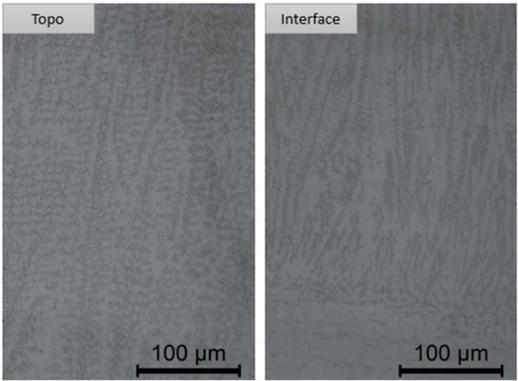
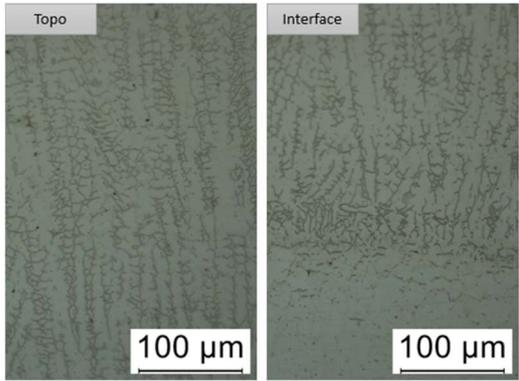
#### 4.1.2. Análise Metalográfica

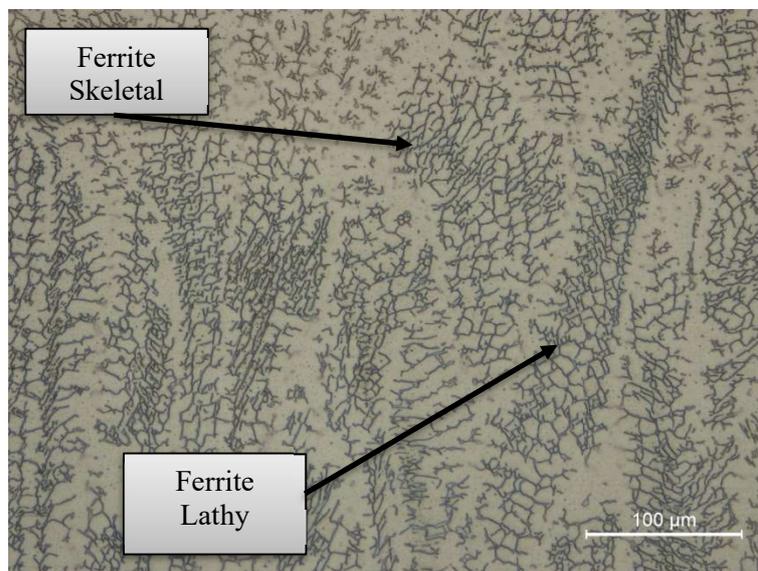
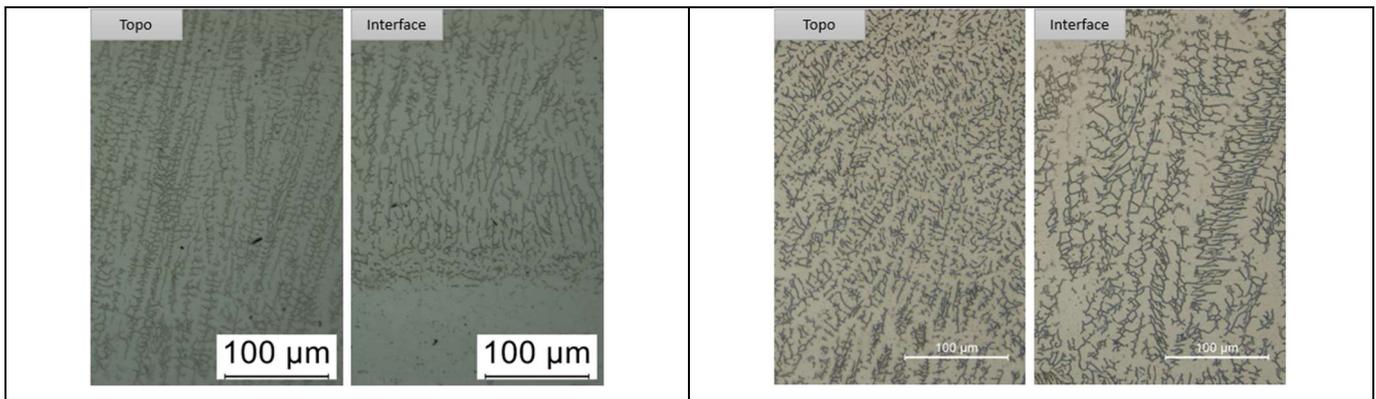
Na presente secção serão analisadas as microestruturas dos componentes monocamada depositados. Nas figuras da

Tabela 4.2 são apresentadas as micrografias dos componentes monocamada #1 a #8. Nestas figuras é possível observar as zonas de interface entre o material depositado e o substrato, bem como a zona do topo de cada uma das monocamadas. Ao realizar a análise das micrografias não foram observadas porosidades nos componentes monocamada depositados, o mesmo já tinha sido referido como uma das vantagens do TIG, na revisão bibliográfica [22],[3]. A realização da análise das micrografias permite identificar estruturas dendríticas típicas do processo de deposição do aço AISI 316L, existindo uma matriz de austenite (zona branca) com estruturas de ferrite  $\delta$  (estruturas pretos) [23]. Como estas estruturas podem ser encontradas em todas as monocamadas, na Figura 4.5, são representadas, na amostra #8, as possíveis morfologias da ferrite, *skeletal* e *lathy* [24],[25],[26],[23],[27]. Na zona da interface entre o material depositado e o substrato é possível observar estruturas típicas de um arrefecimento rápido, estas estruturas são caracterizadas por filmes de ferrite  $\delta$  de pequenas dimensões, sendo visíveis em todas as monocamadas. Na Figura 4.6 são mostradas com maior detalhe as estruturas típicas de uma velocidade de arrefecimento elevada, da amostra #3. A elevada velocidade de arrefecimento do material depositado pode ser justificada pelo elevado gradiente térmico entre o banho de fusão e o substrato no início da deposição, ao qual as monocamadas poderão ter estado sujeitas. À medida a que a deposição ocorre, o gradiente térmico entre o material solidificado e o banho de fusão diminui, desta forma, e como a solidificação do material ocorre a partir do substrato, as zonas superiores da monocamada apresentam estruturas dendríticas com ramos maiores, típicas de uma velocidade de arrefecimento mais lenta. Nas micrografias das amostras #5 e #8, apresentadas na Tabela 4.2, é possível observar que, as dendrites ramificadas aparecem mais perto da zona da interface, comparativamente às restantes monocamadas, estas estruturas são características de um arrefecimento lento, provocado pela utilização de elevadas intensidades de corrente. A intensidade de corrente utilizada na deposição da amostra #5 é igual a 146,25 A, e a intensidade da corrente utilizada na monocamada #8 é igual a 110, no entanto a corrente utilizada na deposição da última não é

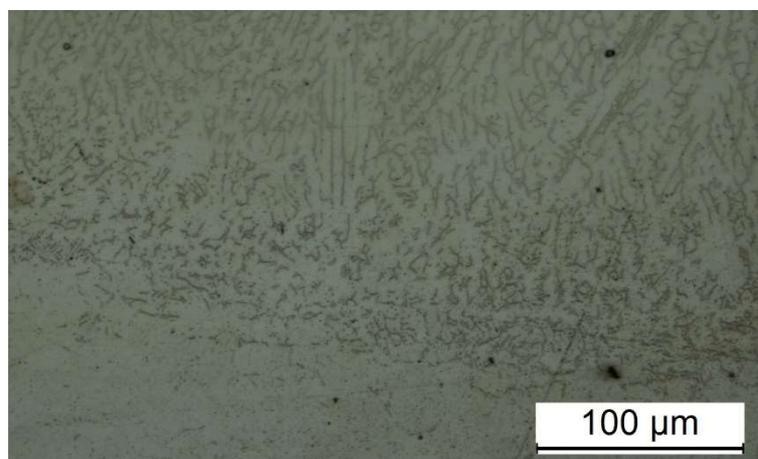
pulsada. O que, de acordo com a literatura, se traduz num aumento da temperatura do componente.

**Tabela 4.2.** Micrografias dos componentes monocamada #1 a #8.

Micrografia	Micrografia
<p data-bbox="416 584 448 613">#1</p>  <p>The image shows two micrographs for component #1. The left one is labeled 'Topo' and the right one 'Interface'. Both show a fine, granular microstructure. Each has a 100 µm scale bar at the bottom.</p>	<p data-bbox="1098 584 1129 613">#2</p>  <p>The image shows two micrographs for component #2. The left one is labeled 'Topo' and the right one 'Interface'. Both show a fine, granular microstructure. Each has a 100 µm scale bar at the bottom.</p>
<p data-bbox="416 1041 448 1070">#3</p>  <p>The image shows two micrographs for component #3. The left one is labeled 'Topo' and the right one 'Interface'. Both show a fine, granular microstructure. Each has a 100 µm scale bar at the bottom.</p>	<p data-bbox="1098 1041 1129 1070">#4</p>  <p>The image shows two micrographs for component #4. The left one is labeled 'Topo' and the right one 'Interface'. Both show a fine, granular microstructure. Each has a 100 µm scale bar at the bottom.</p>
<p data-bbox="416 1498 448 1527">#5</p>  <p>The image shows two micrographs for component #5. The left one is labeled 'Topo' and the right one 'Interface'. Both show a fine, granular microstructure. Each has a 100 µm scale bar at the bottom.</p>	<p data-bbox="1098 1498 1129 1527">#6</p>  <p>The image shows two micrographs for component #6. The left one is labeled 'Topo' and the right one 'Interface'. Both show a fine, granular microstructure. Each has a 100 µm scale bar at the bottom.</p>
<p data-bbox="416 1955 448 1984">#7</p>	<p data-bbox="1098 1955 1129 1984">#8</p>



**Figura 4.5.** Micrografia evidenciando as diferentes morfologias da ferrite  $\delta$ , amostra #8.

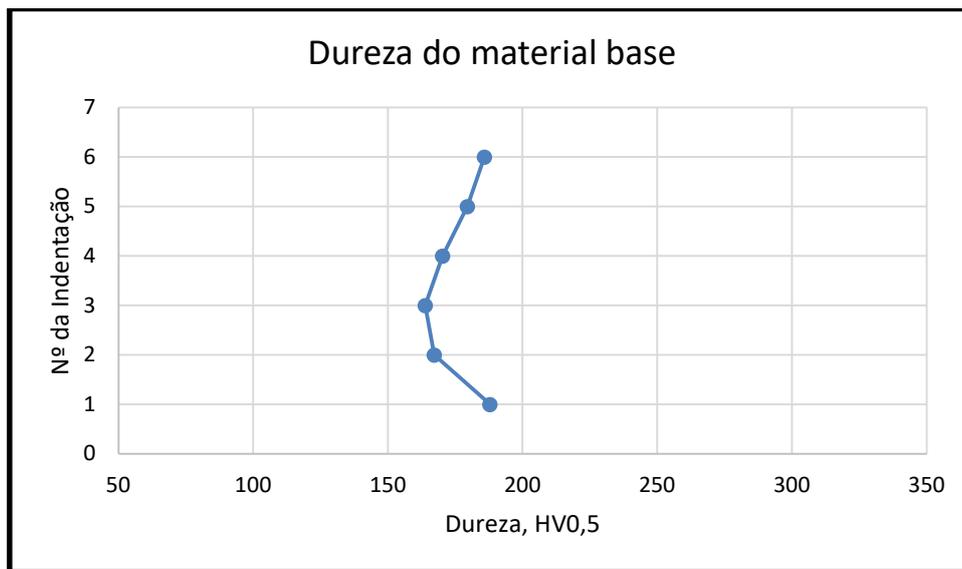


**Figura 4.6.** Micrografia evidenciando as estruturas de arrefecimento rápido, amostra #3.

### 4.1.3. Caracterização Mecânica

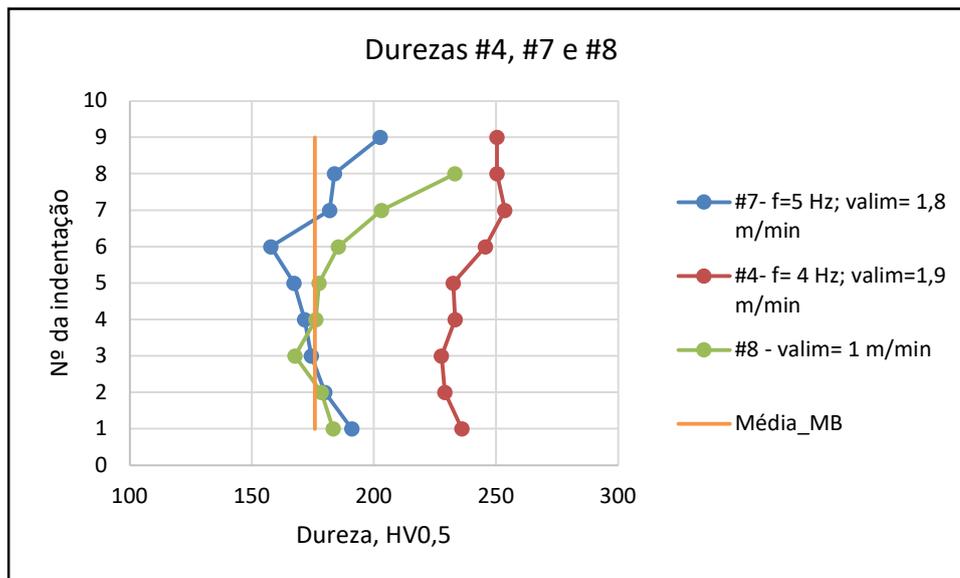
Nesta secção, inicialmente é feita uma análise do perfil de dureza do substrato utilizado para as deposições, apresentado no gráfico da Figura 4.7. Através da análise do perfil apresentado no gráfico, é possível aferir que a dureza deste não é linear ao longo da sua espessura, sendo superior nos extremos e inferior a meio da espessura. Dessa forma, as medições de dureza efetuadas no substrato dos componentes #1 a #8 podem conduzir a evoluções de dureza variáveis, de amostra para amostra, consoante a posição das indentações relativamente à espessura do substrato.

De seguida efetua-se uma análise comparativa dos perfis de dureza dos diferentes componentes monocamada #1 a #8, as indentações foram realizadas no sentido de baixo para cima, isto é, a primeira indentação localiza-se no substrato e a última indentação na zona fundida. Em primeiro lugar é feita uma comparação entre os valores de dureza dos componentes, #4, #7 e #8, depositados com os mesmos parâmetros utilizados para depositar os componentes P2, P3 e P1, respetivamente. Posteriormente procede-se à análise comparativa dos valores de dureza dos componentes depositados a mesma frequência, comparando assim a influência dos restantes parâmetros nos valores da dureza dos componentes. Por fim, os valores de dureza dos componentes com frequência 2 Hz, 4 Hz e 5 Hz, de modo a perceber a influência do valor da frequência na dureza dos componentes. No entanto, é importante realçar que, para além dos valores de frequência, nestes componentes, foram utilizados outros parâmetros de deposição diferentes, que têm influência na evolução dos valores de dureza.



**Figura 4.7.** Gráfico dos valores das durezas do material base.

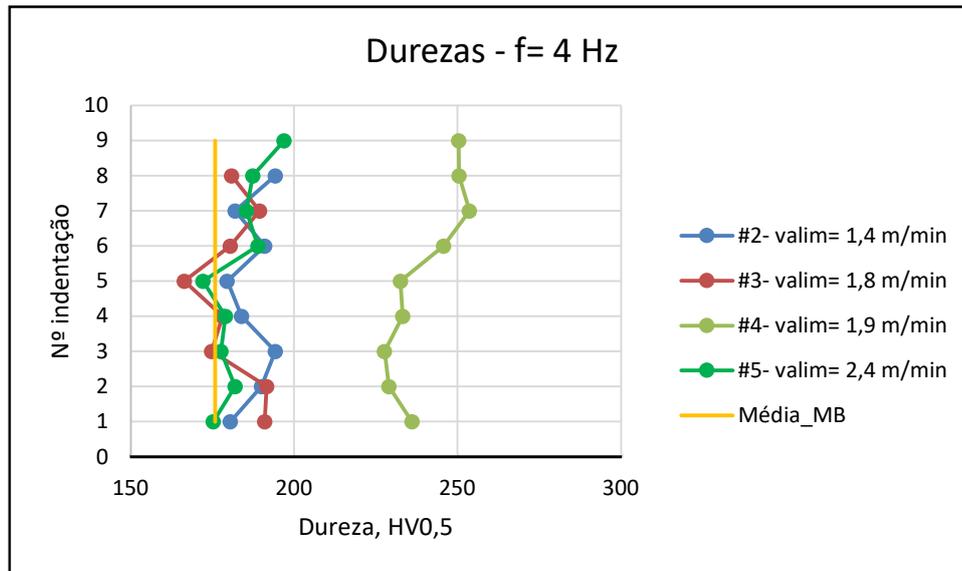
Na Figura 4.8 são apresentados os perfis de dureza das amostras #4, #7 e #8. Analisando comparativamente os perfis de dureza dos componentes #4, #7 e #8, apresentados no gráfico, é possível verificar que o componente #4 apresenta os maiores valores de dureza. Uma possível justificação para este resultado é a suposta maior velocidade de arrefecimento, pois este componente apesar de ter sido depositado com uma elevada energia, a velocidade de alimentação do arame de adição na sua deposição foi superior, implicando uma menor energia disponível no banho de fusão e assim uma velocidade de arrefecimento superior [19]. No entanto os valores obtidos para a amostra #4 podem também ter sido resultado de erros de medição. Os componentes #4, #7 e #8 foram depositados em diferentes chapas de substrato, no entanto, foram os últimos a ser depositados em cada uma das chapas, como resultado, o gradiente térmico foi inferior comparativamente ao obtido em monocamadas depositadas em substratos à temperatura ambiente.



**Figura 4.8.** Gráfico dos valores das durezas dos componentes #4, #7 e #8.

No gráfico da Figura 4.9 estão apresentados todos os perfis de dureza dos componentes monocamada depositados com frequência de pulso igual a 4 Hz. As velocidades de deposição apresentadas no gráfico correspondem às velocidades de alimentação no pico.

Através da análise do gráfico é possível perceber que, à exceção do componente #4, os valores de dureza dos componentes monocamada #2, #3 e #5 apresentam tendência a aumentar com a diminuição dos valores de velocidade de alimentação do arame de adição. Seria esperado que a monocamada #3, por ter a menor intensidade de corrente apresentasse um valor de dureza superior à dureza da monocamada #5, no entanto, apesar da elevada intensidade de corrente, a velocidade de alimentação de arame de adição da monocamada #5 é muito superior às restantes, permitindo assim um arrefecimento mais rápido, levando ao aumento do valor da dureza [25], [26].



**Figura 4.9.** Gráfico dos valores das durezas dos componentes com frequência igual a 4 Hz, #2, #3, #4 e #5.

No gráfico da Figura 4.10 são apresentados os perfis de dureza dos componentes monocamada depositados com frequência igual a 5 Hz. As velocidades de alimentação utilizadas no gráfico correspondem à velocidade no pico. A análise do gráfico permite concluir que, os perfis de dureza das monocamadas #6 e #7 apresentam valores de dureza próximos e que as curvas apresentam um comportamento semelhante, tendo valores de dureza superiores na ZF [28]. Apesar de a energia de deposição do componente #6 ser superior à utilizada na deposição do componente #7, o que levaria, de acordo com a literatura, a uma diminuição da dureza, a velocidade de alimentação utilizada na deposição do componente #7 é superior, diminuindo assim, a energia fornecida ao banho de fusão e aumentando a velocidade de arrefecimento, o que, por sua vez conduz a um valor de dureza maior [25], [26].

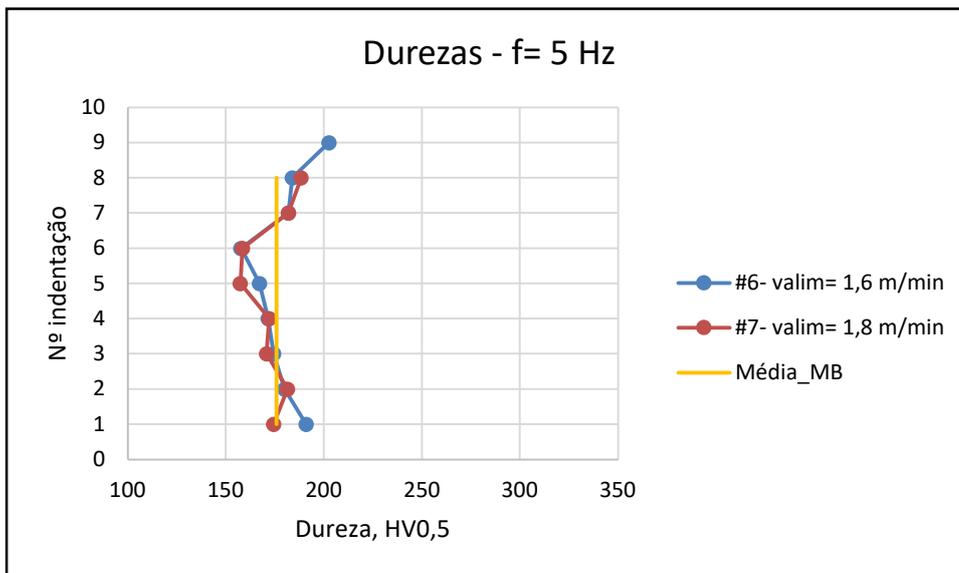


Figura 4.10. Gráfico dos valores das durezas dos componentes com frequência igual a 5 Hz, #6 e #7.

No gráfico da Figura 4.11, são apresentados os perfis de dureza dos componentes monocamada depositados com frequências iguais a 2 Hz, 4 Hz e 5 Hz. Analisando o gráfico, percebe-se que, os valores das durezas não são influenciados pelo valor da frequência de deposição.

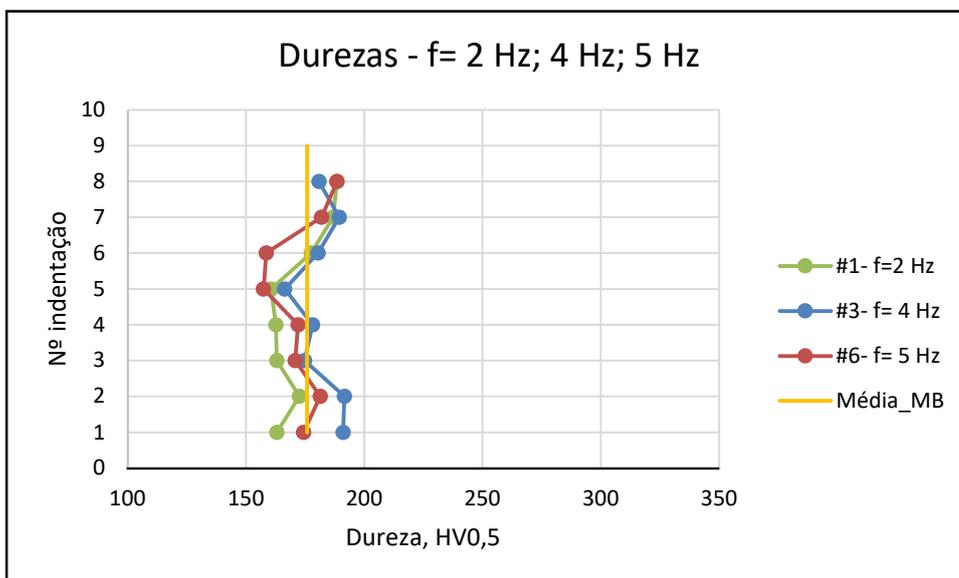
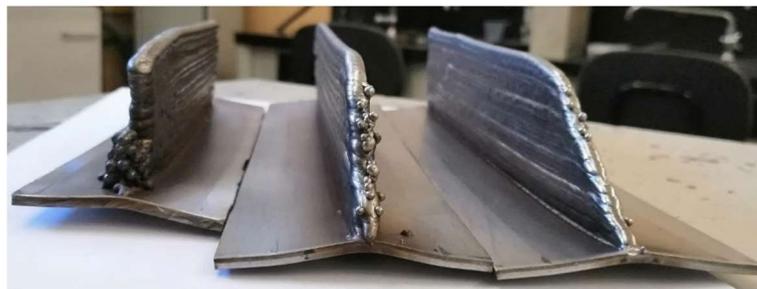


Figura 4.11. Gráfico dos valores das durezas dos componentes com frequência igual a 2 Hz, 4 Hz e 5 Hz.

## 4.2. Componentes Multicamadas

### 4.2.1. Inspeção Visual

Na Figura 4.12 onde são apresentados os componentes multicamada, P1, P2 e P3, é possível observar as distorções provocadas no substrato de cada um dos componentes. A análise da figura permitiu não só registrar a ocorrência de importantes distorções dos substratos, em todas as amostras, como também, a existência de desalinhamento entre as diferentes camadas de cada componente. Enquanto a distorção dos substratos pode ser associada à elevada quantidade de calor adicionado durante o processo de deposição dos componentes multicamada. A ocorrência de desalinhamentos deve-se, sem dúvida, a alterações na trajetória de movimentação do sistema de transporte da tocha TIG, a qual não se encontra delimitada fisicamente.



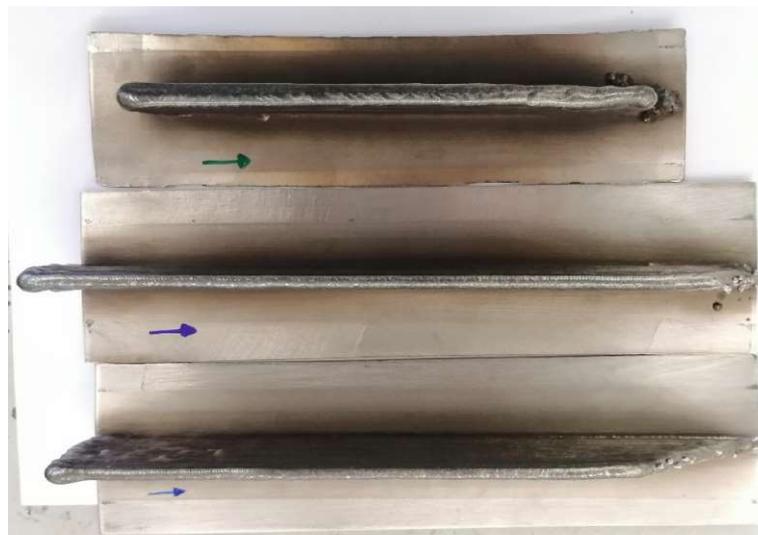
**Figura 4.12.** Distorções dos substratos, componentes multicamada P1, P2 e P3 (da esquerda para a direita).

A Figura 4.13, a qual mostra os três componentes multicamada vistos de cima, torna visível a diferença nas espessuras de cada um dos componentes. Sendo o componente P1 o que apresenta maior espessura, seguido do P2 e, por fim, o componente P3, com a espessura menor. Na Tabela 4.3 são apresentados o número de camadas depositadas em cada parede. Apesar de todos os componentes terem a mesma altura aproximada, o componente P1 teve um menor crescimento ao longo da deposição. Através da análise efetuada anteriormente às dimensões dos componentes monocamada permite efetuar uma comparação entre as dimensões dos componentes monocamada e os componentes multicamada, produzidos com os mesmos parâmetros de deposição. Tal como no caso dos componentes monocamada, em que o cordão #8, depositado com corrente não pulsada, intensidade igual a 110 A e velocidade de alimentação do arame de adição de 1 m/minuto, apresenta maior penetração, maior largura e menor altura, também P1 apresenta maior largura e um maior número de camadas na mesma altura dos restantes componentes multicamada. Por outro lado, P2 e P3

apresentarem um crescimento semelhante. No entanto as larguras destes componentes são diferentes, sendo a largura de P2 superior à largura de P3. Esta diferença de largura pode ser justificada pela diferença significativa entre a intensidade média de corrente, que no caso de P2 é igual a 112,5 A e no caso de P3 é igual a 96 A, desta forma, o calor adicionado ao componente P2 é superior, aumentando assim a fluidez do material depositado resultando numa maior largura do componente depositado.

**Tabela 4.3.** Número de camadas e altura da parede.

Nomenclatura	P1	P2	P3
Número de camadas	64	53	54
Altura da parede [mm]	≈47	≈47	≈47



**Figura 4.13.** Componentes multicamada, P1, P2 e P3 (de cima para baixo).

Durante a deposição dos componentes multicamada foi também possível observar diferenças significativas da altura dos cordões ao longo do comprimento do componente. Apesar de este problema ter sido registado durante a execução dos três componentes, foi possível perceber que a sua magnitude foi mais acentuada em P1 e P3, o que pode ser justificado pela diminuição do gradiente térmico entre o cordão e o substrato/camada anterior, provocada pelo aquecimento do substrato/camada anterior durante a deposição. A

variação da altura entre camadas pode ser justificada da mesma forma, pois o gradiente térmico entre as primeiras camadas e o substrato, será maior comparativamente ao gradiente térmico entre as camadas depositadas de forma sucessiva, sem intervalos de arrefecimento entre camadas. Estes resultados foram também observados na deposição de componentes por outros processos de WAAM por Fialho L. M. G. M. [29]. De acordo com Zhang *et. al.* [30], este defeito pode ser evitado alterando o sentido de deposição entre camadas sucessivas. No entanto, no caso do processo TIG com alimentação automática, a implementação desta solução é difícil, pois a alimentação do arame de adição não é coaxial ao elétrodo de tungstênio, como já foi referido na revisão bibliográfica.

O componente P1, foi o primeiro a ser depositado e, portanto, é o componente onde se observam mais defeitos relacionados com o operador. A diminuição da altura do componente na zona final foi amplificada pela falta de experiência do operador. A grande dificuldade passou por perceber o momento exato para o fim da deposição. No entanto, a parte final de P1 foi corrigida durante a deposição, adicionando mais material ao final dos cordões.

#### **4.2.2. Análise Morfológica**

Na presente secção é feita uma análise da evolução do relevo dos componentes multicamada ao longo da sua altura e comprimento. Para isso, as amostras foram divididas em três secções, esquerda, meio e direita. O mapa de relevo do componente P1, obtido por Correlação Digital de Imagem e representado na Figura 4.14, mostra a variação do relevo ao longo da altura do componente e as secções definidas nesse componente. A medição de relevo, foi obtida tendo como referência, pontos da amostra que tenham posições relativas das camadas iguais ou próximas, mostrando-se com o mesmo tom da escala de cores à esquerda na imagem. No gráfico da Figura 4.15, são apresentados os valores da posição relativa das camadas depositadas do componente P1 em três secções diferentes da amostra. No gráfico é possível observar que, apesar de existir uma grande amplitude de valores do relevo da amostra, com valor aproximado de 1 mm, essa variação ocorre de forma uniforme em todas as secções da amostra. Desta forma, é possível concluir que, o componente P1 tem uma superficial irregular em toda a área da amostra analisada.

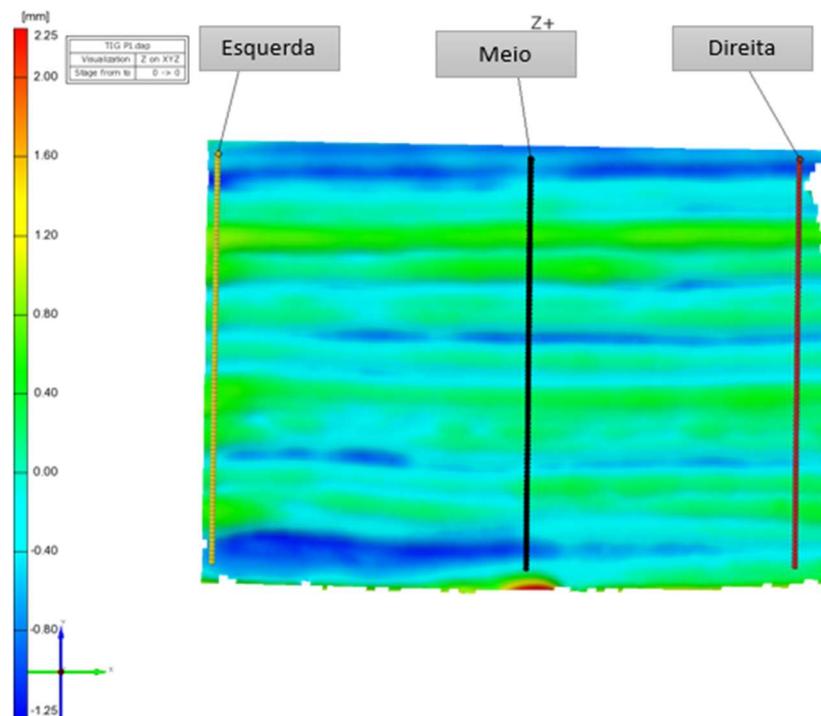


Figura 4.14. Representação da posição relativa dos cordões, componente P1.

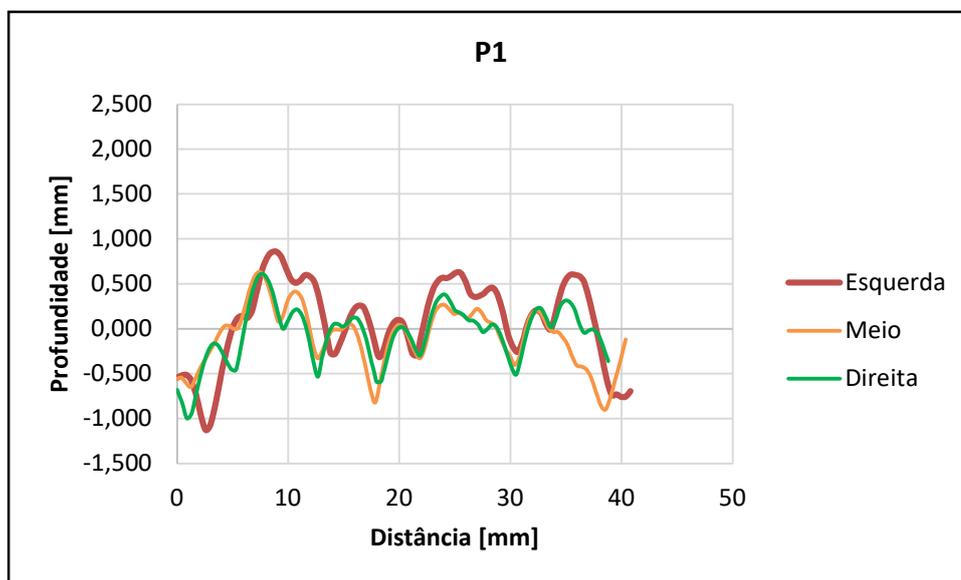
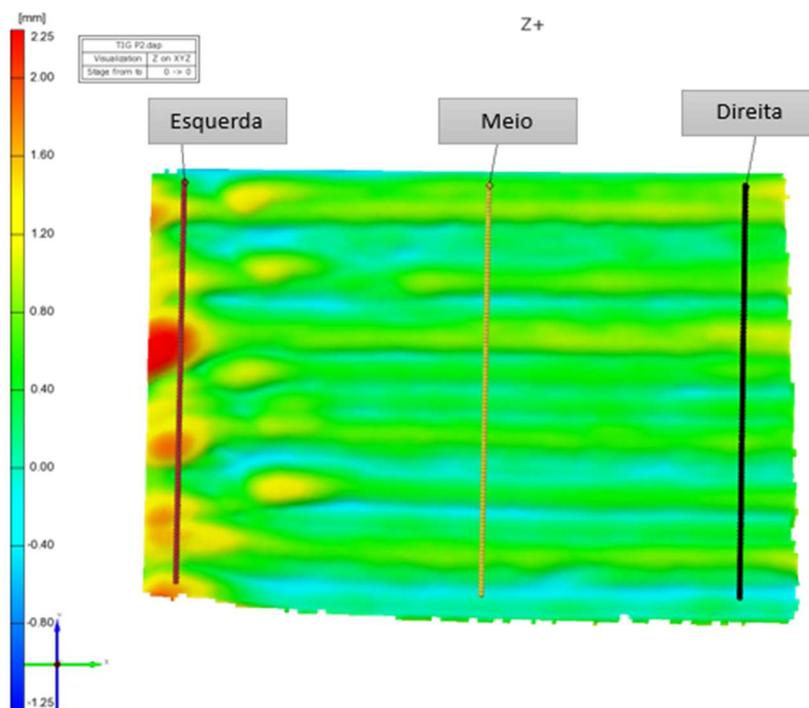


Figura 4.15. Gráfico dos valores da posição relativa dos cordões, componente P1.

As secções presentes no mapa de relevo do componente P2, obtido por Correlação Digital de Imagem e representado na Figura 4.16, mostram a variação do relevo ao longo da

altura do componente e das secções representadas. Este mapa foi obtido da mesma forma que o mapa de distribuição do componente anterior. No gráfico da, Figura 4.17 são apresentados os valores da posição relativa das camadas depositadas do componente P2 em três secções diferentes da amostra. Analisando o gráfico, é possível perceber que, no componente P2, a zona da secção esquerda apresenta uma variação de relevo, com uma amplitude média superior a 1 mm. As restantes zonas apresentam-se com relevo irregular, no entanto a sua variação ocorre de forma uniforme entre as secções. A análise realizada permite concluir que, o relevo do componente P2 se apresenta uniforme nas secções do meio e direita da amostra.



**Figura 4.16.** Representação da posição relativa dos cordões, componente P2.

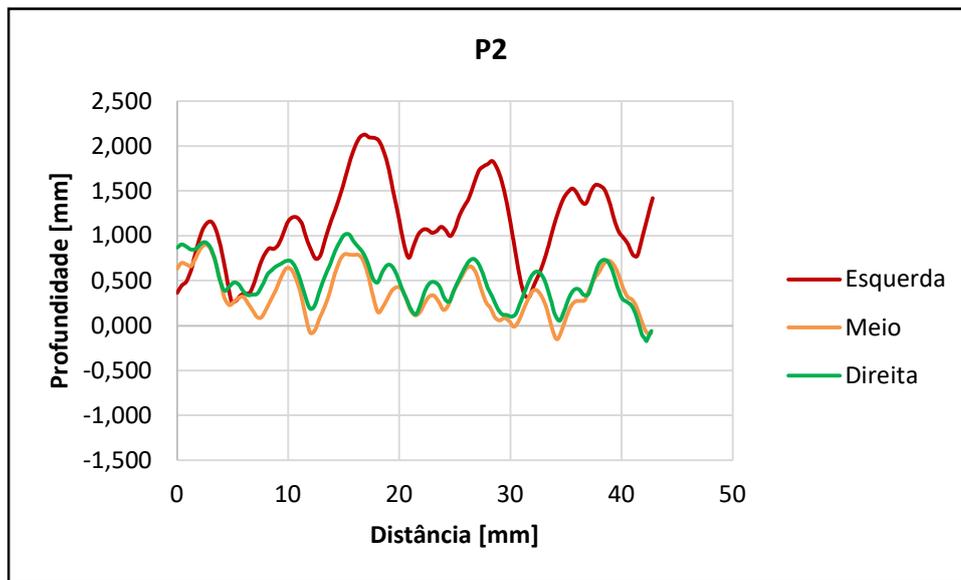


Figura 4.17. Gráfico dos valores da posição relativa dos cordões, componente P2.

Por fim, o mapa de relevo do componente P3, obtido por Correlação Digital de Imagem, apresentado na Figura 4.18, permite auxiliar a análise dos valores de relevo no componente. No gráfico da Figura 4.19, apresentam-se as curvas de variação dos valores de relevo ao longo da altura do componente, nas secções representadas na Figura 4.18. É de notar que, este componente apresenta valores de relevo muito irregulares ao longo de todas as secções, sendo a secção da esquerda a que apresenta uma maior amplitude de valores.

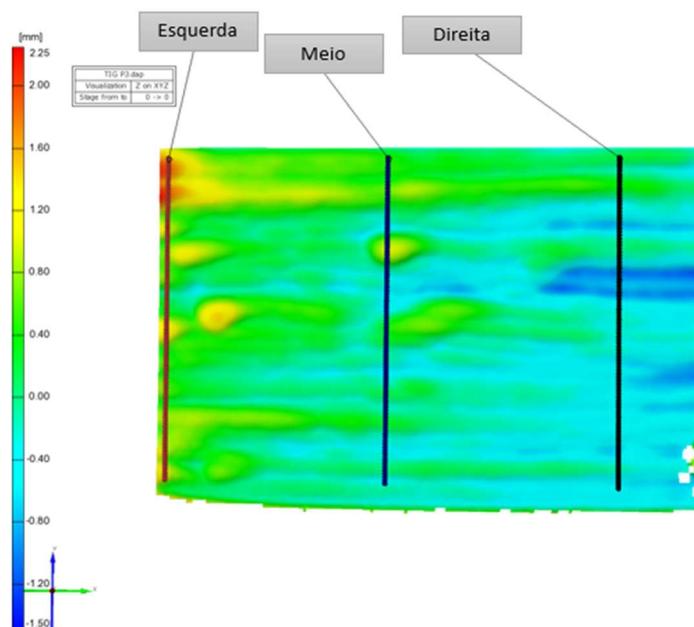


Figura 4.18. Representação da posição relativa dos cordões, componente P3.

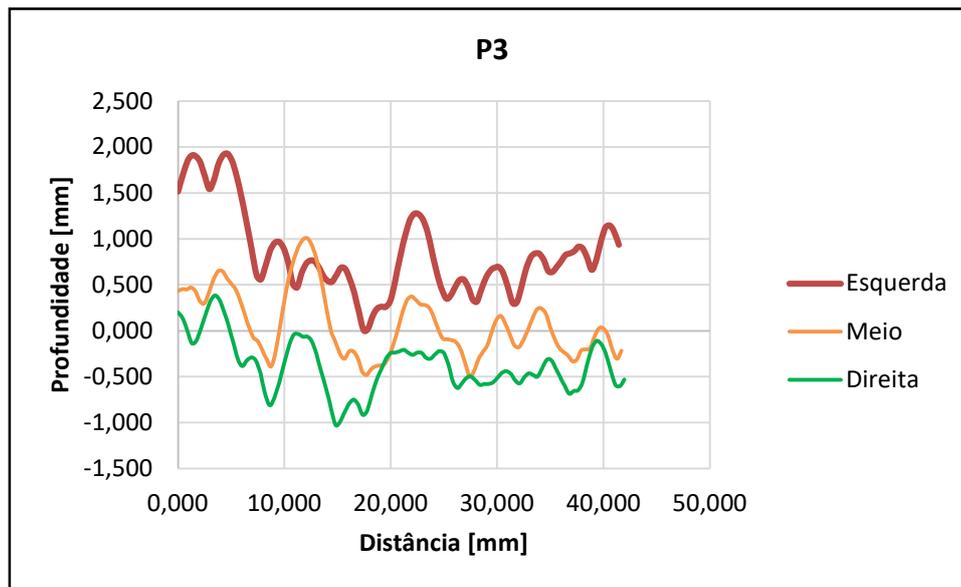


Figura 4.19. Gráfico dos valores da posição relativa dos cordões, componente P3.

#### 4.2.3. Análise Metalográfica

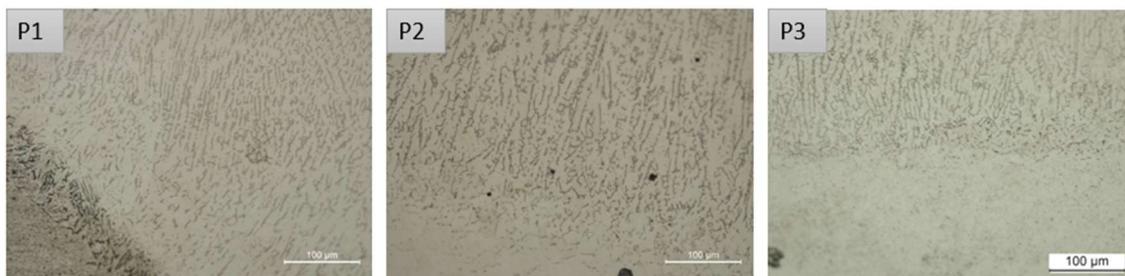
Os ciclos térmicos sofridos pelos componentes depositados pelos processos WAAM têm um grande impacto na sua microestrutura [31],[32].

A análise microestrutural dos componentes multicamada será efetuada dividindo os componentes em três zonas distintas, zona da base, meio e topo, de forma a facilitar a observação das estruturas presentes em cada uma das zonas.

Na Figura 4.20 estão apresentadas as zonas da base dos componentes multicamada. Nesta zona dos componentes é possível observar a zona da interface entre o componente depositado e o substrato, como consequência de estar em contacto com o substrato, esta zona poderá ter estado sujeita a elevados gradientes térmicos. As micrografias das zonas da base dos componentes P1, P2 e P3 podem ser observadas na Figura 4.21. Através da análise desta figura é possível verificar que a ferrite apresenta uma estrutura dendrítica orientada segundo a direção da dissipação do calor, sendo que, de acordo com a literatura as trocas de energia com o substrato ocorrem segundo todas as direções.



**Figura 4.20.** Zona da base dos componentes multicamada, P1, P2 e P3, evidenciando as zonas das quais foram retidas as micrografias. Ampliação 1,25x.

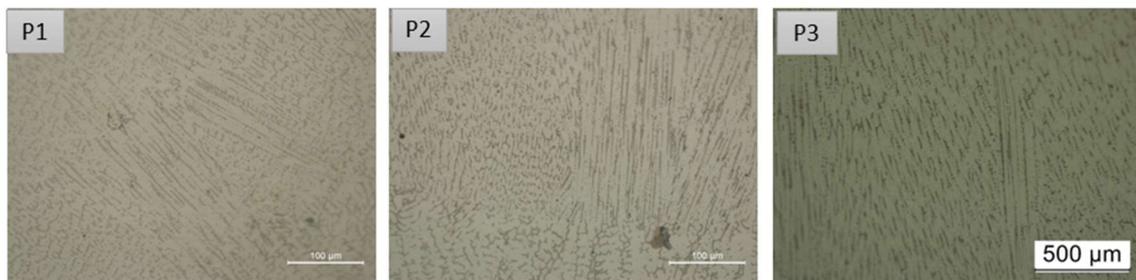


**Figura 4.21.** Micrografia retiradas da zona da base dos componentes multicamada.

Na Figura 4.22, são representadas as zonas do meio dos componentes multicamada P1, P2 e P3 e evidenciadas as linhas de fusão entre camadas. A Figura 4.23 apresenta as micrografias da zona do meio dos diferentes componentes, onde, para além das estruturas habituais (ferrite *skeletal* e *lathy*), podem ser observadas dendrites colunares. Nas zonas de fronteira entre camadas, onde ocorre a refusão da camada anterior, existe um aumento do gradiente térmico e conseqüentemente, um aumento da velocidade de arrefecimento, alterando a morfologia da ferrite depositada [33][34].



**Figura 4.22.** Zona do meio dos componentes multicamada, com linhas de fusão evidenciadas, componentes P1, P2 e P3. Ampliação 1,25x.



**Figura 4.23.** Micrografia retiradas da zona do meio dos componentes multicamada, componentes P1, P2 e P3.

A zona do topo dos componentes está representada na Figura 4.24, onde é possível observar a última camada depositada. Na Figura 4.25 são apresentadas as micrografias da zona do topo dos três componentes. Através da análise da figura, é possível perceber, que esta zona apresenta estruturas dendríticas com ramificações de elevadas dimensões que se apresentam bem definidas e com direção perpendicular à direção de deposição, estas estruturas são consequência da ausência de camadas posteriores e de um arrefecimento lento [35].



**Figura 4.24.** Zona do topo dos componentes multicamada, P1, P2 e P3, evidenciando as zonas das quais foram retidas as micrografias. Ampliação 1,25x.



**Figura 4.25.** Micrografia retiradas da zona do topo dos componentes multicamada, P1, P2 e P3.

#### 4.2.4. Caracterização Mecânica

Na secção atual vai ser feita uma análise dos resultados obtidos através da medição das durezas dos componentes multicamada, P1, P2 e P3. No gráfico da Figura 4.26, são apresentados os valores médios das durezas nos três componentes multicamada e da dureza média do material do substrato. É possível constatar que os valores médios das durezas obtidos para os componentes P1, P2 e P3 são superiores a 190 HV, desta forma, todos os componentes depositados apresentam uma dureza média superior à dureza média do substrato. Este resultado pode ser justificado pela maior quantidade de ferrite nos componentes depositados, relativamente ao substrato, sendo a ferrite uma fase mais dura em comparação com a austenite [34]. Analisando o gráfico da figura, percebe-se que o valor médio mais elevado da dureza é o da parede P2. Este resultado está em conformidade com o resultado apresentado no subcapítulo anterior, sendo que, os parâmetros utilizados na deposição deste componente, são iguais aos utilizados na deposição da monocamada #4, estes parâmetros conjugam uma intensidade média de corrente alta, 112,5 A, e uma velocidade de alimentação do arame de adição no pico elevada, 1,9 m/minuto, utilizando corrente pulsada. De acordo com o subcapítulo anterior, um maior aporte térmico conduz a uma menor velocidade de arrefecimento, e, portanto, mais tempo de estabilização da austenite, sendo esta uma fase mais macia comparativamente à ferrite, traduzindo-se numa diminuição da dureza da amostra [29],[19].

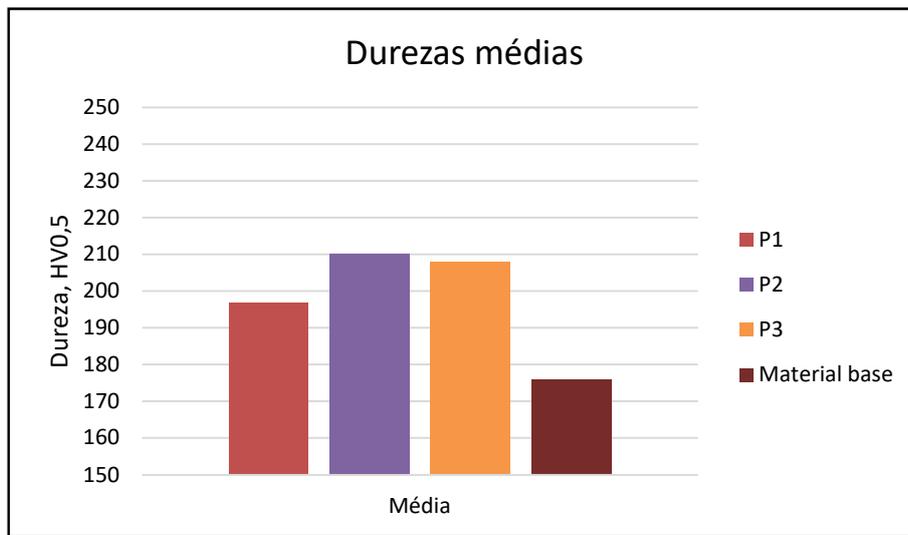


Figura 4.26. Durezas médias de P1, P2 e P3.

O gráfico da Figura 4.27, onde é apresentado o perfil de durezas do componente multicamada P1, permite aferir, através da sua análise que, os valores de dureza deste componente se encontram próximos de 200 HV. As pequenas variações dos valores de dureza podem ser consequência do local onde é efetuada a indentação, pois, tal como foi visto anteriormente, as zonas entre camadas apresentam velocidades de arrefecimento elevadas, o que provoca o aumento da dureza.

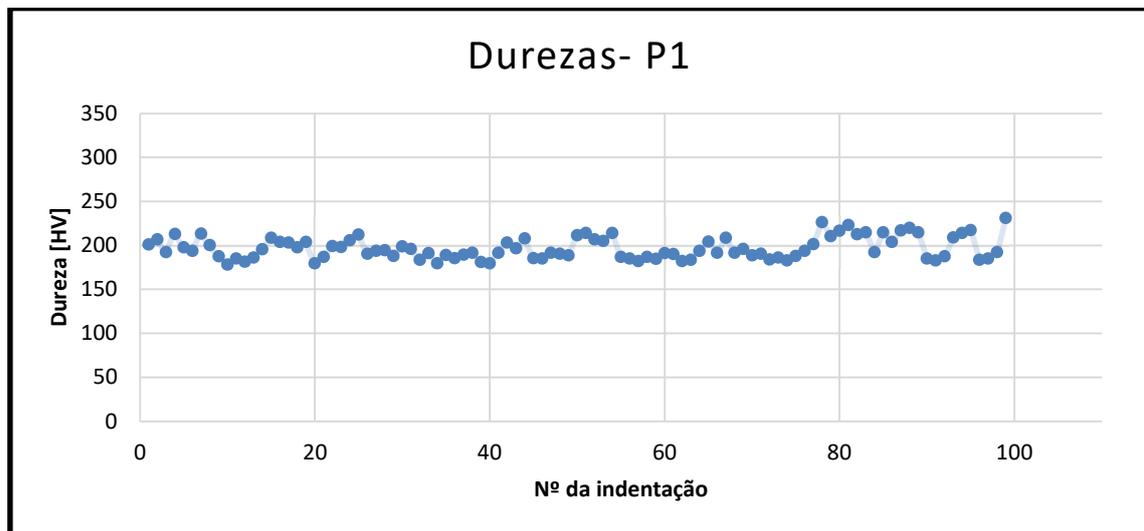


Figura 4.27. Perfil de durezas de P1.

No gráfico da Figura 4.28, são expostos os valores da dureza ao longo da altura do componente P2. Através da sua análise, é possível observar que, tal como no cordão #4, o valor da dureza da indentação feita no substrato é próximo de 250 HV. Os valores de dureza

do componente P3 mantém-se próximos dos 200 HV, com a exceção de algumas indentações e da zona do topo do cordão onde existe um elevado crescimento da dureza.

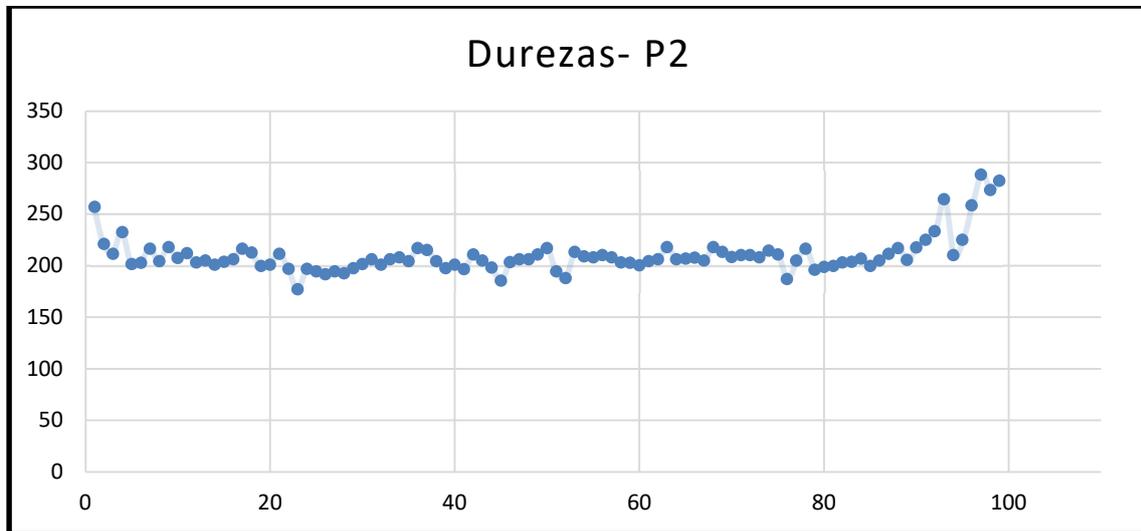
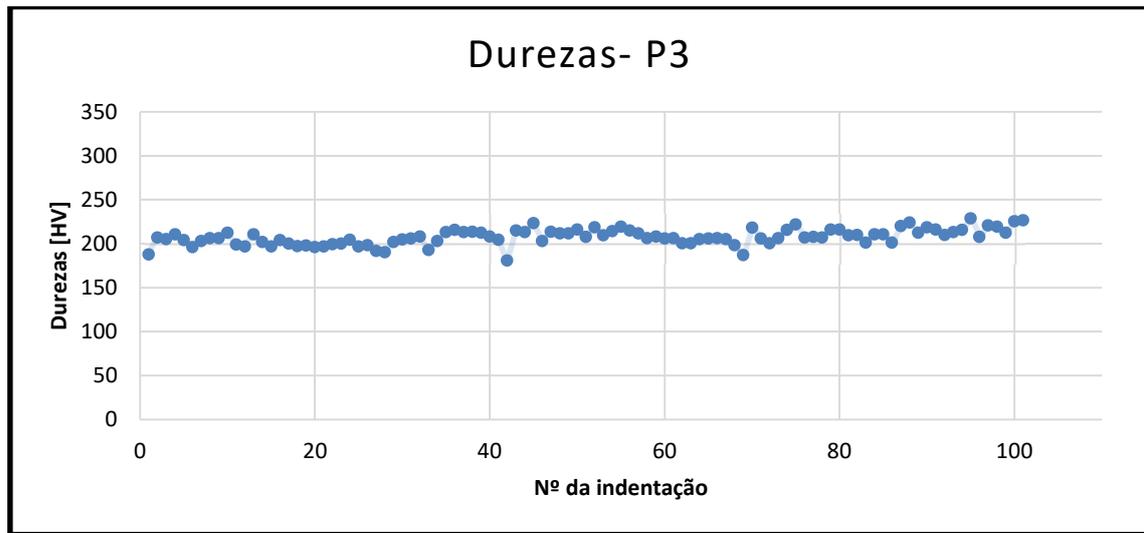


Figura 4.28. Perfil de durezas de P2.

O perfil de durezas do componente P3, medido ao longo da altura do componente e apresentado no gráfico da Figura 4.29, tem um comportamento uniforme, com exceção de algumas indentações que apresentam valores ligeiramente inferiores ou superiores ao valor médio. O componente multicamada P3 foi depositado utilizando os mesmos parâmetros de deposição do componente monocamada #7, utilizando corrente pulsada de intensidade média de corrente igual a 112,5 A e velocidade de alimentação do arame de adição no pico 1,8 m/minuto tendo, tal como este uma dureza no substrato próxima de 200 HV.



**Figura 4.29.** Perfil de durezas de P3.



## 5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram analisados componentes monocamada e multicamada depositado por TIG em aço inoxidável austenítico. Independentemente dos parâmetros de deposição utilizados, todos os componentes se apresentam livres de defeitos de fusão.

A intensidade média da corrente tem consequência direta na quantidade de energia fornecida ao componente durante a deposição, quanto maior for a intensidade média da corrente, maior será a energia de deposição. Por outro lado, a velocidade do arame de adição também influencia a quantidade de energia de deposição. Uma maior velocidade de alimentação do arame de deposição corresponde a uma menor energia de deposição, pois, durante a deposição é necessário fundir arame à temperatura ambiente, fazendo com que a restante energia que é fornecida ao banho de fusão seja menor.

Todas as monocamadas apresentam microestruturas semelhantes, constituídas por uma matriz de austenite e filmes ferrite  $\delta$ , que podem apresentar morfologias diferentes, *skeletal* e *lathy*. A análise microestrutural revelou que, a zona da interface entre o material depositado e o substrato apresenta filmes de ferrite de pequenas dimensões e grão colunares, e que, por outro lado, a zona superior das monocamadas apresenta dendrites ramificadas, com orientação preferencial na direção de escoamento do calor.

A utilização de corrente contínua pulsada permite depositar componentes com menores valores de penetração e largura e maiores valores de altura. Para o caso da fabricação aditiva, a altura do cordão é a dimensão mais importante, pois influencia diretamente o crescimento do componente depositados por TIG.

Na análise dos componentes monocamada observou-se que, para a mesma frequência de deposição, quanto maior for a velocidade de alimentação do arame de adição, maior será a largura dos componentes monocamada depositados. E quanto maior a energia de deposição maior será a sua penetração. No entanto, deve ser tida em consideração a ordem pela qual o componente é depositado no substrato, pois, a temperatura do substrato tem influência na velocidade de arrefecimento do componente.

Foi ainda possível concluir com a análise mecânica dos componentes monocamada, que, a maior temperatura do banho de fusão provoca uma diminuição da dureza final do componente. Para a mesma frequência, observou-se que, a dureza aumenta com a diminuição

da velocidade de alimentação do arame de adição. E ainda se concluiu que as diferentes frequências não tiveram influência na dureza dos componentes depositados.

A deposição dos componentes realizada com corrente pulsada apresenta maior produtividade, comparativamente à utilização de corrente não pulsada. Os componentes depositados com corrente pulsada apresentam menor distorção do substrato comparativamente aos componentes depositados com corrente não pulsada.

A análise morfológica dos componentes multicamada permite observar que, todos os componentes possuem grandes irregularidades no relevo das camadas. Sendo o componente P2 o que apresenta uma superfície menos irregular.

Os valores de dureza dos componentes multicamada depositados são superiores aos valores de dureza do material do substrato, sendo uma justificção possível a existência de uma maior quantidade de ferrite  $\delta$ , que por sua vez, é uma fase mais dura. Os componentes multicamada depositados com corrente contínua pulsada apresentam maiores valores de dureza, comparativamente ao componente depositado com corrente contínua não pulsada. A energia aplicada ao componente P1 é superior à energia aplicada aos componentes P2 e P3, pois, para além de ter uma intensidade de corrente elevada, a velocidade de alimentação do arame de adição é inferior.

## **6. PRESPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS**

Para melhor justificar as diferenças nas dimensões dos cordões dos componentes monocamada depositados e nos resultados da análise das micro durezas deveria ser feita uma análise metalúrgica.

Para melhor compreender a forma como a frequência tem influência na dureza dos componentes produzidos seria necessário realizar deposições com intensidades médias de corrente e velocidades de alimentação do arame de adição iguais, fazendo apenas variação do valor da frequência.



---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] D. Klobčar, M. Lindič, and M. Bušić, “Wire arc additive manufacturing of mild steel,” *Mater. Geoenvironment*, vol. 65, no. 4, pp. 179–186, Dec. 2018, doi: 10.2478/rmzmag-2018-0015.
- [2] W. E. Frazier, “Metal additive manufacturing: A review,” *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 23, no. 6, pp. 1917–1928, 2014, doi: 10.1007/s11665-014-0958-z.
- [3] V. Vinoth, S. Sathiyamurthy, U. Natarajan, D. Venkatkumar, J. Prabhakaran, and K. Sanjeevi Prakash, “Examination of microstructure properties of AISI 316L stainless steel fabricated by wire arc additive manufacturing,” *Mater. Today Proc.*, no. xxxx, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.04.011.
- [4] U. Tripathi, N. Saini, R. S. Mulik, and M. M. Mahapatra, “Effect of build direction on the microstructure evolution and their mechanical properties using GTAW based wire arc additive manufacturing,” *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, vol. 37, pp. 103–109, 2022, doi: 10.1016/j.cirpj.2022.01.010.
- [5] Ivántabernero, A. Paskual, P. Álvarez, and A. Suárez, “Study on Arc Welding Processes for High Deposition Rate Additive Manufacturing,” *Procedia CIRP*, vol. 68, pp. 358–362, Jan. 2018, doi: 10.1016/J.PROCIR.2017.12.095.
- [6] Y. Suat, B. Koc, and O. Yilmaz, “Building strategy effect on mechanical properties of high strength low alloy steel in wire + arc additive manufacturing,” *Zavar. i zavarene Konstr.*, vol. 65, no. 3, pp. 125–136, 2020, doi: 10.5937/zzk2003125s.
- [7] M. Dinovitzer, X. Chen, J. Laliberte, X. Huang, and H. Frei, “Effect of wire and arc additive manufacturing (WAAM) process parameters on bead geometry and microstructure,” *Addit. Manuf.*, vol. 26, pp. 138–146, Mar. 2019, doi: 10.1016/J.ADDMA.2018.12.013.
- [8] J. L. Prado-Cerqueira *et al.*, “Analysis of favorable process conditions for the manufacturing of thin-wall pieces of mild steel obtained by wire and arc additive manufacturing (WAAM),” *Materials (Basel)*, vol. 11, no. 8, 2018, doi: 10.3390/ma11081449.
- [9] J. F. S. Duarte, “Análise Comparativa de Soldaduras Obtidas em Estado Sólido e por Fusão,” Universidade de Coimbra, 2015.

- [10] D. L. Olson, T. A. Siewert, S. Liu, and G. R. Edwards, *Welding, Brazing, and Soldering Volume 6 of the Asm Handbook.*, vol. 74, no. 8. 1993.
- [11] P. K. Baghel and D. S. Nagesh, “Pulse TIG welding: Process, Automation and Control,” *J. Weld. Join.*, vol. 35, no. 1, pp. 43–48, 2017, doi: 10.5781/jwj.2017.35.1.43.
- [12] M. Sowrirajan, S. Vijayan, and M. Arulraj, “Welding Based Additive Manufacturing: Fundamentals,” *Stainl. Steels [Working Title]*, Apr. 2022, doi: 10.5772/INTECHOPEN.104768.
- [13] F. J. G. Silva, *Tecnologia da Soldadura- Uma abordagem técnico-didática*, 2<sup>a</sup> Edição.
- [14] E. Karayel and Y. Bozkurt, “Additive manufacturing method and different welding applications,” *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 9, no. 5, pp. 11424–11438, 2020, doi: 10.1016/j.jmrt.2020.08.039.
- [15] V. das N. Rolo, “Procedimentos de soldadura de materiais exóticos,” Universidade de Coimbra, 2015.
- [16] A. Kumar and S. Sundarrajan, “Optimization of pulsed TIG welding process parameters on mechanical properties of AA 5456 Aluminum alloy weldments,” *Mater. Des.*, vol. 30, no. 4, pp. 1288–1297, Apr. 2009, doi: 10.1016/J.MATDES.2008.06.055.
- [17] J. R. . Davis, Ed., *ASM Speciality Handbook: Stainless Steels*. 1994.
- [18] ISO, “ISO 14343:2017- Welding consumables.” 2017.
- [19] S. Kumar and A. S. Shahi, “Effect of heat input on the microstructure and mechanical properties of gas tungsten arc welded AISI 304 stainless steel joints,” *Mater. Des.*, vol. 32, no. 6, pp. 3617–3623, 2011, doi: 10.1016/j.matdes.2011.02.017.
- [20] J. P. Oliveira, T. G. Santos, and R. M. Miranda, “Revisiting fundamental welding concepts to improve additive manufacturing: From theory to practice,” *Prog. Mater. Sci.*, vol. 107, p. 100590, Jan. 2020, doi: 10.1016/J.PMATSCI.2019.100590.
- [21] A. Mondal, M. K. Saha, R. Hazra, and S. Das, “Influence of heat input on weld bead geometry using duplex stainless steel wire electrode on low alloy steel specimens,” *Cogent Eng.*, vol. 3, no. 1, 2016, doi: 10.1080/23311916.2016.1143598.
- [22] E. O. Ogundimu, E. T. Akinlabi, and M. F. Erinosh, “An Experimental Study on

- the Effect of Heat Input on the Weld Efficiency of TIG-MIG Hybrid welding of Type 304 Austenitic Stainless Steel,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1378, no. 2, 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1378/2/022075.
- [23] E. M. F. de S. Silva, G. S. da Fonseca, and L. R. L. dos Santos, “Análise Microestrutural Da Solda Similar Do Aço Inoxidável Austenítico 316L Com O Aumento Do Aporte Térmico,” no. February 2020, pp. 821–828, 2020, doi: 10.5151/2594-5327-33294.
- [24] E. P. dos Santos, ““ESTUDO COMPARATIVO DAS TRANSFORMAÇÕES MICROESTRUTURAIS E TERMOMETALURGICAS DE JUNTAS SOLDADAS DOS AÇOS INOXIDÁVEIS AISI 316 E AISI 316L PELO PROCESSO TIG AUTÓGENO,”” Universidade Federal Fluminense, 2016.
- [25] M. L. N. M. Melo, C. A. Santos, and C. P. Lima, “Efeito da taxa de resfriamento sobre a microestrutura formada durante a solidificação direcional de um aço inoxidável austenítico,” *XVI Congr. Bras. Eng. e Ciência dos Mater.*, no. November, 2004.
- [26] A. Sriba, J. B. Vogt, and S. E. Amara, “Microstructure, Micro-hardness and Impact Toughness of Welded Austenitic Stainless Steel 316L,” *Trans. Indian Inst. Met.*, vol. 71, no. 9, pp. 2303–2314, 2018, doi: 10.1007/s12666-018-1362-4.
- [27] M. de L. N. M. Melo, N. H. A. Pereira, C. A. de L. Penhalber, C. R. P. de Lima, and C. A. dos Santos, “Análise dos modelos utilizados para a previsão dos parâmetros microestruturais obtidos durante a solidificação direcional do aço inoxidável austenítico AISI 304,” *Rem Rev. Esc. Minas*, vol. 60, no. 1, pp. 135–140, 2007, doi: 10.1590/s0370-44672007000100021.
- [28] R. dos S. Silva, R. Demarque, J. A. de Castro, and E. P. dos Santos, “Influência Do Aporte Térmico Sobre As Propriedades De Juntas Soldadas Dos Aços Aisi 316 E Aisi 316L,” vol. 6973, pp. 2826–2837, 2018, doi: 10.5151/1516-392x-286.
- [29] L. Manuel Guilhoto Marques Fialho, “Development of Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) procedures that allow depositing very complex structures without support,” 2019.
- [30] Y. M. Zhang, Y. Chen, P. Li, and A. T. Male, “Weld deposition-based rapid prototyping: a preliminary study,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 135, no. 2–3, pp. 347–357, Apr. 2003, doi: 10.1016/S0924-0136(02)00867-1.

- [31] W. Jin, C. Zhang, S. Jin, Y. Tian, D. Wellmann, and W. Liu, “Wire arc additive manufacturing of stainless steels: A review,” *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 5, 2020, doi: 10.3390/app10051563.
- [32] B. Baufeld, O. Van Der Biest, and R. Gault, “Microstructure of Ti-6Al-4V specimens produced by shaped metal deposition,” *Int. J. Mater. Res.*, vol. 100, no. 11, pp. 1536–1542, 2009, doi: 10.3139/146.110217.
- [33] T. Zhang, H. Li, H. Gong, Y. Wu, X. Chen, and X. Zhang, “Study on location-related thermal cycles and microstructure variation of additively manufactured inconel 718,” *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 18, pp. 3056–3072, May 2022, doi: 10.1016/J.JMRT.2022.03.178.
- [34] L. Beatriz, O. De Souza, M. Ruth, and N. Santos, “Characterization of an Austenitic Stainless Steel Preform Deposited by Wire Arc Additive Manufacturing,” pp. 1–22, 2022.
- [35] X. Wang *et al.*, “Microstructure and Corrosion Properties of Wire Arc Additively Manufactured Multi-Trace and Multilayer Stainless Steel 321,” *Metals (Basel)*, vol. 12, no. 6, p. 1039, 2022, doi: 10.3390/met12061039.

## APÊNDICE A



Figura 6.1. Equipamento de soldadura Fronius KD 4000 D-1.



Figura 6.2. Parte inferior do componente multicamada P1 (sentido da deposição, da esquerda para a direita).

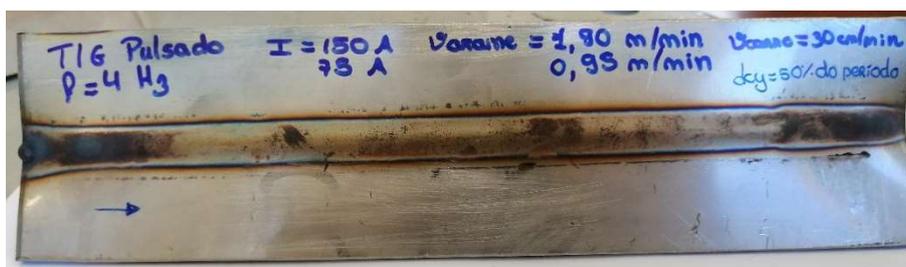
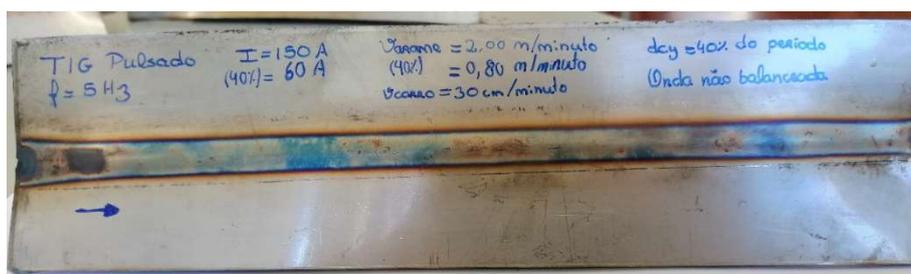


Figura 6.3. Parte inferior da chapa de substrato do componente multicamada P2 e parâmetros de deposição, sentido da deposição da esquerda para a direita.



**Figura 6.4.** Parte inferior da chapa de substrato do componente multicamada P3 e parâmetros de deposição, sentido da soldadura da esquerda para a direita.

**Erro! A origem da referência não foi encontrada.**

---