



UNIVERSIDADE DE  
COIMBRA

Steve Alexandre Martins Vargas

“FRICTION STIR WELDING” DE  
COMPONENTES PRODUZIDOS POR  
FABRICO ADITIVO

Dissertação no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia  
Mecânica orientada pelo Professor Doutor Paulo Nobre Balbis dos  
Reis e pelo Professor Doutor Rui Manuel Ferreira Leal  
apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da  
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Fevereiro de 2023



1 2



9 0

FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE  
COIMBRA

# **“FRICTION STIR WELDING” DE COMPONENTES PRODUZIDOS POR FABRICO ADITIVO**

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

## **FRICTION STIR WELDING OF COMPONENTS PRODUCED BY ADDITIVE MANUFACTURING**

**Autor**

**Steve Alexandre Martins Vargas**

**Orientadores**

**Professor Doutor Paulo Nobre Balbis dos Reis**

**Professor Doutor Rui Manuel Ferreira Leal**

**Júri**

**Presidente** Professora Doutora Ana Paula Bettencourt Martins Amaro  
Professora Associada com Agregação da Universidade de  
Coimbra

**Orientador** Professor Doutor Paulo Nobre Balbis Reis  
Professor Associado da Universidade de Coimbra

**Vogais** Professor Doutor Ivan Rodolfo Pereira Garcia de Galvão  
Professor Adjunto do Instituto Politécnico de Lisboa  
Mestre Miguel Ângelo Reis Pereira  
Assistente Convidado da Universidade de Coimbra

---

**Coimbra, Fevereiro, 2023**







## Agradecimentos

Com esta dissertação de mestrado acaba uma grande etapa da minha vida onde muitas pessoas contribuíram para conseguir superar os desafios que encontrei, às quais gostaria de agradecer.

Agradeço, primeiramente, aos meus orientadores Doutor Paulo Reis e Doutor Rui Leal por toda a ajuda, paciência e conhecimento transmitido ao longo desta dissertação. Agradeço também ao Sr. Fernando por toda a ajuda prestada na realização das soldaduras e pela orientação na oficina. A todos os colegas, professores e investigadores com quem partilhei o laboratório um muito obrigado pela partilha de conhecimento e companheirismo.

Obrigado a todos os colegas e amigos que me acompanharam de perto nesta jornada, pelas vivências, pelo conhecimento partilhado e pela motivação nos momentos mais difíceis.

Por fim, um agradecimento muito especial à minha família e amigos próximos pela confiança e motivação que sempre depositaram em mim.

A todos, muito obrigado.





## Resumo

O objetivo desta dissertação é investigar o impacto que os parâmetros do processo de soldadura por fricção, *Friction Stir Welding* (FSW), têm nas propriedades mecânicas de soldaduras topo a topo de placas de ácido polilático (PLA). Para isso foi utilizada uma ferramenta de base estacionária aquecida com pino cônico roscado. Os parâmetros estudados foram a velocidade de rotação, velocidade de avanço e temperatura de aquecimento da base. Neste contexto e de forma a realizar o menor número possível de experiências, bem como encontrar o conjunto de parâmetros ótimo, recorreu-se ao método de Taguchi. As placas de PLA foram obtidas por processo de fabrico aditivo, nomeadamente o *Fused Filament Fabrication* (FFF), com dimensões de 100 mm de comprimento, 70 mm de largura e 6 mm de espessura.

O cordão de soldadura foi estudado para analisar a influência que cada parâmetro tem na sua morfologia, nomeadamente na formação de defeitos como porosidade, rebarbas e cavidades. Verificou-se que para velocidades de avanço baixas ( $30 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ) existe a tendência de se alterar a morfologia do cordão e a formação de um defeito em V no lado do avanço. Foram realizados ensaios de dureza e de resistência à tração para avaliar o impacto dos parâmetros do processo em cada uma destas propriedades.

Em relação à dureza, a velocidade de avanço mais baixa aparenta criar bastantes defeitos no cordão, levando a valores de dureza mais reduzidos nesses locais. Verificou-se ainda que a dureza é variável para as diferentes placas utilizadas no estudo, o que pode ser atribuído à porosidade introduzida pela impressão 3D.

Por fim, em relação à resistência à tração, a melhor eficiência de junta foi da ordem dos 72% e obtida em soldaduras realizadas com velocidade de avanço, velocidade de rotação e temperatura de aquecimento de  $90 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ , 1140 rpm e  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ , respetivamente. Com base no método de Taguchi, a velocidade de rotação e temperatura de aquecimento são os parâmetros com maior influência e os valores ótimos para maximizar a eficiência da junta são  $30 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ , 1140 rpm e  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**Palavras-chave:** *Friction Stir Welding* (FSW), Impressão 3D, Ácido Polilático (PLA), Taguchi



## Abstract

The aim of this dissertation is to investigate the impact that the parameters of the Friction Stir Welding (FSW) have on the mechanical properties of poly-lactic acid (PLA) plate butt welds. A heated stationary shoulder tool with tapered threaded pin is used for this purpose. The parameters evaluated were the rotational speed, feed rate and heating temperature of the shoulder. In this context and to perform as few experiments as possible to find the optimal set of parameters the Taguchi method was used. The PLA plates were obtained by additive manufacturing process, namely Fused Filament Fabrication (FFM), with dimensions of 100 mm length, 70 mm width and 6 mm thickness.

The weld seam was studied to analyze the influence that each parameter has on its morphology, namely in the formation of defects such as porosity, burrs, and cavities. It was verified that for low feed rate ( $30 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ) there is a tendency to form a V-shaped defect on the advancing side and the weld morphology also changes with this parameter. Hardness and tensile strength tests were performed to evaluate the impact of the process parameters in each of these properties.

In relation to hardness, the lower feed rate appears to create many defects in the weld nugget, leading to lower hardness values at these locations. It was also found that the hardness is variable for the different plates used in the study and that can be attributed to the porosity introduced by 3D printing.

Finally, in relation to tensile strength the best joint efficiency of 72 % was obtained for welds with feed rate, rotation speed and heating temperature of  $90 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ , 1140 rpm and  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ , respectively. Based on Taguchi's method, rotation speed and heating temperature are the most influential parameters, and the optimal parameter set is  $30 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ , 1140 rpm and  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**Keywords:** Friction Stir Welding (FSW), 3D Printing, Poly-lactic Acid (PLA), Taguchi



## Índice

Índice de Figuras .....	ix
Índice de Tabelas .....	xiii
SIGLAS E ACRÓNIMOS.....	xv
Siglas e Acrónimos.....	xv
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	3
2.1. Fused Filament Fabrication (FFF) .....	3
2.2. Polímeros .....	3
2.3. Friction Stir Welding .....	5
2.3.1. Métodos de ligação para polímeros .....	5
2.3.2. Ferramentas de FSW para polímeros.....	8
2.3.3. Geometria de Pino .....	13
2.3.4. Parâmetros do Processo .....	15
2.3.5. Estudos envolvendo FSW e PLA .....	16
2.4. Método de Taguchi .....	18
3. MATERIAIS E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	19
3.1. Material Base .....	19
3.2. Desenho Experimental – Método de Taguchi.....	19
3.3. Processo de Soldadura .....	20
3.3.1. Equipamento.....	20
3.3.2. Ferramenta .....	21
3.3.3. Controlo e Registo da Temperatura.....	22
3.3.4. Preparação e fixação das placas.....	22
3.4. Execução das Soldaduras .....	23
3.5. Caracterização das Soldaduras.....	24
4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....	27
4.1. Macrografias .....	27
4.2. Ensaio de Dureza.....	35
4.2.1. Dureza do Material Base .....	35
4.2.2. Dureza das Soldaduras.....	37
4.3. Ensaio de Tração .....	42
4.3.1. Material Base.....	42
4.3.2. Resistência à Tração das Soldaduras .....	43
4.4. Aplicação do Método de Taguchi .....	48
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	57
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	59
APÊNDICE A .....	63



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Esquema da impressão 3D (adaptado de [3]).....	3
Figura 2.2. Classificação dos processos de ligação soldada (Adaptado de [23]). .....	7
Figura 2.3. Processo FSW (Adaptado de [25]).....	8
Figura 2.4. Ferramenta convencional com base larga (Adaptado de [30]).....	9
Figura 2.5. Ferramenta FSW: a) Ferramenta de Base Dupla (Adaptado de [34]); b) Perfil da base (Adaptado de [35]). .....	10
Figura 2.6. Ferramenta de Base Estacionária Aquecida (Adaptado de [28]). .....	11
Figura 2.7. Ferramenta aquecida por pistola de ar quente (Adaptado de [37]). .....	12
Figura 2.8. Ferramenta aquecida por indução (Adaptado de [38]).....	12
Figura 2.9. Ferramenta com geração interna de calor (Adaptado de [39]).....	13
Figura 2.10. Tipos de pino: a) cilíndrico reto; b) cônico, c) cilíndrico roscado, d) quadrado, e) triangular, f) hexagonal [40].....	13
Figura 2.11. Influência da rotação e geometria do pino no fluxo do material (Adaptado de [42]). .....	14
Figura 2.12. Ferramentas de FSW utilizadas no estudo realizado por Sharma <i>et al.</i> [25]. .	16
Figura 2.13. Ferramenta de FSW utilizada no estudo realizado por Senthil <i>et al.</i> [47]. ....	17
Figura 2.14. Ferramentas de FSW utilizadas no estudo realizado por Vidakis <i>et al.</i> [48]. .	17
Figura 3.1. Fresadora <i>Cincinnati Milacron 207MK</i> . .....	21
Figura 3.2. Ferramenta de soldadura de polímeros por FSW.....	22
Figura 3.3. Esquema da disposição das placas. ....	23
Figura 3.4. Sistema de fixação: real e esquema.....	23
Figura 3.5. Microdurómetro SHIMADZU – HMV-G.....	25
Figura 3.6. Equipamento de ensaio à tração SHIMADZU AGS – X.....	26
Figura 4.1. Macrografia da superfície de soldadura: a) 3D_PLA_1; b) 3D_PLA_2; c) 3D_PLA_3.....	27
Figura 4.2. Macrografia da secção transversal: velocidade de avanço de 60 mm.min <sup>-1</sup> . ....	28
Figura 4.3. Fratura soldadura 3D_PLA_3. ....	29
Figura 4.4. Macrografia da superfície de soldadura: a) 3D_PLA_4; b) 3D_PLA_5; c) 3D_PLA_6.....	30
Figura 4.5. Macrografia da secção transversal: velocidade de avanço de 90 mm.min <sup>-1</sup> . ....	31
Figura 4.6. Macrografia da superfície de soldadura: a) 3D_PLA_7; b) 3D_PLA_8; c) 3D_PLA_9.....	32

Figura 4.7. Macrografia da secção transversal: velocidade de avanço de 30 mm.min <sup>-1</sup> .....	33
Figura 4.8. Macrografia da secção transversal: 3D_PLA_8. ....	34
Figura 4.9. Macrografia da secção transversal: 3D_PLA_9_P1. ....	35
Figura 4.10. Defeitos no Material Base: a) PLA Branco, b) PLA preto. ....	36
Figura 4.11. Gráfico de dureza: 3D_PLA_1. ....	37
Figura 4.12. Gráfico de dureza: 3D_PLA_2. ....	38
Figura 4.13. Gráfico de dureza: 3D_PLA_3. ....	38
Figura 4.14. Gráfico de dureza: 3D_PLA_4. ....	39
Figura 4.15. Gráfico de dureza: 3D_PLA_5. ....	39
Figura 4.16. Gráfico de dureza: 3D_PLA_6. ....	40
Figura 4.17. Gráfico de dureza: 3D_PLA_7. ....	40
Figura 4.18. Gráfico de dureza: 3D_PLA_8. ....	41
Figura 4.19. Gráfico de dureza: 3D_PLA_9. ....	41
Figura 4.20. Imagem das indentações na soldaduras a 30 mm.min <sup>-1</sup> .....	42
Figura 4.21. Curva Tensão-Deformação do material base.....	43
Figura 4.22. Curva Tensão-Deformação das 9 soldaduras.....	43
Figura 4.23. Curva Tensão-Deformação: soldaduras 1, 4 e 5. ....	44
Figura 4.24. Curva Tensão-Deformação: soldaduras 7, 8 e 9. ....	45
Figura 4.25. Curva Tensão-Deformação: soldaduras 2, 3 e 6. ....	45
Figura 4.26. Gráfico do efeito principal para as médias – Resistência à tração.....	49
Figura 4.27. Gráfico do efeito principal para os rácios S/N – Resistência à tração. ....	49
Figura 4.28. Contribuição de cada fator para a resistência à tração.....	51
Figura 4.29. Gráficos de contorno: VR vs VA, VR vs TA e VA vs TA.....	52
Figura 4.30. Soldadura 3D_PLA_10 : Validação do método de Taguchi.....	53
Figura 4.31. Macrografia da secção transversal: velocidade de avanço de 60 mm.min <sup>-1</sup> ...	54
Figura 4.32. Gráfico de Dureza 3D_PLA_10. ....	54
Figura 4.33. Curva tensão-deformação: 3D_PLA_10.....	55
Figura A.1. Provete P2 da soldadura 8.....	63
Figura A.2. Gráfico de dureza do material base.....	64
Figura A.3. Representação de uma amostra de material base.....	64
Figura A.4. Gráfico de dureza do PLA preto: linhas horizontais.....	64
Figura A.5. Gráfico de dureza do PLA preto: linhas verticais.....	65
Figura A.6. Gráfico de dureza do PLA branco: linhas horizontais.....	65
Figura A.7. Gráfico de dureza do PLA branco: linhas verticais.....	65



Figura A.8. Soldadura 3D_PLA_10 vista inferior.....	66
Figura A.9. Fratura do provete 3D_PLA_8_P2.....	66



---

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1. Parâmetros de impressão. ....	19
Tabela 3.2. Fatores e níveis utilizados no método de Taguchi.....	20
Tabela 3.3. Desenho experimental com base na matriz ortogonal L9 – Método de Taguchi. .....	20
Tabela 4.1. Dureza do Material Base. ....	36
Tabela 4.2. Propriedades mecânicas das soldaduras. ....	47
Tabela 4.3. Matriz ortogonal L9 – Método de <i>Taguchi</i> .....	49
Tabela 4.4. Tabela de resposta para râtios S/N.....	50
Tabela 4.5. Tabela de resposta para a média.....	50
Tabela 4.6. Análise de Variância (ANOVA) para a Resistência à Tração.....	50
Tabela 4.7. Validação do método de Taguchi. ....	52



## SIGLAS E ACRÓNIMOS

### Siglas e Acrónimos

ABS – - Acrilonitrila Butadieno Estireno

ANOVA – Análise de Variância

ASTM – *American Society for Testing of Materials*

CAD – *Computer Aided Design*

DEMUC – Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra

FFF – *Fused Filament Fabrication*

FSW – *Friction Stir Welding*

HDPE – Polietileno de Alta Densidade

HV – Dureza Vickers

LA – Lado do Avanço

LR – Lado do Recuo

PA6 – Poliamida 6

PC – Policarbonato

PETG – Polietileno Tereftalato Glicol

PLA – Ácido Polilático

PP – Polipropileno

TA – Temperatura de Aquecimento

TWI – *The Welding Institute*

UHMW-PE – Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular

VA – Velocidade de Avanço

VR – Velocidade de Rotação

ZAT – Zona Afetada Térmicamente

ABS – - Acrilonitrila Butadieno Estireno

ANOVA – Análise de Variância

ASTM – *American Society for Testing of Materials*

CAD – *Computer Aided Design*

DEMUC – Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra

FFF – *Fused Fillament Fabrication*

FSW – *Friction Stir Welding*

HDPE – Polietileno de Alta Densidade

HV – Dureza Vickers

LA – Lado do Avanço

LR – Lado do Recuo

PA6 – Poliamida 6

PC – Policarbonato

PETG – Polietileno Tereftalato Glicol

PLA – Ácido Polilático

PP – Polipropileno

TA – Temperatura de Aquecimento

TWI – *The Welding Institute*

UHMW-PE – Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular

VA – Velocidade de Avanço

VR – Velocidade de Rotação

ZAT – Zona Afetada Termicamente







## 1. INTRODUÇÃO

Atualmente, a indústria tem seguido um caminho que permite obter componentes cada vez mais leves e resistentes e que consigam competir com os materiais metálicos. Neste contexto, os materiais de base polimérica têm conseguido substituir os metais em diversas áreas da indústria, nomeadamente na automóvel, aeronáutica e aeroespacial, onde é imperativo que exista um compromisso entre o peso e a resistência dos componentes.

Neste contexto, é cada vez mais usual o recurso aos processos de fabrico aditivo para a obtenção de componentes em diferentes fases de um projeto, desde a obtenção de protótipos até à criação de componentes finais. No entanto, surge muitas vezes a necessidade de fazer a união de componentes quando estamos limitados às dimensões da base de impressão ou caso seja necessário reparar um componente, aproveitando assim as secções que se encontrem sãs e reimprimindo apenas as danificadas.

Face ao exposto, o presente estudo pretende otimizar os parâmetros do processo de soldadura por *Friction Stir Welding* (FSW) com vista a maximizar as propriedades mecânicas de juntas soldadas topo a topo. As placas de ácido polilático (PLA) a unir são similares e foram obtidas por fabrico aditivo. O polímero utilizado neste trabalho tem origem em fontes renováveis como o amido de milho ou cana-de-açúcar e tem a capacidade de ser biodegradável. O PLA tem visto a sua popularidade aumentar por ser um bioplástico com propriedades competitivas quando comparado com alguns polímeros provenientes de fontes fósseis. Ao nível da tecnologia utilizada, o FSW, é um processo desenvolvido em 1991 no *The Welding Institute* (TWI), inicialmente concebido para soldar metais, como o alumínio, que à data apresentavam grandes dificuldades de ser soldado por processos convencionais onde ocorre fusão. Mais tarde, foi possível aplicar este processo a materiais poliméricos utilizando ferramentas convencionais, porém, devido às propriedades térmicas e mecânicas dos polímeros foram necessárias várias modificações ao processo, principalmente ao nível da ferramenta.

O método de Taguchi foi utilizado para estudar o impacto e a contribuição que cada parâmetro tem na qualidade das soldaduras, bem como encontrar o conjunto ótimo de parâmetros com um número reduzido de experiências.

Assim, para este propósito, a presente dissertação encontra-se dividida em 5 capítulos. No capítulo 2 é feita uma a revisão da literatura. No capítulo 3 é descrito em detalhe o procedimento experimental e, no capítulo 4, são apresentados e discutidos os dados recolhidos nos diversos ensaios realizados. Finalmente, no capítulo 5 são apresentadas as principais conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1. Fused Filament Fabrication (FFF)

O fabrico aditivo é o processo de criação de componentes pela adição sucessiva de camadas, o qual opõe-se diretamente aos processos de fabrico subtrativo onde se parte de um bloco de material e se removem camadas até obter o componente final [1].

Assim, a impressão 3D é um tipo de fabrico aditivo onde componentes são modelados recorrendo a programas CAD (Computer-Aided Design) que convertem modelos 3D em instruções (percurso de deposição) para a impressora. Tem visto a sua popularidade aumentar nos últimos tempos por oferecer a capacidade de criar componentes com geometrias complexas de uma forma rápida [2].

Das diferentes técnicas existente, a impressão 3D é baseada no *Fused Filament Fabrication* (FFF). No FFF um filamento de material termoplástico alimenta uma extrusora aquecida que deposita o material em camadas sucessivas [3]. A extrusora (*nozzle*) controlada por *software* movimenta-se segundo dois eixos depositando uma camada de filamento sobre a peça em construção. Quando termina a deposição da camada anterior, a base ou a extrusora movimenta-se uma distância correspondente à espessura de uma camada e continua a deposição de uma nova camada até se obter o componente final [2]. Na Figura 2.1 está representado um esquema simplificado da impressão 3D.

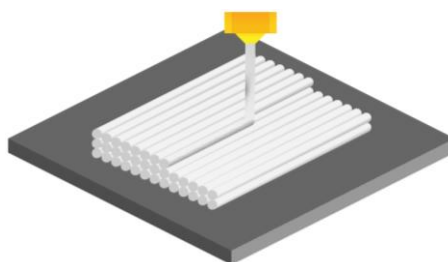


Figura 2.1. Esquema da impressão 3D (adaptado de [3]).

### 2.2. Polímeros

Os materiais poliméricos são utilizados em várias aplicações como na indústria automóvel, aeroespacial, eletrónica, etc [4], [5]. O seu uso tem aumentado nos últimos tempos por oferecer custos de fabrico mais reduzidos e em especial a redução de peso,

permitindo obter componentes com resistências específicas competitivas quando comparados com materiais metálicos. A construção de estruturas leves é muito importante no setor automóvel e aeroespacial, uma vez que, existem leis cada vez mais restritivas em relação à emissão de poluentes e a preocupação pela eficiência energética é crescente [6], [7].

Os polímeros são constituídos por várias (poli) unidades químicas (meros) unidas entre si por ligações covalentes, ou covalentes e secundárias. São produzidos por reações químicas designadas por reações de polimerização nas quais as moléculas se ligam covalentemente formando cadeias longas [8], [9]. Podemos dividir os materiais poliméricos em termoplásticos e termoendurecíveis, em que os primeiros amolecem com a temperatura e, assim, podem ser remoldados e/ou reciclados. São constituídos por longas cadeias de moléculas unidas por ligações secundárias ou de Van Der Waals [10], [11]. As ligações secundárias são ligações com menor energia de ligação e que podem ser quebradas com o fornecimento de energia sob a forma de calor. Com a quebra das ligações secundárias, o polímero aumenta a sua plasticidade, amolecendo e tornando-se flexível, conseguindo moldar-se a qualquer geometria [12]. Finalmente, quando o polímero é arrefecido este forma novamente as ligações secundárias e consegue manter a forma que lhe foi imposta. O ciclo de aquecimento pode ser repetido várias vezes sem que ocorram grandes alterações nas suas propriedades, e está na base de vários métodos de processamento [11], [12].

No que respeita aos termoendurecíveis, são polímeros que quando adquirem uma determinada geometria e são curados através de reações químicas não podem voltar a ser refundidos pela aplicação de calor. O aumento excessivo da temperatura apenas leva à sua degradação [8]. Estes polímeros, contrariamente aos termoplásticos, são constituídos por macromoléculas que têm ligações covalentes entre os seus monómeros e apresentam também ligações covalentes entre cadeias. Devido a estas ligações serem fortes, o fornecimento de energia sob a forma de calor não leva à sua quebra. Desta forma as propriedades mecânicas não estão intimamente ligadas à temperatura como acontece nos termoplásticos [10], [11]. Ao contrário dos termoplásticos, os termoendurecíveis não podem ser amolecidos com o aumento da temperatura e remoldados, o que limita a aplicabilidade de certos processos de ligação de polímeros como a soldadura e, em particular, a FSW [10].

No presente trabalho foi utilizado o PLA, o qual é um termoplástico biodegradável que tem origens em fontes renováveis naturais, como o amido de milho e a cana-de-açúcar. É relativamente barato de se produzir e compostável [13]–[15].

Segundo a *American Society for Testing of Materials* (ASTM), polímeros biodegradáveis são aqueles que sob condições ambientais específicas sofrem alterações estruturais importantes que levam à perda das suas propriedades químicas e físicas. No caso de polímeros biodegradáveis, estas alterações ocorrem por ação de microrganismos tais como bactérias, fungos e algas [16]. O uso de polímeros biodegradáveis tem vindo a crescer ao longo dos anos na tentativa de minimizar danos causados pela introdução de resíduos poliméricos no meio ambiente. Isto é importante uma vez que estes polímeros podem substituir polímeros com origem em fontes não renováveis como derivados de produtos petrolíferos que são prejudiciais para o ambiente e libertam substâncias tóxicas que prejudicam os ecossistemas quando não são corretamente descartados [13], [15]

O uso de PLA na indústria tem sido potenciado devido a questões ambientais e económicas. Tem vindo a ser utilizado em várias indústrias tais como indústria automóvel, aeroespacial, têxtil e ainda no fabrico de embalagens [15]. Existe também um grande potencial no uso de PLA para a produção de equipamentos de proteção individual e outros produtos médicos que se revelaram necessários com o aparecimento da pandemia de COVID-19. Neste contexto, foram desenvolvidas investigações para diversas aplicações, tais como malhas de nano-fibras para o fabrico de filtros de máscaras respiratórias e também a utilização de PLA para a impressão 3D de zaragatoas para a colheita de exsudados nasofaríngeos para testagem à COVID-19 [13].

## **2.3. Friction Stir Welding**

### **2.3.1. Métodos de ligação para polímeros**

O projeto de componentes poliméricos procura sempre a criação de elementos que possam ser moldados de uma só vez com geometria muito próxima da final sem que sejam necessárias muitas operações posteriores (de acabamento e montagem). Porém, a criação de componentes que contenham diferentes materiais na sua constituição, a necessidade de ter componentes que possam ser desmontados e a necessidade de reparar danos requerem que sejam utilizados métodos de ligação. Por outro lado, a união de polímeros associada à

impressão 3D pode ser a solução para certos projetos em que as dimensões da impressora não são adequadas. A criação de várias secções de um componente por impressão 3D e posterior união por processo ligação de polímeros, nomeadamente por FSW, pode ser uma solução para a criação de componentes de grandes dimensões [17]. Os métodos de ligação de polímeros podem-se agrupar em três categorias: ligações mecânicas, adesivas e soldadas [18].

As primeiras caracterizam-se por serem simples, versáteis e capazes de unir materiais similares ou dissimilares. Fazem uso de fixadores mecânicos (parafusos, anilhas, rebites, etc.) para unir as peças, os quais podem ser feitos de material metálico ou polimérico. Os metálicos têm a vantagem de serem mais robustos e não serem afetados pela exposição a elevadas temperaturas, enquanto os poliméricos têm a vantagem de serem leves e resistentes à corrosão [19]. A enorme vantagem destas ligações é que não necessitam de preparação das superfícies a unir, mas as elevadas concentrações de tensões resultantes dos furos são a sua maior desvantagem [18], [19].

No caso das ligações adesivas, estas fazem uso de um adesivo, material diferente do dos substratos, e que é usado para os unir. Assim, a função deste adesivo é ligar as superfícies dos materiais sendo possível criar juntas estanques a diferentes agentes externos. Este método de ligação permite a ligação de vários tipos de materiais, como polímeros, metais e cerâmicos. O mecanismo de ligação baseia-se em forças atrativas entre o adesivo e o substrato, sendo necessário que as superfícies a unir estejam limpas e isentas de gorduras. A molhagem é também um fator importante a ter em conta, pois este parâmetro mede a capacidade que um líquido tem de contactar com a superfície de um sólido e pode estar relacionado com o tipo de roturas que podem ocorrer na ligação. Um líquido espalha-se facilmente numa superfície sólida com maior energia de superfície podendo molhar perfeitamente a superfície e nesse caso as roturas ocorrerão sempre no adesivo e não na interface adesivo-substrato [20]. Porém os polímeros são materiais com baixa energia de superfície e como muitos adesivos são de origem polimérica, isto pode levar a uma baixa adesão na interface adesivo-substrato ao que são necessários processos de tratamento de superfícies para melhorar a ligação [21]. As principais vantagens das ligações adesivas são a distribuição uniforme de tensões ao longo da ligação, ausência de furos e boa resistência à fadiga.

Finalmente, as ligações soldadas baseiam-se na união através da aplicação ou geração de calor nas superfícies, o que leva ao seu amolecimento devido ao aumento da mobilidade das cadeias poliméricas, promovido pela quebra de ligações. A soldadura ocorre segundo três etapas que são semelhantes em todos os processos. Inicialmente, é aplicado calor na junta até que o material amoleça. De seguida, as peças são unidas com pressão constante e por fim a soldadura é arrefecida formando uma ligação permanente [22].

As ligações soldadas podem ser classificadas quanto à fonte de calor agrupando os diferentes processos em 3 classes apresentadas na Figura 2.2.

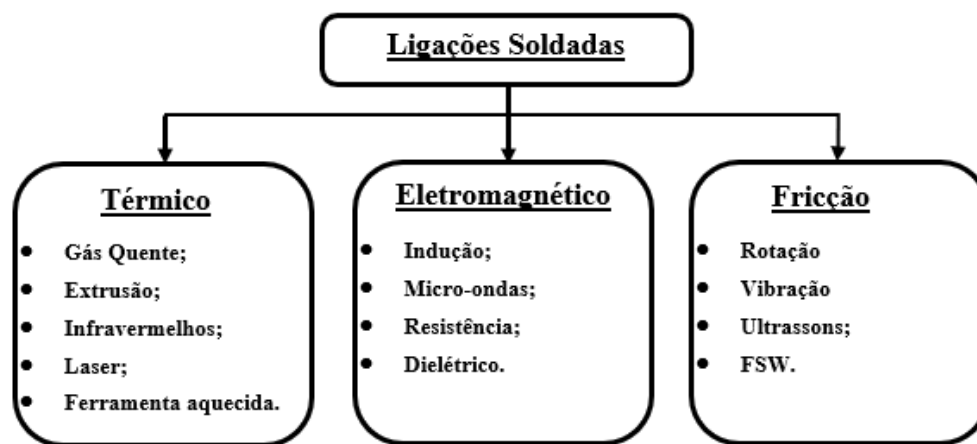


Figura 2.2. Classificação dos processos de ligação soldada (Adaptado de [23]).

A FSW, em particular, trata-se de um processo de soldadura por fricção desenvolvido em 1991 pelo TWI em Cambridge, Inglaterra. Este processo utiliza uma ferramenta rotativa com pino não consumível introduzida na junta dos materiais a soldar. A fricção entre a ferramenta e o material gera calor, amolecendo-o. Por outro lado, a rotação da ferramenta mistura o material plasticizado consolidando-o na junta à medida que a ferramenta avança [24]. A Figura 2.3 representa este processo bem como os principais parâmetros, é ainda possível observar dois locais no cordão, o lado do avanço (LA) e o lado do recuo (LR). O LA é o local onde a direção de rotação e translação da ferramenta têm o mesmo sentido e o LR onde têm sentidos opostos [25]. Inicialmente este processo foi utilizado para soldar ligas de alumínio tais como as ligas da série 2XXX e 7XXX, as quais são difíceis de soldar pelos processos convencionais onde ocorre fusão. Ao longo dos anos a FSW viu crescer o número de pesquisas e desenvolvimento, surgindo novas ferramentas e aplicando o processo a diferentes materiais poliméricos e compósitos. É um processo com baixo consumo energético, ausência de atmosferas tóxicas devido à não utilização de gases de proteção e

ausência de material de adição, tornando a FSW um processo bastante atrativo do ponto de vista económico, energético e ambiental [26], [27].

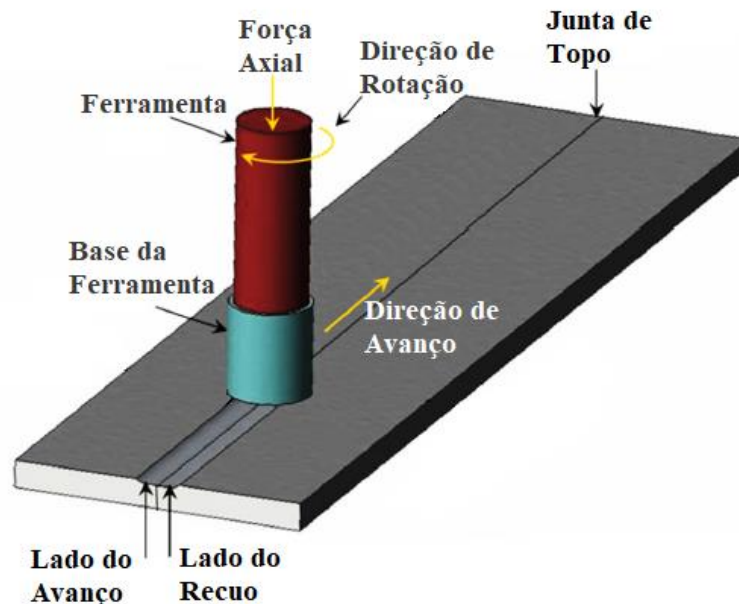


Figura 2.3. Processo FSW (Adaptado de [25]).

### 2.3.2. Ferramentas de FSW para polímeros

Os avanços que foram feitos na FSW em metais não têm sido integralmente aplicados nos materiais poliméricos devido às diferenças nas propriedades mecânicas, principalmente no que diz respeito à condutibilidade térmica. Nelson *et al.* [28], por exemplo, utilizaram uma ferramenta convencional empregue na soldadura de alumínio para soldar placas de Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS), tendo observado que, para além do cordão apresentar aspeto irregular, as propriedades mecânicas da soldadura também foram muito baixas. Isto deveu-se principalmente ao material que foi ejetado da junta (rebarba), o qual criou cavidades que diminuíram as propriedades mecânicas da soldadura. Além disso, a baixa geração de calor impediu que o amolecimento e mistura do material fosse o ideal e, assim, diminuiu a qualidade da soldadura [22], [29]. Isto levou a que fossem desenvolvidos diferentes tipos de ferramentas e pinos para melhorar a geração de calor e diminuir a formação de rebarba com vista a aumentar a qualidade das soldaduras.

Uma das soluções para aumentar a geração de calor passou pelo aumento da base da ferramenta convencional. O aumento da base da ferramenta e conseqüente aumento da área de contato com o material permitem gerar mais calor em comparação com a ferramenta



convencional. O calor gerado na superfície é difundido ao longo da espessura do material por condução, porém como os polímeros apresentam baixa condutibilidade térmica existe alguma dificuldade em transmitir calor ao longo da espessura. Consequentemente, o calor concentrado na superfície leva ao seu amolecimento e a rotação da ferramenta tende a expelir o material amolecido do cordão. O resultado são soldaduras com mau aspeto superficial, com cavidades e rebarbas. Aydin [30] utilizou uma ferramenta convencional de FSW com base larga (ver Figura 2.4) e um sistema de aquecimento para soldaduras de Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular (UHMW-PE) com velocidade de rotação de 960 rpm e 1960 rpm. Neste contexto, quando se opera a baixa velocidade de rotação o calor gerado não é suficiente para obter um bom cordão de soldadura, por outro lado, velocidades elevadas também não produzem boas soldaduras devido ao material ejetado do cordão. A solução foi a utilização de um sistema de aquecimento e velocidade de rotação do pino mais baixa obtendo soldaduras sem defeitos com eficiência de junta na ordem dos 89 %. A eficiência de junta é um parâmetro que permite relacionar a resistência à tração da união soldado com a do material base sendo calculada com base na Equação 4.1 (adaptado de [31]):

$$Eficiência\ de\ junta = \frac{Resistência\ à\ tração\ da\ junta\ soldada}{Resistência\ à\ tração\ do\ material\ menos\ resistente} \times 100\% \quad (2.1)$$

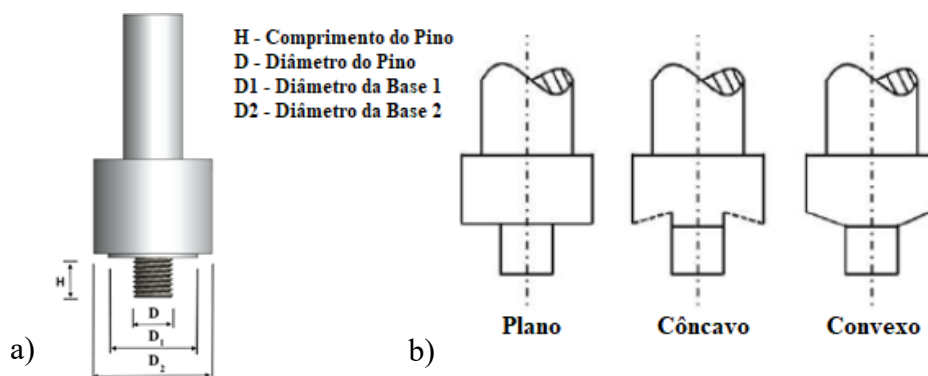


**Figura 2.4.** Ferramenta convencional com base larga (Adaptado de [30]).

Ethiraj *et al.* [32] observaram para soldaduras de Poliamida 6 (PA6) um cordão com uma superfície bastante irregular e a formação de rebarba. Isto deveu-se principalmente ao

fato de a base gerar elevada quantidade de calor na zona superior do cordão amolecendo o material que é posteriormente extraído do cordão devido à rotação do pino. As soldaduras obtiveram baixas propriedades mecânicas com resistências à tração de 18 % do valor obtido para o material base.

Eslami *et al.* [33] realizaram soldaduras em juntas sobrepostas com ferramentas de base larga. Inicialmente, para uma base com 8 mm de diâmetro e um pino quadrado de 3 mm de lado, obtiveram baixa mistura e uma superfície com bastantes defeitos. Numa tentativa de melhorar a qualidade das soldaduras utilizaram bases com 10, 15 e 20 mm de diâmetro. Nestes casos, apesar de ser possível obter boas soldaduras, especialmente na zona inicial dos cordões, verificaram que o polímero tende a aderir ao pino e à base da ferramenta. Deste modo, concluíram que este tipo de ferramenta não é uma boa opção para soldaduras em polímeros, deixando-as com aspeto superficial bastante rugoso, formação de rebarbas e defeito na raiz do cordão. No entanto, a utilização de base dupla em degrau com diferentes diâmetros, como representado na Figura 2.5.a, permite diminuir a formação de rebarba [34].

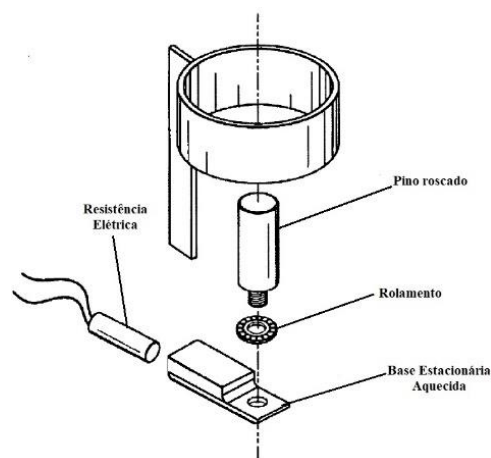


**Figura 2.5.** Ferramenta FSW: **a)** Ferramenta de Base Dupla (Adaptado de [34]); **b)** Perfil da base (Adaptado de [35]).

Neste caso, o diâmetro da parte que contacta diretamente com o material é de menor dimensão o que permite diminuir a geração de calor. Por sua vez, a segunda base apresenta um diâmetro de maior dimensão e é responsável por prevenir que o material que escapa da primeira base seja removido do cordão. A geometria da base também pode ser alterada de forma a melhorar a qualidade das soldaduras. Assim, algumas geometrias estudadas são a base plana, concava e convexa (Figura 2.5.b). A primeira apresenta problemas em manter o material no cordão e, deste modo, forma rebarba. A solução passa então por utilizar uma base côncava que permite aprisionar material na sua cavidade necessitando, no entanto, de

um ângulo de inclinação para que o material consiga entrar na cavidade e por outro lado seja possível exercer pressão sobre o cordão à medida que a ferramenta avança. Por outro lado, o perfil convexo não é muito utilizado por ter a tendência de afastar o material do cordão [34]. Em soldaduras de materiais dissimilares de ABS e Policarbonato (PC) com ferramenta de base dupla em degrau com base concava, Kumar *et al.* [36] obtiveram uma eficiência de juntas na ordem dos 73 % e uma diminuição significativa de rebarba.

A geração de calor também é um problema nos polímeros, uma vez que apresentam baixas condutibilidade térmica e baixo coeficiente de atrito. Como o processo é influenciado pelo calor gerado por fricção, foram desenvolvidas ferramentas que recorrem a fontes de calor secundárias para adicionar mais calor ao processo de soldadura. Algumas destas ferramentas usam base estacionária aquecida, ou então são ferramentas aquecida por pistola de ar quente, aquecida por indução ou com geração interna de calor. Nelson *et al.* [28], por exemplo, patentearam uma ferramenta de base estacionária aquecida e, deste modo, conseguiram ultrapassar os problemas relacionados com a ejeção de material e baixo calor. Desta forma conseguiram confinar o material ao local da soldadura e, simultaneamente, usufruir de uma fonte adicional de calor proveniente de resistências elétricas. Além de impedir a ejeção de material, a base permite ainda fazer uma pressão constante sobre a superfície do cordão melhorando o acabamento superficial da soldadura. Permitiu ainda aumentar o tempo de arrefecimento, o que possibilitou um arrefecimento mais lento e uniforme e, desta forma, diminuir a formação de defeitos como fissuras [28], [29]. Na Figura 2.6 está representado um esquema da ferramenta de base estacionária aquecida proposta.



**Figura 2.6.** Ferramenta de Base Estacionária Aquecida (Adaptado de [28]).

Moochani *et al.* [37] desenvolveram uma ferramenta com aquecimento fornecido por uma pistola de ar quente. O ar quente passa pelo interior da carcaça da ferramenta aquecendo a base e o veio. Foram realizadas soldaduras em placas de Polipropileno (PP) tendo obtido eficiência de junta na ordem dos 96 % em relação ao material base. O esquema da ferramenta está representado na Figura 2.7.

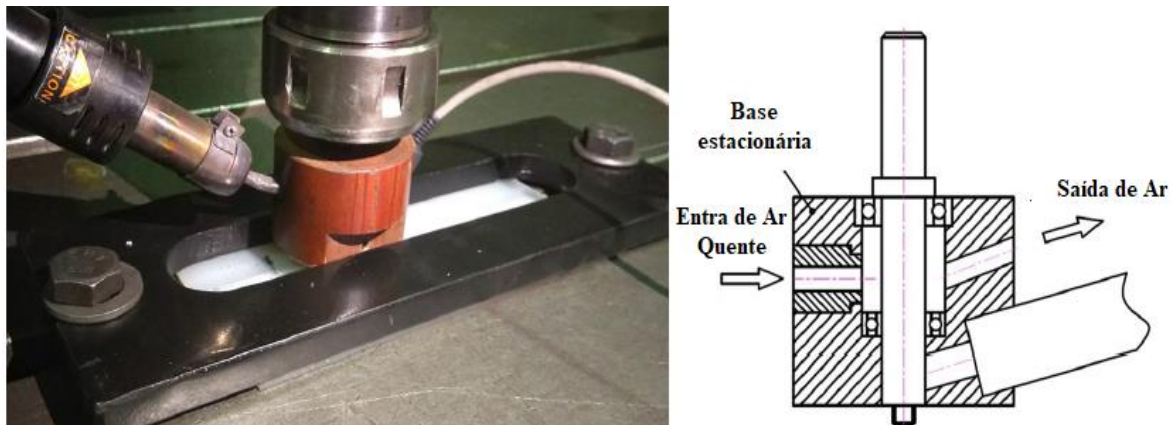


Figura 2.7. Ferramenta aquecida por pistola de ar quente (Adaptado de [37]).

Vijendra *et al.* [38] apresentaram uma nova técnica de adição de calor para realizar soldaduras por FSW em polímeros. A fonte de calor é proveniente de uma bobine de indução que aquece o veio da ferramenta (Figura 2.8). Em soldaduras realizadas em Polietileno de Alta Densidade (HDPE) conseguiram atingir eficiência de junta de 104,3 % em relação ao material base.

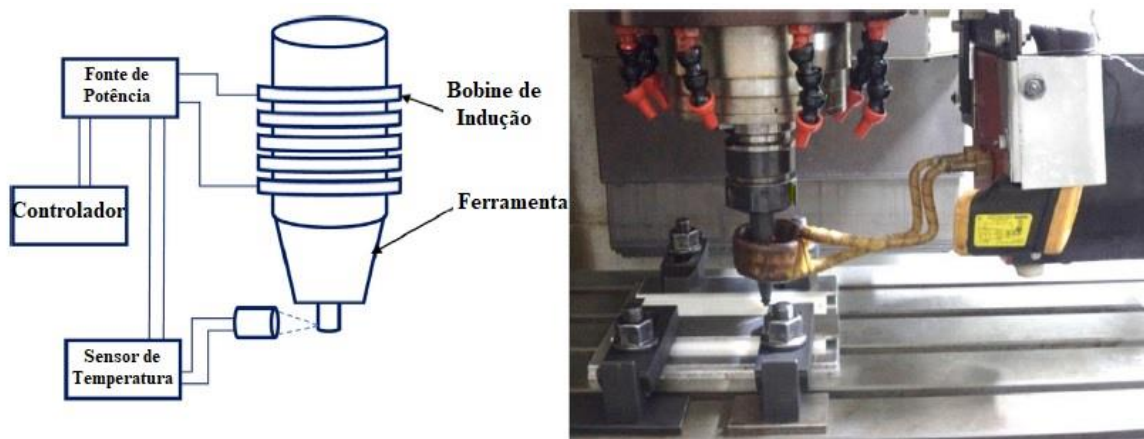


Figura 2.8. Ferramenta aquecida por indução (Adaptado de [38]).

A ferramenta com geração de calor interna (*Self-Heated Tool*) tem um tambor estático que funciona como um travão. No seu interior o veio da ferramenta gira em contacto com

sapatas de um material de fricção que travam o veio. A fricção entre as sapatas e o veio gera calor aquecendo-o. Nath *et al.* [39] realizaram soldaduras em PP utilizando a ferramenta convencional de FSW e a ferramenta com geração interna de calor, tendo obtido eficiências de junta na ordem dos 51,5 % e 71,4 %, respetivamente. Na Figura 2.9 está representada a ferramenta com geração interna de calor.

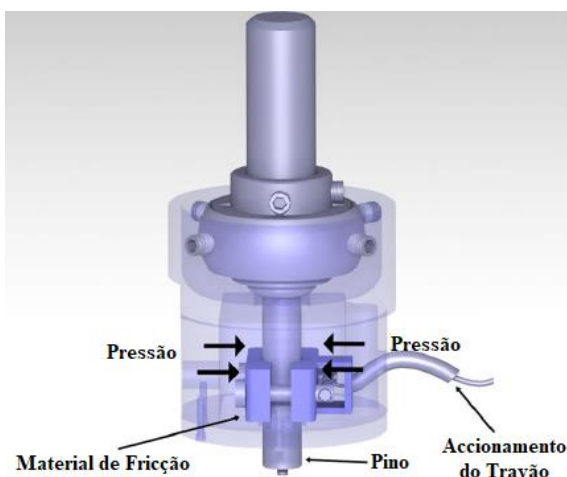


Figura 2.9. Ferramenta com geração interna de calor (Adaptado de [39]).

### 2.3.3. Geometria de Pino

A geometria do pino influencia a geração de calor e a mistura dos materiais pelo que a sua alteração tem grande impacto no processo. Existem várias geometrias, tais como: cilíndrica, cónica, cilíndrica roscada, quadrada, triangular e hexagonal tal como podemos observar na Figura 2.10.

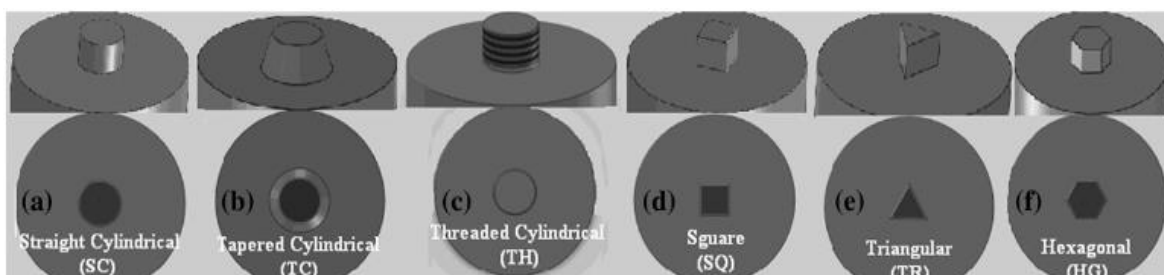


Figura 2.10. Tipos de pino: a) cilíndrico reto; b) cónico, c) cilíndrico roscado, d) quadrado, e) triangular, f) hexagonal [40].

Bilici *et al.* [40] estudaram soldaduras de FSW por pontos em HDPE e observaram que o pino cónico promoveu as melhores propriedades mecânicas. Concluíram que com este pino é possível atingir forças de soldadura maiores e, simultaneamente, gerar mais calor por

fricção. O aumento da temperatura permitiu criar cordões de maior dimensão, bem como obter melhores resultados devido à região de soldadura ser maior. Por sua vez, Payganeh *et al.* [41] estudaram soldaduras de PP reforçado com 30 % de fibras de vidro e observaram que o pino cónico com ranhuras promovia cordões com bom acabamento superficial. Este pino permitiu um maior contato com o material, o que conduziu a maior geração de calor e, desta forma, contribuiu para uma melhor mistura dos materiais e acabamento superficial.

De acordo com Eslami *et al.* [33], as soldaduras de materiais poliméricos requerem o uso de ranhuras ou roscas na superfície do pino, pois a sua ausência leva a que o material fique retido no lado do avanço e diminua a mistura no cordão.

Panneerselvam *et al.* [42] estudaram o sentido de rotação em soldaduras de PA6 com pino roscado. Verificaram que o pino de rosca esquerda e rotação no sentido horário levou a que o material fosse extraído do cordão na forma granular devido ao fluxo ascendente. Por outro lado, a rotação no sentido anti-horário criou um fluxo descendente empurrando, deste modo, o material para o interior do cordão. Simultaneamente ao ser gerado mais calor, o que impediu a extrusão de material, as soldaduras apresentaram melhor aspeto e propriedades mecânicas superiores. Mais recentemente Kumar *et al.* [36] observaram o mesmo efeito em soldaduras de ABS-PC com ferramenta de base dupla em degrau com pino roscado. Segundo estes autores, com rosca à direita o fluxo descendente é atribuído à rotação no sentido horário. Por outro lado, a rotação no sentido anti-horário leva a que o material amolecido seja retirado do cordão, comprometendo a qualidade da soldadura. Assim, é possível concluir que o sentido de rotação é bastante importante quando se usam pinos roscados. Torna-se, assim, importante selecionar o sentido de rotação de acordo com o tipo de rosca para promover o fluxo descendente em direção à raiz do cordão. Na Figura 2.11 está ilustrada, a título de exemplo, a influencia do sentido da rotação no cordão de soldadura.

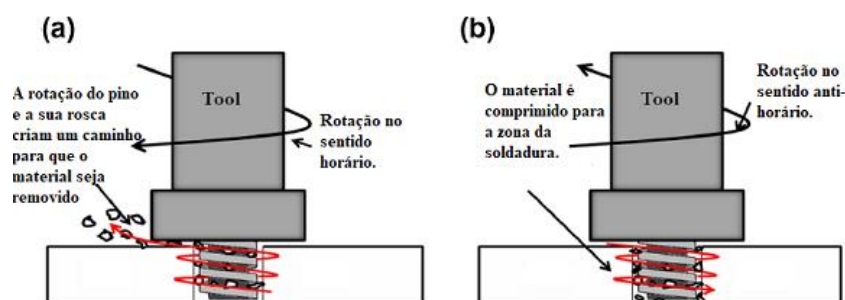


Figura 2.11. Influência da rotação e geometria do pino no fluxo do material (Adaptado de [42]).

### 2.3.4. Parâmetros do Processo

Parâmetros como a velocidade de rotação da ferramenta, velocidade de avanço, temperatura da ferramenta, profundidade de penetração, geometria da ferramenta, força axial e tempo de permanência revelam-se determinantes tanto para a qualidade como para as propriedades mecânicas das soldaduras. A velocidade de rotação da ferramenta, por exemplo, está diretamente relacionada com a geração de calor. Velocidades baixas geram menos calor por fricção e não permitem que o material desenvolva plasticidade suficiente para produzir a soldadura. Contudo, velocidades muito elevadas introduzem demasiado calor podendo levar à degradação do polímero com forte impacto na qualidade da soldadura [25]. Por seu turno, a velocidade de avanço determina o avanço da ferramenta ao longo da junta e, deste modo, está relacionada com a introdução de calor e arrefecimento do cordão. Segundo Mostafapour *et al.* [43], a velocidade de avanço está intimamente relacionada com a taxa de arrefecimento, pois velocidades elevadas levam a arrefecimentos demasiado rápidos do cordão de soldadura fazendo com que estes contraíam e, conseqüentemente, a ocorrência de fissuras.

Segundo Kiss *et al.* [44], a velocidade de rotação e velocidade de avanço são inversamente proporcionais no que diz respeito à energia térmica absorvida pelo cordão. Velocidades de rotação elevadas geram mais calor, porém velocidades de avanço baixas permitem que as ferramentas tenham mais tempo para aquecer o material e, assim, proporcionar o mesmo efeito que o aumento da velocidade de rotação. Estudos realizados por Kiss *et al.* [44], [45] em PP e Polietileno Tereftalato de Glicol (PETG) revelaram que o tipo de material apresenta uma enorme influência no valor da velocidade de rotação que deve ser usado. Por exemplo, estes autores observaram que uma eficiência de junta na ordem dos 90 % é obtida com velocidade de rotação de 2500 – 4000 rpm para o PP, enquanto para o PETG é por volta de 1800 – 2500 rpm. Os autores justificaram este fenómeno pelas diferenças ao nível das estruturas dos materiais e temperaturas de amolecimento. Bagheri *et al.* [46] utilizaram uma ferramenta aquecida de base estacionária e observaram que velocidades de rotação elevadas (superiores a 1600 rpm) levam à queima e degradação do ABS devido às temperaturas elevadas alcançadas, enquanto as velocidades de rotação baixas geram pouco calor e não promovem uma boa mistura. Conseqüentemente, são obtidas baixas propriedades mecânicas. Estes autores também verificaram que velocidades de

avanço elevadas (superiores a  $80 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ) comprometem a qualidade da soldadura (geram cordões com bastantes defeitos) devido ao aquecimento incorreto do cordão.

Deste modo é possível concluir que os valores ótimos da velocidade de rotação e de avanço dependem do tipo de material, geometria do pino, tipo de base e sistema de aquecimento. De um modo geral, as velocidades de rotação baixas geram pouco calor e, conseqüentemente, comprometem a plasticidade e mistura dos materiais. Por outro lado, velocidade de rotação elevadas geram elevado calor, arriscando a degradação do polímero. Em relação à velocidade de avanço, existe aparentemente uma relação com a velocidade de rotação, pois é possível obter o mesmo efeito do aumento da velocidade de rotação com a redução da velocidade de avanço (proporciona mais tempo para que seja gerado calor e promover a mistura). No entanto, para velocidades demasiado elevadas começam a surgir defeitos e falta de homogeneidade no cordão, afetando as propriedades do cordão.

### 2.3.5. Estudos envolvendo FSW e PLA

A literatura não disponibiliza muitos estudos de FSW em placas de PLA, mas dos existentes é possível evidenciar o realizado por Sharma *et al.* [25] onde foi analisado o efeito da velocidade de rotação (700, 1400 e 2000 rpm) e da velocidade de avanço (20, 30 e  $40 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ), bem como o tipo de pino (cilíndrico, cônico e cilíndrico roscado, mostrados na Figura 2.12). A melhor eficiência de junta alcançada por estes autores foi na ordem dos 66% e obtida com um pino cilíndrico a 1400 rpm e  $30 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ .

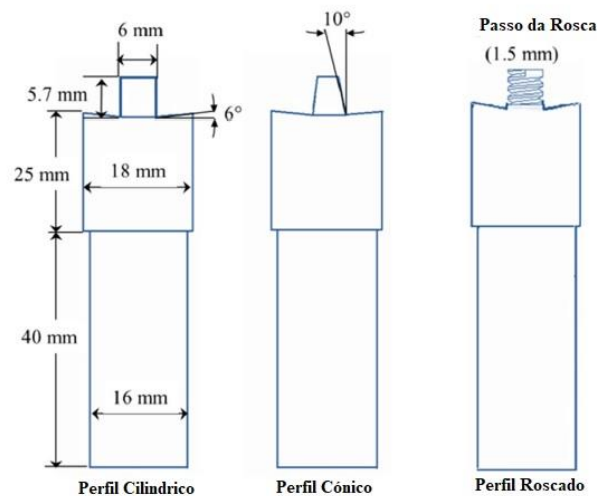


Figura 2.12. Ferramentas de FSW utilizadas no estudo realizado por Sharma *et al.* [25].



Senthil *et al.* [47] estudaram os parâmetros de FSW em placas de PLA obtidas por impressão 3D, utilizando uma ferramenta de perfil cônico cilíndrico com diâmetro de 4 mm e uma base com 10 mm de diâmetro, conforme mostra a Figura 2.13. Foram realizadas 9 soldaduras com velocidades de rotação de 700, 1400 e 2000 rpm e velocidades de avanço de 10, 14 e 20 mm.min<sup>-1</sup>. Estes autores obtiveram a melhor eficiência de junta (na ordem dos 40 %) com uma velocidade de rotação de 1400 rpm e velocidade de avanço de 10 mm.min<sup>-1</sup>.

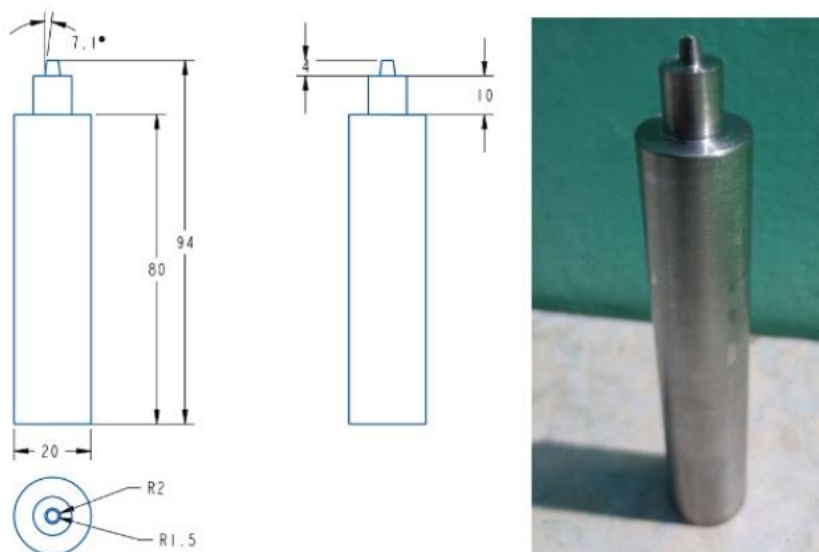


Figura 2.13. Ferramenta de FSW utilizada no estudo realizado por Senthil *et al.* [47].

Vidakis *et al.* [48] efetuaram um estudo semelhante ao anterior, mas neste caso envolvendo os seguintes parâmetros: velocidades de rotação de 600, 1000 e 1400 rpm, velocidades de avanço de 3,6 e 9 mm.min<sup>-1</sup>, e dois tipos diferentes de pinos (cilíndrico e cônico) ilustrados na Figura 2.14.

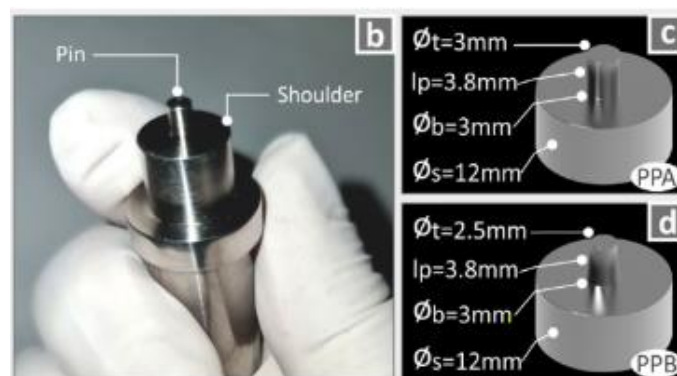


Figura 2.14. Ferramentas de FSW utilizadas no estudo realizado por Vidakis *et al.* [48].

Na região da soldadura, estes autores observaram que a FSW permitiu remover as porosidades provenientes da impressão 3D e que as melhores propriedades mecânicas foram obtidas com o pino cilíndrico, uma velocidade de rotação de 1400 rpm e velocidade de avanço de 9 mm.min<sup>-1</sup>. Neste caso, o pino cilíndrico ao apresentar maior volume permite que o material transferido entre a sua zona frontal e traseira apresente uma melhor homogeneidade e, conseqüentemente, melhores propriedades mecânicas. Também observaram que o parâmetro com maior influência foi a velocidade de avanço, obtendo-se grandes melhorias nas propriedades mecânicas com o seu aumento.

## 2.4. Método de Taguchi

O método Taguchi é uma ferramenta de otimização de base estatística, desenvolvida pelo engenheiro japonês, Genichi Taguchi, para melhorar a qualidade de produtos otimizando os processos [49].

Segundo Taguchi, a otimização deve ser realizada em três etapas: concepção do sistema, estudo de parâmetros e controlo de tolerâncias. Durante a fase de concepção de sistemas (*System Design*) é feito o projeto do mesmo, selecionando tecnologias e materiais de forma a obter um protótipo funcional do sistema. O objetivo do estudo de parâmetros (*Parameter Design*) é avaliar o impacto que estes têm numa determinada característica do produto e encontrar a combinação de parâmetros que maximizem essa característica. Isto permite obter produtos com melhor qualidade e baixa sensibilidade a fatores externos, como variações das condições ambientais locais, tornando o sistema robusto. Por fim, o controlo de tolerâncias (*Tolerance Design*) é realizado quando se conhece o conjunto ótimo de parâmetros e a variabilidade do sistema não é aceitável. O objetivo é apertar os intervalos de tolerância para uma dada característica de qualidade, o que pode requerer a utilização de matéria-prima e ferramentas de maior qualidade levando a custos acrescidos [49].

Ao longo desta dissertação será utilizado o método de Taguchi de acordo com a abordagem de estudo de parâmetros (*Parameter Design*) de forma a obter uma combinação ótima de parâmetros do processo FSW.

### 3. MATERIAIS E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O objetivo deste capítulo é descrever todos os aspetos relacionados com a componente experimental do estudo. É descrito o procedimento e parâmetros de produção das placas de material base, bem como o processo de soldadura, inclusivamente a ferramenta utilizada. Por fim serão abordados todos os ensaios laboratoriais utilizados neste trabalho.

#### 3.1. Material Base

As placas de material base foram obtidas por impressão 3D com recurso a filamentos de PLA. Para tal, foi utilizada uma impressora B2X300 da BEEVERYCREATIVE e as amostras de PLA foram impressas sob a forma de placas retangulares (100 × 70 mm). Foram depositadas 30 camadas, para obter a espessura de 6 mm, cujas orientações foram [- 45°/+45°]<sub>15</sub> para diminuir o efeito de anisotropia nas amostras [50]. Os parâmetros que foram usados na impressão estão ilustrados na Tabela 3.1. Foi utilizado PLA de cor branca e preta de forma a evidenciar o fluxo no cordão, tendo sido utilizado os mesmos parâmetros de impressão para todas as amostras.

**Tabela 3.1.** Parâmetros de impressão.

Material	Espessura das camadas [mm]	Velocidade de alimentação [mm/min]	Diâmetro do Nozzle [mm]	Temperatura de extrusão [°C]	Temperatura da base de impressão [°C]
PLA	0,2	60	0,4	215	60

#### 3.2. Desenho Experimental – Método de Taguchi

Pretende-se avaliar o efeito da velocidade de rotação, velocidade de avanço e temperatura de aquecimento nas propriedades mecânicas da soldadura. Neste contexto foram selecionados 3 níveis para cada fator, com vista a evidenciar o comportamento das soldaduras face às alterações de cada parâmetro. A Tabela 3.2 representa os fatores e os seus níveis (cada nível tem uma cor associada para facilitar a leitura nas tabelas). O estudo de todas as combinações possíveis destes parâmetros resultaria numa matriz de combinações de parâmetros com  $3 \times 3 \times 3 = 27$  soldaduras, de cada soldadura resultam 4 amostras para ensaios de tração, dureza e caracterização da morfologia o que levaria a 108 amostras no

total. Com base no método de Taguchi, é possível reduzir a totalidade de ensaios por meio de uma matriz ortogonal L9, resultando em apenas 9 soldaduras e 36 amostras para ensaios. A matriz de combinações de parâmetros L9 está representada na Tabela 3.3. A designação 3D\_PLA\_i indica que o material base foi obtido por impressão 3D de PLA, sendo a soldadura identificada por i.

**Tabela 3.2.** Fatores e níveis utilizados no método de Taguchi.

Fator	Nível 1	Nível 2	Nível 3
Velocidade de Rotação [rpm]	870	1140	1500
Velocidade de Avanço[mm.min <sup>-1</sup> ]	30	60	90
Temperatura de Aquecimento[°C]	35	85	100

**Tabela 3.3.** Desenho experimental com base na matriz ortogonal L9 – Método de Taguchi.

Designação	Velocidade de Rotação [rpm]	Velocidade de Avanço [mm.min <sup>-1</sup> ]	Temperatura de Aquecimento [°C]
3D_PLA_1	870	60	35
3D_PLA_2	1140	60	85
3D_PLA_3	1500	60	100
3D_PLA_4	1500	90	35
3D_PLA_5	870	90	85
3D_PLA_6	1140	90	100
3D_PLA_7	1140	30	35
3D_PLA_8	1500	30	85
3D_PLA_9	870	30	100

### 3.3. Processo de Soldadura

#### 3.3.1. Equipamento

As soldaduras foram realizadas utilizando uma fresadora *Cincinnati Milacron 207MK* (Figura 3.1), existente nas oficinas do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra (DEMUC). Este equipamento permite selecionar diversas velocidades de avanço, velocidades de rotação e controlar a profundidade de penetração da ferramenta. No que diz respeito à escolha das velocidades apenas é possível realizá-lo dentro de um conjunto de valores discretos, dos quais foram selecionados os valores 870 ,1140 e 1500 rpm para a velocidade de rotação e 30 ,60 e 90 mm.min<sup>-1</sup> para a velocidade de avanço.



**Figura 3.1.** Fresadora *Cincinnati Milacron 207MK*.

### 3.3.2. Ferramenta

A ferramenta utilizada na realização das soldaduras é de base estacionária aquecida com pino cônico roscado (ver Figura 3.2), a qual é constituída pela base, que deve ser guiada para evitar o seu movimento de rotação, e pelo veio que contém o pino numa extremidade enquanto a outra é acoplada ao equipamento.

A base da ferramenta construída em alumínio AA5083 tem uma geometria retangular ( $180 \times 25$  mm), cujas extremidades possuem 5 furos que permitem colocar 4 resistências elétricas e um termopar que comunica a temperatura à unidade de controlo. Existe ainda um termopar (fio verde e branco da Figura 3.2.a) na zona central que permite registar as temperaturas junto ao pino. O pino é construído em aço H13 temperado e revenido com 10 mm de diâmetro na base e 6 mm de diâmetro na extremidade, com um comprimento de 5,7 mm (ver Figura 3.2.b).

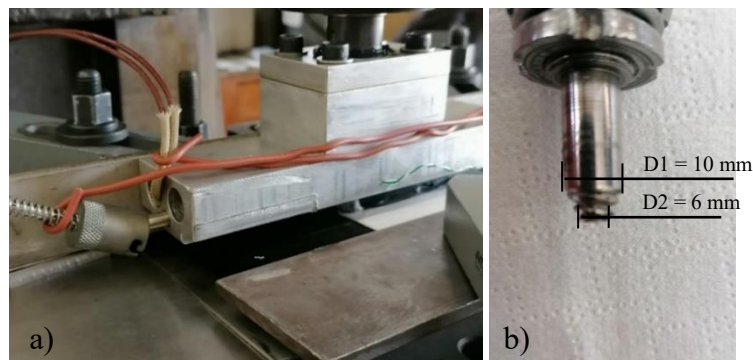


Figura 3.2. Ferramenta de soldadura de polímeros por FSW.

### 3.3.3. Controlo e Registo da Temperatura

A ferramenta utilizada permite o aquecimento da base através de resistências elétricas, tal como foi referido anteriormente. Para isso faz-se uso de duas resistências colocadas nos furos no topo da ferramenta para que a base seja aquecida. A temperatura é monitorizada através de uma unidade de controlo, dispositivo onde é colocada a temperatura objetivo, mas com um valor 15 °C inferior à temperatura desejada. Esta diferença deve-se à forma como o sistema de aquecimento funciona. Quando a temperatura registada na ferramenta está abaixo da temperatura de controlo, as resistências são ligadas até que se atinja a temperatura desejada, momento a partir do qual o sistema desliga as resistências. Devido ao efeito da inercia térmica, a temperatura vai subir até atingir um máximo, seguindo-se uma diminuição da temperatura para o valor desejado e, então, dá-se o início da soldadura. Por fim, o registo da temperatura na zona do pino da ferramenta é efetuado com recurso ao software de aquisição de dados QuickDAC<sup>®</sup> ligado ao equipamento de leitura DATA TRANSLATION DT9828 com um termopar do tipo K (fio verde e branco da Figura 3.2).

### 3.3.4. Preparação e fixação das placas

Conforme esquematiza a Figura 3.3, a soldadura é realizada entre duas placas, tendo sido necessárias duas placas adicionais que servem de apoio à base da ferramenta e são colocadas no início e no fim do trajeto da ferramenta para assegurar o apoio da base da ferramenta ao longo de toda a soldadura.

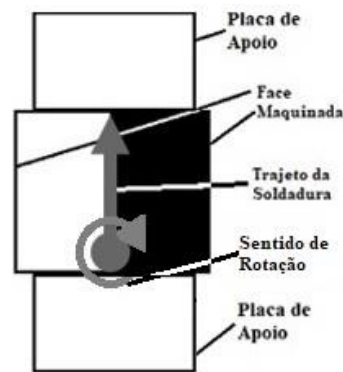


Figura 3.3. Esquema da disposição das placas.

A base de fixação ligada à mesa de trabalho da fresadora é constituída por uma base maquinada com rasgos que permitem a utilização de grampos de fixação. Conforme ilustra a Figura 3.4, nesta base foi ainda colocada uma cantoneira em L para servir de encosto à parte lateral da ferramenta evitando, assim, oscilações durante o seu avanço.

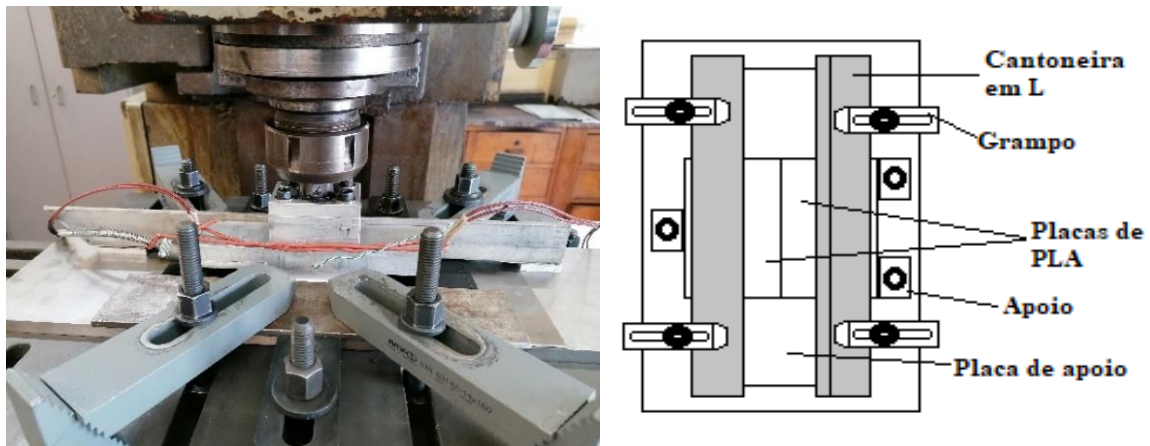


Figura 3.4. Sistema de fixação: real e esquema.

### 3.4. Execução das Soldaduras

Inicialmente é verificado que todos os ângulos de inclinação do cabeçote da fresadora estão a zero para garantir que a base da ferramenta esteja paralela à base de trabalho (sem qualquer inclinação). De seguida, é colocada a base de fixação na base de trabalho da fresadora e a ferramenta é colocada no cabeçote.

Depois de montada a ferramenta é realizado o alinhamento, como referido anteriormente, o qual deve ser feito de forma que a linha de soldadura seja paralela com a cantoneira em L e, conseqüentemente, com o deslocamento linear do pino da ferramenta. Foram ainda utilizadas duas placas de apoio com 6 mm de espessura que apoiam a

ferramenta em todo o seu trajeto de forma que não ocorram inclinações durante a operação de soldadura que poderiam comprometer a qualidade das soldaduras. O sistema de fixação é preparado de modo que se mantenha inalterado e permitindo apenas a colocação das placas para serem soldadas e sejam facilmente retiradas quando a operação terminar.

Nesta fase são colocadas as amostras na zona de soldadura e é verificado o alinhamento da junta que deve ser coincidente com o centro do pino em todo o seu trajeto. É selecionada a profundidade de penetração de 5,7 mm, garantindo o encosto da base no material e permitindo conservar cerca de 0,3 mm para evitar o contato do pino com a base de fixação. São ainda selecionadas as velocidades de rotação e velocidades de avanço. Por fim, são colocadas as resistências e os sensores de temperatura de forma a controlar e registrar a temperatura.

Com as placas nas suas posições e todos os parâmetros selecionados, aguarda-se até que a temperatura atinja a temperatura objetivo. A ferramenta inicia então o trabalho, descendo sobre as placas e permanecendo em rotação no mesmo local por 10 s. Este período denominado de tempo de permanência é necessário para introduzir calor suficiente no local para que ocorra o amolecimento do material e se atinjam as condições de soldadura.

Durante o período de avanço da ferramenta são registados os valores de temperatura lidos pelo termopar existente na ferramenta. No final, a ferramenta permanece no local durante 15 s e sem rotação, permitindo que o polímero arrefeça o suficiente para que a ferramenta arranque a menor quantidade de material possível durante a sua remoção. Após este período a ferramenta é removida da soldadura e as amarras que prendem as peças são aliviadas, dando-se por terminado o processo de soldadura.

### **3.5. Caracterização das Soldaduras**

Após a soldadura das placas de PLA, foram retirados provetes para análise macrográfica, para a realização de ensaios de dureza e ensaios de tração. Para tal, os provetes foram cortados de forma a retirar 20 mm no início e fim da soldadura, regiões referentes à zona da entrada do pino e à remoção da ferramenta da soldadura, respetivamente. Desta forma foram obtidos quatro provetes, com 15 mm de largura e 6 mm de espessura, usando uma serra de fita. No final os provetes foram maquinados, para obter paralelismo entre faces, ficando as dimensões finais com 12 mm de largura e 6 mm de espessura.



Alguns destes provetes foram posteriormente alvos de polimento, utilizando, para tal, lixas com granulometria P600, P1000, P2500 e P4000, terminando com um pano de polimento com a adição de uma pasta de diamante com granulometria de  $1\mu\text{m}$  e lubrificação por água desmineralizada. Este procedimento visava destacar a zona de soldadura da zona de material de base e possíveis defeitos, tendo sido, para este fim, utilizada uma lupa Zeiss.

Após a análise macrográfica, foram realizados ensaios de dureza, para determinar os perfis de dureza nos provetes, tendo sido utilizado um Microdurómetro digital SHIMADZU da série HMV-G (Figura 3.5). A dureza foi medida em Vickers, tendo o indentador aplicado uma força de 1,962 N (200 g) durante 15 s.



**Figura 3.5.** Microdurómetro SHIMADZU – HMV-G.

As amostras foram alinhadas de forma que o centro da soldadura coincidissem com a marcação de 12,5 mm do microdurómetro. Depois o microdurómetro é colocado na posição máxima de 25 mm e iniciam-se as indentações da esquerda para a direita (lado do avanço para o lado do recuo) espaçadas por 1 mm.

Por fim, os provetes foram ensaiados à tração para determinar a sua resistência mecânica e, conseqüentemente, comparar com a do material base com vista a obter a eficiência da soldadura. Para a realização destes ensaios foi utilizada uma máquina SHIMADZU, da série AGS-X (Figura 3.6), equipada com uma célula de carga de 100 kN e os dados registados com recurso ao software TRAPEZIUMX. Foi utilizado um extensómetro MESS & FEINWERKTECHNIK GMBH e os ensaios foram realizados com uma velocidade de deformação  $2\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ . Embora os provetes não tenham geometria normalizada, o procedimento experimental decorreu de acordo com a norma ASTM D638.



**Figura 3.6.** Equipamento de ensaio à tração SHIMADZU AGS – X.

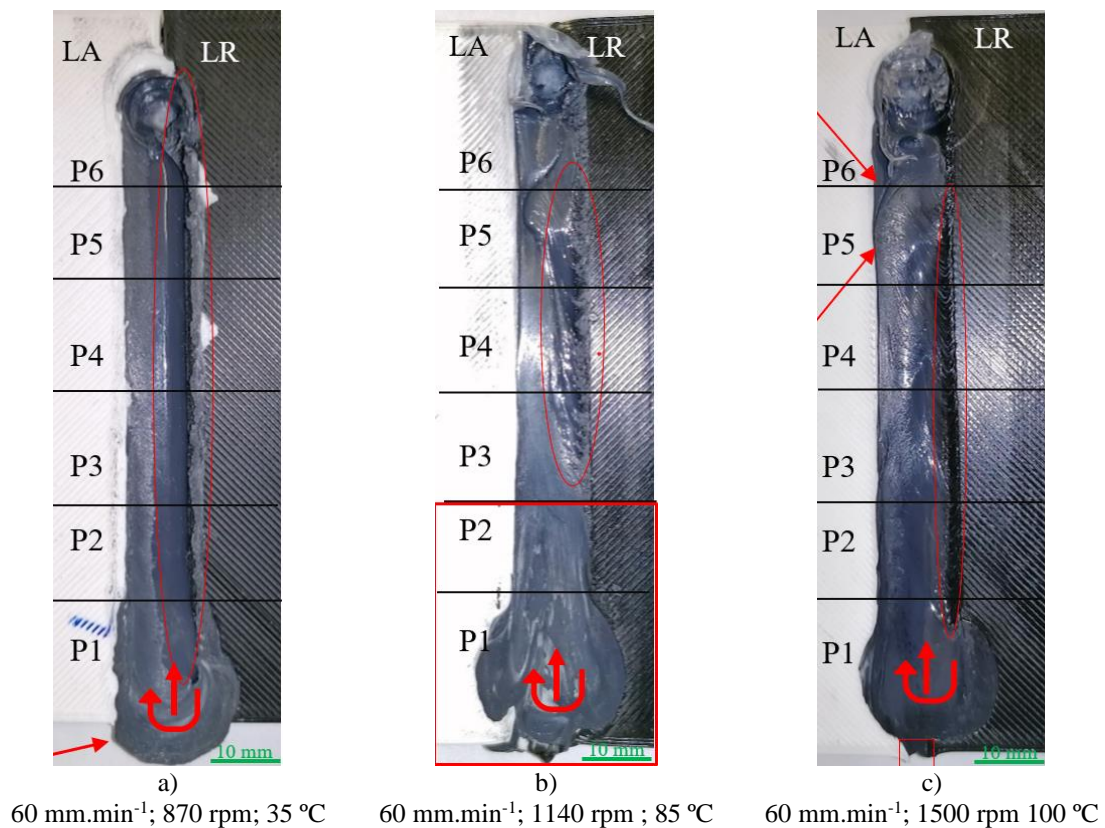
Os procedimentos de polimento acima descritos na caracterização das soldaduras foram aplicados em amostras de material base posteriormente ensaiados à dureza segundo várias direções. Foram ainda ensaiados provetes de material base à tração segundo os procedimentos utilizados nos ensaios à tração das amostras soldadas.

## 4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

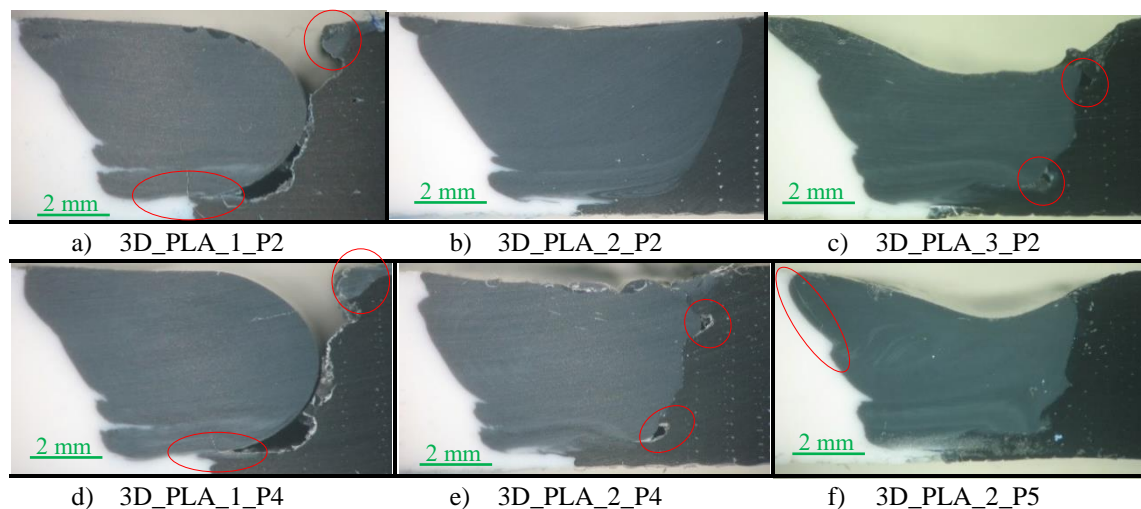
Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos das soldaduras realizadas de acordo com o desenho experimental da Tabela 3.3, bem como a interpretação destes. Inicialmente são apresentadas as macrografias das soldaduras e realizada a caracterização morfológica das mesmas. De seguida são apresentadas as durezas obtidas em cada soldadura e os resultados dos ensaios à tração. De seguida, são expostos os resultados do método Taguchi bem como a análise dos mesmos.

### 4.1. Macrografias

As macrografias foram obtidas de forma a colocar o lado do avanço (LA) no lado esquerdo e o lado do recuo (LR) do lado direito. Nas Figura 4.1 e Figura 4.2 são apresentadas as macrografias das soldaduras com a velocidade de avanço (VA) de  $60 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ .



**Figura 4.1.** Macrografia da superfície de soldadura: a) 3D\_PLA\_1; b) 3D\_PLA\_2; c) 3D\_PLA\_3.



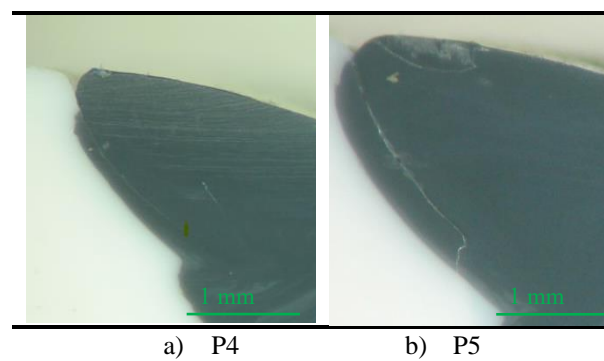
**Figura 4.2.** Macrografia da secção transversal: velocidade de avanço de  $60 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ .

É possível observar alterações na morfologia do cordão com a variação da velocidade de rotação (VR) e temperatura de aquecimento (TA), nomeadamente o surgimento de defeitos lineares e variações na dimensão de cavidades e poros. Assim, uma análise mais detalhada mostra que na soldadura 3D\_PLA\_1 ( $870 \text{ rpm}$ ,  $60 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $35 \text{ }^\circ\text{C}$ ), existe um defeito linear profundo no LR que percorre toda a soldadura e que poderá ser devido à baixa VR e TA. O calor fornecido pode não ter sido suficiente para que o material plasticizado se ligasse corretamente com o material base criando, assim, uma descontinuidade ao longo de todo o cordão. O defeito tem uma profundidade considerável, sendo que as placas apenas estão unidas por uma pequena porção na raiz do cordão, como é possível visualizar mais detalhadamente na Figura 4.2.a e Figura 4.2.d. Algum material é removido do cordão na zona de introdução da ferramenta sob a forma de rebarba, assinalado pela seta vermelha na Figura 4.1.a. Apesar do defeito no LR, é possível verificar que o material é bem consolidado no LA, não se verificando defeitos nesse local.

Na soldadura 3D\_PLA\_2 ( $1140 \text{ rpm}$ ,  $60 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  e  $85 \text{ }^\circ\text{C}$ ) verifica-se que na zona assinalada pelo retângulo na Figura 4.1.b existiu um bom preenchimento apesar de uma pequena perda de material na zona inicial do cordão. É visível pela macrografia da secção transversal do provete P2 (Figura 4.2.b) que o cordão se encontra bem preenchido sem nenhum defeito. Porém, após esta zona começa a desenvolver-se um defeito superficial a meio do provete P3 na Figura 4.1.b, que coincide com o surgimento de defeitos no interior do cordão, como se observa na Figura 4.2.e. Estes defeitos podem estar relacionados com a falta de material que ocorre a partir do provete P3 e consequente falta de pressão exercida sobre o cordão levando à formação dos defeitos acima descritos. Comparando com a

soldadura 1, podemos concluir que o aumento da VR e TA permitem mitigar a formação da cavidade no LR, porém continuam a formar-se defeitos em dois locais no interior do cordão junto à interface com o MB no LR.

A soldadura 3D\_PLA\_3 (1500 rpm, 60 mm.min<sup>-1</sup> e 100°C) sofreu uma diminuição de área da secção transversal ao longo de todo o cordão. É possível verificar que ocorreu afastamento das placas na zona inicial de soldadura (retângulo vermelho na Figura 4.1.c), como o processo não utiliza material de adição isto faz com que tenha repercussões na espessura do cordão. No provete P2 (Figura 4.2.c) existem dois defeitos no LR que tendem a diminuir à medida que a área transversal tende a aumentar, tal como é possível comprovar pelo provete P5 (Figura 4.2.f) onde os defeitos desaparecem e a área de secção transversal é maior. A partir do provete P4 começa a desenvolver-se uma fratura no LA assinalada a vermelho na macrografia do provete P5 da Figura 4.2.f e em pormenor na Figura 4.3, onde se encontra também a fratura no provete P4. Apesar de no provete P2 se verificarem defeitos na mesma zona que os observados na soldadura 3D\_PLA\_2 estes apresentam menor dimensão e tendem a desaparecer à medida que se avança pelo cordão. Isto pode dever-se a uma maior introdução de calor e melhor mistura concedida pela elevada VR e TA em relação à soldadura 2, contudo a partir do provete P3 começa a desenvolver-se no LA uma fratura segundo a qual todos os provetes falham.

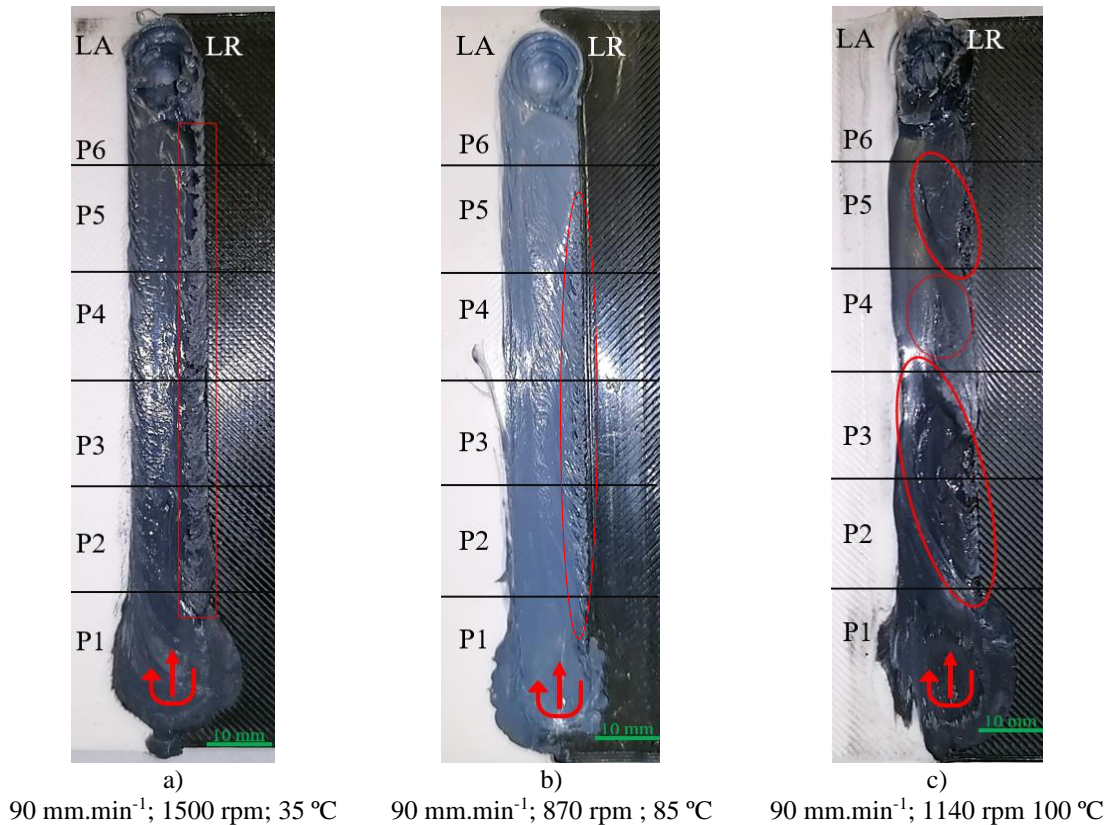


**Figura 4.3.** Fratura soldadura 3D\_PLA\_3.

Neste conjunto de soldaduras, com VA de 60 mm.min<sup>-1</sup>, é possível observar que para baixos valores de VR e TA ocorre formação de defeitos de grandes dimensões no LR, porém com boa consolidação no LA. De acordo com a literatura existe diferenças no fluxo e na temperatura entre o LA e LR. Segundo Bagheri *et al.* [46] existem diferenças no fluxo de material entre o LA e LR que podem levar a que exista falta de material no LR refletindo-se na resistência da soldadura. Além disso, existe alguma assimetria térmica devido ao sentido

de rotação e deslocamento da ferramenta levando a que o LA experimente temperaturas mais elevadas que o LR. Em suma, para VA de  $60 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$  o aumento dos parâmetros relacionados com a introdução de calor e mistura dos materiais tendem a diminuir os defeitos que surgem no LR.

No que concerne às soldaduras realizadas com velocidade de avanço de  $90 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ , estão representadas nas Figura 4.4 e Figura 4.5 ao nível das suas macrografias.

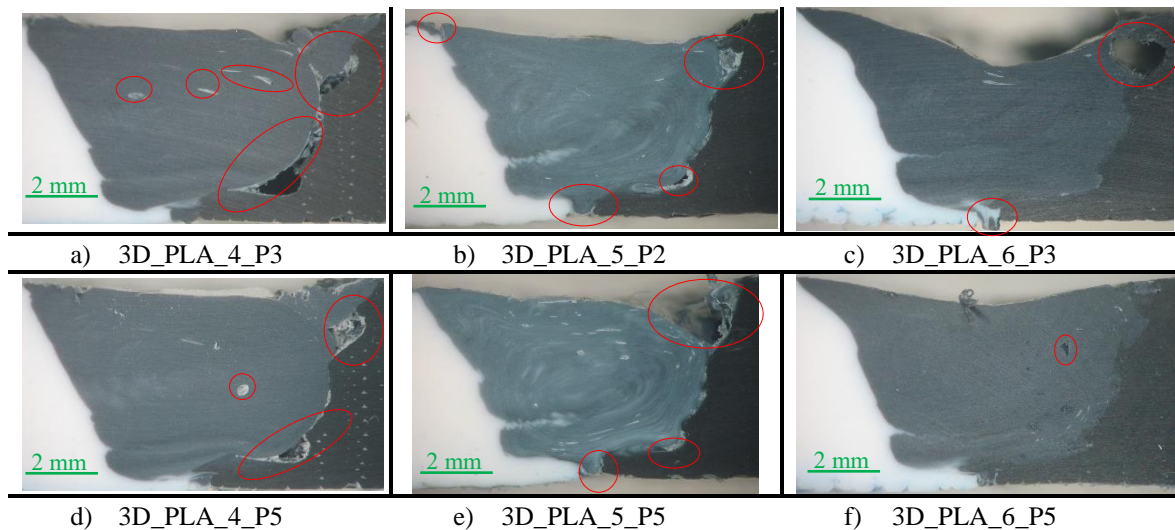


**Figura 4.4.** Macrografia da superfície de soldadura: a) 3D\_PLA\_4; b) 3D\_PLA\_5; c) 3D\_PLA\_6.

A soldadura 3D\_PLA\_4 ( $1500 \text{ rpm}$ ,  $90 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ,  $35 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) apresenta um defeito linear superficial e interno que percorre toda a soldadura no LR atingindo maiores dimensões no provete P3 e diminuindo até ao provete P5. Este defeito assemelha-se ao observado na soldadura 3D\_PLA\_1 ( $870 \text{ rpm}$ ,  $60 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ,  $35 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) tendo, neste caso, em comum a TA ( $35^{\circ}\text{C}$ ). Aparentemente, o defeito pode ter sido mitigado pelo aumento da VR (maior geração de calor) apesar do aumento da VA (menor tempo para introduzir calor).

Por sua vez na soldadura 3D\_PLA\_5 ( $870 \text{ rpm}$ ,  $90 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ,  $85 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) é evidente uma diferença na cor da mistura em relação às restantes soldaduras, verificando-se na zona central bandas com diferentes cores designadas, pela literatura, como *onion rings* assim como

alguma porosidade. Mais uma vez verifica-se a existência de defeitos superficiais (Figura 4.4.b) e no interior do cordão (Figura 4.5.b) junto ao LR, porém de menor dimensão. Apesar da aparente diminuição de VR, o aumento de TA permitiu diminuir o defeito no LR. Existe ainda um defeito na raiz do cordão que se poderá dever ao afastamento das placas durante o processo.

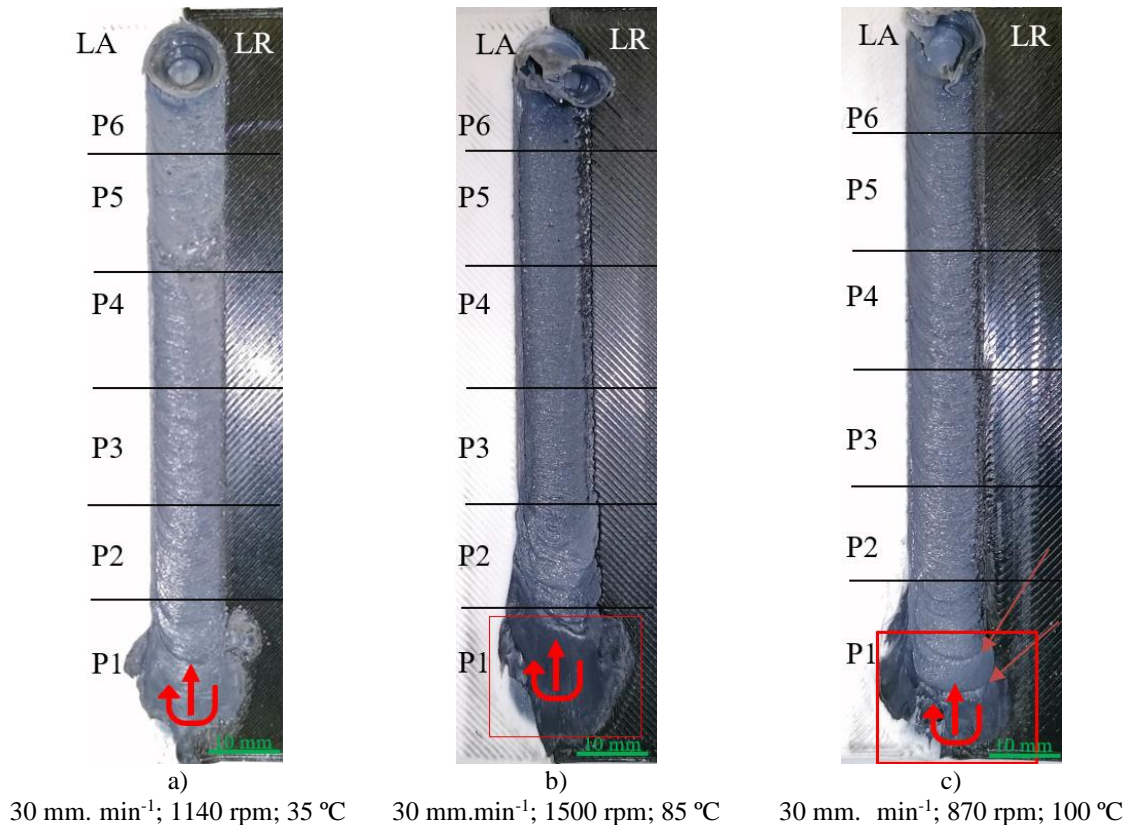


**Figura 4.5.** Macrografia da secção transversal: velocidade de avanço de  $90 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ .

Por fim, na soldadura 3D\_PLA\_6 ( $1140 \text{ rpm}$ ,  $90 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ,  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ ) verifica-se um defeito na superfície do cordão na zona dos provetes P2 e P3 assinalado a vermelho na Figura 4.4.c, refletindo-se numa diminuição da área de secção transversal como é possível visualizar no provete P3 da Figura 4.5.c. Este defeito pode estar relacionado com o afastamento das placas pelo que origina falta de material no cordão culminando com a diminuição da secção transversal. A superfície do cordão nos provetes P4 e P5 apresenta-se mais uniforme como se pode ver na Figura 4.4.c ainda que evidencie pequenos defeitos na zona central e no LR, contudo, devido à recuperação de material no cordão é possível obter melhor preenchimento, tal como é possível visualizar no provete P5 da Figura 4.5.f. Existe alguma porosidade ao longo do cordão, porém os defeitos interiores no LR desapareceram.

Finalmente nas Figura 4.6 e Figura 4.7 estão representadas as soldaduras com velocidade de avanço de  $30 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ . A grande diferença em termos morfológicos entre este conjunto de soldaduras e as restantes reside no facto de o defeito linear que tendencialmente surge no LR apresenta-se, neste caso, no LA com geometria em V. Aparentemente a VA é o fator predominante nesta mudança. Por outro lado, elas também apresentam uma superfície de cordão bastante rugosa, onde é possível observar vários perfis

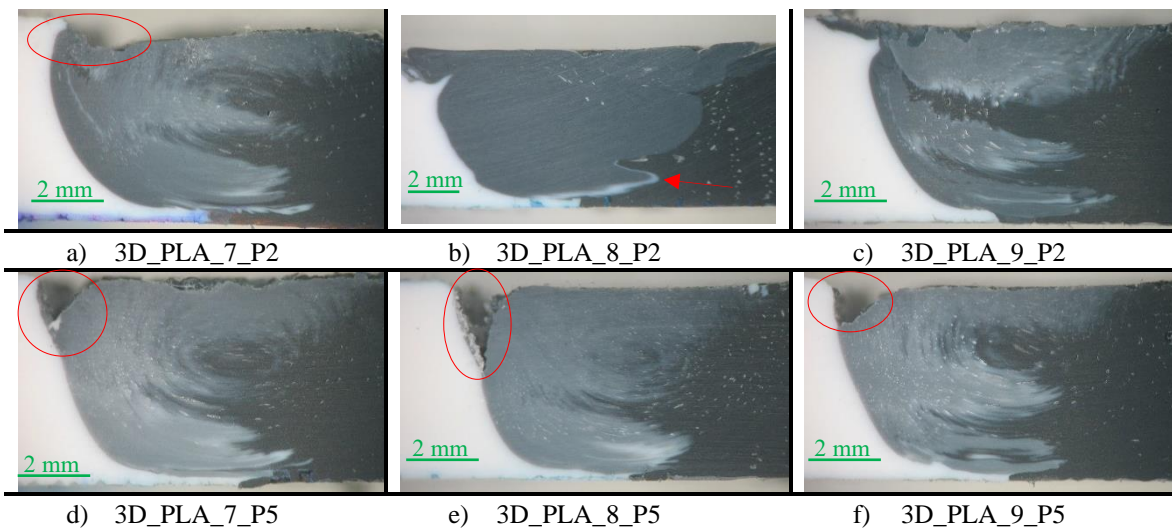
circulares provenientes do pino da ferramenta. Por outro lado, a superfície do cordão aparenta estar mais preenchida e uniforme, mas com muito mais porosidade no seu interior.



**Figura 4.6.** Macrografia da superfície de soldadura: a) 3D\_PLA\_7; b) 3D\_PLA\_8; c) 3D\_PLA\_9.

A soldadura 3D\_PLA\_7 (1140 rpm, 30 mm.min<sup>-1</sup>, 35 °C) apresenta um defeito no LA que se começa a desenvolver no provete P2 e se prolonga por todo o cordão. Verificam-se também bastantes porosidades e de vários tamanhos em todo o cordão. Na soldadura 3D\_PLA\_8 (1500 rpm, 30 mm.min<sup>-1</sup>, 85 °C) a secção transversal do provete P2 apresenta um bom preenchimento e mistura homogênea, a superfície do cordão altera-se, passando de uma mistura com aspeto mais liso e uniforme para uma onde se verificam defeitos circulares decorrentes do fluxo de material na superfície observáveis na Figura A.1 do Apêndice A, momento a partir do qual a morfologia da mistura na vista da secção transversal também se altera. De salientar que no provete P2 já começam a desenvolver mudanças no LR que levam ao fluxo característico para estas soldaduras, assinalado na Figura 4.7.b pela seta a vermelho.





**Figura 4.7.** Macrografia da secção transversal: velocidade de avanço de  $30 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ .

A partir deste provete começa a desenvolver-se a morfologia característica deste conjunto de soldaduras, com um defeito no LA de maior dimensão em relação às soldaduras 3D\_PLA\_7 e 3D\_PLA\_9. Por fim, a soldadura 3D\_PLA\_9 ( $870 \text{ rpm}$ ,  $30 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ ), tal como as restantes soldaduras com VA mais baixa, apresenta um cordão com uma morfologia característica para esta velocidade, ou seja, com defeito no LA, mas de menor dimensão em relação às soldaduras 7 e 8.

Analisando as diferentes soldaduras é possível relacionar alguns defeitos com os parâmetros do processo. A VA parece influenciar o surgimento de defeito lineares, sendo que para valores baixos estes surgem tendencialmente no LA e para velocidades mais elevadas no LR. A mistura no cordão também se altera de acordo com este parâmetro, tendo-se encontrado uma mistura menos homogénea e com maior porosidade no LR para baixos valores de VA ( $30 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ). Segundo Lambiase *et al.* [51] a porosidade surge devido à humidade absorvida pelo polímero como consequência da sua elevada higroscopia. Estes autores observaram este fenómeno nas soldaduras de policarbonato (PC) quando a temperatura excedia os  $170 \text{ }^\circ\text{C}$ . O PLA também é higroscópico [52] o que pode justificar a maior porosidade observada nas soldaduras efetuadas com velocidade de  $30 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ , nas quais uma menor VA conduz a temperaturas mais elevadas e, assim, promovendo o surgimento destes defeitos. Por outro lado, parecem existir locais preferenciais para o desenvolvimento de defeitos no LR para VA de  $60$  e  $90 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ . Neste caso surgem, algumas vezes, canais em zonas mais profundas do cordão e, também, em zonas mais perto da superfície, as quais tendem a ligar-se quando o calor introduzido é demasiado baixo

(como acontece nas soldaduras 1 e 4). Aparentemente estes canais tendem a diminuir com o aumento da VR e TA. Por outro lado, também se observou o afastamento das placas, principalmente na zona de introdução do pino, levando à diminuição de material disponível no cordão e respetiva redução da área do cordão. Por fim, devido ao facto de o material base ter bastante porosidade, resultante do processo de fabrico (impressão 3D), pode conduzir a outra justificação para a menor área da secção transversal em algumas soldaduras.

No provete P2 da soldadura 3D\_PLA\_8 existe uma alteração do fluxo no cordão, passando de uma mistura homogénea para uma mistura semelhante à obtida nas soldaduras realizadas a VA de  $30 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ , tal como se observa na Figura 4.7.b e Figura 4.7.e. Neste caso, foram analisadas várias secções do provete P2 da soldadura 8 (Figura 4.8), de forma a evidenciar o local onde ocorre a alteração da mistura. O provete P2 faz parte de uma secção da soldadura em que se começa a alterar a morfologia da superfície do cordão, tal como ilustrado na Figura A.1, passando de uma zona com aspeto liso para outra com aspeto rugoso e marcas de fluxo visíveis, tal como referido anteriormente. Na Figura 4.8.a estão assinalados dois locais no LR onde é possível observar o início das alterações no cordão. À medida que se avança pelo cordão o efeito da alteração da superfície tem cada vez mais influência no interior deste. Retirando cerca de 1 mm de material (Figura 4.8.b) é possível verificar que os prolongamentos evidenciados na imagem anterior aumentam de tamanho, existindo também bastante porosidade no LR. Retirando 4 mm de material surge a mistura característica destas soldaduras, com zonas no LR em que o material preto não se mistura com o material do cordão.

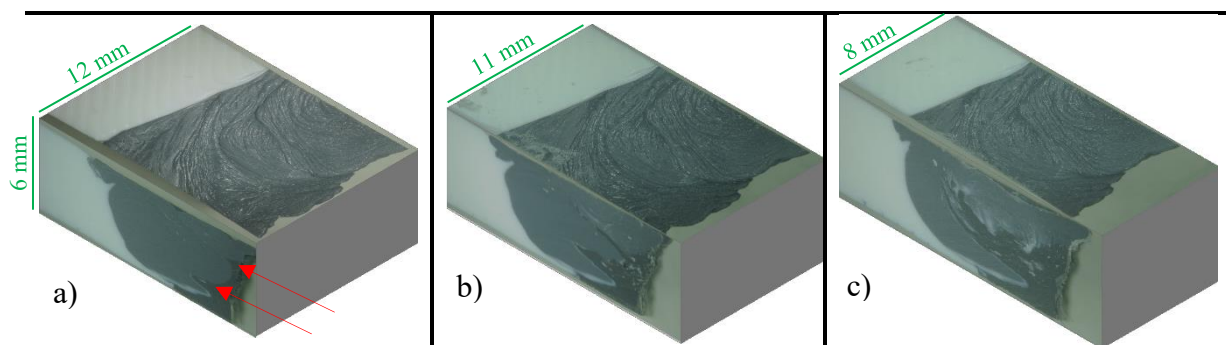


Figura 4.8. Macrografia da secção transversal: 3D\_PLA\_8.

Realizando o mesmo procedimento para a soldadura 9, na zona de introdução do pino onde se observa a mesma transição na superfície do cordão, confirma-se o observado na soldadura 8. Na Figura 4.9.a pode observar-se uma mistura homogénea que se altera à

medida que se avança pelo cordão. Na Figura 4.9.b o efeito que a superfície do cordão tem no interior deste começa a ser evidenciado, formando-se prolongamentos do material preto que se estendem para o interior da soldadura como já tinha sido verificado na soldadura 8. Quando se passa para uma zona em que a superfície do cordão apresenta ser mais rugoso, com marcas do fluxo, a mistura no interior do cordão passa a ser a mistura característica observada nas soldaduras com esta VA.

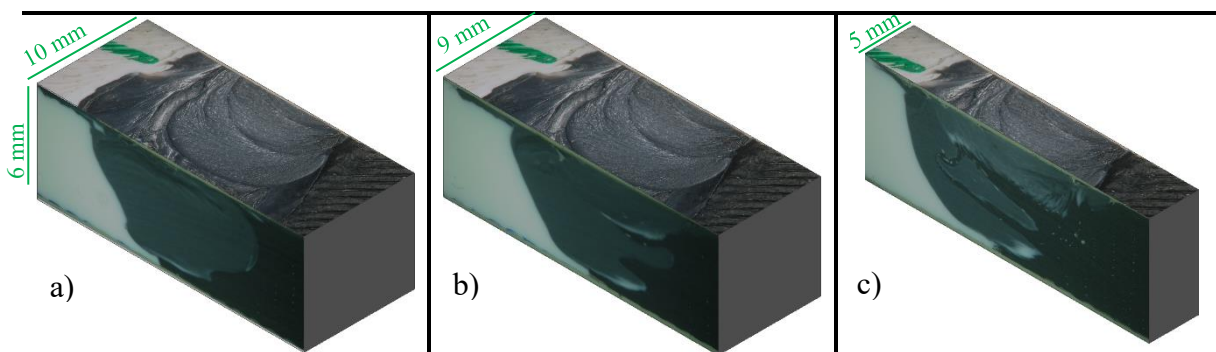


Figura 4.9. Macrografia da secção transversal: 3D\_PLA\_9\_P1.

Nas soldaduras realizadas a VA mais baixa ( $30 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ) existe uma tendência para gerar uma mistura característica como observado nas macrografias anteriores aparentando estar relacionado com a alteração da mistura na superfície do cordão. Nestas soldaduras não parece existir redução da área de secção transversal além do defeito observado no LA. É possível que exista material suficiente no LR para que a pressão seja elevada o suficiente para gerar este tipo de fluxo nestas soldaduras, além disso a VA reduzida permite pressionar o material do cordão durante mais tempo o que pode por sua vez ajudar na formação deste tipo de fluxo.

## 4.2. Ensaios de Dureza

### 4.2.1. Dureza do Material Base

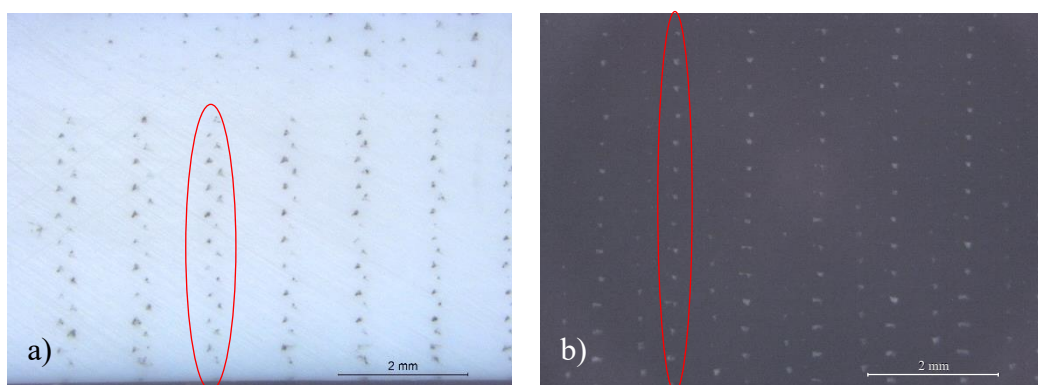
Inicialmente foram realizados ensaios de dureza no material base. Para tal, foram retiradas amostras tanto do PLA preto como do branco, tendo sido avaliada a dureza segundo diferentes planos. Desta forma, pretendia-se verificar se existiam diferenças de dureza entre as zonas da base de impressão e a zona de deposição do filamento (face superior). A Tabela 4.1 apresenta os valores de dureza obtidos.

**Tabela 4.1.** Dureza do Material Base.

PLA	Dureza [HV <sub>0.2</sub> ]		
	Mínimo	Média	Máximo
Preto	18.0	18.2	18.3
Branco	16.4	17.3	17.8

A Figura A.2, ilustrada no Apêndice A, representa as durezas registadas nas amostras de PLA branco e PLA preto, bem como os valores mínimos, médios e máximos registados em cada face ensaiada. Na Figura A.3 ilustra-se o provete utilizado nos ensaios de dureza, onde se pode observar os chanfres no provete que permitem identificar as faces após o polimento. O PLA preto apresenta as medições mais consistentes de dureza com um valor médio de 18.2 HV<sub>0.2</sub>, enquanto o PLA branco apresenta uma dureza média de 17.3 HV<sub>0.2</sub>, mas com uma maior dispersão. As Figura A.4 e Figura A.5 mostram os gráficos de dureza do PLA preto segundo linhas horizontais e linhas verticais, respetivamente. Por outro lado, as Figura A.6 e Figura A.7 representam os gráficos de dureza do PLA branco segundo linhas horizontais e verticais, respetivamente.

A dispersão de dureza pode estar relacionada com a porosidade existente na secção transversal que está representada na Figura 4.10. Estes defeitos seguem um padrão linear no plano perpendicular à direção de deposição e têm a forma de um canal que em muitos casos é contínuo.

**Figura 4.10.** Defeitos no Material Base: a) PLA Branco, b) PLA preto.

Este defeito parece estar relacionado com o processo de impressão, onde a deposição de camadas conduz a zonas que não são preenchidas pelo filamento. Como se pode verificar pelas imagens, o efeito é mais acentuado no PLA branco. Isto pode ser explicado pelos aditivos utilizados para conferir a cor ao polímero, os quais alteram as propriedades

mecânicas do material. Wittbrodt *et al.* [53] verificaram que a cor do filamento influencia a formação e o tamanho destes defeitos tal como a temperatura de processamento. Para temperaturas baixas e para certos aditivos pode ocorrer uma diminuição do fluxo de material de deposição levando ao aumento das cavidades. As imagens foram analisadas com recurso ao programa de processamento de imagens *ImageJ* tendo sido obtido uma porosidade de cerca de 3 % para o PLA branco e de 1 % para o PLA preto.

#### 4.2.2. Dureza das Soldaduras

Todos os ensaios de dureza na região das soldaduras foram realizados nos provetes P3, ao longo de uma linha horizontal da zona média da secção transversal e em 25 pontos diferentes com início a 12,5 mm da linha central do cordão no lado do avanço. A distância entre indentação foi de 1 mm.

O gráfico que mostra a evolução da dureza para a soldadura 3D\_PLA\_1 (870 rpm, 60 mm.min<sup>-1</sup>, 35°C) está representado na Figura 4.11 e apresentou um valor médio de 15,0 HV<sub>0.2</sub>. Verifica-se que existe pouca dispersão, tendo apenas o primeiro ponto um valor inferior aos restantes e que se pode dever a defeitos não perceptíveis na superfície. Todavia, no interior do cordão não é aparente nenhuma alteração da dureza em relação ao observado para o material base no LA e LR. Ainda que de pequena expressão existem duas zonas na vizinhança do cordão em que o material sofre um ligeiro amaciamento que pode corresponder à zona afetada termicamente (ZAT).

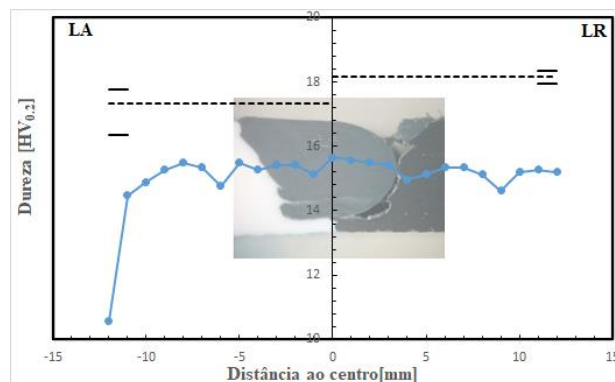
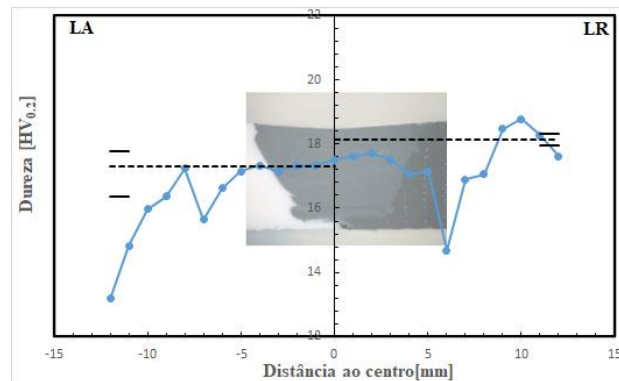


Figura 4.11. Gráfico de dureza: 3D\_PLA\_1.

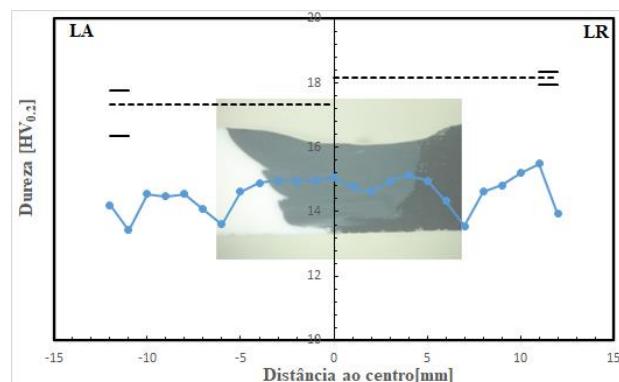
A Figura 4.12 representa a curva de dureza da soldadura 3D\_PLA\_2 (1140 rpm, 60 mm.min<sup>-1</sup>, 85°C). No LA é possível observar que a dureza tende a aumentar à medida que se aproxima do cordão. Na vizinhança do cordão, tanto no LA como no LR existe um amaciamento do material e que pode corresponder à ZAT, sendo que a diminuição da dureza

aparenta ser mais abrupta no LR, recuperando para valores próximos do MB à medida que se afasta da influência do cordão. Esta soldadura obteve valores médios de dureza na ordem dos 16,9 HV<sub>0,2</sub>.



**Figura 4.12.** Gráfico de dureza: 3D\_PLA\_2.

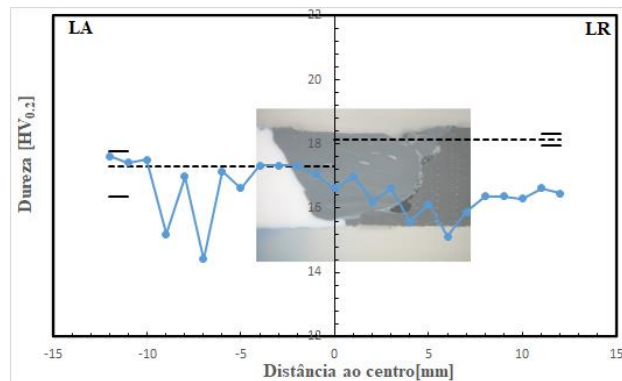
Na Figura 4.13 está representada a curva de dureza da soldadura 3D\_PLA\_3 (1500 rpm, 60 mm.min<sup>-1</sup>, 100 °C). Tal como na soldadura anterior, verifica-se que o material sofre um amaciamento na vizinhança do cordão, ou seja, na ZAT, mantendo-se constante dentro deste. Neste caso é possível observar que a dureza seja mais reduzida que a observada no material base e com um valor médio de 14,6 HV<sub>0,2</sub>.



**Figura 4.13.** Gráfico de dureza: 3D\_PLA\_3.

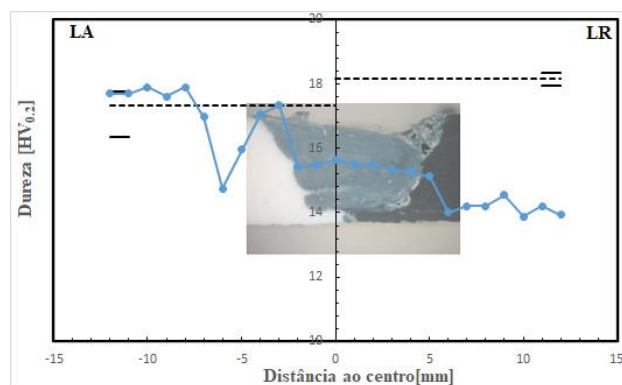
Na Figura 4.14 está representada a dureza da soldadura 3D\_PLA\_4 (1500 rpm, 90 mm.min<sup>-1</sup>, 35°C). Existem alguns pontos com dureza mais baixa no PLA branco que podem ser devido a porosidade no MB, porém a dureza tende a estabilizar junto da zona de transição com o cordão, a partir da qual tende a diminuir em direção ao LR. No PLA preto a dureza começa a subir mantendo relativamente constante à medida que se afasta da influência do cordão. Neste caso, é aparente um amaciamento do cordão em regiões

próximas do LR, local onde a temperatura é relativamente mais baixa que no LA o que pode estar na causa desta diminuição. A dureza média observada nesta soldadura foi de 16,9 HV<sub>0.2</sub>.



**Figura 4.14.** Gráfico de dureza: 3D\_PLA\_4.

Para a amostra 3D\_PLA\_5 (870 rpm, 90 mm.min<sup>-1</sup>, 85°C) a evolução da dureza está representada na Figura 4.15.



**Figura 4.15.** Gráfico de dureza: 3D\_PLA\_5.

No LA é aparente um amaciamento do material que pode corresponder à ZAT, embora no interior do cordão a dureza seja relativamente constante no LA diminuindo no LR, sofrendo uma descida mais acentuada no MB. Neste caso o PLA preto apresenta valores de dureza bastante reduzidos em relação ao observado na caracterização do material base, contudo no cordão é possível uniformizar a dureza com valores intermédios entre o PLA branco e o PLA preto. A dureza média observada nesta soldadura foi de 15,7 HV<sub>0.2</sub>.

A soldadura 3D\_PLA\_6 (1140 rpm, 90 mm.min<sup>-1</sup>, 100 °C) foi onde se obteve os valores mais uniformes e com menor dispersão de entre as 9 solduras, tal como evidencia a Figura 4.16. É possível obter uma distribuição de durezas uniforme ao longo de toda a

amostra, podendo estar relacionada com a boa mistura e introdução de calor provenientes desta combinação de parâmetros. A dureza é semelhante à observada para o material base com apenas dois pontos onde ela é um pouco menor que as restantes e que podem corresponder a defeitos no MB. A dureza média desta soldadura foi de 17,3 HV<sub>0.2</sub>.

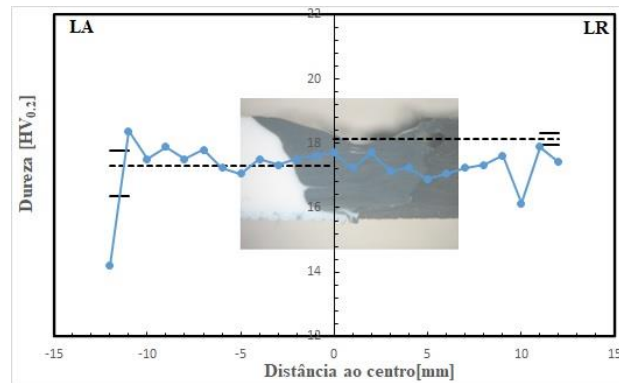


Figura 4.16. Gráfico de dureza: 3D\_PLA\_6.

Na Figura 4.17 está representada a curva de dureza da soldadura 3D\_PLA\_7 (1140 rpm, 30 mm.min<sup>-1</sup>, 35°C).

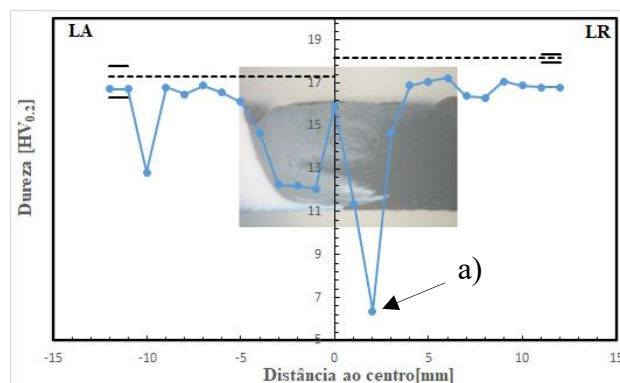


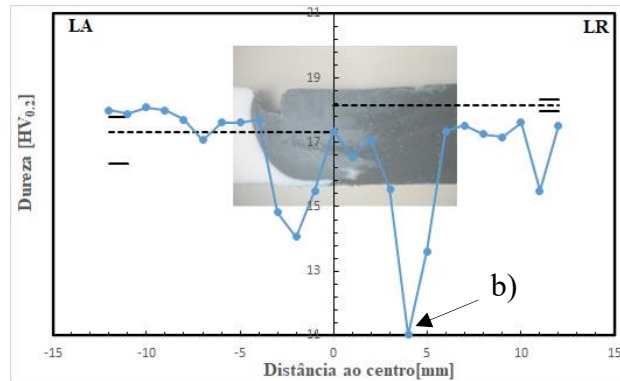
Figura 4.17. Gráfico de dureza: 3D\_PLA\_7.

Neste caso a dureza diminui quando se aproxima da zona do cordão, caindo para valores em torno dos 12 HV<sub>0.2</sub>. No centro do cordão a dureza sobe para cerca de 16 HV<sub>0.2</sub> voltando a descer e atingindo uma dureza na ordem dos 6 HV<sub>0.2</sub>. À medida que se avança em direção ao MB do LR a dureza volta a subir para valores na ordem dos 17 HV<sub>0.2</sub> mantendo-se relativamente constante.

Na Figura 4.18 está representada a soldadura 3D\_PLA\_8 (1500 rpm, 30 mm.min<sup>-1</sup>, 85°C). A dureza é constante no PLA branco, diminuindo na região do cordão, com elevada dispersão de valores, atingindo os mais baixos em torno dos 11 HV<sub>0.2</sub>. Quando se sai da zona

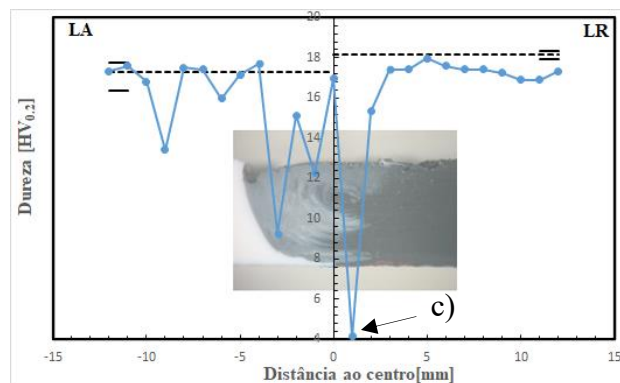


de influência do cordão de soldadura, pelo LR, a dureza volta a aumentar para valores na ordem dos 17 HV<sub>0.2</sub>.



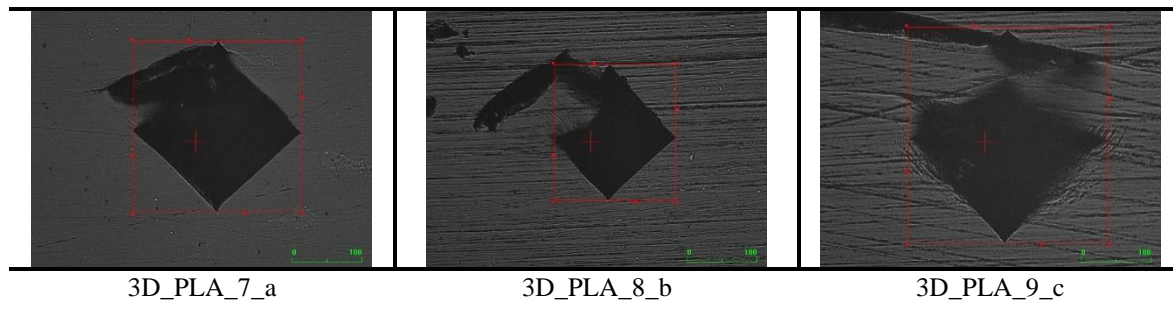
**Figura 4.18.** Gráfico de dureza: 3D\_PLA\_8.

Por fim, a soldadura 3D\_PLA\_9 (870 rpm, 30 mm.min<sup>-1</sup>, 100°C) está representada na Figura 4.19. Podemos observar uma elevada dispersão de resultados com maior impacto na região do cordão, atingindo o valor mais baixo de 4 HV<sub>0.2</sub>. Porém, à medida que se afasta do cordão a dureza tende a aumentar para valores próximos da média observada para o MB e mantendo-se posteriormente constante.



**Figura 4.19.** Gráfico de dureza: 3D\_PLA\_9.

Na Figura 4.20 estão representadas as imagens das indentações dos pontos com valores mais baixos de dureza registados nas soldaduras 7, 8 e 9. Estes pontos estão assinalados com as letras a, b e c nos gráficos das Figura 4.17 a 4.19. Como é possível observar, existem defeitos nos locais das indentações, os quais influenciam os resultados e, conseqüentemente, levam a valores muito mais baixos que os observados para o material base.



**Figura 4.20.** Imagem das indentações na soldaduras a  $30 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ .

Devido à pouca uniformidade que foi observada nos valores da dureza, a análise da influência dos parâmetros de soldadura torna-se difícil. Para as soldaduras com uma velocidade de avanço de  $60 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  é possível observar zonas na vizinhança do cordão em que ocorre amaciamento do material, o que pode corresponder à ZAT. Por outro lado, para velocidades de avanço de  $90 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  é possível observar uma tendência para a diminuição da dureza para o LR, sendo possível obter o melhor resultado para a soldadura com temperatura de aquecimento de  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  e velocidade de rotação de  $1140 \text{ rpm}$ . As soldaduras realizadas com velocidades de avanço mais baixas,  $30 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ , são as que apresentam maior porosidade no cordão, sendo notória a sua influência nos resultados dos ensaio de dureza. Segundo Vidakis *et al.* [48] o FSW permite eliminar os defeitos existentes no material base devido à impressão 3D, o que é possível verificar pelas curvas de dureza nas soldaduras realizadas com velocidade de avanço de  $60$  e  $90 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ . Neste caso os valores de dureza apresentam menor dispersão do que no material base devido à diminuição da porosidade. Porém na VA mais baixa ( $30 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ), as temperaturas mais elevadas podem favorecer o surgimento de maior porosidade devido à higroscopia do PLA tal como referido anteriormente.

### 4.3. Ensaio de Tração

#### 4.3.1. Material Base

O material base foi submetido a ensaios de tração de forma a comparar a sua resistência mecânica com a obtida nos provetes soldados. Foram, assim, obtidos valores convencionais de resistência à tração de  $54,4 \text{ MPa}$  para o PLA preto e  $48,1 \text{ MPa}$  para o PLA branco. Como é possível observar pelas curvas representadas na Figura 4.21, o PLA preto e o PLA branco

apresentam um comportamento semelhante embora com valores ligeiramente diferentes. Estas diferenças estão, de acordo com a literatura, relacionadas com os aditivos utilizados.

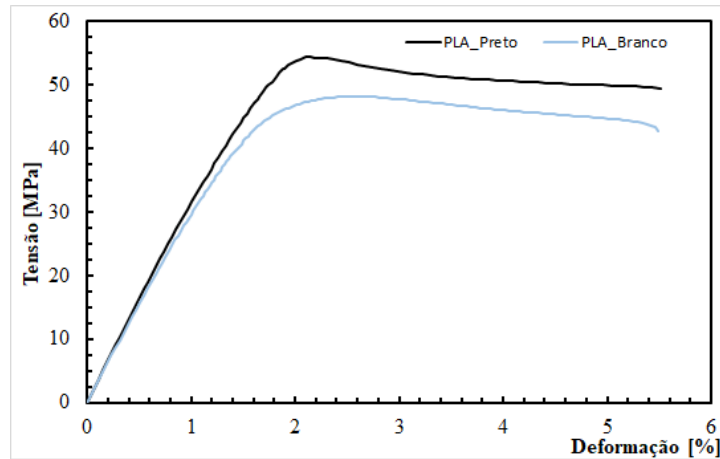


Figura 4.21. Curva Tensão-Deformação do material base.

#### 4.3.2. Resistência à Tração das Soldaduras

Na Figura 4.22 estão representadas as curvas tensão-deformação das 9 soldaduras, tendo sido selecionados provetes representativos da média obtida em cada soldadura. É possível observar que a rigidez é semelhante em todas as soldaduras à exceção da soldadura 3D\_PLA\_1 (870 rpm, 60 mm.min<sup>-1</sup>, 35 °C) e que se pode dever ao facto de esta apenas estar ligada por uma pequena porção de material na raiz do cordão, tal como se observou na Figura 4.2.a.

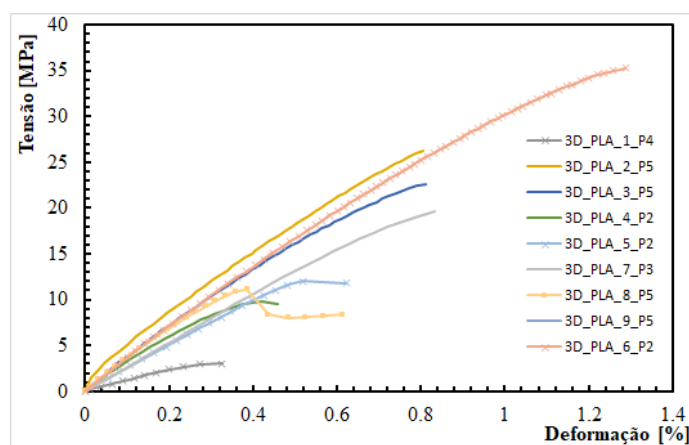


Figura 4.22. Curva Tensão-Deformação das 9 soldaduras.

Na Figura 4.23 estão representadas as curvas tensão-deformação das soldaduras com os resultados mais baixos. A soldadura 3D\_PLA\_1 (870 rpm, 60 mm.min<sup>-1</sup>, 35°C) apresenta

a pior resistência à tração de todas as soldaduras devido ao defeito que surge no LR e devidamente referenciado na análises das macrografias. A soldadura 3D\_PLA\_4 (1500 rpm, 90 mm.min<sup>-1</sup>, 35°C) também apresenta um defeito no LR, porém de menor dimensão em relação à soldadura 1. O aumento da VR permitiu melhorar o comportamento à tração desta soldadura. Por fim a soldadura 3D\_PLA\_5 (870 rpm, 90 mm.min<sup>-1</sup>, 85°C) apresenta um resultado superior em relação a este conjunto de soldaduras e poderá dever-se ao aumento da TA para 85°C, enquanto nas anteriores foi apenas de 35°C. De forma geral, um aumento da VR ou da TA permite melhorar a resistência à tração, porém a TA aparenta ter um maior impacto, como observado na soldadura 5. Nestas soldaduras a rotura ocorre sempre no LR devido aos defeitos que se desenvolvem nesse local.

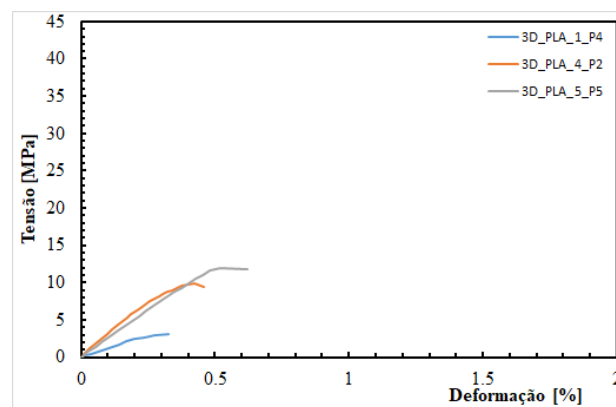


Figura 4.23. Curva Tensão-Deformação: soldaduras 1, 4 e 5.

As soldaduras que obtiveram resultados intermédios em relação à resistência à tração estão apresentadas na Figura 4.24. Observa-se que, neste conjunto com VA de 30 mm.min<sup>-1</sup>, o pior resultado é obtido para a soldadura 8 devendo-se à maior cavidade em V que existe no LA. Nesta soldadura registou-se o defeito com maior dimensão e consequentemente a menor área resistente, pelo que todos os provetes falharam nesse local à exceção do provete P2 que falhou no LR. Isto pode-se justificar pelo facto de existir alteração do fluxo, o que faz com que não se verifique o defeito em V no LA. Por sua vez a área resistente é superior nesse local, para além de que existe bastante porosidade no LR, o que leva ao provete fraturar na região dessa porosidade como ilustra a Figura A.9 do Apêndice A. Por outro lado, as soldaduras 7 e 9 apresentam resistência à tração bastante semelhante, apresentando o mesmo defeito que a soldadura 8, porém de menor dimensão. Todos os provetes destas duas soldaduras falham no LA devido à redução da área resistente.

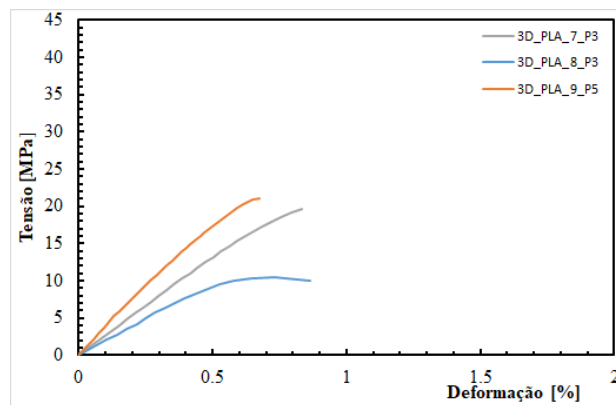


Figura 4.24. Curva Tensão-Deformação: soldaduras 7, 8 e 9.

Por fim, as soldaduras que obtiveram os resultados à tração mais elevados estão representadas na Figura 4.25.

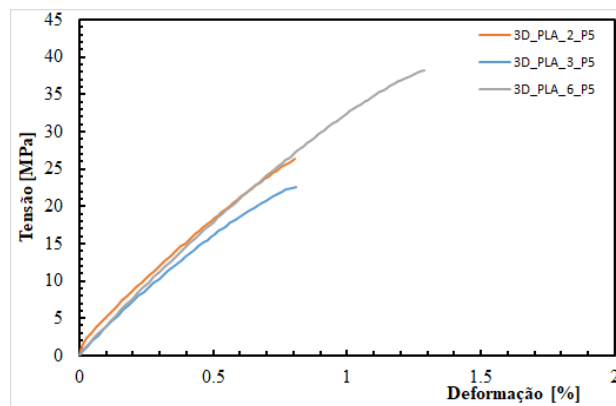


Figura 4.25. Curva Tensão-Deformação: soldaduras 2, 3 e 6.

A 3D\_PLA\_3 apresenta resistência à tração um pouco mais baixa, apesar de ter maior introdução de calor. No provete P2 existe redução da área resistente junto ao LR, além disso existe uma cavidade no interior do cordão contribuindo para a diminuição da resistência nesse local. A partir do provete P3 a falha ocorre no LA devido a uma fratura que se desenvolve nesse local, o que já tinha sido observado e mencionado anteriormente. O provete P2 da soldadura 3D\_PLA\_2 obtém o melhor resultado à tração, o que se deve à ausência de defeitos no cordão bem como ao preenchimento total do cordão. Neste provete a fratura ocorre no LA, no material base. Os restantes falham no LR devido ao defeito que se começa a desenvolver nesse local. Por fim, a soldadura 3D\_PLA\_6 apresenta os melhores resultados à tração. No provete P2 e P3 existe uma redução da área resistente no LR, possivelmente devido ao afastamento das placas. Deste modo o material disponível no cordão diminui significativamente, razão pela qual os provetes falham nesse local. Após esse defeito o

---

cordão estabiliza recuperando a área resistente, com os provetes P4 e P5 a falhar no LA no material base.

De um modo geral, é possível observar que os piores resultados ocorrem quando a introdução de calor é insuficiente para promover uma boa ligação entre o cordão e o material base, tendo sido observado que valores baixos de VR e TA levam a falta de ligação no LR com a formação de cavidade que em casos extremos impedem a ligação entre o MB e o cordão. Isto é visível nas soldaduras 1, 4 e 5 que obtiveram os piores resultados à tração. Por outro lado, quando se consegue garantir uma introdução de calor no cordão de forma adequada, é possível eliminar os defeitos existentes no LR, especialmente para os valores de TA mais elevados e VR intermédias. Por fim, as alterações na morfologia do cordão que ocorrem nas soldaduras com VA mais baixas acabam por levar a uma resistência à tração intermédia, dado que os defeitos no LR tendem a desaparecer, porém surge uma cavidade em V no LA que acaba por diminuir a resistência à tração.

Na

Tabela 4.2 encontram-se indicados os valores da resistência à tração de cada uma das soldaduras bem como a região onde ocorreu a rotura. Encontra-se também indicada a eficiência de junta para cada uma das soldaduras, neste caso, ainda que tenhamos materiais similares, será utilizado a resistência à tração do PLA branco por apresentar o valor mais baixo, por fim apresentam-se as temperaturas máximas registadas pelo termopar.

**Tabela 4.2.** Propriedades mecânicas das soldaduras.

Soldadura	Provete	Resistência à Tração [MPa]	Zona de Rotura	Eficiência [%]	Parâmetros			T <sub>Máx</sub> [°C]
					VR	VA	TA	
3D_PLA_1	P2	2,5	LR	5,9	1	2	1	49,0
	P3	3,4	LR					
	P4	3,0	LR					
	P5	2,5	LR					
3D_PLA_2	P2	40,8	LA	55,4	2	2	2	88,2
	P3	25,5	LR					
	P4	14,1	LR					
	P5	26,3	LR					
3D_PLA_3	P2	22,4	LR	49,4	3	2	3	103,9
	P3	28,4	LA					
	P4	21,5	LA					
	P5	22,6	LA					
3D_PLA_4	P2	9,8	LR	17,5	3	3	1	56,1
	P3	6,9	LR					
	P4	7,3	LR					
	P5	9,8	LR					
3D_PLA_5	P2	9,3	LR	20,3	1	3	2	91,9
	P3	5,7	LR					
	P4	11,5	LR					
	P5	12,0	LR					
3D_PLA_6	P2	35,3	LR	72,0	2	3	3	-
	P3	28,3	LR					
	P4	36,7	LA					
	P5	38,2	LA					
3D_PLA_7	P2	22,8	LA	41,8	2	1	1	52,9
	P3	19,6	LA					
	P4	15,2	LA					
	P5	22,9	LA					
3D_PLA_8	P2	22,5	LR	28,1	3	1	2	85,9
	P3	10,4	LA					
	P4	10,1	LA					
	P5	11,1	LA					
3D_PLA_9	P2	26,4	LA	45,9	1	1	3	-
	P3	20,4	LA					
	P4	20,4	LA					
	P5	21,1	LA					

Como neste estudo foi utilizado o método de Taguchi torna-se mais complexa a análise da influência de cada parâmetro, uma vez que não foram realizadas todas as combinações possíveis. Deste modo é dificultada a comparação entre as diferentes soldaduras quando se altera apenas um parâmetro.

Por outro lado, os valores das temperaturas registradas não aparentam ter correlação com os valores de resistência à tração. Por exemplo, as soldaduras 3D\_PLA\_7 e 3D\_PLA\_4

apresentam valores de temperatura de 52,9 e 56,1 °C e os seus resultados de resistência à tração são de 20,1 e 8,4 MPa, respetivamente. Seria expectável uma melhoria com o aumento da temperatura, porém isso não se verifica. O mesmo ocorre na soldadura 3D\_PLA\_2 e 3D\_PLA\_5 onde temos temperaturas de aquecimento de 88,2 e 91,9 °C e resistências de 26,7 e 9,6 Mpa, respetivamente. Isto poderá dever-se ao fato de o termopar medir a temperatura na base da ferramenta e não a temperatura que se faz realmente sentir no cordão de soldadura. De salientar que as soldaduras 6 e 9 não apresentam os valores de temperatura devido aos dados estarem corrompidos.

#### 4.4. Aplicação do Método de Taguchi

Neste subcapítulo será aplicado e analisado o método de Taguchi, bem como a soldadura de validação. Os valores médios de resistência à tração são utilizados como característica de qualidade a otimizar. A análise da resposta (valores médios da resistência à tração) foi realizada para avaliar a influência de cada fator através do rácio “*signal-to-noise*” (S/N). Os resultados obtidos em S/N são processados com a condição “*Larger is Better*” (LB) e calculados pela Equação 4.2:

$$S/N_{LB} = -10 \log_{10} \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i^2} \right], \quad (4.1)$$

onde  $S/N_{LB}$  é a relação sinal/ruído (dB),  $n$  é o número de observações nas mesmas condições experimentais e  $R_i$  o valor de resposta obtido pela medição. Na Tabela 4.3 está apresentada a matriz L9 bem como os valores médios da resistência à tração e os rácios  $S/N$  para cada soldadura.

O programa Minitab<sup>®</sup> foi utilizado para fazer o estudo da resposta do desenho experimental proveniente do método de Taguchi. Nas Figura 4.26 e Figura 4.27 são apresentados os gráficos do efeito principal utilizando a resposta média e para os rácios  $S/N$  em relação à resistência à tração do PLA. Os valores mais elevados do rácio  $S/N$  representam os melhores resultados em relação à resposta em estudo, neste caso a resistência à tração. Com base nas Tabela 4.4 e Tabela 4.5, o conjunto de parâmetros que permitem maximizar a resposta são a velocidade de rotação no nível 2 (1140 rpm), a velocidade de avanço no nível 1 (30 mm.min<sup>-1</sup>) e a temperatura de aquecimento no nível 3 (100 °C).



Tabela 4.3. Matriz ortogonal L9 – Método de Taguchi.

Designação	Velocidade de Avanço [mm.min <sup>-1</sup> ]	Velocidade de Rotação [rpm]	Temperatura de Aquecimento [°C]	Resistência à Tração Média [Mpa]	Rácio S/N [dB]
3D_PLA_1	60	870	35	3,21	10,13
3D_PLA_2	60	1140	85	26,65	28,51
3D_PLA_3	60	1500	100	23,74	27,51
3D_PLA_4	90	1500	35	8,44	18,53
3D_PLA_5	90	870	85	9,64	19,68
3D_PLA_6	90	1140	100	34,62	30,79
3D_PLA_7	30	1140	35	20,12	26,07
3D_PLA_8	30	1500	85	13,51	22,61
3D_PLA_9	30	870	100	22,1	26,89

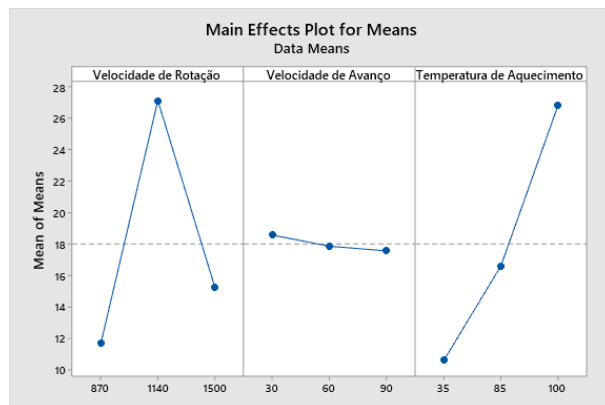


Figura 4.26. Gráfico do efeito principal para as médias – Resistência à tração.

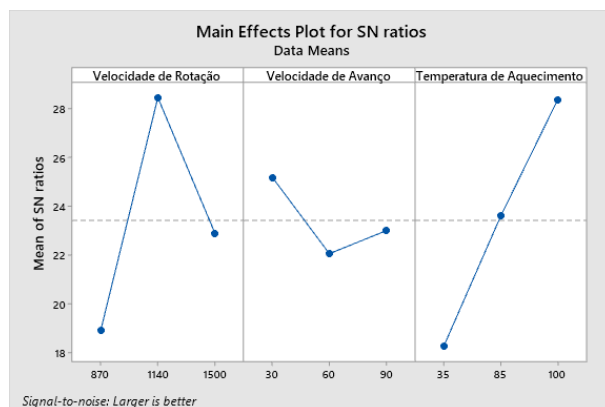


Figura 4.27. Gráfico do efeito principal para os rácios S/N – Resistência à tração.

**Tabela 4.4.** Tabela de resposta para rácios S/N

Nível	Velocidade de Rotao	Velocidade de Avanço	Temperatura de Aquecimento
1	18,9	25,19	18,24
2	28,46	22,05	23,6
3	22,88	23	28,39
<i>Delta</i>	9,56	3,14	10,15
<i>Rank</i>	2	3	1

**Tabela 4.5.** Tabela de resposta para a média

Nível	Velocidade de Rotao	Velocidade de Avanço	Temperatura de Aquecimento
1	11,65	18,58	10,59
2	27,13	17,87	16,6
3	15,23	17,57	26,82
<i>Delta</i>	15,48	1,01	16,23
<i>Rank</i>	2	3	1

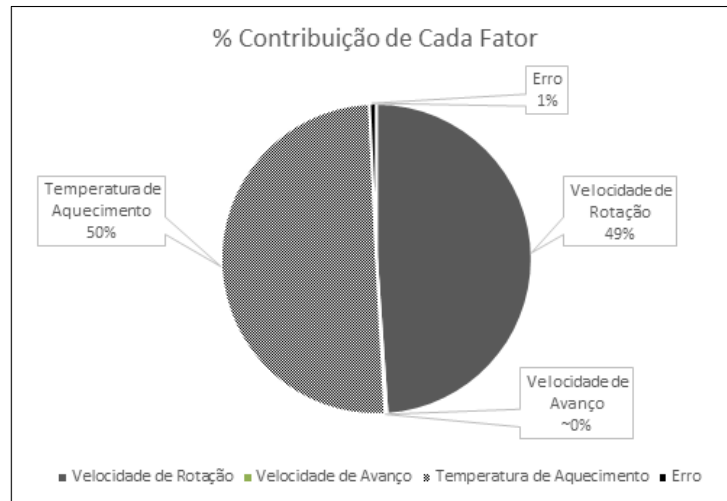
Finalmente foi realizada uma análise de variância (ANOVA) de forma a verificar quais os parâmetros que são estatisticamente mais significantes no processo. O resultado desta análise  apresentado na Tabela 4.6.

**Tabela 4.6.** Análise de Variância (ANOVA) para a Resistência  Traço

Fonte	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	%Contribuio
Velocidade de Rotao	2	394,057	394,057	197,028	67,55	0,015	48,92164482
Velocidade de Avanço	2	1,614	1,614	0,807	0,28	0,783	0,200375922
Temperatura de Aquecimento	2	403,981	403,981	201,991	69,25	0,014	50,15369603
Erro	2	5,834	5,834	2,917			0,724283228
Total	8	805,486					100
S = 1,7079		R-Sq = 99,28 % R-Sq(adj) = 97,10 %					

 possível observar que os fatores com maior impacto na resistência  traço são a velocidade de rotao e a temperatura de aquecimento, isto por apresentarem valores de  $p < 0,05$ , dado que a análise foi realizada com uma confiança de 95 %. Por outro lado, podemos observar que a contribuio que cada um destes fatores tem sobre a resistência  traço  de cerca de 49 % para a velocidade de rotao e de 50 % para a temperatura de

aquecimento, sendo que a velocidade de avanço tem uma contribuição bastante baixa tal como podemos observar na Tabela 4.6 e Figura 4.28.



**Figura 4.28.** Contribuição de cada fator para a resistência à tração.

Os melhores resultados são obtidos para uma temperatura de aquecimento mais elevada e velocidade de rotação intermédia, tal como tinha sido observado anteriormente. Porém, com base na análise de variância é possível concluir que a velocidade de avanço tem uma contribuição baixa para a resistência à tração. Neste caso, a variação deste parâmetro deverá ter pouco efeito na resistência à tração das soldaduras. Contudo, verificou-se que para uma velocidade de rotação baixa existem algumas alterações no cordão que podem levar a menor resistência à tração, nomeadamente o defeito em V no lado do avanço. De forma a confirmar experimentalmente este resultado, foi realizada uma soldadura de validação com a combinação dos parâmetros ótimos. Através da Equação 4.3 (adaptado de [53]) e com base no conjunto dos parâmetros ótimos obtidos previamente é possível fazer uma previsão do resultado de resistência à tração para essa combinação:

$$\hat{\mu} = \mu_m + \sum_{i=1}^3 (\bar{\mu}_i - \mu_m) \quad (4.2)$$

em que  $\mu_m$  é a média da resistência à tração e  $\bar{\mu}_i$  a média da resposta obtida para o nível ótimo de cada fator, de acordo com a Tabela 4.5. Assim para a combinação de 1140 rpm, 30 mm.min<sup>-1</sup> e 100 °C a previsão  $\hat{\mu}$  é dada por:

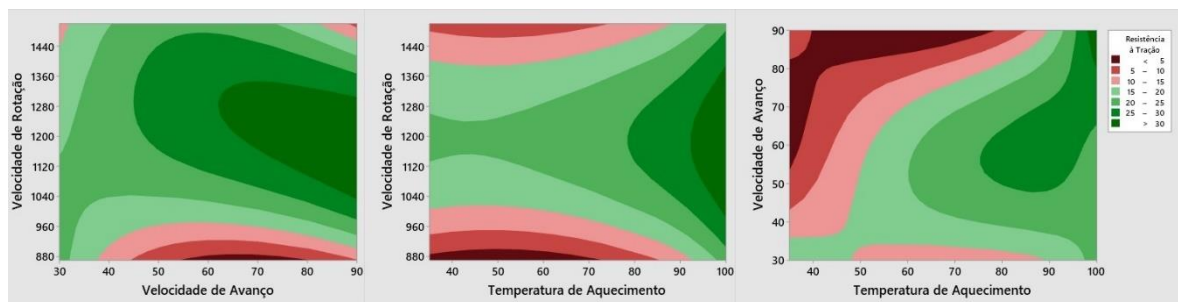
$$\hat{\mu} = 18 + (27.13 - 18) + (18.58 - 18) + (26.82 - 18) = 36,52 \text{ Mpa} \quad (4.3)$$

Os resultados experimentais obtidos com os parâmetros ótimos provenientes do método de Taguchi encontram-se comparados com os valores teóricos na Tabela 4.7.

**Tabela 4.7.** Validação do método de Taguchi.

Designação	Velocidade de Avanço [mm/min]	Velocidade de Rotação [rpm]	Temperatura de Aquecimento [°C]	Resistência à Tração Média [Mpa]
Previsão Teórica	30	1140	100	36,5
Resultado Experimental 3D_PLA_10	30	1140	100	27,4

Para velocidade de rotação de 1140 rpm, velocidade de avanço de 30 mm.min<sup>-1</sup> e temperatura de aquecimento de 100°C foi possível obter uma resistência à tração média de 27,4 MPa. O erro entre a previsão e o valor obtido experimentalmente foi de 25,1 %. Segundo a análise de variância, a velocidade de avanço tem um impacto pouco significativo na resistência à tração, pelo que pode ser utilizado o nível 1, 2 ou 3 com baixo impacto nesta propriedade. No entanto, de acordo com a Tabela 4.7 existe alguma variação entre a resistência à tração prevista e a experimental. De acordo com obtido experimentalmente a melhor combinação de parâmetros aparenta ser a utilizada na soldadura 3D\_PLA\_6 com velocidade de rotação de 1140 rpm, velocidade de avanço de 90 mm.min<sup>-1</sup> e temperatura de aquecimento de 100 °C. Recorrendo a gráficos de contorno (Figura 4.29) em que se avalia o efeito de dois parâmetros em relação à resistência à tração é possível chegar à mesma conclusão.



**Figura 4.29.** Gráficos de contorno: VR vs VA, VR vs TA e VA vs TA.

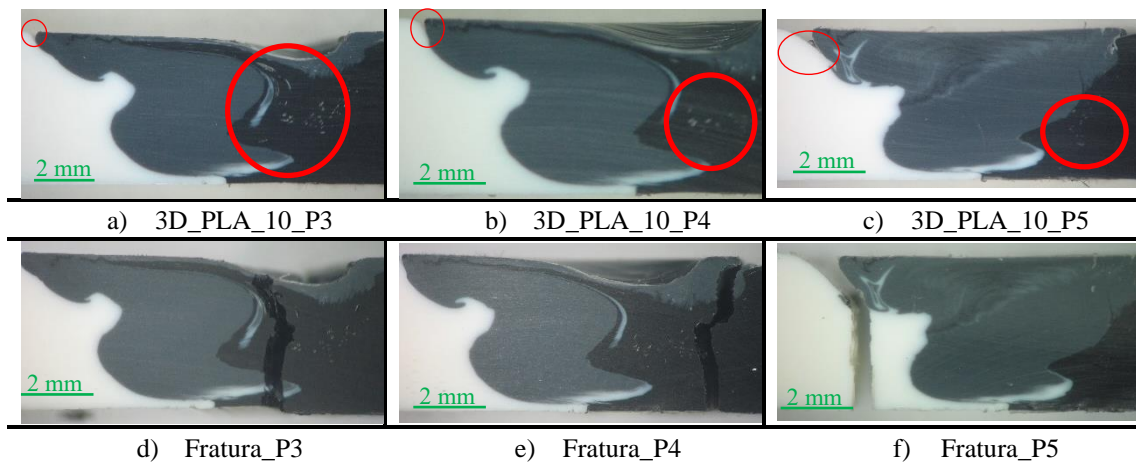
A Figura 4.30 ilustra a macrografia da soldadura realizada com os parâmetros ótimos que foram preditos pelo método de Taguchi.



**Figura 4.30.** Soldadura 3D\_PLA\_10 : Validação do método de Taguchi.

É possível observar que o aspeto do cordão é diferente do observado para as restantes soldaduras realizadas com VA mais baixa, embora na zona assinalada a vermelho exista um defeito superficial que acaba por afetar os provetes P2, P3 e P4. Apesar da redução de área na secção transversal dos provetes, os resultados da resistência à tração foram mais elevados do que o obtido no provete P5. Assim, para os provetes P2, P3 e P4 foi obtida uma resistência à tração de 29,5 MPa, 31,5 MPa e 28,7 MPa, respetivamente, enquanto o provete P5 apresentou um valor de apenas 19,7 MPa. Este decréscimo da resistência (de 31,5 para 19,7 MPa) é devido ao defeito que surge no LA, o qual começa a desenvolver-se a partir do provete P3 e tanto progride como aumenta a sua severidade na direção do provete P5.

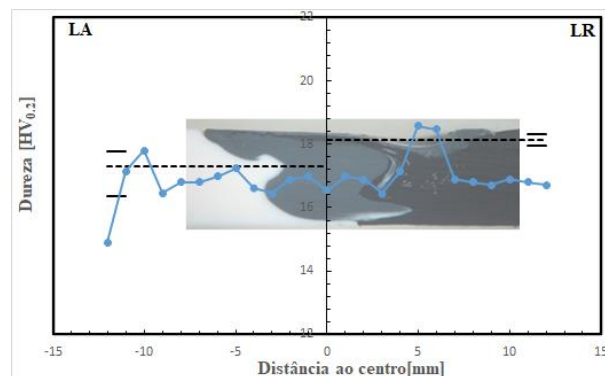
De acordo com a Figura 4.31.c, a fratura inicia-se no LA e propaga-se em direção ao material base. Mais detalhadamente, a sua geometria em forma de V começa a desenvolver-se nos primeiros provetes, mas a fratura acaba por ocorrer no lado mais próximo de LR. Isto pode ser explicado pela diminuição da área na secção transversal dos provetes, a qual é devido ao afastamento das placas na sua zona inicial, durante o processo de soldadura, e pela extrusão de material na zona de introdução da ferramenta (ver Figura A.8 do Apêndice A).



**Figura 4.31.** Macrografia da secção transversal: velocidade de avanço de 60 mm.min<sup>-1</sup>.

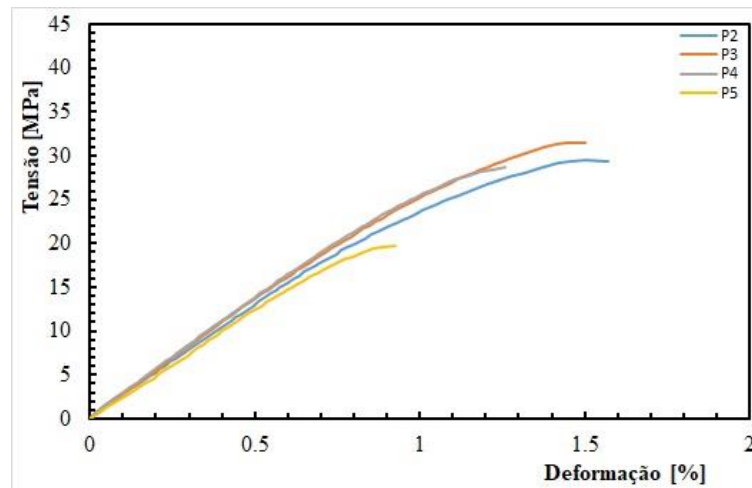
Como foi referido anteriormente, existe uma grande tendência de se desenvolver defeitos no LA quando a VA é baixa (neste caso de 30 mm.min<sup>-1</sup>). Por outro lado, apesar dos resultados obtidos com o método de Taguchi não terem evidenciado a VA como um parâmetro de grande impacto na resistência à tração, o estudo experimental deixa fortes evidências que existe interação devido ao defeito que se desenvolve no LA. Acresce ainda que nestas soldaduras a superfície do cordão não é tão irregular como nas soldaduras 7 a 9 e a sua morfologia, inicialmente semelhante a um Z nos provetes P2 a P4, passa a caracterizar-se por alguma linearidade entre os provetes P4 e P5 devido à recuperação de toda a área transversal.

Na Figura 4.32 está representada a curva que ilustra a evolução da dureza na soldadura que foi realizada para validar os resultados obtidos pelo método de Taguchi. É possível denotar alguma uniformidade dos valores da dureza ao longo do cordão, realçando-se apenas um aumento significativo na zona de transição para o MB e no LR.



**Figura 4.32.** Gráfico de Dureza 3D\_PLA\_10.

Finalmente, as curvas tensão-deformação da soldadura 3D\_PLA\_10 encontram-se ilustradas na Figura 4.33. Os primeiros provetes caracterizam-se por um comportamento bastante semelhante e todos eles exibiram fratura no LR, enquanto o provete P5 devido ao defeito que apresenta no LA conduz a uma menor resistência mecânica devido à menor área resistente que tem.



**Figura 4.33.** Curva tensão-deformação: 3D\_PLA\_10.





## 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base no estudo realizado, verifica-se que é possível obter ligações soldadas por FSW em PLA impresso por FFF com eficiências de junta na ordem dos 72 %. Este resultado é superior ao observado na literatura nos estudos realizados por Sharma *et al.* [25] e Senthil *et al.* [47] para velocidades de avanço mais elevadas (90 mm.min<sup>-1</sup>) potenciado possivelmente pelo uso de base aquecida. Os defeitos no cordão foram também relacionados com alguns parâmetros do processo onde, por exemplo, verificou-se que a formação de cavidades no lado do avanço (defeito em V) relaciona-se com as velocidades de avanço mais reduzidas. Neste caso, é preferível a utilização de velocidades de rotação intermédias e temperaturas de aquecimento mais elevadas para diminuir este tipo de defeitos. Também se observou que o fluxo de material no cordão altera-se com a velocidade de avanço, podendo conduzir a cordões com maior porosidade. Por exemplo, quando se combinam velocidades de avanço mais elevadas (60 e 90 mm.min<sup>-1</sup>) com velocidades de rotação e temperaturas de aquecimento mais baixas surge a formação de cavidades no lado do recuo, as quais podem inclusivamente prolongar-se até à raiz do cordão e afetar significativamente a resistência à tração. O efeito dos parâmetros do processo na dureza não foi totalmente compreendido, pelo que apenas se concluiu que o FSW permite diminuir a porosidade provocada pela impressão 3D na zona do cordão e que esta zona tende a apresentar valores de dureza intermédios em relação aos observados no material base.

A análise realizada com o método de Taguchi e ANOVA permitiu concluir que a temperatura de aquecimento e a velocidade de rotação são os parâmetros com maior impacto no processo. Porém, a combinação ótima de parâmetros produziu apenas o segundo melhor resultando em relação à resistência de junta. Isto poderá ser justificado pelo facto de as placas terem sofrido algum afastamento durante o processo de soldadura e, conseqüentemente, alguma variabilidade nos resultados de validação.

Segundo os resultados experimentais a combinação de parâmetros que permitiu maximizar a resistência à tração foi: velocidade de rotação de 1140 rpm, velocidade de avanço 90 mm.min<sup>-1</sup> e temperatura de aquecimento de 100 °C.

Como propostas de trabalhos futuros, sugere-se que as placas de PLA sejam impressas de modo a conter o menor número de defeitos possível, o ideal seria mesmo a ausência deles, para deste modo obter cordões de soldadura mais uniformes.

Relativamente às soldaduras por FSW, seria importante estudar mais aprofundadamente o tipo de fluxo para as velocidades mais baixas, bem como a possibilidade de ter um registo mais preciso das temperaturas que se fazem sentir durante todo o processo. Para este propósito recomenda-se, por exemplo, o uso de câmaras térmicas. Por outro lado, seria importante impedir ao máximo o afastamento das placas durante o processo uma vez que pode introduzir variabilidade aos resultados influenciando a análise dos mesmos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

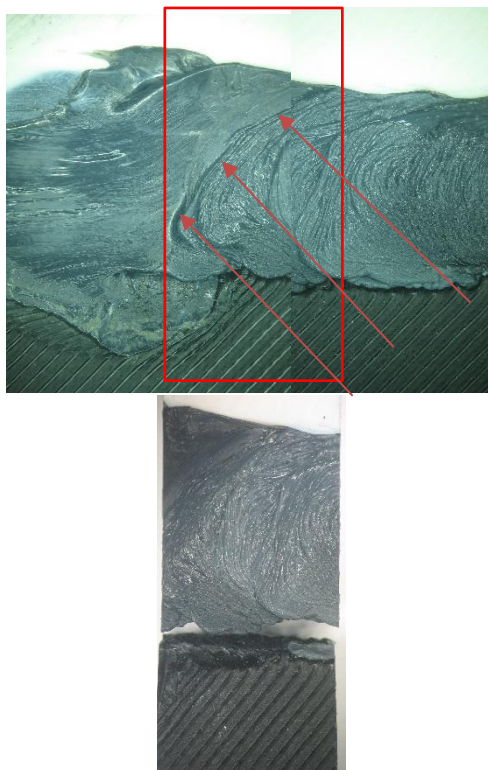
- [1] “Designation: F2792 – 12a - Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies,” *ASTM INTERNATIONAL*, 2013, doi: 10.1520/F2792-12A.
- [2] L. Jyothish Kumar, P. M. Pandey, and D. I. Wimpenny, *3D printing and additive manufacturing technologies*. Springer Singapore, 2018. doi: 10.1007/978-981-13-0305-0.
- [3] Ondrej Strítěský, *Basics of 3D Printing with Josef Prusa, 11-12.*, First Edition. 2019.
- [4] A. Zafar, M. Awang, and S. R. Khan, “Friction stir welding of polymers: An overview,” *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, pp. 19–36, 2017, doi: 10.1007/978-981-10-4232-4\_2.
- [5] M. Barmouz, P. Shahi, and P. Asadi, “Friction stir welding/processing of polymeric materials,” in *Advances in Friction-Stir Welding and Processing*, Elsevier Ltd, 2014, pp. 601–670. doi: 10.1533/9780857094551.601.
- [6] N. Amanat, N. L. James, and D. R. McKenzie, “Welding methods for joining thermoplastic polymers for the hermetic enclosure of medical devices,” *Medical Engineering and Physics*, vol. 32, no. 7. Elsevier Ltd, pp. 690–699, Sep. 01, 2010. doi: 10.1016/j.medengphy.2010.04.011.
- [7] “Joining Plastics Fügen Von Kunststoffen The Newsletter of Joining Plastics.” [Online]. Available: [www.dvs-media.eu](http://www.dvs-media.eu)
- [8] William D. Callister Jr., *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*, Quinta Edição. LTC EDITORA, 2002.
- [9] William F. Smith, *Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais*, Terceira Edição. McGraw Hill, 1998.
- [10] M. Sercer and P. Raos, “Joining of Plastics and Composites.”
- [11] R.J. Carwford, *Plastics Engineering*, Third Edition. 1998.
- [12] A. Riveiro *et al.*, “Laser surface texturing of thermoplastics to improve biological performance,” in *Materials for Biomedical Engineering: Thermoset and Thermoplastic Polymers*, Elsevier, 2019, pp. 29–56. doi: 10.1016/B978-0-12-816874-5.00002-5.
- [13] T. L. de Albuquerque, J. E. Marques Júnior, L. P. de Queiroz, A. D. S. Ricardo, and M. V. P. Rocha, “Polylactic acid production from biotechnological routes: A review,” *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 186. Elsevier B.V., pp. 933–951, Sep. 01, 2021. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2021.07.074.
- [14] A. K. R. Sharma, M. Roy Choudhury, and K. Debnath, “Experimental investigation of friction stir welding of PLA,” *Welding in the World*, vol. 64, no. 6, pp. 1011–1021, Jun. 2020, doi: 10.1007/s40194-020-00890-7.
- [15] G. Dharmalingam, M. Arun Prasad, and S. Salunkhe, “Investigation of impact strength at different infill rates biodegradable PLA constituent through fused deposition modeling,” *Mater Today Proc*, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.03.591.
- [16] ASTM International, “Standard Terminology Relating to Plastics, D883-00.”
- [17] V. K. Tiwary, N. J. Ravi, P. Arunkumar, S. Shivakumar, A. S. Deshpande, and V. R. Malik, “Investigations on friction stir joining of 3D printed parts to overcome bed size limitation and enhance joint quality for unmanned aircraft systems,” *Proc Inst*

- Mech Eng C J Mech Eng Sci*, vol. 234, no. 24, pp. 4857–4871, Dec. 2020, doi: 10.1177/0954406220930049.
- [18] M. Sercer and P. Raos, “Welding Engineering and Technology: Joining of Plastic and Composites,” *Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)*.
- [19] Plastics Design Library., *Handbook of plastics joining: a practical guide, 105-136*. Plastics Design Library, 1997.
- [20] Plastics Design Library., *Handbook of plastics joining: a practical guide, 137-163*. Plastics Design Library, 1997.
- [21] L. R. R. Silva, E. A. S. Marques, and L. F. M. da Silva, “Polymer joining techniques state of the art review,” *Welding in the World*, vol. 65, no. 10, pp. 2023–2045, Oct. 2021, doi: 10.1007/s40194-021-01143-x.
- [22] S. R. Strand, “Effects of Friction Stir Welding on Polymer Microstructure,” 2004. [Online]. Available: <https://scholarsarchive.byu.edu/etdDissertations.42>. <https://scholarsarchive.byu.edu/etd/42>
- [23] A. Yousefpour, M. Hojjati, and J. P. Immarigeon, “Fusion bonding/welding of thermoplastic composites,” *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol. 17, no. 4, pp. 303–341, Jul. 2004. doi: 10.1177/0892705704045187.
- [24] P. Maji, R. Karmakar, R. Kanti Nath, and P. Paul, “An overview on friction stir welding/processing tools,” *Mater Today Proc*, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.01.009.
- [25] A. K. R. Sharma, M. Roy Choudhury, and K. Debnath, “Experimental investigation of friction stir welding of PLA,” *Welding in the World*, vol. 64, no. 6, pp. 1011–1021, Jun. 2020, doi: 10.1007/s40194-020-00890-7.
- [26] M. A. S. Miranda, G. M. D. Almaraz, J. J. V. López, and J. A. R. Vilchez, “Dissimilar joining of ABS and PP using friction stir welding (FSW) and mechanical properties evaluation,” *Procedia Structural Integrity*, vol. 39, pp. 161–172, 2022, doi: 10.1016/j.prostr.2022.03.085.
- [27] J. Gao, C. Li, U. Shilpakar, and Y. Shen, “Improvements of mechanical properties in dissimilar joints of HDPE and ABS via carbon nanotubes during friction stir welding process,” *Mater Des*, vol. 86, pp. 289–296, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.matdes.2015.07.095.
- [28] Nelson et al., “United States Patent: US 6,811,632 B2,” 2004
- [29] N. Mendes, A. Loureiro, C. Martins, P. Neto, and J. N. Pires, “Morphology and strength of acrylonitrile butadiene styrene welds performed by robotic friction stir welding,” *Mater Des*, vol. 64, pp. 16–18, Dec. 2014, doi: 10.1016/j.matdes.2014.07.047.
- [30] M. Aydin, “Effects of welding parameters and pre-heating on the friction stir welding of UHMW-polyethylene,” *Polymer - Plastics Technology and Engineering*, vol. 49, no. 6, pp. 595–601, Jan. 2010, doi: 10.1080/03602551003664503.
- [31] G. I. Khidhir and S. A. Baban, “Efficiency of dissimilar friction welded 1045 medium carbon steel and 316L austenitic stainless-steel joints,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 8, no. 2, pp. 1926–1932, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.jmrt.2019.01.010.
- [32] N. Ethiraj, T. Sivabalan, C. V. Raghavan, and S. Mourya, “Friction stir welding of nylon-6: effect of process parameters on mechanical and microstructural properties,” 2017. [Online]. Available: [www.jurnalteknologi.utm.my](http://www.jurnalteknologi.utm.my)

- [33] S. Eslami, T. Ramos, P. J. Tavares, and P. M. G. P. Moreira, "Shoulder design developments for FSW lap joints of dissimilar polymers," *J Manuf Process*, vol. 20, pp. 15–23, Oct. 2015, doi: 10.1016/j.jmapro.2015.09.013.
- [34] M. A. E. Omer, M. Rashad, A. H. Elsheikh, and E. A. Showaib, "A review on friction stir welding of thermoplastic materials: recent advances and progress," *Welding in the World*, vol. 66, no. 1. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, Jan. 01, 2022. doi: 10.1007/s40194-021-01178-0.
- [35] Juho Nenonen, "Development of friction stir welding tool for sealing copper canisters," 2016.
- [36] S. Kumar and B. S. Roy, "Novel study of joining of acrylonitrile butadiene styrene and polycarbonate plate by using friction stir welding with double-step shoulder," *J Manuf Process*, vol. 45, pp. 322–330, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.jmapro.2019.07.013.
- [37] A. Moochani, H. Omidvar, S. R. Ghaffarian, and S. M. Goushegir, "Friction stir welding of thermoplastics with a new heat-assisted tool design: mechanical properties and microstructure," *Welding in the World*, vol. 63, no. 1, pp. 181–190, Jan. 2019, doi: 10.1007/s40194-018-00677-x.
- [38] B. Vijendra and A. Sharma, "Induction heated tool assisted friction-stir welding (i-FSW): A novel hybrid process for joining of thermoplastics," *J Manuf Process*, vol. 20, pp. 234–244, Oct. 2015, doi: 10.1016/j.jmapro.2015.07.005.
- [39] R. K. Nath, P. Maji, and J. D. Barma, "Development of a Self-Heated Friction Stir Welding tool for welding of polypropylene sheets," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 41, no. 12, Dec. 2019, doi: 10.1007/s40430-019-2059-2.
- [40] M. K. Bilici and A. I. Yüklér, "Influence of tool geometry and process parameters on macrostructure and static strength in friction stir spot welded polyethylene sheets," *Mater Des*, vol. 33, no. 1, pp. 145–152, Jan. 2012, doi: 10.1016/j.matdes.2011.06.059.
- [41] G. H. Payganeh, N. B. M. Arab, Y. Dadgar Asl, F. A. Ghasemi, and M. Saeidi Boroujeni, "Effects of friction stir welding process parameters on appearance and strength of polypropylene composite welds," *International Journal of the Physical Sciences*, vol. 6, no. 19, pp. 4595–4601, 2011, doi: 10.5897/IJPS11.866.
- [42] K. Panneerselvam and K. Lenin, "Joining of Nylon 6 plate by friction stir welding process using threaded pin profile," *Mater Des*, vol. 53, pp. 302–307, 2014, doi: 10.1016/j.matdes.2013.07.017.
- [43] A. Mostafapour and E. Azarsa, "A study on the role of processing parameters in joining polyethylene sheets via heat assisted friction stir welding: Investigating microstructure, tensile and flexural properties," *International Journal of the Physical Sciences*, vol. 7, no. 4, Jan. 2012, doi: 10.5897/ijps11.1653.
- [44] Z. Kiss and T. Czigány, "Applicability of friction stir welding in polymeric materials," *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, vol. 51, no. 1, pp. 15–18, 2007, doi: 10.3311/pp.me.2007-1.02.
- [45] Z. Kiss and T. Czigány, "Effect of welding parameters on the heat affected zone and the mechanical properties of friction stir welded poly(ethylene-terephthalate-glycol)," *J Appl Polym Sci*, vol. 125, no. 3, pp. 2231–2238, Aug. 2012, doi: 10.1002/app.36440.

- 
- [46] A. Bagheri, T. Azdast, and A. Doniavi, “An experimental study on mechanical properties of friction stir welded ABS sheets,” *Mater Des*, vol. 43, pp. 402–409, 2013, doi: 10.1016/j.matdes.2012.06.059.
- [47] S. M. Senthil and M. B. Kumar, “Effect of tool rotational speed and traverse speed on friction stir welding of 3d-printed polylactic acid material,” *Applied Science and Engineering Progress*, vol. 15, no. 1, 2022, doi: 10.14416/j.asep.2021.09.002.
- [48] N. Vidakis, M. Petousis, N. Mountakis, and J. D. Kechagias, “Material extrusion 3D printing and friction stir welding: an insight into the weldability of polylactic acid plates based on a full factorial design,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 121, no. 5–6, pp. 3817–3839, Jul. 2022, doi: 10.1007/s00170-022-09595-1.
- [49] S. Karna and R. Sahai, “An Overview on Taguchi Method,” *International Journal of Engineering and Mathematical Sciences*, vol. Volume 1, pp. 11–18, 2012, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/265282800>
- [50] M. R. Ayatollahi, A. Nabavi-Kivi, B. Bahrami, M. Yazid Yahya, and M. R. Khosravani, “The influence of in-plane raster angle on tensile and fracture strengths of 3D-printed PLA specimens,” *Eng Fract Mech*, vol. 237, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.engfracmech.2020.107225.
- [51] F. Lambiase, V. Grossi, and A. Paoletti, “Advanced mechanical characterization of friction stir welds made on polycarbonate,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 104, no. 5–8, pp. 2089–2102, Oct. 2019, doi: 10.1007/s00170-019-04006-4.
- [52] C. T. Seng, S. Y. A/l Eh Noum, S. K. A/l Sivanesan, and L. J. Yu, “Reduction of hygroscopicity of PLA filament for 3D printing by introducing nano silica as filler,” in *AIP Conference Proceedings*, May 2020, vol. 2233. doi: 10.1063/5.0001927.
- [53] W. H. Yang and Y. S. Tarng, “Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method,” 1998.

## APÊNDICE A



**Figura A.1.** Provete P2 da soldadura 8.

Legenda da Figura A.2:

T1 – Base da Impressão

T2 – Face Superior

L1 – Face exterior – horizontal

L2 – Face de corte - linha horizontal

V1 – Face exterior – linha vertical

V2 -Face de corte – linha vertical

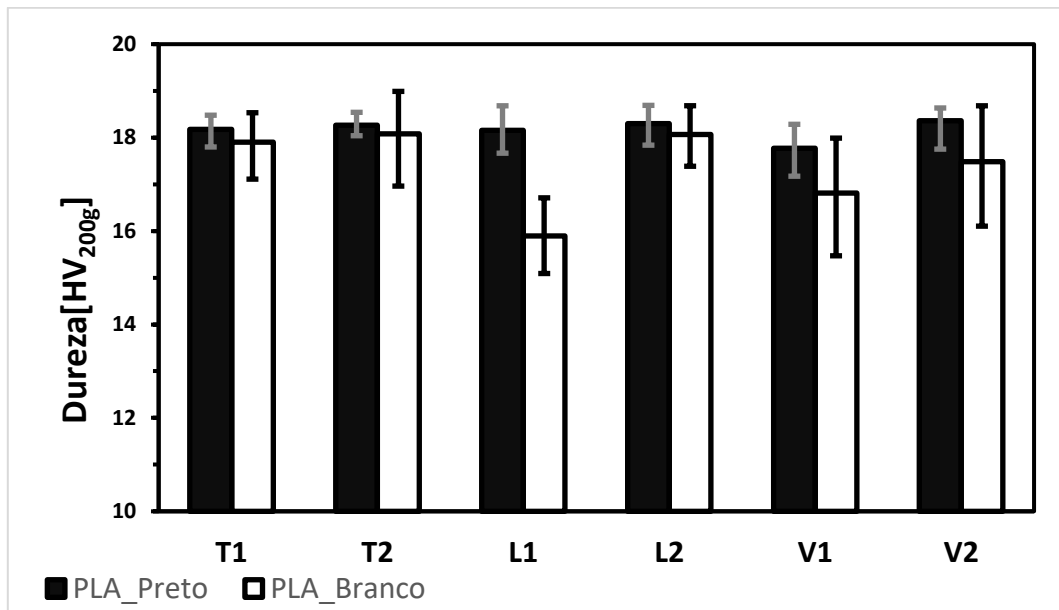


Figura A.2. Gráfico de dureza do material base.

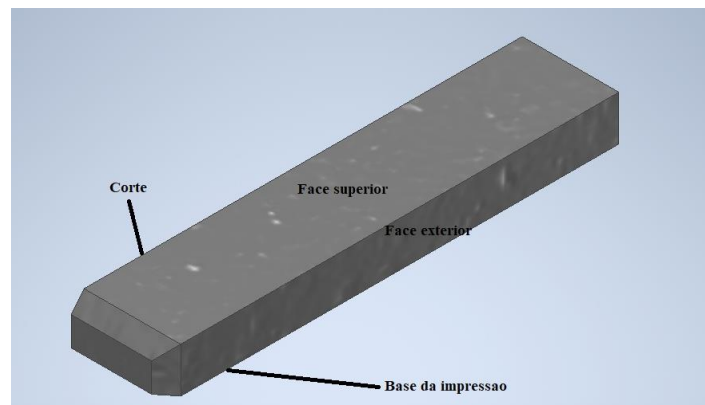


Figura A.3. Representação de uma amostra de material base.

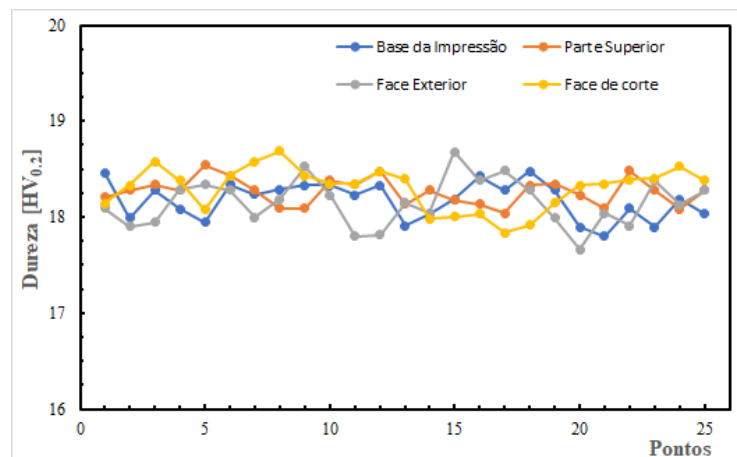


Figura A.4. Gráfico de dureza do PLA preto: linhas horizontais.



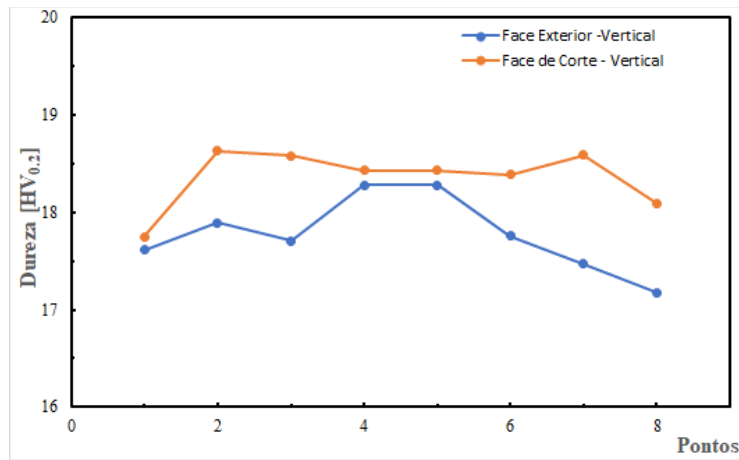


Figura A.5. Gráfico de dureza do PLA preto: linhas verticais.

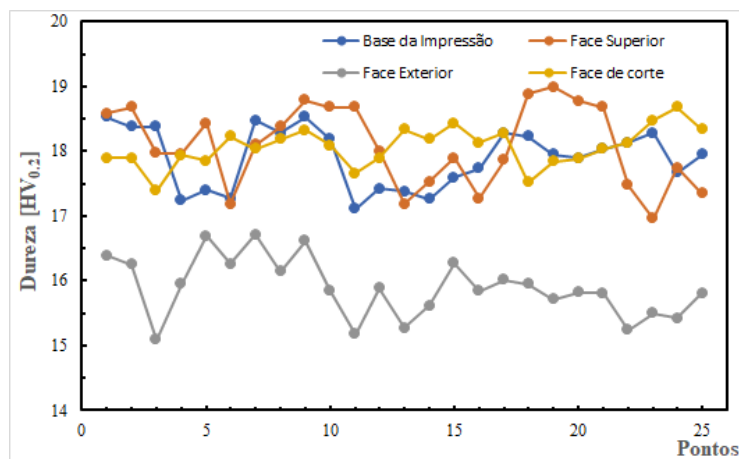


Figura A.6. Gráfico de dureza do PLA branco: linhas horizontais.

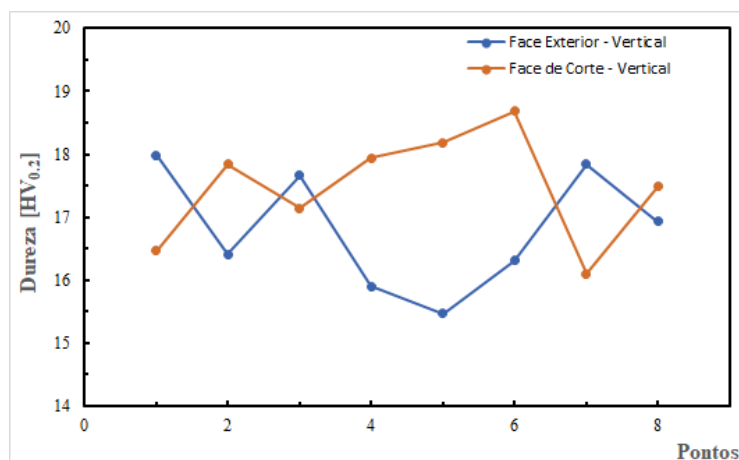
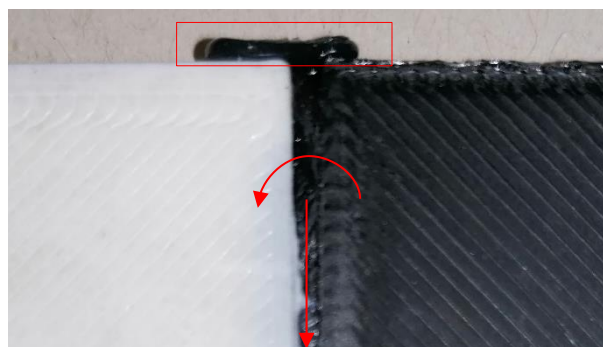
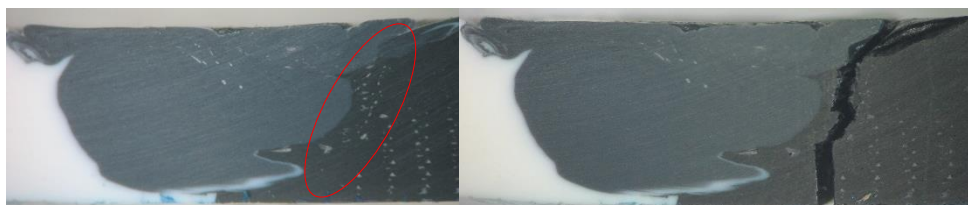


Figura A.7. Gráfico de dureza do PLA branco: linhas verticais.



**Figura A.8.** Soldadura 3D\_PLA\_10 vista inferior.



**Figura A.9.** Fratura do provete 3D\_PLA\_8\_P2