



PEDRO LEBRE BRANCO VIEIRA DE MELO  
Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

# DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO DE SOLDADURA POR FRICÇÃO LINEAR DE PLACAS DE PEEK PRODUZIDAS POR FA- BRICO ADITIVO

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA  
Universidade NOVA de Lisboa  
Dezembro, 2022





# DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO DE SOLDADURA POR FRICÇÃO LINEAR DE PLACAS DE PEEK PRODUZIDAS POR FABRICO ADITIVO

**PEDRO LEBRE BRANCO VIEIRA DE MELO**

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

**Orientadora:** Doutora Catarina Isabel Silva Vidal  
Professora Auxiliar, Universidade NOVA de Lisboa

**Júri:**

**Presidente:** Doutor Telmo Jorge Gomes dos Santos,  
Professor Catedrático, FCT-NOVA

**Arguentes:** Doutor Daniel Filipe Oliveira Braga,  
Investigador Coordenador, INEGI  
Doutor Bruno Alexandre Rodrigues Simões Soares,  
Professor Auxiliar, FCT-NOVA

**Orientador:** Doutora Catarina Isabel Silva Vidal,  
Professora Auxiliar, FCT-NOVA



## **DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO DE SOLDADURA POR FRICÇÃO LINEAR DE PLACAS DE PEEK PRODUZIDAS POR FABRICO ADITIVO**

Copyright © Pedro Lebre Branco Vieira de Melo, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

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



## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, deixo um agradecimento à minha orientadora, a Professora Doutora Catarina Vidal, pela oportunidade de realizar este trabalho tão desafiante, por toda a disponibilidade, orientação e conhecimento partilhado durante esta dissertação.

Ao Engenheiro Pedro Rendas deixo o meu profundo agradecimento, pelas muitas horas passadas no laboratório, pelo trabalho, dedicação e organização sem os quais teria sido impossível desenvolver todo o trabalho aqui apresentado.

Ao Sr. António Campos e ao Sr. Paulo Magalhães pelo auxílio prestado em todas as fases do trabalho experimental.

Aos companheiros desta viagem, Amélia, Basílio, Cátia, Dinis, Eugénio, Mafalda, Margarida e Miguel, por me terem acolhido vindo do outro lado do rio e que estiveram sempre presentes, nos melhores e piores momentos desta caminhada.

Aos meus fiéis amigos, Afonso Gonçalves, Dinis Forte, Francisco Gonçalves, Guilherme Dourado, Joana Ramos, Mariana Martins, Marta Marques e Ricardo Sebastião que enquanto ARC, mas também de forma distinta e individual foram fundamentais nos últimos 5 anos.

A todos os meus companheiros de equipa com quem passei demasiadas horas, ultrapassei alguns dos meus maiores obstáculos e vivi as maiores vitórias e derrotas.

Aos cabritos ao sal, em quem me apoiei para resistir aos difíceis tempos pandémicos, fazendo do surf uma fortaleza.

À Inês por ser uma fonte de simplicidade, paciência, amor (q.b) e por me ter ensinado a cozer esparguete e andar de bicicleta sem rodinhas.

Aos meus avós, Generosa e Luciano, por serem o exemplo a seguir, pelo molho para o entrecosto e pelo leite com cevada.

À minha irmã agradeço em avanço pelas consultas gratuitas e por ter ofuscado todo o meu percurso académico, foi um prazer.

E por fim, aos meus pais por me terem dado sempre a possibilidade de escolher o meu caminho.



“Para além da curva da estrada  
Talvez haja um poço, e talvez um castello.  
E talvez apenas a continuação da estrada.  
Não sei nem pergunto.  
Em quanto vou na estrada antes da curva  
Só olho para a estrada antes da curva.  
Porque não posso ver senão a estrada antes da curva.  
De nada me serviria estar olhando para outro lado  
E para aquilo que não vejo.  
Importemo-nos apenas com o logar onde estamos  
Ha belleza bastante em estar aqui e não noutra parte qualquer,  
Se ha alguém para além da curva da estrada,  
Esses que se preocupem com o que ha para além da curva da estrada,  
Essa é que é a estrada para elles.  
Se nós tivermos que chegar lá, quando lá chegarmos saberemos.  
Por ora só sabemos que lá não estamos  
Aqui há so a estrada antes da curva, e antes da curva  
Ha a estrada sem curva nenhuma.” (Alberto Caeiro).



## RESUMO

A soldadura por fricção linear (SFL) é uma tecnologia de ligação no estado sólido inicialmente desenvolvida para materiais metálicos em 1991 pelo *The Welding Institute* (TWI), tendo sido nos últimos anos alargada a outros materiais, como os polímeros, mais precisamente os termoplásticos. Devido às diferenças das propriedades dos termoplásticos relativamente aos materiais metálicos, surgiu a necessidade do desenvolvimento de variantes do processo de SFL que permitam obter melhores resultados nestes materiais.

O objetivo deste trabalho foi a conceção de um aparato experimental adequado para melhoria da aplicação de SFL em PEEK (Polyetheretherketone) e a caracterização das amostras produzidas.

Foram realizados ensaios em PEEK com a ferramenta concebida, de forma a avaliar a influência dos diferentes parâmetros operacionais nas propriedades mecânicas das amostras. As amostras foram caracterizadas através de análise visual, análise macrográfica da secção transversal do cordão de soldadura e ensaios de tração uniaxial. Foi ainda monitorizada a temperatura dos ensaios de SFL.

A ferramenta desenvolvida mostrou-se essencial para a melhoria dos resultados da aplicação de SFL em PEEK, nomeadamente na qualidade superficial das amostras, sem a presença de rebarba, independentemente dos parâmetros utilizados. Também a utilização de temperaturas de fontes externas foi essencial, os melhores resultados foram obtidos com temperatura de 165 °C.

**Palavras chave:** Soldadura por Fricção Linear, Fabrico Aditivo, Polímeros, PEEK.



## ABSTRACT

Friction Stir Welding (FSW) is a solid-state joining technology initially developed for metallic materials in 1991 by The Welding Institute (TWI) and has, in recent years, been extended to other materials such as polymers, most specifically thermoplastics. Due to the differences in the properties of thermoplastics in comparison to metallic materials, the need arose to develop variants of the FSW process to improve the results in these materials.

This thesis aims at improving the application of FSW in PEEK (Polyetheretherketone) by developing an FSW tool and a new experimental setup.

Tests were performed on PEEK with the designed tool, to evaluate the influence of the different operational parameters on the mechanical properties of the samples. The samples were characterised through visual analysis, macrographic analysis of the cross section of the weld nugget and uniaxial tensile tests. The temperature of the SFL tests was also monitored.

The developed tool proved to be essential for improving the results of the application of SFL in PEEK, namely in the superficial quality of the samples, without the presence of flash defects, independently of the parameters used. Also, the temperature from external sources was essential, the best results were obtained with a temperature of 165 °C.

**Keywords:** Friction Stir Welding, Additive Manufacturing, Polymers, PEEK.



# ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1	Enquadramento .....	1
1.2	Motivação e Objetivos .....	2
1.3	Estrutura do Documento.....	2
<b>2</b>	<b>ESTADO DA ARTE</b> .....	<b>3</b>
2.1	Polyetheretherketone (PEEK) .....	3
2.1.1	Descrição do PEEK .....	3
2.1.2	Propriedades térmicas e mecânicas do PEEK.....	4
2.2	Processos de ligação utilizados em PEEK.....	5
2.3	Fundamentos da SFL.....	6
2.4	Parâmetros operacionais da SFL .....	8
2.5	SFL convencional em polímeros.....	8
2.5.1	Parâmetros de processo do equipamento – $\Omega$ e $v$ .....	9
2.5.2	Parâmetros de processo da ferramenta - Influência da geometria do pino.....	9
2.5.3	Análise visual, microscópica, cristalinidade e escoamento do material.....	10
2.6	Variantes do processo de SFL convencional.....	14
2.6.1	SFL com <i>shoulder</i> estacionário.....	14

2.6.2	SFL com fonte externa de aquecimento .....	17
<b>3</b>	<b>PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>21</b>
3.1	Metodologia Experimental .....	21
3.2	Caracterização do material base .....	23
3.3	Realização dos cordões de SFL.....	25
3.3.1	Equipamento de SFL utilizado.....	25
3.3.2	Sistema de fixação das peças - <i>Backing Plate</i> .....	26
3.3.3	Desenvolvimento da ferramenta de SFL .....	28
3.3.4	Sistema de aquecimento e controlo de temperatura .....	32
3.4	Parâmetros utilizados nos ensaios de SFL e procedimento experimental .....	33
<b>4</b>	<b>APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....</b>	<b>37</b>
4.1	Caracterização Visual das Superfícies.....	37
4.1.1	Resultados em PLA.....	38
4.1.2	Análise dos Resultados em PLA.....	41
4.1.3	Resultados em PEEK.....	41
4.1.4	Análise dos Resultados em PEEK .....	45
4.2	Caracterização macrográfica das juntas soldadas de PEEK.....	45
4.2.1	Resultados em PEEK.....	46
4.2.2	Análise de Resultados em PEEK.....	47
4.3	Ensaio de Tração Uniaxial.....	49
4.3.1	Resultados em PLA.....	50
4.3.2	Resultados em PEEK.....	51
4.3.3	Análise de Resultados em PEEK.....	57
4.4	Análise da temperatura dos Ensaio de SFL em PEEK.....	59
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>61</b>

5.1	Conclusões.....	61
5.2	Trabalhos futuros .....	63
	<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>65</b>
<b>A</b>	<b>ANEXOS - DESENHOS TÉCNICOS .....</b>	<b>69</b>
A.1	Desenho Técnico da Base do Sistema de Fixação .....	69
A.2	Especificações técnicas para o rolamento 7200 BEP produzido pela SKF.....	70
A.3	Desenho técnico da Caixa de Montagem do Rolamento.....	71
A.4	Desenho técnico da Base do <i>Shoulder</i> .....	72
A.5	Desenho técnico do Pino da ferramenta .....	73
A.6	Geometria dos provetes para ensaio de tração uniaxial.....	74
A.7	Desenho técnico da moldura desenvolvida para o corte de provetes do ensaio de tração uniaxial .....	75
<b>B</b>	<b>ANEXOS - PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.....</b>	<b>76</b>
B.1	Procedimento dos Ensaios de Soldadura por Fricção Linear .....	76
B.2	Procedimento de Corte de Provetes de Tração Uniaxial .....	78
B.3	Procedimento de Ensaios de Tração Uniaxial.....	79
<b>C</b>	<b>ANEXOS - RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....</b>	<b>81</b>
C.1	DOE inicialmente planeado para a aplicação do método de Taguchi para o estudo de SFL em PEEK.....	81
C.2	Aspeto visual da face superficial e da raiz do cordão das placas de PEEK soldadas..	82
C.3	Ensaios de Tração Uniaxial em PLA.....	84
C.4	Medição de temperatura superficial das placas de PEEK, antes e após os ensaios de SFL- .....	85



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Estrutura química do PEEK, adaptado de [2].	4
Figura 2.2 - Representação esquemática do processo de SFL convencional, adaptado de [4].	7
Figura 2.3 - Parâmetros operacionais de SFL, adaptado de [12].	8
Figura 2.4 - Secção transversal das amostras de material soldado: A - 300 rev/min com 0°, B - 400 rev/min com 0°, C - 500 rev/min com 0°, D - 1000 rev/min com 0°, E - 300 rev/min com 3°, [19].	11
Figura 2.5 - Efeito do sentido de rotação na ejeção de material base, adaptado de [20].	11
Figura 2.6 - Análise microscópica de baixa ampliação: A - 300 rev/min com 0°, B - 400 rev/min com 0°, C - 500 rev/min com 0°, D - 300 rev/min com 3° [19].	12
Figura 2.7 - Análise microscópica de alta ampliação da superfície de fratura. A - 300 rev/min com 0°; B - 400 rev/min com 0°; C - 500 rev/min com 0°; D - 300 rev/min com 3° [11].	12
Figura 2.8 - Corte transversal das amostras soldadas, adaptado de [21].	13
Figura 2.9 - Observação microscópica do LR da amostra [21].	13
Figura 2.10 – A - Amostras soldadas com marcador colocado paralelamente à direção de soldadura; B – Secção transversal da junta soldada da zona com marcador no LR; C - Secção transversal da junta soldada da zona com marcador no LA [19].	14
Figura 2.11 - Ferramenta de SFL com <i>shoulder</i> estacionário: (a) Vista detalhada, (b) Componentes da ferramenta, [22].	15
Figura 2.12 - Secção transversal das amostras soldadas, [23].	16
Figura 2.13 - Variantes de SFL: a) <i>Shoulder</i> de duplo passo, (b) <i>Shoulder</i> de forma côncava., adaptado de [14].	17
Figura 2.14 - i-FSW: a) Representação esquemática, b) Montagem experimental., adaptado de [27].	18

Figura 2.15 - Esquema e montagem do sistema de <i>shoulder</i> estacionário aquecido, adaptado de [29].....	19
Figura 2.16 - Amostras de PA6 soldadas: a) Parâmetros incorretos, b) Parâmetros ideais, [28]. .....	19
Figura 2.17 - Ferramenta de <i>shoulder</i> estacionário com aquecimento externo por pistola de ar quente, [30].....	20
Figura 2.18 - Microscopia eletrónica de varrimento da superfície de fratura de: a) e b) amostra com menor qualidade e de: c) e d) amostra com maior qualidade, [30]......	20
Figura 3.1 - Placas de PEEK produzidas por fabrico aditiva: a) <i>Extruder Multiplier</i> = 0,9; b) <i>Extruder Multiplier</i> = 1. ....	24
Figura 3.2 - Fresadora convencional de quatro eixos: a) Controlo da velocidade de rotação, b) Controlo da velocidade de avanço, C) Controlo do posicionamento angular da cabeça. ....	26
Figura 3.3 - Sistema de fixação: a) Base do sistema de fixação, b) Sistema de fixação na mesa da fresadora.....	27
Figura 3.4 - Ferramenta de SFL: a) Vista Frontal e Secção de Corte A-A, b) Plano de corte do Modelo CAD 3D da ferramenta em perspetiva isométrica. Nomenclatura: Base do <i>Shoulder</i> Estacionário (1), Caixa de montagem do rolamento (2), Espaçador de baquelite para isolamento térmico (3), Rolamento de contacto angular (4), Casquilho isolador de Teflon (5), Ferramenta rotativa do pino (6). ....	28
Figura 3.5 - Caixa de montagem do rolamento: a) Modelo em CAD 3D, b) Componente fabricado.....	29
Figura 3.6 - Base do <i>Shoulder</i> : a) Modelo em CAD 3D, b) Componente fabricado.....	31
Figura 3.7 - Pino da Ferramenta de SFL: a) Evolução da versão inicial para a versão final - Modelo CAD 3D b) Versão final do pino fabricado.....	32
Figura 3.8 - Circuito elétrico para aquecimento do <i>Shoulder</i> ou da Base de suporte.....	33
Figura 3.9 - Encurvamento da superfície das placas de PEEK: a) Placas de PEEK na mesa de impressão, b) Superfície inferior com encurvamento, c) Resultado do encurvamento das placas na montagem.....	34
Figura 3.10 - a) Inclinação da ferramenta de SFL em relação ao eixo de rotação, b) Rolamento queimado.....	35
Figura 3.11 - Ensaio de SFL com o bloco de nivelamento colocado. ....	36

Figura 3.12 - Montagem do aparato experimental para aquecimento da base do sistema de fixação até 165°C.....	36
Figura 4.1 - Aspeto visual da superfície das placas soldadas com combinação de parâmetros 1 e 2.....	38
Figura 4.2 - Aspeto visual da superfície das placas soldadas com combinação de parâmetros 3 e 4.....	38
Figura 4.3 - Aspeto visual da superfície das placas soldadas com combinação de parâmetros 5 e 6.....	38
Figura 4.4 - Aspeto visual da superfície das placas soldadas com combinação de parâmetros 7 e 8.....	38
Figura 4.5 - Aspeto visual da superfície das placas soldadas com combinação de parâmetros 9. ....	39
Figura 4.6 - Conjunto de 3 repetições das combinações de parâmetros 1 e 4.....	39
Figura 4.7 - Aspeto visual da superfície das placas soldadas de PEEK: a) Ensaio 1, b) Ensaio 2. ....	42
Figura 4.8 - Aspeto visual da superfície das placas soldadas de PEEK: a) Ensaio 3, b) Ensaio 4. ....	43
Figura 4.9 - Aspeto visual da superfície das placas soldadas de PEEK: a) Ensaio 5, b) Ensaio 6. ....	43
Figura 4.10 - Aspeto visual da superfície das placas soldadas de PEEK do ensaio 7.....	43
Figura 4.11 - Macrografia dos cordões de SFL em PEEK: a) Ensaio 1, b) Ensaio 2.....	46
Figura 4.12 - Macrografia dos cordões de SFL em PEEK: a) Ensaio 3, b) Ensaio 4.....	46
Figura 4.13 - Macrografia dos cordões de SFL em PEEK: a) Ensaio 5, b) Ensaio 6.....	47
Figura 4.14 - Entrada de material através do casquilho de Teflon: a) Pino antes do ensaio, b) Pino após ensaio.....	48
Figura 4.15 - Macrografia das amostras de PEEK impressas: a) Com sobre extrusão. b) Com sub extrusão.....	49
Figura 4.16 - Equipamento utilizado para os ensaios de tração uniaxial.....	50
Figura 4.17 - Material Base .....	52
Figura 4.18 - Série de 3 ensaios com combinação de parâmetros 1.....	52
Figura 4.19 - Série de 3 ensaios com combinação de parâmetros 2.....	52
Figura 4.20 - Série de 3 ensaios com combinação de parâmetros 3.....	52
Figura 4.21 - Série de 3 ensaios com combinação de parâmetros 4.....	53
Figura 4.22 - Série de 3 ensaios com combinação de parâmetros 5.....	53

Figura 4.23 - Série de 3 ensaios com combinação de parâmetros 6.....	53
Figura 4.24 - Valor médio de Tensão Máxima dos 6 ensaios e respetivo desvio padrão.....	54
Figura 4.25 - Macrografia do provete após Ensaio 1: a) Superfície superior do provete, b) Superfície de fratura do cordão de soldadura do LR, c) Superfície de fratura da interface do material base com o LR.....	54
Figura 4.26 - Macrografia do provete após Ensaio 2: a) Superfície superior do provete, b) Superfície de fratura do cordão de soldadura do LR, c) Superfície de fratura da interface do material base com o LR.....	55
Figura 4.27 - Macrografia do provete após Ensaio 3: a) Superfície superior do provete, b) Superfície de fratura do cordão de soldadura do LR, c) Superfície de fratura da interface do material base com o LR.....	55
Figura 4.28 - Macrografia do provete após Ensaio 4: a) Superfície superior do provete, b) Superfície de fratura do cordão de soldadura do LR, c) Superfície de fratura da interface do material base com o LR.....	55
Figura 4.29 - Macrografia do provete após Ensaio 5: a) Superfície superior do provete, b) Superfície de fratura do cordão de soldadura do LR, c) Superfície de fratura da interface do material base com o LR.....	56
Figura 4.30 - Macrografia do provete após Ensaio 6: a) Superfície superior do provete, b) Superfície de fratura do cordão de soldadura do LR, c) Superfície de fratura da interface do material base com o LR.....	56
Figura 4.31 - Macrografia do provete com pior valor de ERJS após Ensaio 3: a) Superfície superior do provete, b) Superfície de fratura do cordão de soldadura do LR, c) Superfície de fratura da interface do material base com o LR. ....	57
Figura 4.32 - Medição da temperatura do rolamento: a) Câmara termográfica <i>Fluke Ti400</i> , b) Temperatura do rolamento durante o ensaio 1, c) Temperatura do rolamento durante o ensaio 4. ....	59
Figura A.1 - Desenho técnico da base do sistema de fixação de placas.....	69
Figura A.2 - Especificações técnicas para o rolamento 7200 BEP.....	70
Figura A.3 - Tabela de tolerância de fabrico para o Anel externo do rolamento 7200 BEP. ....	70
Figura A.4 - Tolerâncias e ajustes resultantes para montagem com aperto do rolamento 7200 BEP. ....	70
Figura A.5 - Desenho técnico da caixa de montagem do rolamento.....	71

Figura A.6 - Desenho técnico da Base do Shoulder.....	72
Figura A.7 - Desenho técnico do pino da ferramenta.....	73
Figura A.8 - Desenho técnico dos provetes para ensaio de tração uniaxial.....	74
Figura A.9 - Componente 1 da moldura de fixação para corte de provetes do ensaio de tração uniaxial.....	75
Figura A.10 - Componente 2 da moldura de fixação para corte de provetes do ensaio de tração uniaxial.....	75
Figura B.1 - Procedimento para corte de provetes de tração uniaxial: a) Montagem e fixação dos dois módulos da moldura, b) Resultado após procedimento de corte do provete, c) Provede cortado.....	79
Figura C.1 - DOE para aplicação do método de Taguchi inicialmente planeado para os ensaios de SFL em PEEK.....	81
Figura C.2 - Aspeto visual resultante do ensaio 1: a) Face superior do cordão, b) Raiz do Cordão. ....	82
Figura C.3 - Aspeto visual resultante do ensaio 2: a) Face superior do cordão, b) Raiz do Cordão. ....	82
Figura C.4 - Aspeto visual resultante do ensaio 3: a) Face superior do cordão, b) Raiz do Cordão. ....	82
Figura C.5 - Aspeto visual resultante do ensaio 4: a) Face superior do cordão, b) Raiz do Cordão. ....	83
Figura C.6 - Aspeto visual resultante do ensaio 5: a) Face superior do cordão, b) Raiz do Cordão. ....	83
Figura C.7 - Aspeto visual resultante do ensaio 6: a) Face superior do cordão, b) Raiz do Cordão. ....	83
Figura C.8 - Gráfico dos efeitos principais para as médias.....	84
Figura C.9 - Medição da temperatura superficial das placas no ensaio 1: a) Temperatura da superfície do PEEK antes do ensaio ,b) Temperatura da superfície do PEEK após o ensaio. ....	85
Figura C.10 - Medição da temperatura superficial das placas no ensaio 2: a) Temperatura da superfície do PEEK antes do ensaio ,b) Temperatura da superfície do PEEK após o ensaio. ....	85
Figura C.11 - Medição da temperatura superficial das placas no ensaio 3: a) Temperatura da superfície do PEEK antes do ensaio ,b) Temperatura da superfície do PEEK após o ensaio. ....	85
Figura C.12 - Medição da temperatura superficial das placas no ensaio 4: a) Temperatura da superfície do PEEK antes do ensaio ,b) Temperatura da superfície do PEEK após o ensaio. ....	86

Figura C.13 - Medição da temperatura superficial das placas no ensaio 5: a) Temperatura da superfície do PEEK antes do ensaio ,b) Temperatura da superfície do PEEK após o ensaio. ....86

Figura C.14 - Medição da temperatura superficial das placas no ensaio 6: a) Temperatura da superfície do PEEK antes do ensaio ,b) Temperatura da superfície do PEEK após o ensaio. ....86

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 - Parâmetros de processo de SFL e respectivos níveis. ....	22
Tabela 3.2 - Matriz ortogonal <i>Taguchi</i> L <sub>9</sub> utilizada. ....	22
Tabela 3.3 - Ensaio de SFL realizados em PEEK.....	23
Tabela 3.4 - Parâmetros de impressão de PEEK <i>Apium</i> 450 .....	23
Tabela 3.5 - Propriedades Físicas de PLA e PEEK, [3, 30-32].....	25
Tabela 3.6 - Propriedades mecânicas de PLA e PEEK, [31] [34]. ....	25
Tabela 3.7 - Parâmetros de corte utilizados para maquinagem da Base de Suporte. ....	28
Tabela 3.8 - Parâmetros de corte utilizados para maquinagem do Topo do <i>Shoulder</i> . ....	30
Tabela 3.9 - Parâmetros de corte utilizados para maquinagem da Base do <i>Shoulder</i> .....	31
Tabela 3.10 - Parâmetros operacionais constantes nos ensaios de SFL.....	33
Tabela 4.1 - Análise qualitativa do aspeto visual dos cordões de soldadura de cada combinação de parâmetros em PLA. ....	40
Tabela 4.2 - Ensaio de SFL realizados em PEEK.....	42
Tabela 4.3 - Análise qualitativa do aspeto visual dos diferentes cordões de soldadura obtidos em PEEK.....	44
Tabela 4.4 - Eficiência Relativa da Junta Soldada dos ensaios de SFL realizados em PEEK.....	51
Tabela 4.5 - Análise do tipo de fratura obtido em cada ensaio. ....	57
Tabela C.1 - Análise da Variância e Percentagem de contribuição. ....	84



## SIGLAS

<b>PEEK</b>	<i>Polyetheretherketone</i>
<b>PLA</b>	Poli (ácido láctico)
<b>FFF</b>	<i>Fused Filament Fabrication</i>
<b>SFL</b>	Soldadura por fricção linear
<b>SE</b>	<i>Shoulder</i> estacionário
<b>ERJS</b>	Eficiência relativa da junta soldada
<b>LA</b>	Lado em Avanço
<b>LR</b>	Lado em Retrocesso
<b>HDPE</b>	Polietileno de alta densidade
<b>HMWPE</b>	Polietileno de elevado peso molecular
<b>PMMA</b>	Poli (metil metacrilato) (Acrílico)
<b>PA6</b>	Nylon 6
<b>PA66</b>	Nylon 6,6
<b>PP</b>	Polipropileno
<b>DoE</b>	<i>Design of experiments</i>



## SÍMBOLOS

$T_g$	Temperatura de Transição Vítrea
$T_f$	Temperatura de Fusão
$\Omega$	Velocidade de rotação da ferramenta de SFL
$v$	Velocidade de avanço da ferramenta de SFL
$\sigma$	Tensão nominal
$\sigma_{máx}$	Tensão máxima
$\varepsilon$	Extensão nominal
$l$	Comprimento do provete durante o ensaio
$l_0$	Comprimento inicial do provete
$F$	Força
$A_0$	Área de secção transversal inicial do provete



# INTRODUÇÃO

Neste capítulo será feito um enquadramento do processo de SFL (Soldadura por Fricção Linear) explicitando a relevância da aplicação deste processo em PEEK (Polyetheretherketone) produzido por fabrico aditivo. Serão ainda apresentados os objetivos e a estrutura deste documento.

## 1.1 Enquadramento

O recente desenvolvimento e aparecimento de novas tecnologias de fabrico aditivo, conjuntamente com o aparecimento de novos materiais, permitiu a implementação do fabrico aditivo em indústrias com requisitos de produção muito específicos, como a indústria biomédica.

O PEEK (Polyetheretherketone) é um termoplástico semicristalino de alto desempenho com bastante potencial para ser produzido por fabrico aditivo, por *Fused Filament Fabrication* (FFF). A elevada resistência química, biocompatibilidade e propriedades mecânicas deste material, em conjunto com o seu potencial para fabrico aditivo, aumentam o interesse relativamente à aplicação deste material na indústria biomédica, nomeadamente para o fabrico de próteses. Existem, no entanto, alguns desafios relacionados com o fabrico aditivo do PEEK. As limitações dimensionais impostas pela utilização dos equipamentos avançados de FFF requerem a utilização de processos de ligação que permitam unir vários componentes impressos individualmente, sem comprometer a sua biocompatibilidade ou propriedades mecânicas.

Neste sentido, será estudada a aplicação do processo de Soldadura por Fricção Linear (SFL), em inglês *Friction Stir Welding* (FSW), em placas de PEEK produzidas por fabrico aditivo. SFL é

um processo de ligação no estado sólido, sem adição de consumíveis, desenvolvido e patenteado pelo *The Welding Institute* (TWI), no Reino Unido em 1991 [1].

## 1.2 Motivação e Objetivos

A motivação que levou à realização deste trabalho foi contribuir para o desenvolvimento da tecnologia de SFL em polímeros, através da aplicação de variantes do processo.

O objetivo principal deste estudo estudar a influência dos diferentes parâmetros de processo nas propriedades mecânicas das amostras soldadas. Para isso, foram definidos alguns objetivos, nomeadamente:

- Desenvolvimento e conceção de um aparato experimental adequado para a soldadura no estado sólido de PEEK;
- Realização de ensaios de soldadura por fricção linear em PEEK com as ferramentas concebidas, com diferentes parâmetros;
- Caracterização das amostras produzidas através de análise visual, análise macrográfica, ensaios mecânicos e monitorização da temperatura durante os ensaios de SFL.

## 1.3 Estrutura do Documento

O documento está estruturado em cinco capítulos.

No capítulo 2 apresenta-se uma revisão do estado da arte do polímero em estudo, PEEK, com especial atenção para os processos de ligação utilizados neste material. Sendo a SFL o método de ligação em estudo nesta dissertação, é feita de seguida uma revisão da literatura existente sobre SFL em polímeros e as diferentes variantes já estudadas.

No capítulo 3 é apresentada a metodologia e o procedimento experimental adotados, no capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados experimentais das diferentes técnicas de caracterização utilizadas e por último, no capítulo 5 apontam-se as conclusões gerais do trabalho apresentado bem como possíveis trabalhos futuros para a continuação do desenvolvimento desta área de estudo.

## ESTADO DA ARTE

Neste capítulo apresenta-se uma revisão da literatura existente sobre o PEEK e o seu fabrico por FFF, seguida dos diferentes processos de ligação utilizados para este material. Por último será feito um resumo alargado do estado da arte do processo de SFL, com especial foco na sua aplicação em polímeros, nomeadamente PEEK. Apresentam-se as diferentes variantes do processo e os estudos disponíveis sobre as mesmas.

### 2.1 Polyetheretherketone (PEEK)

#### 2.1.1 Descrição do PEEK

O Polyetheretherketone (PEEK) é um termoplástico semicristalino de elevado desempenho, pertencente ao grupo dos polyaryletherketone (PAEK), cuja aplicação tem suscitado um crescente interesse em diversos ramos da engenharia. O PEEK é um homopolímero linear, ou seja, um polímero cuja cadeia molecular é linear e constituída por repetições do mesmo monómero [2].

A estrutura química do PEEK, representada na Figura 2.1, torna este material pouco suscetível à corrosão química e degradação térmica, o que resulta em elevada biocompatibilidade, que em conjunto com as suas propriedades mecânicas, facilidade de esterilização e processamento, faz deste polímero uma alternativa aos metais para o fabrico de próteses médicas. Atualmente, o PEEK é comercializado em vários formatos, como *pellets*, pó, barras ou filamento.

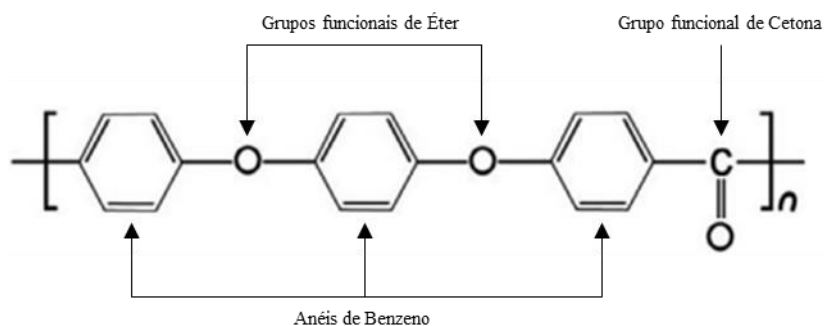


Figura 2.1 - Estrutura química do PEEK, adaptado de [2].

## 2.1.2 Propriedades térmicas e mecânicas do PEEK

É necessário estudar as propriedades e o comportamento térmico do PEEK para que se possa perceber de que forma as condições de elevada temperatura a que se sujeitará o polímero quer na sua produção, quer na aplicação de processos de ligação, afetam as propriedades mecânicas do material. O PEEK é um polímero semicristalino, a sua cadeia molecular é constituída por duas fases: cristalina e amorfa. Durante o aquecimento, os polímeros semicristalinos sofrem essencialmente duas transições térmicas, uma correspondente à Temperatura de Transição Vítreia ( $T_g$ ) e outra correspondente à Temperatura de Fusão ( $T_f$ ). A temperaturas inferiores a  $T_g$  o material tem um comportamento que se pode considerar frágil. Quando esta temperatura é ultrapassada, as cadeias poliméricas das regiões amorfas do material passam de um estado rígido para um estado mais flexível e de maior viscosidade, deslizando umas sobre as outras quando sujeitas a deformação. A partir de  $T_f$  também as cadeias poliméricas das zonas cristalinas passam a ter movimento relativo entre si e o material apresenta um comportamento fluido. A  $T_g$  do PEEK é de cerca de 145°C e a  $T_f$  aproximadamente 355°C [3].

A proporção entre as fases cristalina e amorfa define o grau de cristalinidade do polímero. As ligações intermoleculares da fase cristalina são mais fortes e a sua deformação requer mais energia, comparativamente à fase amorfa. Por esta razão, o PEEK com maior grau de cristalinidade apresenta melhores propriedades mecânicas, nomeadamente maior resistência à tração e ao corte [4]. O grau de cristalinidade do polímero depende essencialmente das condições de aquecimento e arrefecimento a que o material esteve sujeito até então. A técnica mais utilizada para avaliar a cristalinidade de polímeros é a *Differential Scanning Calorimetry* (DSC). Esta técnica permitiu observar que a recristalização do PEEK começa a ocorrer quando a temperatura atinge aproximadamente os 295°C, para o caso de arrefecimento do material, e

aproximadamente 177°C para aquecimento do material. É ainda referida uma relação entre taxas de arrefecimento mais lentas e um aumento do grau de cristalinidade do polímero [5]. Desta forma é importante controlar a aplicação de gradientes térmicos ao material de forma a controlar o grau de cristalinidade do polímero, que influencia as propriedades mecânicas do mesmo.

## 2.2 Processos de ligação utilizados em PEEK

Os diferentes polímeros podem ser divididos em três categorias: elastómeros, termoendurecíveis e termoplásticos. Os dois primeiros têm uma temperatura a partir da qual as cadeias de monómeros se degradam e tornam o polímero inutilizável. Os termoplásticos, por sua vez, podem sofrer um determinado número de ciclos de aquecimento e arrefecimento, atingindo a temperatura de fusão, sem se degradarem. Sendo o PEEK um termoplástico, podem ser equacionados processos de ligação por soldadura, que envolvam o aquecimento do material. Os processos tipicamente utilizados para a ligação de termoplásticos são: ligações por adesivos, fixação mecânica por aparafusamento e alguns processos de soldadura. Os dois primeiros apresentam algumas desvantagens, nomeadamente o maior impacto ambiental, limitação da gama de temperaturas de trabalho por parte dos adesivos e a concentração de tensões e aumento do peso pela utilização da fixação mecânica. Os processos de soldadura surgem assim como uma alternativa para a ligação de termoplásticos, baseando-se na formação de ligações moleculares entre os materiais.

As ligações moleculares que garantem a ligação entre os materiais são obtidas por aquecimento do material. O calor pode ser gerado de diferentes formas, consoante o processo de soldadura utilizado. Relativamente ao PEEK foi estudada a aplicação de dois grupos de processos de soldadura. O primeiro inclui processos em que o calor é gerado através de fenómenos eletromagnéticos e o segundo contempla processos em que o calor é gerado por movimento mecânico.

O primeiro grupo de processos inclui a Soldadura por Resistência e a Soldadura por Indução. Ambos os processos têm como base a aplicação de um elemento externo condutor na zona de soldadura. No caso da Soldadura por Resistência é aplicada uma corrente elétrica ao elemento externo que aquece por efeito de *Joule* e liberta o calor necessário para a entrada do material no regime visco-plástico, ou fusão do mesmo. Na Soldadura por Indução é gerado um campo magnético que através de correntes induzidas aquece o elemento externo, que produz desta forma o calor necessário. Apesar da aplicabilidade de ambos os processos de

soldadura no PEEK [6], [7], a utilização destes processos é indicada essencialmente para a produção de compósitos com matriz polimérica, uma vez que o elemento externo funciona como material de adição e alterará propriedades do material como a densidade, condutividade ou biocompatibilidade.

O segundo grupo de processos inclui a Soldadura por Ultrassons e a SFL. A Soldadura por Ultrassons foi utilizada pela primeira vez em termoplásticos em 1963 e utiliza energia ultrasónica de elevada frequência, entre 20 e 40 kHz, para produzir vibrações mecânicas de baixa amplitude que em conjunto com a aplicação de pressão permitem a entrada no regime viscoplástico ou fusão do material a unir [8]. Apesar do vasto estudo da aplicabilidade deste processo em termoplásticos, o processo preferencial para o estudo de aplicação em PEEK e que se detalhará daqui em diante será a Soldadura por Fricção Linear (SFL), devido aos seguintes fatores: Primeiramente devido à possibilidade de aplicação de fontes externas de temperatura e arrefecimento controlado no processo de SFL, que podem aumentar a fase cristalina do material. Em [9] refere-se também que as condições de ritmo de deformação elevada, presentes no processo de SFL, resultam no aumento da resistência à tração do PEEK. Adiciona-se por último a menor complexidade das ferramentas para o processo de SFL, comparativamente à soldadura por ultrassons.

## 2.3 Fundamentos da SFL

O processo de SFL, em inglês *Friction Stir Welding* (FSW), foi desenvolvido e patenteado pelo *The Welding Institute* (TWI), no Reino Unido em 1991 [1]. Inicialmente a SFL despertou interesse como processo de ligação de ligas de alumínio no estado sólido. Hoje em dia, devido ao desenvolvimento da tecnologia, é um processo cuja aplicação se estende a outras ligas metálicas como as de aço, titânio ou níquel ou polímeros [10]. Esta versatilidade da SFL possibilita a sua aplicabilidade em diversos ramos industriais, como o aeroespacial, automóvel, ferroviário ou naval [11]. A SFL é um processo de ligação de materiais no estado sólido, sem material de adição, em que a ligação se dá a temperaturas inferiores às temperaturas de fusão dos materiais envolvidos. Este é um processo aplicável em várias configurações de junta, como juntas sobrepostas, juntas em T ou juntas de canto, sendo mais utilizada em juntas topo a topo. Independentemente da configuração da junta, é importante garantir o correto alinhamento e posicionamento do material base. É por isso necessária a utilização de um sistema de fixação

e aperto que garanta o alinhamento dos topos do material base segundo uma linha paralela e a aplicação de pressão constante em todas as zonas.

A SFL convencional realiza-se através da introdução de uma ferramenta rotativa e não consumível na junta que se pretende soldar, sem necessidade de gás de proteção, conforme se representa na Figura 2.2.

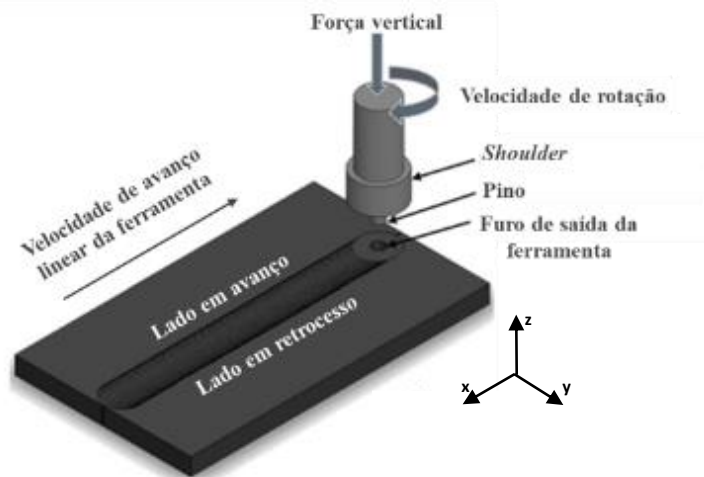


Figura 2.2 - Representação esquemática do processo de SFL convencional, adaptado de [4].

Do *shoulder* destaca-se um pino que terá um comprimento ligeiramente inferior à profundidade de penetração desejada. A aplicação de uma força vertical na ferramenta permite que o *shoulder* entre em contacto com a superfície de trabalho e que se dê a penetração total do pino na junta a soldar.

Estabelecidas as condições iniciais de fixação das peças a soldar e o posicionamento da ferramenta, inicia-se o movimento linear de avanço desta que mantém uma velocidade de rotação constante. Durante este processo, o calor necessário para provocar o amolecimento do material é produzido pelo fluxo visco-plástico do material, imposto pela rotação do pino, e também pelo atrito superficial desenvolvido entre o material a soldar e o *shoulder*. O amolecimento do material base juntamente com a sua deformação plástica provoca o escoamento e mistura do material em torno da ferramenta dando origem a uma junta soldada. Como se observa na Figura 2.2, a assimetria de uma junta produzida por SFL é caracterizada por duas zonas distintas. A zona em que a velocidade de avanço linear da ferramenta tem o mesmo sentido da velocidade de rotação, denomina-se lado em avanço (LA). O lado em retrocesso (LR) é a zona em que estas velocidades têm sentidos opostos. O facto da SFL se processar a temperaturas inferiores à temperatura de fusão faz com que problemas decorrentes da solidificação como a formação de novas fases, porosidades, ou fissuras, ou resultantes dos ciclos térmicos, como distorção e tensões residuais, não se verifiquem [10].

## 2.4 Parâmetros operacionais da SFL

O ajuste correto dos diferentes parâmetros é crucial para a obtenção de bons resultados, na medida em que influenciam as propriedades finais do cordão de soldadura. Aos parâmetros do processo convencional juntam-se parâmetros auxiliares que se relacionam com adaptações feitas ao processo de SFL convencional. A utilização de fontes de aquecimento externas é uma das adaptações possíveis e é especialmente importante para a aplicação de SFL em polímeros, como se detalhará mais à frente. Na Figura 2.3 apresenta-se um esquema detalhado dos diferentes parâmetros operacionais da SFL.

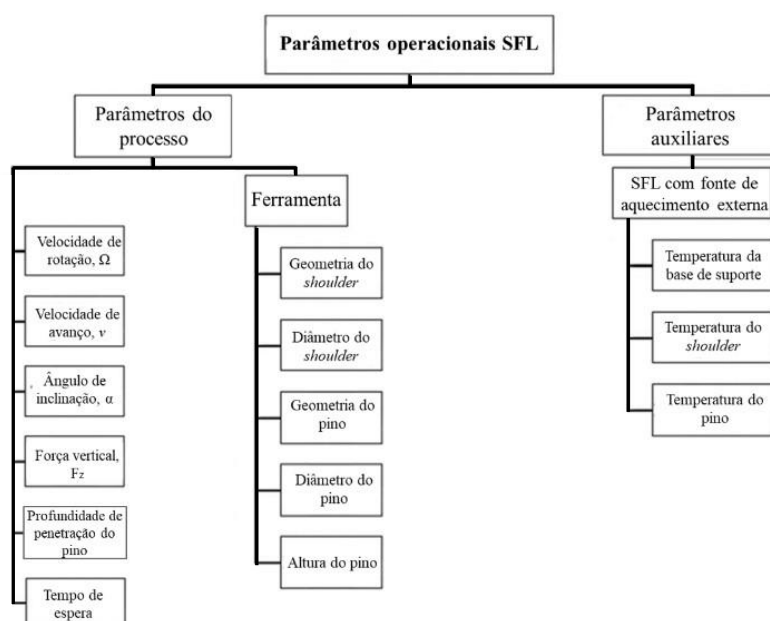


Figura 2.3 - Parâmetros operacionais de SFL, adaptado de [12].

## 2.5 SFL convencional em polímeros

A SFL foi inicialmente desenvolvida para ligas de alumínio difíceis de soldar através das técnicas de soldadura convencionais. Devido ao seu sucesso, esta nova técnica foi depois aplicada em diversos materiais metálicos e em 1997 foi pela primeira vez demonstrada em polímeros [13]. Ao contrário do que acontece nos materiais metálicos, a SFL de polímeros não é um processo de soldadura exclusivamente no estado sólido. Devido a variações do comprimento das

cadeias que compõem os materiais poliméricos, a mudança de fase não ocorre a uma temperatura definida mas sim numa gama de temperaturas [13].

Primeiramente, a SFL foi aplicada em termoplásticos sem quaisquer modificações à ferramenta convencional e foram obtidos resultados satisfatórios, nomeadamente a eficiência relativa da junta soldada (ERJS), que relaciona a resistência à tração da junta soldada com a resistência do material base. Em [14] são apresentados valores entre 18 e 55% para PA6, e PA66. Para outros materiais como HDPE e PC, os resultados variam entre 70 e 80%.

### 2.5.1 Parâmetros de processo do equipamento – $\Omega$ e $v$

Um dos desafios da SFL nos polímeros é a utilização dos parâmetros de processo corretos, em especial a velocidade de rotação da ferramenta  $\Omega$  e velocidade de avanço da ferramenta  $v$  que têm grande influência no calor gerado no material base e na qualidade superficial da junta soldada. Em [13] e [15] é possível encontrar resultados de eficiência relativa da junta para diferentes valores de  $\Omega$  e  $v$ , utilizando um pino cilíndrico para soldar HDPE, o que facilita a interpretação da influência dos parâmetros variáveis. Os valores mais elevados de ERJS, 94,9% e 89,5% foram obtidos respetivamente para:  $\Omega = 3000$  rev/min e  $v = 115$  mm/min e  $\Omega = 930$  rev/min e  $v = 25$  mm/min. Apesar de bastante díspares, os valores da entrega térmica são semelhantes se for tido em conta o quociente  $\Omega/v$ . Para o primeiro caso tem-se  $\Omega/v = 26,09$  rev/mm e para o segundo  $\Omega/v = 37,20$  rev/mm.

Em [16], a aplicação da ANOVA, um método de análise de variâncias dos resultado de ensaios variando de velocidade de rotação, velocidade de avanço e ângulo de ataque, permitiu concluir que a velocidade de rotação da ferramenta  $\Omega$  é o parâmetro com maior influência na qualidade da junta soldada, contribuindo 73,85% da totalidade dos parâmetros. A velocidade de avanço  $v$  contribui com 20,18% e o ângulo de ataque é o parâmetro menos significativo com apenas 5,96% de contribuição para a qualidade da junta soldada.

### 2.5.2 Parâmetros de processo da ferramenta - Influência da geometria do pino

Existe um número considerável de estudos sobre o efeito de diferentes perfis do pino da ferramenta na qualidade da junta soldada. Como seria de esperar, os resultados variam consoante o material base em estudo. Em [15], para o caso de o material base ser HDPE, conclui-se que o pino de geometria cilíndrica permite a obtenção de melhor ERJS. Contudo, para ABS sugere-se que o pino que permite obter melhor ERJS é o de geometria cônica. Em [17], para HDPE,

são apresentados melhores resultados também para o pino de geometria cilíndrica, no que diz respeito à resistência à fluência. Em [18] é efetuado o mesmo estudo em PLA (poli(ácido láctico)) e a geometria de pino que permite obter juntas soldadas com melhor qualidade superficial e maior ERJS é o pino cilíndrico. Neste artigo é feita uma análise da distribuição de temperaturas através da utilização de uma câmara termográfica de infravermelhos. A utilização do pino de geometria cilíndrica e dos parâmetros ótimos,  $\Omega$  e  $\nu$ , resultou nas menores temperaturas durante a soldadura, entre os 75 e 110°C, valores ligeiramente superiores à temperatura de transição vítrea do material e que se revelaram ser os mais benéficos para a qualidade da junta soldada.

### 2.5.3 Análise visual, microscópica, cristalinidade e escoamento do material

Em [19] foi feito um estudo relativo à aplicação de SFL em placas de PA6 com 16 mm de espessura. Foi obtido um valor de ERJS de 32% para  $\Omega = 300$  rev/min e  $\nu = 25$  mm/min. Apesar de ser um valor de ERJS relativamente baixo, este estudo é particularmente relevante. Para além estudar as amostras obtidas através de ensaios de tração uniaxial, que permitem calcular a ERJS da junta soldada, é feita uma análise visual da morfologia dos provetes e dos defeitos existentes. As superfícies de fratura são também analisadas por microscopia eletrónica de varrimento, é avaliada a cristalinidade através de um ensaio de análise calorimétrica diferencial, e é ainda estudado o escoamento do material durante o processo de SFL. Esta análise completa permite entender detalhadamente estes fenómenos que influenciam diretamente os resultados obtidos.

O estudo foi realizado para velocidades de rotação de  $\Omega = 300, 400, 500$  e  $1000$  rev/min, ângulo de ataque de  $0^\circ$  e para uma velocidade de avanço de  $\nu = 25$  mm/min. Foi ainda obtida uma amostra para  $\Omega = 300$  rev/min,  $\nu = 25$  mm/min e ângulo de ataque de  $3^\circ$ . A análise visual das amostras, Figura 2.4, permite uma análise da qualidade superficial das amostras. Em todas elas observa-se a formação de defeitos na forma de *flashes*. No entanto, para menores velocidades de rotação há menos ejeção de material. Conclui-se então que velocidades de rotação demasiado elevadas resultam numa menor qualidade superficial e redução de espessura da junta, devido à ejeção de quantidades significativas de PA6, reduzindo a resistência à tração da junta soldada. Observa-se também que a formação de *flashes* ocorre sobretudo no LR, indicando que a temperatura nesta zona é superior à temperatura do LA.

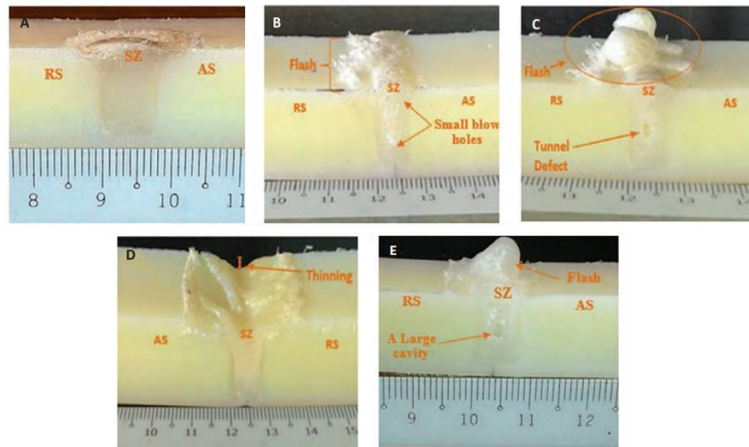


Figura 2.4 - Secção transversal das amostras de material soldado: A - 300 rev/min com 0°, B - 400 rev/min com 0°, C - 500 rev/min com 0°, D - 1000 rev/min com 0°, E - 300 rev/min com 3°, [19].

Em [20] é estudada a utilização de um pino cilíndrico roscado para a SFL de placas de PA6. Conclui-se que o sentido de rotação de um pino roscado influencia a qualidade da junta soldada obtida. Como observado na Figura 2.5, utilizando uma rosca esquerda com sentido de rotação horário obtêm-se melhores resultados, menor ejeção de material base, melhor qualidade superficial e menor número de porosidades na junta soldada.

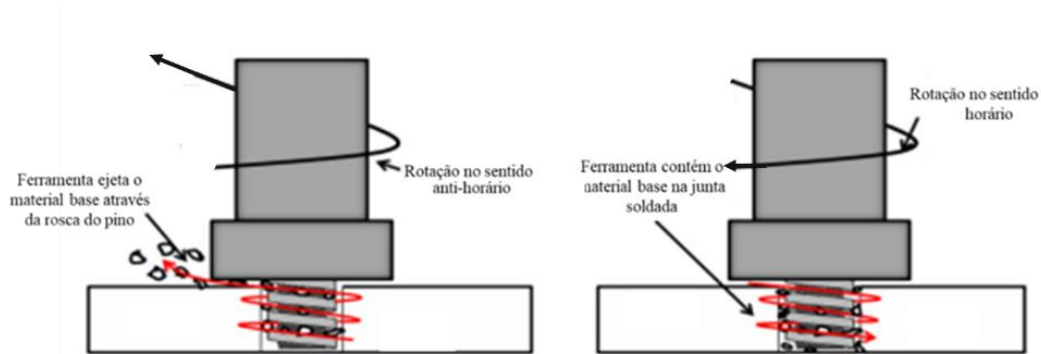


Figura 2.5 - Efeito do sentido de rotação na ejeção de material base, adaptado de [20]

Como referido anteriormente, em [19] é feita a análise da secção transversal da junta soldada por microscopia ótica com baixa ampliação, Figura 2.6, e de seguida por microscopia eletrónica de varrimento com alta ampliação, Figura 2.7. A amostra da Figura 2.6A apresenta excelente qualidade superficial, ao contrário das amostras soldadas a velocidades de rotação superiores que apresentam defeitos como pequenas porosidades, defeito do tipo túnel e cavidades de grande dimensão, causados pela excessiva quantidade de calor gerado. Contudo, nesta amostra também é possível detetar um defeito de falta de ligação na zona inferior da interface do LR.

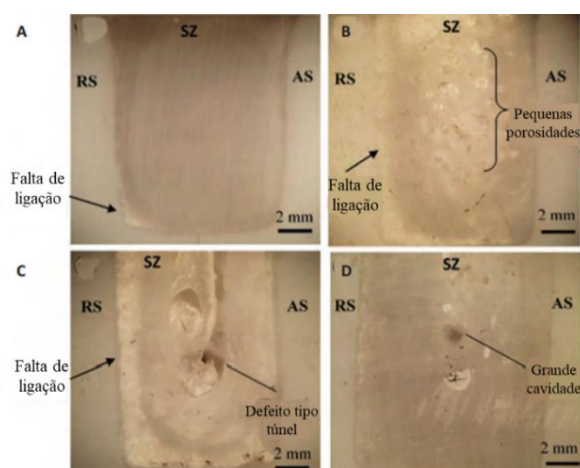


Figura 2.6 - Análise microscópica de baixa ampliação: A - 300 rev/min com 0°, B - 400 rev/min com 0°, C - 500 rev/min com 0°, D - 300 rev/min com 3° [19].

A observação da Figura 2.7 torna clara a influência da velocidade de rotação na microestrutura da junta soldada. A amostra da Figura 2.7 A apresenta grande qualidade superficial, enquanto as restantes apresentam uma superfície irregular, que contribui para a existência de pontos de concentração de tensão. Assim, conclui-se que devido à baixa viscosidade do material PA6, é benéfica a utilização de baixas velocidades de rotação.

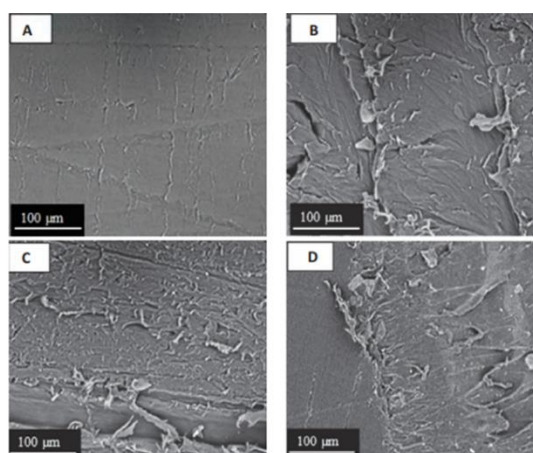


Figura 2.7 - Análise microscópica de alta ampliação da superfície de fratura. A - 300 rev/min com 0°; B - 400 rev/min com 0°; C - 500 rev/min com 0°; D - 300 rev/min com 3° [11].

Em [19] observa-se também que em todas as amostras a fratura se dá no LR, permitindo concluir que esta é a zona mais frágil da junta soldada. Por esta razão foi analisada a cristalinidade das diferentes zonas da junta soldada, o LA é a região com maior grau de cristalinidade, enquanto o LR e o centro da junta soldada são as regiões com menor grau de cristalinidade. O baixo grau de cristalinidade em conjunto com a falta de ligação entre o material do LR e o

material base são a razão para que esta seja a região mais frágil e onde ocorre preferencialmente a fratura.

Em [21] conclui-se também que a interface do LR tem uma qualidade inferior. É estudada a aplicação de SFL em placas de PMMA. A análise visual das secções transversais da junta soldada, Figura 2.8, permite identificar diferenças na morfologia da amostra no LA e LR.

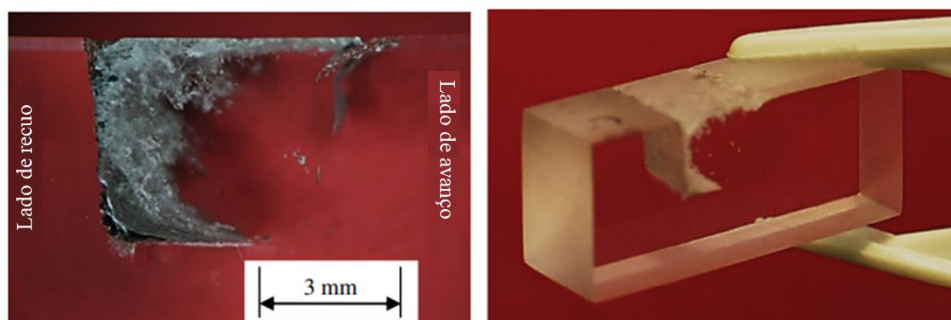


Figura 2.8 - Corte transversal das amostras soldadas, adaptado de [21].

O LA apresenta uma morfologia e transparência muito semelhante ao material base, enquanto no LR observa-se uma zona não transparente na interface com o material base indicando menor qualidade de ligação nesta zona.

A observação microscópica do LR, apresentada na Figura 2.9, corrobora a observação visual da Figura 2.8. É detetado um grande número de vazios, devido a uma mistura e escoamento incorretos do material, sendo de esperar que esta seja a zona com menor resistência mecânica.

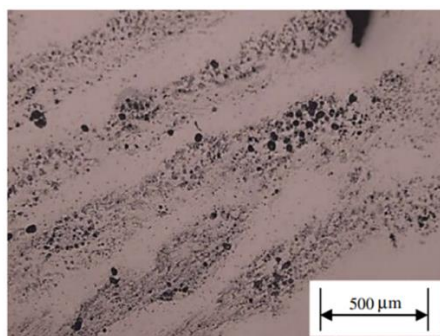


Figura 2.9 - Observação microscópica do LR da amostra [21].

Por esta razão, em [19] considerou-se relevante analisar pormenorizadamente o escoamento do material durante o processo de soldadura. Para este efeito, foram colocadas camadas de 1.5 mm de espessura de ABS de cor vermelha em diferentes zonas de ligação entre as duas placas de PA6, que funcionaram como marcador.

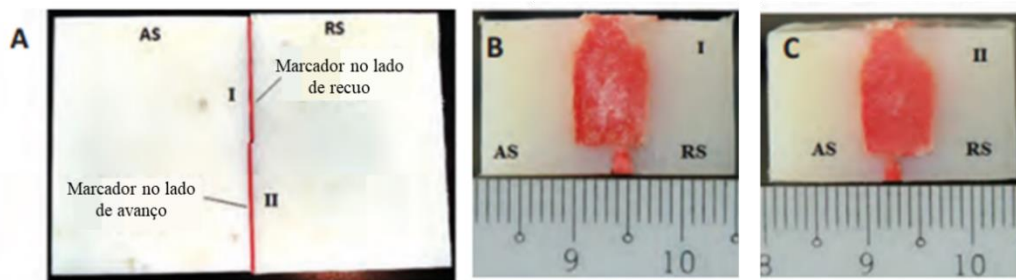


Figura 2.10 – A - Amostras soldadas com marcador colocado paralelamente à direção de soldadura; B – Secção transversal da junta soldada da zona com marcador no LR; C - Secção transversal da junta soldada da zona com marcador no LA [19].

Na Figura 2.10 observa-se, na zona inferior de ambas as amostras, uma quantidade de marcador consideravelmente inferior. Esta zona corresponde à distância entre a base do pino e a superfície inferior do material base, portanto à zona em que não ocorre penetração do pino. Esta observação indica que nesta zona não houve mistura do material, resultando na existência de defeitos na raiz do cordão por falta de penetração.

Apesar de satisfatórios para primeira iteração, os resultados da aplicação da técnica convencional de SFL a termoplásticos são inferiores aos resultados obtidos para os metais. Isto deve-se à grande diferença entre as propriedades dos metais e dos materiais termoplásticos em termos de resistência, escoamento do material, temperatura de fusão e condutividade térmica [14]. Analisando estas diferenças, os defeitos resultantes da ligação de termoplásticos e relacionando-os com as diferentes funções das ferramentas convencionais de SFL, foi possível otimizar as ferramentas para se tornarem adequadas a materiais termoplásticos, criando variantes do processo convencional de SFL.

## 2.6 Variantes do processo de SFL convencional

### 2.6.1 SFL com *shoulder* estacionário

Devido à baixa condutividade térmica dos termoplásticos, comparativamente à dos metais, o calor gerado pela rotação do *shoulder* da ferramenta concentra-se na superfície do material, resultando num gradiente térmico no material base, o que leva à ejeção de material da junta soldada, dando origem ao denominado defeito de formação de *flashes*, ou rebarba. O desafio é modificar a ferramenta de modo que consiga conter o material processado dentro da junta

a soldar. Uma das soluções encontradas é a utilização de um rolamento entre o *shoulder* e o pino, permitindo que o *shoulder* não rode e, portanto, o único elemento em rotação seja o pino. A utilização de uma ferramenta com o *shoulder* estacionário permite a redução de ejeção do material, melhorando a qualidade superficial e as propriedades mecânicas da junta soldada. Na Figura 2.11 está representada uma ferramenta com *shoulder* estacionário e os seus componentes, nomeadamente o *shoulder* fabricado em teflon, um rolamento e o pino rotativo. Como se pode observar, é adicionada uma placa de cobre na base do *shoulder* para aumentar o calor gerado. Desta forma compensa-se a menor quantidade de calor gerado pela ferramenta com *shoulder* estacionário.

Em [22] é estudada a aplicação de SFL-SE (SFL com *shoulder* estacionário), Figura 2.11, em placas de HMWPE com 3 mm de espessura, com  $\Omega = 2500 \text{ rev/min}$  e  $v = 50 \text{ mm/min}$ , tendo sido obtida uma ERJS de 97%. Segundo os autores este resultado deve-se à utilização da placa de cobre em conjunto com o *shoulder* estacionário. A placa de cobre na base do *shoulder* permitiu o pré-aquecimento do HMWPE antes da ação rotativa do pino resultando numa melhor distribuição de temperatura no material base. Ainda assim, a fratura do material registou-se maioritariamente no LR, confirmando a tendência verificada para a SFL convencional.

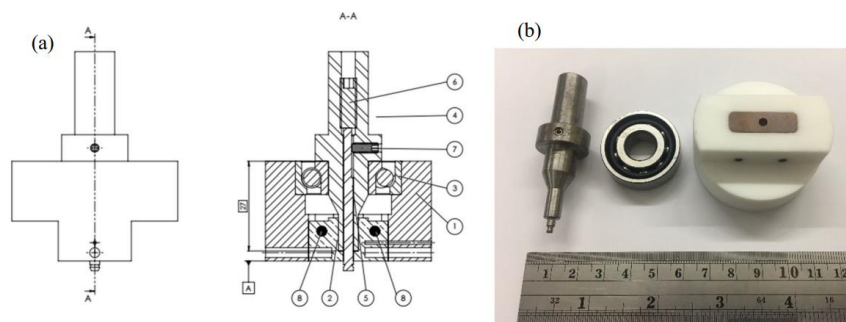


Figura 2.11 - Ferramenta de SFL com *shoulder* estacionário: (a) Vista detalhada, (b) Componentes da ferramenta, [22].

Em [23] é aplicada a SFL-SE em placas de HDPE de 8.5 mm, utilizando um *shoulder* em madeira e com o calor a ser exclusivamente gerado pela ação rotativa do pino. Com  $\Omega = 1036 \text{ rev/min}$  e  $v = 14 \text{ mm/min}$ , foi obtida uma ERJS de 91% e uma elevada qualidade superficial, sem a existência de defeitos, como se verifica na Figura 2.12. A localização preferencial da fratura do material foi registada também no LR.

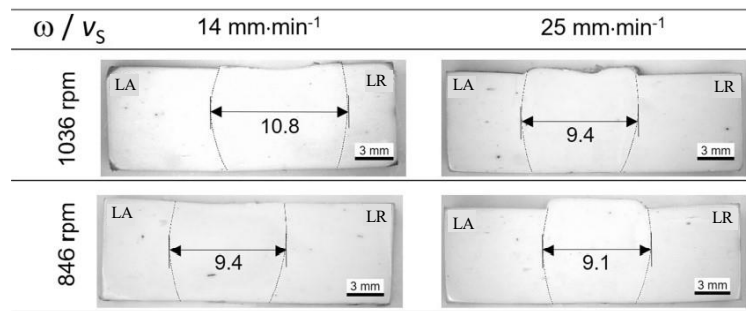


Figura 2.12 - Secção transversal das amostras soldadas, [23].

No artigo de revisão [13] é feita uma comparação entre os resultados de eficiência relativa da junta soldada por SFL convencional e SFL-SE para HDPE e PP, obtidos em diversos estudos e é possível observar que na generalidade o valor de ERJS com *shoulder* estacionário é superior. Esta análise permite concluir que em termos gerais a utilização do *shoulder* estacionário se traduz numa melhoria da qualidade da junta soldada, explicada pela melhor qualidade superficial e ausência de defeitos.

Existem outras adaptações da SFL que permitem eliminar ou reduzir a ejeção de material melhorando a qualidade superficial que se relaciona diretamente com a qualidade da junta soldada. Uma delas é a utilização de um *shoulder* de duplo passo, representado na Figura 2.13, que consiste na utilização de dois *shoulders*. O *shoulder* que contacta com o material base tem um diâmetro inferior, o que resulta numa redução do calor gerado por fricção do *shoulder* com o material base. No artigo de revisão [14] são apresentados resultados de três estudos utilizando SFL com *shoulder* de duplo passo, sendo que o valor mais elevado de eficácia relativa da junta soldada foi obtido para um junta dissimilar de ABS e PC com 6 mm de espessura. A ERJS foi de 73.16% e foi obtida para  $\Omega = 1600$  rev/min e  $v = 12$  mm/min.

O *shoulder* pode ter uma geometria plana, convexa ou côncava, a utilização de uma forma côncava, representada na Figura 2.13 b), permite também a redução da ejeção de material da junta soldada. Devido à menor área de contacto entre o *shoulder* e o material base, é gerada menor temperatura na superfície do material, resultando num melhor acabamento superficial [14].

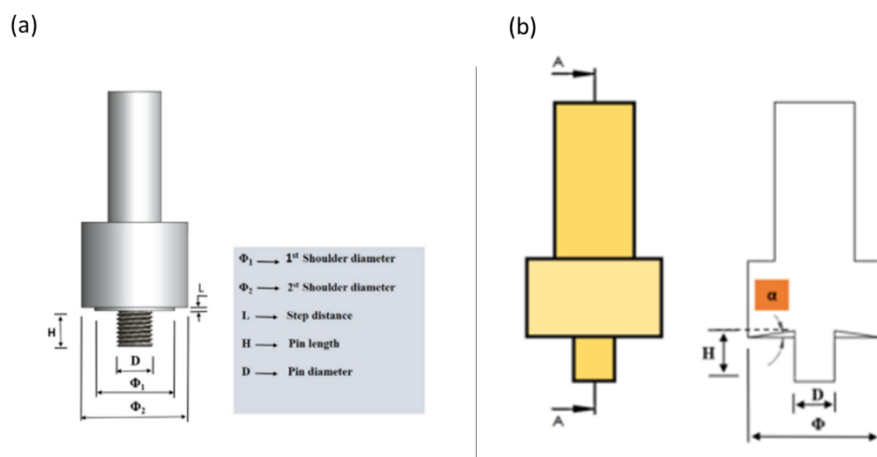


Figura 2.13 - Variantes de SFL: a) *Shoulder* de duplo passo, (b) *Shoulder* de forma côncava., adaptado de [14].

## 2.6.2 SFL com fonte externa de aquecimento

Como se referiu anteriormente, a escolha dos parâmetros operacionais corretos permite a obtenção de juntas com melhores propriedades. São estes parâmetros que influenciam a quantidade de calor gerado no processo. A baixa condutividade e difusidade térmicas dos termoplásticos, resulta em gradientes de temperatura acentuados no material, dificultando a transmissão do calor gerado à superfície. Em zonas da junta soldada com temperatura de trabalho demasiado baixa podem surgir defeitos como vazios no LR [24], ou fraca aderência entre as interfaces do material a unir [25]. Assim, surgiu o interesse na utilização de fontes externas de aquecimento na SFL que permitam uma diminuição da necessidade de calor gerado por fricção entre a ferramenta e o material tornando a transmissão do calor mais uniforme para todo o material a soldar.

### 2.6.2.1 Pré-aquecimento do material base

Em 2010 foi estudada a influência da utilização de aquecimento externo em SFL convencional para polímeros [26]. O aquecimento foi introduzido através do pré-aquecimento do material base, placas de 4 mm de espessura de UHWM-PE (polietileno de alta densidade molecular), a 50°C e 80°C. À temperatura ambiente, 17°C, foi obtido um valor máximo de ERJS de 72% e foram detetadas porosidades e cavidades, resultado de temperatura insuficiente. Com o pré-aquecimento do material a 50°C,  $\Omega = 960$  rev/min e  $v = 20$  mm/min, o valor máximo de ERJS aumentou para 89%, tendo desaparecido os defeitos anteriormente registados.

### 2.6.2.2 Aquecimento da ferramenta de SFL convencional

Apesar da comprovada eficácia do pré-aquecimento do material base, este é um processo complexo e demorado, para além disso, a manutenção do polímero a uma temperatura constante durante o processo de SFL representa também um desafio. Por esta razão foram desenvolvidas soluções para o aquecimento da ferramenta de SFL. Em [27] estuda-se a adaptação da ferramenta convencional, para a junção de placas de HDPE com 5 mm de espessura, através de uma técnica denominada *i-FSW*. A ferramenta é aquecida através de uma bobina de indução, como se observa na Figura 2.14 e é ainda utilizado um sensor de temperatura, que permite a manutenção da temperatura constante da ferramenta.

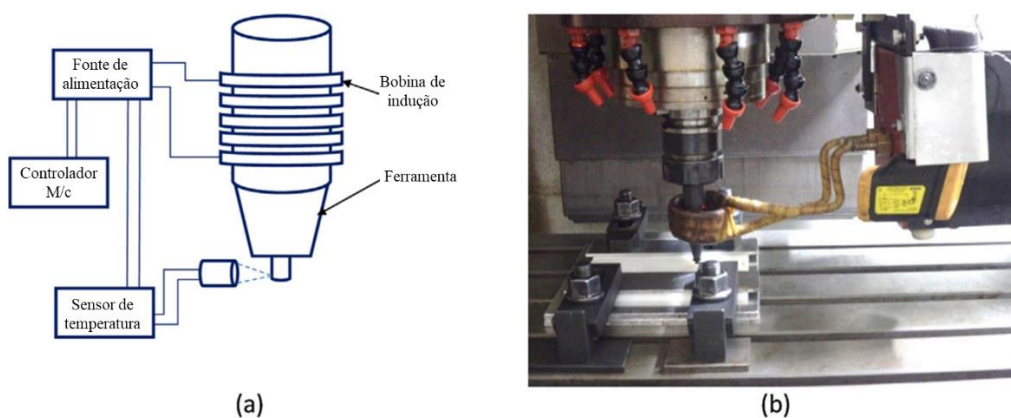


Figura 2.14 - i-FSW: a) Representação esquemática, b) Montagem experimental., adaptado de [27].

Sem a aplicação de calor externo, e para  $\Omega = 3000$  rev/min e  $v = 50$  mm/min o valor máximo de eficiência relativa da junta obtido foi de 50%. Aquecendo a ferramenta a  $45^{\circ}\text{C}$  e para os parâmetros  $\Omega = 2000$  rev/min e  $v = 50$  mm/min obteve-se um valor de ERJS de 104,3%, concluindo-se que o aquecimento da ferramenta a  $45^{\circ}\text{C}$  resulta num aumento do valor de ERJS. Para valores superiores a  $45^{\circ}\text{C}$  a ductilidade do material aumenta, o que resulta numa diminuição do valor de ERJS.

### 2.6.2.3 Aquecimento da ferramenta de SFL com *shoulder* estacionário aquecido

No processo de SFL convencional o *shoulder* é responsável pela geração de 75% de todo o calor fornecido ao material base [24]. Por esta razão foram desenvolvidas alternativas combinando a utilização do *shoulder* estacionário com fontes de aquecimento externo que permitam atingir temperaturas de trabalho favoráveis para a obtenção de bons resultados.

Em 2016, foi estudada a utilização de um *shoulder* estacionário aquecido, longo e com forma retangular, representado na Figura 2.15, para a ligação de placas de PA6 com 6 mm de espessura [28].

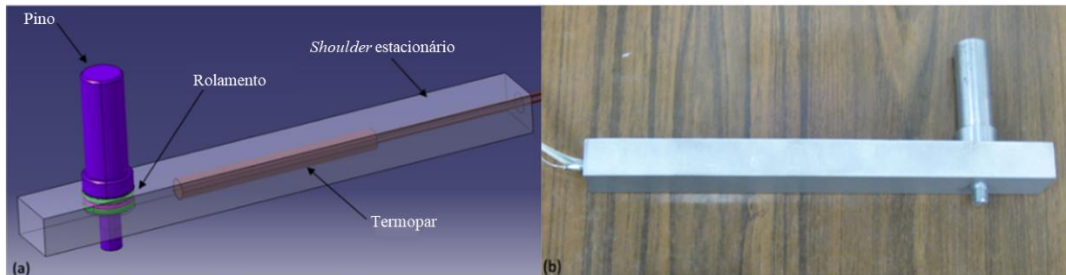


Figura 2.15 - Esquema e montagem do sistema de *shoulder* estacionário aquecido, adaptado de [29]

O aquecimento adicional do *shoulder* a 150°C, com  $\Omega = 630 \text{ rev/min}$  e  $v = 20 \text{ mm/min}$  permitiu ultrapassar o valor máximo de ERJS obtido sem a utilização de fontes de calor externo, de 47%, tendo sido obtido um valor de 98%, uma amostra sem defeitos e com qualidade superficial superior, como se observa na Figura 2.16.

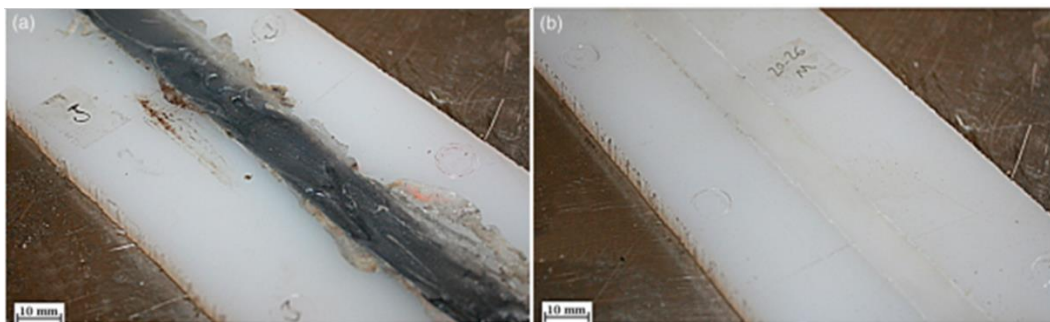


Figura 2.16 - Amostras de PA6 soldadas: a) Parâmetros incorretos, b) Parâmetros ideais, [28].

Em [30] estudou-se outro mecanismo para a introdução de aquecimento externo para SFL-SE. Recorre-se a uma pistola de ar quente conectada diretamente à ferramenta, que pode ser observada na Figura 2.17. Este mecanismo permite manter a temperatura do pino constante e a um valor desejável.



Figura 2.17 - Ferramenta de *shoulder* estacionário com aquecimento externo por pistola de ar quente, [30].

Foram utilizadas placas de PP com 4 mm de espessura. O aquecimento adicional do *shoulder* a 150°C, com  $\Omega = 565$  rev/min e  $v = 24$  mm/min permitiram obter ERJS de 96%. O estudo microscópico da superfície de fratura, Figura 2.18, das amostras permite observar que na amostra em que se obteve um valor superior de ERJS e maior extensão até à fratura não se detetam vazios na microestrutura, enquanto na amostra com os valores mais baixos são facilmente identificados vazios. Estando por isso os resultados de ERJS relacionados diretamente com a qualidade microestrutural das amostras e a existência de defeitos.

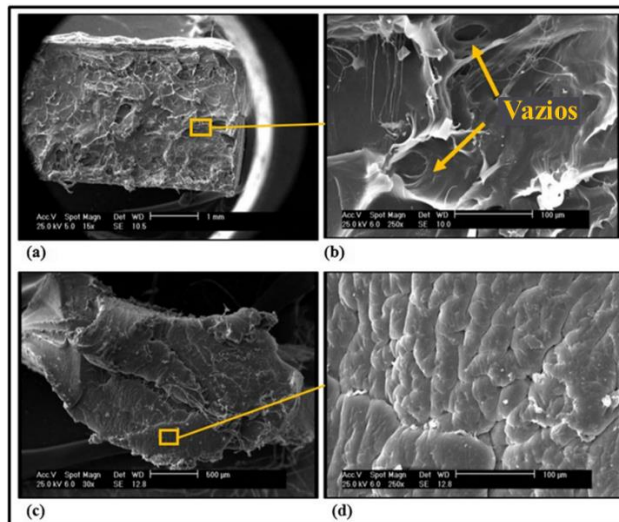


Figura 2.18 - Microscopia eletrónica de varrimento da superfície de fratura de: a) e b) amostra com menor qualidade e de: c) e d) amostra com maior qualidade, [30].

## PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo apresenta-se a metodologia experimental adotada bem como os parâmetros operacionais utilizados para o estudo da aplicação de SFL em placas de PEEK. Segue-se a descrição das propriedades dos materiais utilizados neste estudo, bem como uma apresentação do equipamento de SFL utilizado, e das ferramentas desenvolvidas e concebidas. Por último será apresentado o procedimento experimental adotado.

### 3.1 Metodologia Experimental

A implementação de uma metodologia experimental adequada para estudar a aplicação do processo de SFL em PEEK e a influência dos seus parâmetros na qualidade das juntas soldadas, carece de conhecimento teórico baseado na pesquisa bibliográfica, apresentado no estado de arte, mas também de sensibilidade resultante da prática experimental.

Desta forma, de modo a obter a prática experimental necessária, foram realizados ensaios preliminares em PLA produzido por fabrico aditivo, um polímero com temperatura de fusão inferior e mais acessível que ao PEEK. Com este material realizou-se um estudo de otimização de parâmetros, aplicando o Método *Taguchi* com vista a encontrar a combinação paramétrica que permitisse melhorar o aspeto visual e as propriedades mecânicas das juntas soldadas de PLA. Para a análise dos resultados foi aplicada a metodologia ANOVA de forma a calcular a contribuição relativa dos parâmetros em estudo para os resultados

Para o estudo preliminar em PLA utilizou-se uma matriz ortogonal de Taguchi  $L_9$ , que permite o estudo de três parâmetros variados em três níveis com apenas 9 combinações de parâmetros. Os parâmetros em estudo foram os parâmetros operacionais que têm maior influência no perfil térmico da soldadura: Velocidade de rotação, Velocidade de avanço e Temperatura da

base ou do *shoulder*. Na Tabela 3.1 apresentam-se valores utilizados que foram escolhidos tendo em conta os seguintes critérios: Bibliografia consultada, ensaios de teste realizados previamente e as limitações operacionais do equipamento de SFL utilizado. Apesar da metodologia de Taguchi exigir uma variação linear entre os níveis dos parâmetros, foram usados os níveis disponíveis nos equipamentos utilizados.

Tabela 3.1 - Parâmetros de processo de SFL e respetivos níveis.

Parâmetros de soldadura (unidade)	Nível 1	Nível 2	Nível 3
Velocidade de Rotação (rev/min)	900	1120	1400
Velocidade de Avanço (mm/min)	11	18	28
Temperatura (°C)	T <sub>ambiente</sub>	65	85

Na Tabela 3.2 apresentam-se as 9 combinações de parâmetros, resultado do Método de *Taguchi*. Seguindo os princípios deste método foram feitas três repetições de ensaios para cada combinação de parâmetros. A grandeza utilizada para otimizar o processo do ponto de vista das propriedades mecânicas foi a tensão máxima, avaliada para cada provete através de ensaios de tração uniaxial.

Tabela 3.2 - Matriz ortogonal *Taguchi* L<sub>9</sub> utilizada.

Combinação	Parâmetros de processo de SFL		
	Velocidade de Rotação (rev/min)	Velocidade de Avanço (mm/min)	Temperatura (°C)
C1	900	11	T <sub>ambiente</sub>
C2	900	18	65
C3	900	28	85
C4	1120	11	85
C5	1120	18	65
C6	1120	28	T <sub>ambiente</sub>
C7	1400	11	85
C8	1400	18	T <sub>ambiente</sub>
C9	1400	28	65

Tendo em conta os resultados obtidos no estudo preliminar em PLA, apresentados nos subcapítulos 4.1.1 e 4.3.1, para o estudo de SFL em PEEK optou-se por fixar os valores das velocidades de rotação e de avanço e testar a viabilidade da ferramenta para a obtenção de resultados

satisfatórios, estudando isoladamente a influência da variação de temperatura de fontes externas ao processo. Foi tomada esta opção uma vez que a possibilidade de aquecimento é o caráter mais inovador da ferramenta desenvolvida e, segundo o que é descrito na bibliografia consultada, tem uma contribuição importante para a melhoria dos resultados.

Os valores da velocidade de avanço e rotação foram escolhidos tendo em conta os resultados obtidos nos ensaios preliminares do estudo de otimização em PLA, mas também com base em alguns ensaios de preliminares realizados em PEEK. Sendo assim os valores escolhidos foram  $\Omega = 1400$  rev/min e  $v = 11$  mm/min. Relativamente à temperatura, foi estudado separadamente o aquecimento da base do sistema de fixação das placas e da base do shoulder. Sendo a temperatura de transição vítrea o ponto a partir do qual se dá o amolecimento do material, que permite o seu escoamento e mistura do material em volta do pino, foi estudada a aplicação de uma temperatura inferior a  $T_g$  de PEEK, uma temperatura próxima de  $T_g$  e outra superior, existindo ainda um grupo de ensaios sem aquecimento. Realizou-se também um grupo de ensaios em placas de PEEK produzidas com sobre extrusão e outro com a ferramenta com *shoulder* rotativo, ambos com a temperatura que produziu melhores resultados. A Tabela 3.3 apresenta os 7 grupos de ensaios de SFL realizados em PEEK.

Tabela 3.3 - Ensaios de SFL realizados em PEEK

Ensaios realizados	T <sub>ambiente</sub>	125°	145°	165°
Ferramenta <i>shoulder</i> estacionário - Base do sistema de fixação aquecida	✓	✓	✓	✓
Ferramenta <i>shoulder</i> estacionário - <i>Shoulder</i> aquecido	✗	✗	✗	✓
Ferramenta <i>shoulder</i> estacionário - Sobre extrusão	✗	✗	✗	✓
Ferramenta <i>shoulder</i> rotativo - Base aquecida	✗	✗	✗	✓

## 3.2 Caracterização do material base

Para a análise experimental deste estudo utilizaram-se placas de PLA produzidas por fabrico aditivo a partir de filamento de PLA de diâmetro 1.75mm. Utilizaram-se também placas de PEEK produzidas por fabrico aditivo a partir de filamento de PEEK *Apium* 450 de diâmetro 1.75 mm, com os parâmetros de impressão apresentados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Parâmetros de impressão de PEEK *Apium* 450

Parâmetros de impressão	
Temperatura da <i>nozzle</i>	485 °C

Temperatura do <i>zone heater</i>	130 °C
Temperatura da plataforma de impressão	130°C
Altura de camada	0.2 mm
<i>Extruder multiplier</i>	0.9
Número de linhas de perímetro	2
Número de camadas de topo/base	1
Padrão de <i>infill</i> exterior	<i>Concentric</i>
Padrão de <i>infill</i> interior	<i>Rectilinear</i>
Porcentagem de <i>infill</i>	100%
Velocidade de impressão	2000 mm/min
Velocidade de movimentação	4800 mm/min
Número de linhas de <i>brim</i>	35

Após terem sido impressas todas as placas necessárias para o estudo em PEEK verificou-se que apesar do valor recomendado pelo fabricante para *Extrude Multiplier* ser 0.9, utilizando o valor de 1.0, ou seja, imprimindo as placas com sobre extrusão, a qualidade superficial das mesmas melhorava substancialmente, nomeadamente pela diminuição de vazios, como se pode verificar na Figura 3.1. Dada a reduzida quantidade de material disponível não foi possível repetir a impressão para os 21 ensaios necessários, no entanto incluiu-se no estudo um grupo de ensaios com placas com sobre extrusão, utilizando a temperatura que produziu melhores resultados dentro dos restantes grupos, de modo a perceber qual o impacto da qualidade das placas anteriormente impressas nos resultados obtidos.

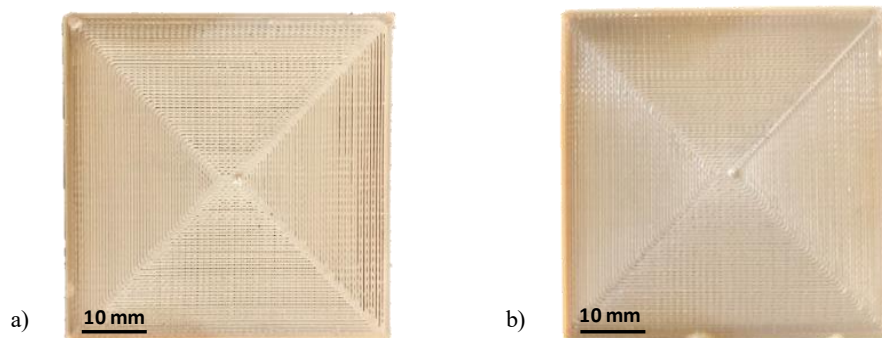


Figura 3.1 - Placas de PEEK produzidas por fabrico aditiva: a) *Extruder Multiplier* = 0,9; b) *Extruder Multiplier* = 1.

As propriedades físicas e mecânicas dos materiais utilizados são descritas na Tabela 3.5 e Tabela 3.6

Tabela 3.5 - Propriedades Físicas de PLA e PEEK, [3, 30-32].

Propriedades Físicas				
	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Temperatura de transição ví- trea (°C)	Temperatura de fu- são (°C)	Condutividade térmica (W/m.K)
PLA	1,25	63,1	151,5	0,08
PEEK	1,32	145,0	355,0	0,26

Tabela 3.6 - Propriedades mecânicas de PLA e PEEK, [31] [34].

Propriedades Mecânicas		
	Tensão máxima (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
PLA	59,90 - 64,13	3,98 - 4,39
PEEK	70,30 - 103,00	3,76 - 3,95

### 3.3 Realização dos cordões de SFL

#### 3.3.1 Equipamento de SFL utilizado

Todos os ensaios de SFL descritos foram realizados numa fresadora convencional de três eixos (Figura 3.2), correspondentes ao movimento x-y no plano da mesa de trabalho e movimento vertical de subida e descida da mesa. Para além destes 3 movimentos independentes existe também a possibilidade de alterar o ângulo de ataque da ferramenta através da alteração da posição angular da cabeça, onde se localiza o eixo de rotação do equipamento, em relação à posição horizontal definido pela mesa.

Os valores disponíveis para a velocidade de rotação e velocidade de avanço são matrizes de valores discretos o que limita a escolha dos parâmetros de processo de SFL. Para além disso os valores não são igualmente espaçados entre si o que constituiu uma limitação para a aplicação do Método de *Taguchi*. Outra das limitações impostas pelo equipamento utilizado consiste na impossibilidade de realizar o ciclo de soldadura com controlo de força. A impossibilidade do controlo de força vertical de forjamento exercida traduz-se numa acrescida dificuldade de repetibilidade de condições entre ensaios, dificultando a análise dos resultados obtidos. Para a realização da SFL com este equipamento, foi desenvolvido um sistema de fixação das placas de material base, assim como, uma nova ferramenta de SFL. Estes componentes permitiram o estudo da variante SFL com *shoulder* estacionário e com fontes externas de aquecimento, variantes que, segundo a literatura consultada apresentam melhorias para SFL em

polímeros. Todos os componentes concebidos foram projetados e fabricados no âmbito da tese de doutoramento do Engenheiro Pedro Miguel Palma Rendas.

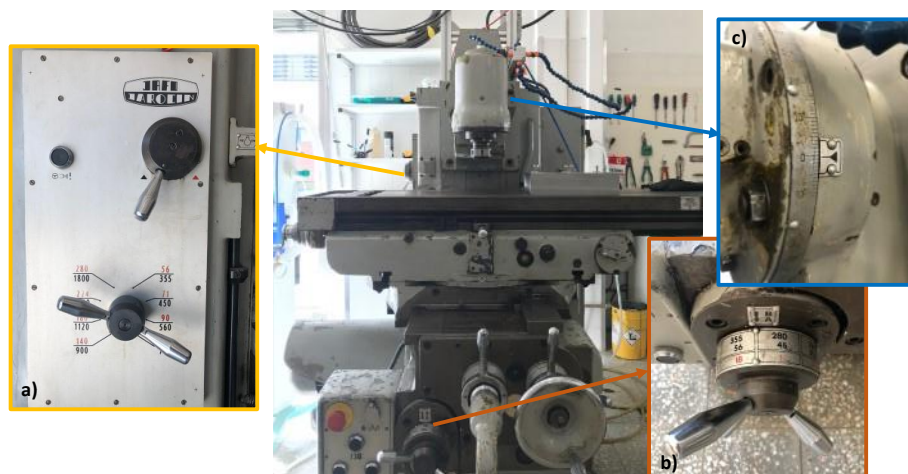


Figura 3.2 - Fresadora convencional de quatro eixos: a) Controlo da velocidade de rotação, b) Controlo da velocidade de avanço, C) Controlo do posicionamento angular da cabeça.

### 3.3.2 Sistema de fixação das peças - *Backing Plate*

O sistema de fixação projetado e apresentado na Figura 3.3 permite a realização de cordões de soldadura em juntas topo a topo para placas de comprimento de 47.5 mm, largura 50 mm e espessura 5 mm. A dimensão das placas de material a soldar foi definida tendo em conta dois fatores: Primeiramente a necessidade de retirar das amostras soldadas, provetes de tração com as dimensões definidas pela norma ISO 527-2:2012(E) para os ensaios de tração uniaxial. Em segundo lugar, o elevado custo do material em estudo, PEEK, que limita a quantidade de material disponível, exigindo uma minimização da dimensão das placas.

A dimensão reduzida das placas é outra das limitações do presente estudo tendo em conta a distância necessária à estabilização do processo que resulta em zonas de cordão válidas para análise muito pequenas. A base do sistema de fixação, foi construída em alumínio, e os restantes elementos de aperto, duas barras, que se ligam à base, foram construídas em aço. Todas as dimensões da base são descritas no desenho técnico apresentado no Anexo A.1e este componente tem as seguintes características:

- Paralelismo entre as superfícies superior e inferior da base;
- Perpendicularidade entre superfícies de encosto, inferior e laterais, das placas de material, garantida pela abertura de um pequeno canal na interface entre estas superfícies para eliminar raios interiores de maquinagem, garantindo encosto das placas;

- O constrangimento segundo os eixos xx e yy é feito através da abertura de uma caixa central com profundidade de 4 mm e que permite o encaixe das placas. O aperto de dois parafusos laterais garante o correto posicionamento das placas e a manutenção de pressão na interface das mesmas;
- O constrangimento segundo o eixo zz é aplicado por duas barras montadas na sua configuração de maior rigidez à flexão provocada pelo aperto, que se ligam à base através de dois parafusos. Estas barras permitem também o nivelamento e atenuam os efeitos do encurvamento das placas resultado do processo de impressão das mesmas.
- Os 4 furos existentes na base e cujo centro está distanciado por 126 mm, permitem a ligação aparafusada deste componente à mesa da fresadora;
- Isolamento térmico da mesa da fresadora relativamente à base através da utilização de uma placa de baquelite e mica de isolamento;
- Caixa de 5 mm de profundidade na superfície inferior para permitir o encaixe da mica de aquecimento.

O apertado controlo dimensional e geométrico para a obtenção das características descritas acima será crucial para o correto alinhamento, posicionamento e montagem das placas a soldar, o que garantirá a qualidade dos ensaios;

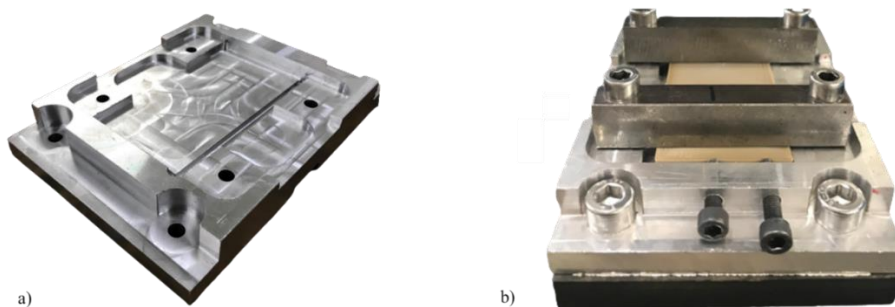


Figura 3.3 - Sistema de fixação: a) Base do sistema de fixação, b) Sistema de fixação na mesa da fresadora.

Relativamente ao processo de fabrico, em primeiro lugar foi maquinado um bloco de alumínio com as dimensões de 110x155x22 mm na fresadora. A necessidade de precisão no fabrico e a complexidade geométrica deste componente, levaram à utilização do centro de maquinagem de 3 eixos (CNC) para a obtenção da geometria desejada.

Para tal foram utilizadas 4 ferramentas: 2 fresas de  $\Phi = 20$  mm e  $\Phi = 4.77$  mm e duas brocas de  $\Phi = 3.3$  mm e  $\Phi = 6.5$  mm. Os parâmetros de corte utilizados foram escolhidos de acordo com as informações disponibilizadas no catálogo de cada ferramenta e são apresentados na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 - Parâmetros de corte utilizados para maquinagem da Base de Suporte.

Ferramenta	Diâmetro (mm)	$\Omega$ (rev/min)	$v$ (mm/min)
Fresa	20	2200	300
	4.77	9000	
Broca	3.3	9000	250
	6.5	5500	

### 3.3.3 Desenvolvimento da ferramenta de SFL

Tendo em conta a literatura consultada e os ensaios preliminares efetuados em PLA e PEEK com as ferramentas de SFL com *shoulders* rotativos existentes em laboratório, concluiu-se que o desenvolvimento e conceção de uma ferramenta de SFL com *shoulder* estacionário seria crucial para o estudo completo e com resultados satisfatórios da aplicação da tecnologia de SFL em PEEK. Para além disso, esta ferramenta permitiu também o estudo da influência da utilização de fontes de calor externas, através da incorporação de uma cavidade para o encaixe de uma resistência para aquecimento. A ferramenta desenvolvida apresenta-se na Figura 3.4 e é composta essencialmente por 3 módulos: Pino, Base do *Shoulder* Estacionário e Topo do *Shoulder* Estacionário.

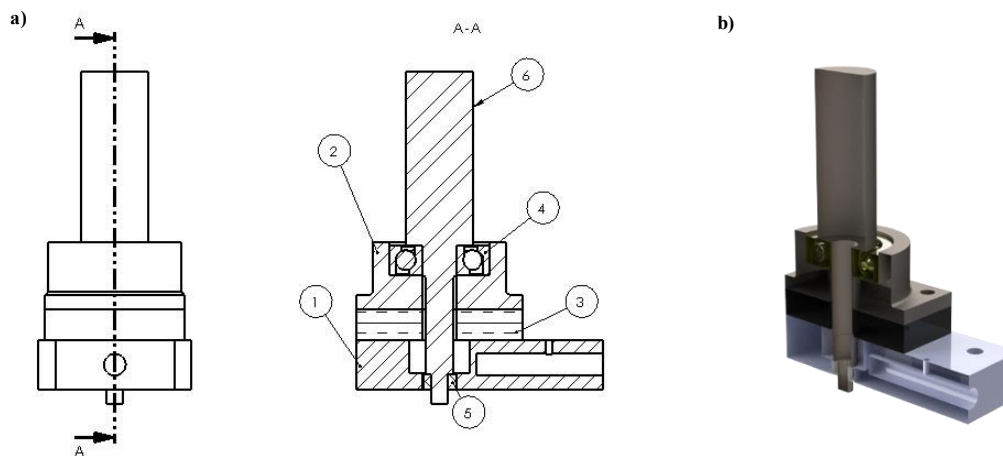


Figura 3.4 - Ferramenta de SFL: a) Vista Frontal e Corte A-A, b) Plano de corte do Modelo CAD 3D da ferramenta em perspetiva isométrica. Nomenclatura: Base do *Shoulder* Estacionário (1), Caixa de montagem do rolamento (2), Espaçador de baquelite para isolamento térmico (3), Rolamento de contacto angular (4), Casquilho isolador de Teflon (5), Ferramenta rotativa do pino (6).

### 3.3.3.1 Shoulder

O ponto de partida para o desenvolvimento da ferramenta de SFL com *shoulder* estacionário foi a escolha do rolamento que garante a estacionariedade do *shoulder* e a eficaz transmissão dos esforços axiais e radiais impostos pelo pino em rotação e pelo movimento de avanço linear da ferramenta. Tendo em conta estas condições de operação, foi escolhido um rolamento de esferas de contacto angular, projetado para acomodar cargas combinadas, ou seja, cargas axiais e radiais atuando simultaneamente [35], e cujas especificações técnicas podem ser consultadas no Anexo A.2. O *shoulder* da ferramenta foi projetado de forma modular, apesar desta construção dificultar a montagem da ferramenta, a concentricidade e alinhamento de todos os componentes, foi a solução encontrada para manter o rolamento dentro das temperaturas de operação, uma vez que a base do *shoulder* será aquecida até 165°C, temperatura que resultaria na rápida degradação do rolamento. Desta forma o *shoulder* é composto por 3 componentes: Caixa de montagem do rolamento, Espaçador de isolamento térmico em baquelite e Base do *shoulder*, o que permite uma dissipação mais eficaz do calor, isolando termicamente o rolamento. Relativamente à caixa de montagem do rolamento, tendo em conta os esforços impostos pelo rolamento a que estará sujeita, foi construída em aço. Para este efeito, utilizou-se um bloco deste material com as dimensões de 50x42x20 mm. Para se obter a geometria final apresentada na Figura 3.5, recorreu-se novamente ao centro de maquinagem de 3 eixos (CNC), que permite obter um componente com a precisão necessária, de acordo com o a tolerância definida para a montagem do rolamento e de forma a não comprometer os requisitos funcionais desta ferramenta, nomeadamente a manutenção de concentricidade entre todos os componentes.

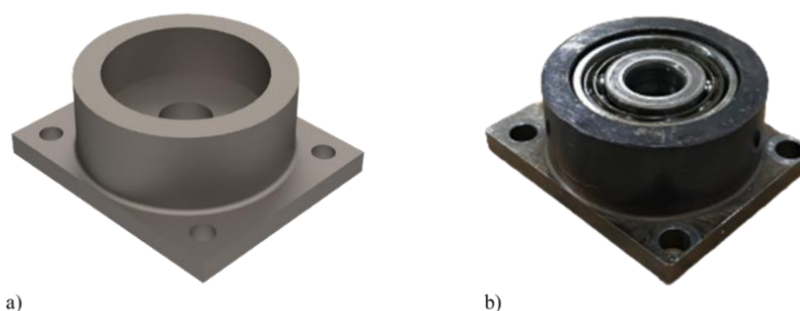


Figura 3.5 - Caixa de montagem do rolamento: a) Modelo em CAD 3D, b) Componente fabricado.

Para as operações de maquinagem na CNC foram utilizadas 2 ferramentas: 1 fresa de  $\Phi = 18$  mm e uma broca de  $\Phi = 4.3$  mm. Os parâmetros de corte utilizados foram escolhidos de acordo com as informações disponibilizadas no catálogo de cada ferramenta e são descritos na Tabela 3.8. O desenho técnico deste componente encontra-se no Anexo A.3.

Tabela 3.8 - Parâmetros de corte utilizados para maquinagem do Topo do *Shoulder*.

Ferramenta	Diâmetro (mm)	$\Omega$ (rev/min)	v (mm/min)
Fresa	18	1000	40
Broca	4.3	1500	120

Importa aprofundar o processo de dimensionamento da caixa de montagem do rolamento, nomeadamente o toleranciamento geométrico da caixa circular deste componente, de forma que o seu fabrico resultasse num ajustamento com aperto com o diâmetro externo do rolamento, como pretendido. O rolamento escolhido foi o 7200 BEP produzido pela SKF, com diâmetro externo nominal  $d = 30$  mm, que corresponde à cota nominal ( $C_N$ ). De acordo com as tabelas do fabricante disponibilizadas no Anexo A.2, este rolamento é produzido com uma tolerância de  $-9 \mu\text{m}$  para o diâmetro externo, ou seja, desvio inferior  $d_i = 0.009$  mm e desvio superior  $d_s = 0$  mm. Estes valores permitem concluir que o anel externo do rolamento, em sistema métrico, está na posição h com classe de qualidade 5: h5. Resultando nas seguintes cotas máximas e mínimas:

Veio

$$C_{max}V = C_N + d_s = 30,000 + 0 = 30,000 \text{ mm}$$

$$C_{min}V = C_N + d_i = 30,000 - 0,009 = 29,991 \text{ mm}$$

De modo a obter um ajustamento com aperto entre o anel externo do rolamento e a caixa de montagem do rolamento, e tendo em conta a informação consultada no catálogo do Anexo A.2 para este efeito, a caixa deste componente foi fabricada com um desvio N6, obtendo-se:

Furo

$$C_{max}F = C_N + D_s = 30,000 - 0,011 = 29,989 \text{ mm}$$

$$C_{min}F = C_N + D_i = 30,000 - 0,024 = 29,976 \text{ mm}$$

Uma vez que a condição  $C_{max}F < C_{min}V$  se confirma, os desvios calculados correspondem a um ajustamento com aperto, como pretendido. Com isto, a cota nominal para fabrico da caixa foi ajustada para dimensão média entre as suas cotas máximas e mínimas produzindo assim um dimensionamento funcional para fabrico deste componente.

Relativamente à Base do *Shoulder*, uma vez que não está em contacto com o pino em rotação e de forma a tornar o seu aquecimento e arrefecimento mais rápidos, foi concebido em

alumínio. Foi utilizado um bloco com as dimensões iniciais de 74x42x15 mm. Pelas mesmas razões anteriormente referidas para o Topo do *Shoulder*, recorreu-se ao centro de maquinaria de 3 eixos (CNC) para obter a geometria final do componente.

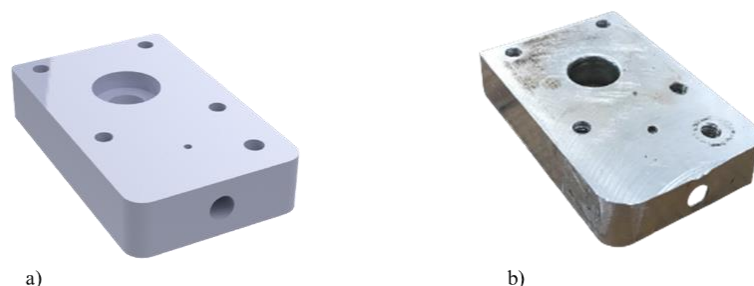


Figura 3.6 - Base do *Shoulder*. a) Modelo em CAD 3D, b) Componente fabricado

Para as operações de maquinaria foram utilizadas 2 ferramentas: 1 fresa de  $\Phi = 5$  mm e uma broca de  $\Phi = 4.5$  mm. Os parâmetros de corte utilizados foram escolhidos de acordo com as informações disponibilizadas no catálogo de cada ferramenta e são descritos na Tabela 3.9.

Tabela 3.9 - Parâmetros de corte utilizados para maquinaria da Base do *Shoulder*.

Ferramenta	Diâmetro (mm)	$\Omega$ (rev/min)	v (mm/min)
Fresa	5	9000	300
Broca	4.5	8500	250

### 3.3.3.2 Pino

Para a produção do pino foi torneado um varão de aço obtendo-se os diferentes valores de diâmetro ao longo do seu comprimento que garantem a funcionalidade deste componente. Através do contacto com o rolamento, o pino transmite o movimento de avanço linear a toda a ferramenta, portanto está sujeito a consideráveis esforços de flexão alternada. Este fator exigiu que o projeto e conceção deste componente fosse um processo iterativo até à sua versão final.

O primeiro modelo projetado, representado em Figura 3.7 a), fraturou ao fim de 2 ensaios experimentais em PLA. Analisada a superfície de fratura concluiu-se que o comprimento da zona de menor diâmetro do pino,  $\Phi = 5$  mm, era excessivo. O comprimento da zona de menor diâmetro traduzia-se na concentração de esforços na zona do chanfro, assinalada na Figura

3.7, resultando na fratura do componente nesta zona. Como solução para este problema diminuiu-se em 10 mm o comprimento da zona de menor diâmetro.

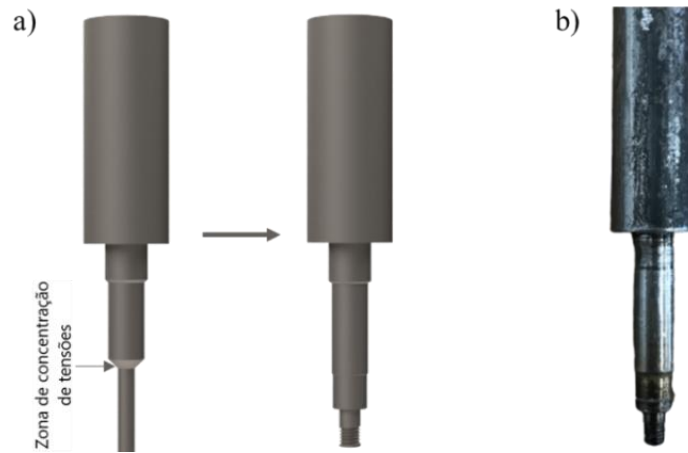


Figura 3.7 - Pino da Ferramenta de SFL: a) Evolução da versão inicial para a versão final - Modelo CAD 3D b) Versão final do pino fabricado.

O pino tem uma ponta rosca em ISO M5 com rosca esquerda de modo que, em conjunto com o sentido de rotação horário, a operação do pino tenha um efeito de *pushdown* no fluxo de material. Outro fator importante foi o comprimento efetivo do pino, ou seja, o comprimento do pino que irá estar em contacto com o material base e será responsável pelo fluxo do mesmo. As placas de material base têm 5 mm de espessura, portanto projetou-se inicialmente o pino com comprimento efetivo de 4,5 mm, garantindo assim que este não entrava em contacto com a base do sistema de fixação das placas, mas estava suficientemente perto da superfície inferior das mesmas, evitando defeitos na raiz da soldadura. No entanto, devido à necessidade de aplicação de um nível superior de força vertical de forjamento, corrigiu-se o comprimento efetivo do pino de 4.5 mm para 4.3 mm, permitindo assim aumentar o esmagamento das placas para 0.5 mm, sem que o pino entrasse em contacto com a base de suporte. O desenho técnico do pino encontra-se no Anexo A.5. Para produzir este comprimento do pino a ferramenta montada foi retificada na mó retificadora com a ajuda de um bloco em V.

### 3.3.4 Sistema de aquecimento e controlo de temperatura

Foi desenvolvido um sistema de aquecimento e controlo de temperatura que possibilitou o estudo da aplicação de fontes externas de aquecimento através do aquecimento da Base do

*Shoulder* e da Base do sistema de fixação. A Figura 3.8 representa o circuito elétrico do sistema desenvolvido.

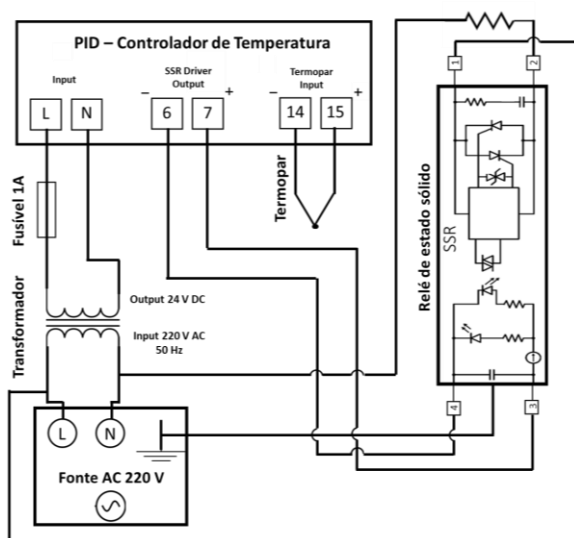


Figura 3.8 - Circuito elétrico para aquecimento do *Shoulder* ou da Base de suporte.

### 3.4 Parâmetros utilizados nos ensaios de SFL e procedimento experimental

Os ensaios de Soldadura por Fricção Linear efetuados dividem-se em dois grupos. Um dos grupos é constituído pelos ensaios efetuados para estudo do processo de SFL em PLA e o outro é respeitante aos ensaios efetuados para o estudo de SFL em PEEK. Nestes ensaios existe um conjunto de parâmetros que foram variados de modo que fosse possível estudar a sua influência nas propriedades dos cordões obtidos, anteriormente apresentados no subcapítulo 3.1, os restantes parâmetros mantiveram-se constantes e são os seguintes:

Tabela 3.10 - Parâmetros operacionais constantes nos ensaios de SFL

Ângulo de ataque, $\alpha$	Geometria do Pino	Sentido de Rotação	Tempo de espera para arranque	Comprimento dos cordões
0.5°	M5 - Roscado	Horário	10 s	50 mm

**Nota 1** - O equipamento de SFL utilizado não permite controlar a força vertical de forjamento, portanto os ensaios foram efetuados sob o controlo de posição da ferramenta, ou seja, controlo da profundidade de penetração do pino na junta. As placas utilizadas têm 5 mm de espessura, a profundidade de penetração foi 4.8 mm, portanto o pino ficou a 0.2 mm da superfície inferior das placas;

Salienta-se que o procedimento experimental é constituído não só pelo procedimento do ensaio de SFL, mas também por todo o trabalho preparatório e de montagem.

Os ensaios preliminares foram úteis não só para a definição dos parâmetros operatórios mais adequados ao material em estudo, mas principalmente para o desenvolvimento de um procedimento experimental adequado. Nestes ensaios preliminares o principal problema identificado como a causa para a falta de repetibilidade entre ensaios foi a variação do nível de força vertical de forjamento. O equipamento utilizado não permitiu a realização de ensaios com controlo de força. Desta forma foi necessário um cuidado especial na montagem das placas e na prescrição da posição da ferramenta, de modo a tentar manter o nível de esmagamento constante. Por esta razão incluiu-se no procedimento de montagem uma etapa que consiste na medição do zero no eixo zz da ferramenta na superfície superior das placas, com o auxílio de uma folha de papel para aumentar a precisão desta medição. Um dos fatores que dificultou a medição correta do zero foi o encurvamento da superfície de algumas das placas de material resultante do processo de fabrico aditivo das mesmas, como se observa na Figura 3.9.

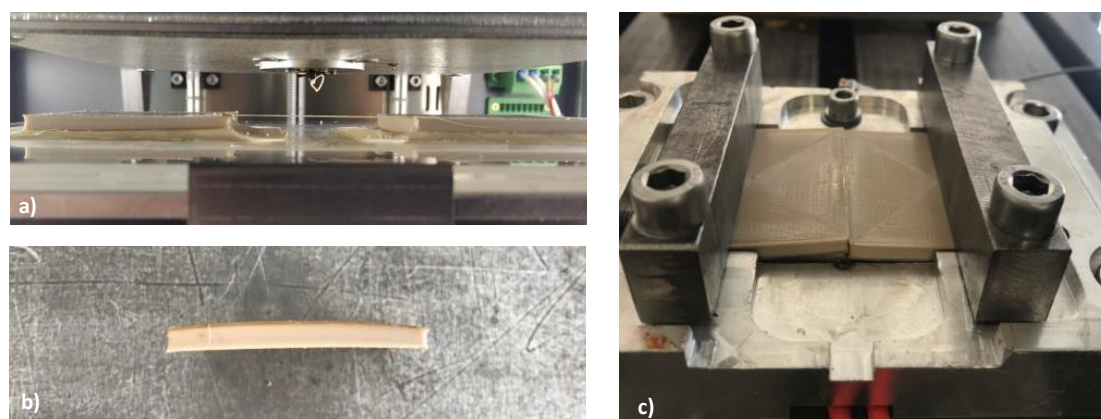


Figura 3.9 - Encurvamento da superfície das placas de PEEK: a) Placas de PEEK na mesa de impressão, b) Superfície inferior com encurvamento, c) Resultado do encurvamento das placas na montagem.

Este problema foi atenuado com um cuidado especial com a sequência de montagem. Depois de colocadas as placas de material base na base do sistema de fixação, foram aparafusadas, um pouco antes do aperto máximo, as barras de constrangimento das placas no eixo zz, posteriormente foram colocados os parafusos que exercem a pressão lateral, evitando assim o levantamento das mesmas, observado na Figura 3.9 c).

Outro problema, desta vez relacionado com a ferramenta desenvolvida, prende-se com a inclinação da base do *shoulder* no fim do ensaio de SFL. Como é possível constatar na Figura 3.10 a), a ferramenta apresenta uma inclinação de aproximadamente  $2.5^\circ$  relativamente ao plano da mesa da fresadora. Apesar de durante a etapa inicial dos ensaios de SFL a inclinação não se verificar, visto que a base do *shoulder* está assente nas placas, no final dos ensaios a parte frontal da base deixa de estar apoiada, e após alguns ensaios, devido ao desgaste da gaiola do rolamento, verifica-se esta inclinação. O esforço adicional causado por esta inclinação levou a que ao fim de alguns ensaios em PEEK, os rolamentos, mesmo estando a ser utilizados dentro das condições operacionais adequadas, atingissem temperaturas de trabalho demasiado elevadas, e gripassem, como se verifica na Figura 3.10 b).

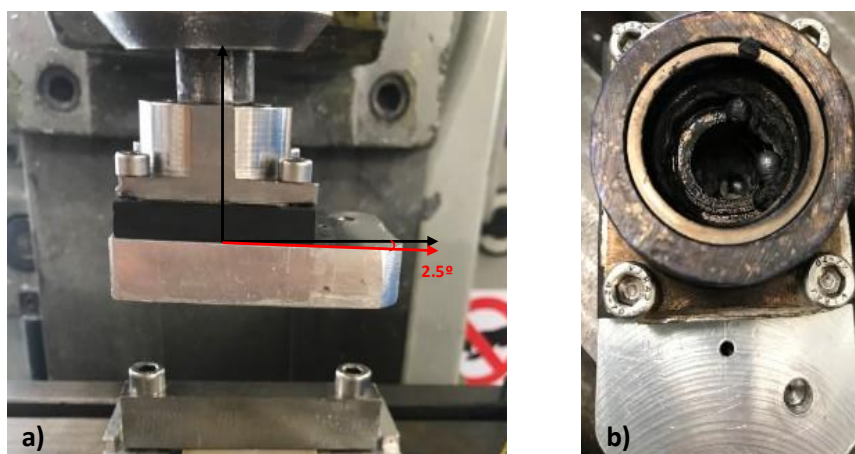


Figura 3.10 - a) Inclinação da ferramenta de SFL em relação ao eixo de rotação, b) Rolamento queimado.

A solução encontrada foi o desenvolvimento de um pequeno bloco espaçador para nivelamento, identificado por uma seta vermelha na Figura 3.11, colocado junto às placas do material a soldar, na base do sistema de fixação garantindo que a base do *shoulder* está apoiada até ao fim do ensaio.



Figura 3.11 - Ensaio de SFL com o bloco de nivelamento colocado.

Por último, foi necessário encontrar uma solução que permitisse aquecer a base do sistema de fixação das placas até 165°, temperatura mais elevada nos ensaios em PEEK. Para este efeito desenvolveu-se uma caixa para isolamento térmico, apresentada na Figura 3.12, com o interior em folha laminada de alumínio, com o intuito de reduzir a dissipação térmica por radiação e convecção, facilitando o aquecimento.



Figura 3.12 - Montagem do aparato experimental para aquecimento da base do sistema de fixação até 165°C.

No Anexo B.1 encontra-se descrito todo o procedimento experimental adotado nos ensaios de SFL em PLA e PEEK.

## APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo faz-se uma apresentação dos resultados obtidos, bem como a sua avaliação e discussão.

Sendo os ensaios em PLA ensaios preliminares para facilitação do estudo de SFL em PEEK, foram avaliados através da análise visual da superfície e de ensaios de tração uniaxial. Relativamente ao material em estudo, PEEK, realizou-se uma análise mais aprofundada que englobou as seguintes técnicas de caracterização: em primeiro lugar realizou-se a análise visual da superfície das amostras de SFL, de seguida analisou-se macroscopicamente a secção transversal das juntas soldadas. Posteriormente foram retirados provetes das placas soldadas para a realização de ensaios de tração uniaxial. Finalmente, as superfícies de fratura resultantes dos ensaios de tração uniaxial foram analisadas macroscopicamente. Complementarmente a estas técnicas de avaliação, durante os ensaios em PEEK monitorizaram-se as temperaturas da ferramenta e do material, com recurso a uma câmara termográfica de infravermelhos.

### 4.1 Caracterização Visual das Superfícies

Depois de cada ensaio fotografaram-se as placas soldadas de forma a poder analisar a qualidade superficial das mesmas. De seguida apresentam-se os resultados obtidos, Figura 4.1 a Figura 4.5, bem como a interpretação e análise qualitativa da superfície das amostras das diferentes combinações de parâmetros estudados. Em primeiro lugar apresentam-se os resultados de SFL em PLA e de seguida em PEEK.

### 4.1.1 Resultados em PLA

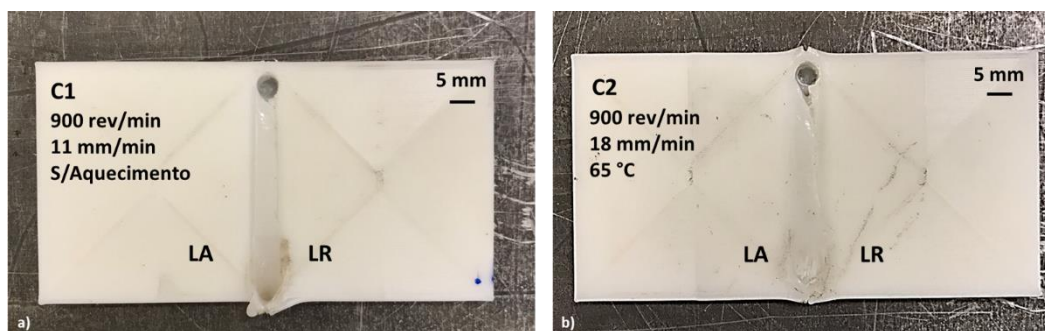


Figura 4.1 - Aspeto visual da superfície das placas soldadas com combinação de parâmetros 1 e 2.

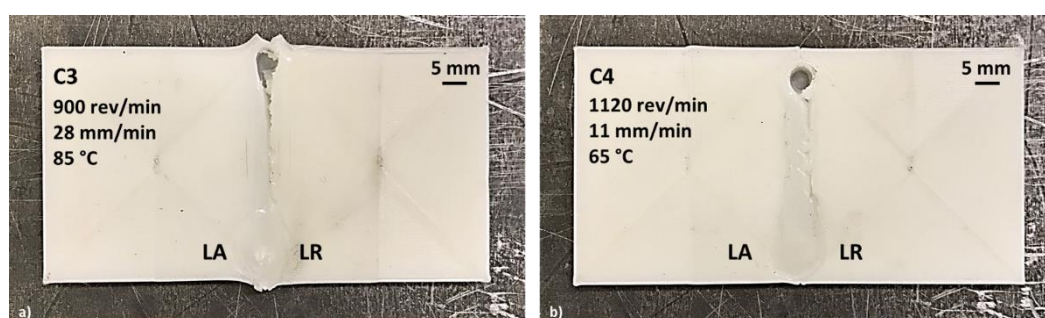


Figura 4.2 - Aspeto visual da superfície das placas soldadas com combinação de parâmetros 3 e 4.

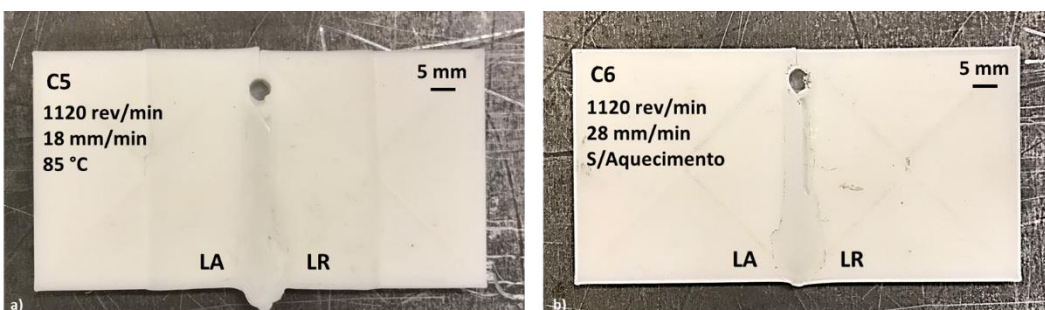


Figura 4.3 - Aspeto visual da superfície das placas soldadas com combinação de parâmetros 5 e 6.

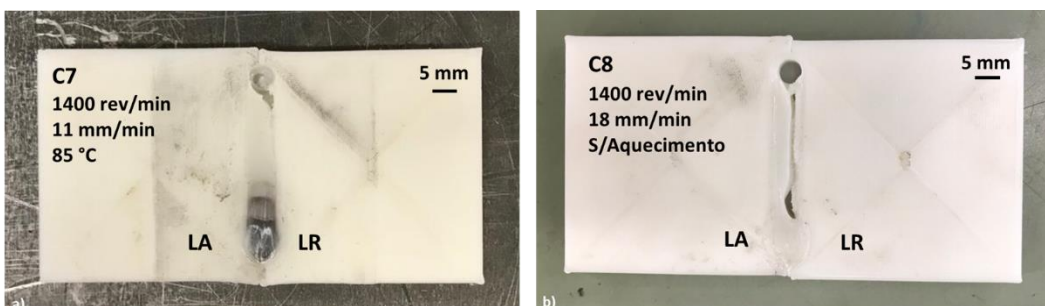


Figura 4.4 - Aspeto visual da superfície das placas soldadas com combinação de parâmetros 7 e 8.

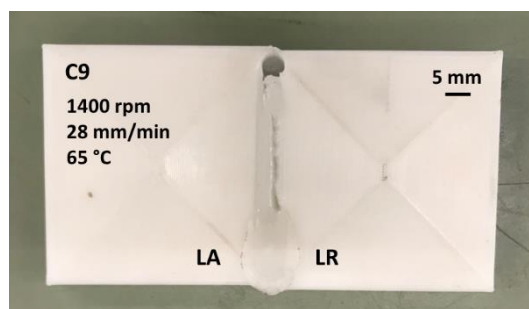


Figura 4.5 - Aspecto visual da superfície das placas soldadas com combinação de parâmetros 9.

Para além dos resultados obtidos com cada combinação de parâmetros apresentam-se também as 3 repetições de duas das combinações, na Figura 4.6, de modo a documentar as dificuldades relativas à repetibilidade dos ensaios.

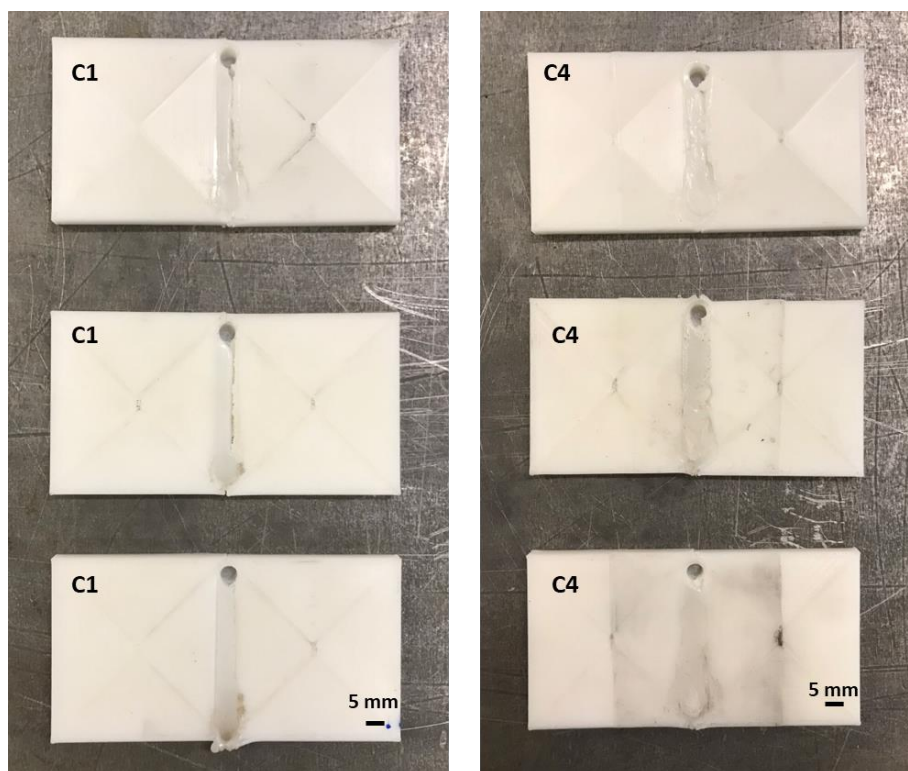


Figura 4.6 - Conjunto de 3 repetições das combinações de parâmetros 1 e 4.

Na Tabela 4.1 analisam-se as principais características visuais da superfície dos ensaios de SFL efetuados em PLA.

Tabela 4.1 - Análise qualitativa do aspeto visual dos cordões de soldadura de cada combinação de parâmetros em PLA.

Combinação	Face superior do cordão									Observações	
	Rebarba		Largura do Cordão		Rasgo			Esmagamento			
	Ausente	Presente	Regular	Variável	Lado em retrocesso	Lado em avanço	Centro do cordão	Inexistente	Suave		Marcado
C1	X		X		X			X			Rasgo pouco perceptível, mas existente.
C2	X		X		X				X		Rasgo inicia-se muito perto da zona final do cordão
C3	X			X	X				X		A descontinuidade que dá origem ao rasgo começa no lado em retrocesso
C4	X			X	X				X		
C5	X		X		N.A	N.A	N.A			X	
C6	X			X	X			X			
C7	X		X		X					X	Rasgo pouco perceptível e somente na parte final do cordão
C8	X			X	X		X	X			Apresenta o rasgo até à raiz do cordão em algumas zonas. evolui do lado em retrocesso até ao centro
C9	X			X	X				X		

Legenda: N.A - Não aplicável ao ensaio em questão

## 4.1.2 Análise dos Resultados em PLA

A análise das principais características dos cordões de soldadura obtidos, resultado da inspeção visual das mesmas, permite verificar que: nenhum dos ensaios apresenta rebarba, comprovando a significativa melhoria da qualidade superficial dos cordões obtidos com a ferramenta de *shoulder* estacionário quando comparado com o *shoulder* rotativo.

Constata-se também que a irregularidade da largura do cordão de soldadura das amostras está relacionada com a falta de esmagamento. À exceção da combinação 1 em que o esmagamento é inexistente, pelo menos aparentemente e a largura do cordão é regular, nas restantes combinações em que o esmagamento é inexistente, a largura do cordão é variável.

A dificuldade em garantir o nível correto de esmagamento pode estar relacionada com a baixa temperatura do ensaio, os ensaios correspondentes às combinações de parâmetros com temperatura ambiente, C1, C6 e C8 apresentam esmagamento inexistente, pelo que a utilização de fontes externas de temperatura se revela útil também neste aspeto.

As falta de repetibilidade entre ensaios manifesta-se essencialmente no aparecimento de rasgos no LR. Da análise da Figura 4.6, conclui-se que, nas 3 repetições da combinação 1, a variação do esmagamento não é tão notória devido à baixa temperatura do ensaio, efetuado à temperatura ambiente, em que todos os ensaios apresentam baixo nível de esmagamento. Contudo nas repetições da combinação 4, efetuada com o *shoulder* a 85°C, é notória a diferença do nível de força vertical de forjamento exercida, e que influencia a existência de um rasgo na interface do cordão de soldadura com o material base. Nestes ensaios observou-se ainda que o parâmetro com maior influência na qualidade superficial das amostras foi a velocidade de avanço, em que os ensaios com  $v = 28 \text{ mm/min}$ , C3, C6 e C9, apresentam rasgos acentuados no LR. Este defeito é resultado da baixa condutividade térmica dos polímeros e das inferiores temperaturas do processo no LR que tornam o material mais viscoso e, portanto, mais difícil de misturar [36]. Os efeitos da velocidade de rotação e temperatura do *shoulder* foram mais difíceis de observar pela análise visual das amostras devido essencialmente à dificuldade de obtenção de repetibilidade entre amostras.

## 4.1.3 Resultados em PEEK

Após análise visual dos primeiros ensaios efetuados para o DOE planeado para o estudo de PEEK, apresentados no Anexo C.1, concluiu-se que a variabilidade entre repetições da mesma combinação de parâmetros não permitia um estudo válido dos 3 parâmetros em análise:

velocidade de rotação, velocidade de avanço e temperatura da base do sistema de fixação. Estes ensaios serviram, no entanto, para a definição do nível de velocidade de rotação e de avanço mais adequado. Fixou-se então  $\Omega = 1400 \text{ rev/min}$  e  $v = 11 \text{ mm/min}$  e iniciou-se o estudo de funcionalidade e aplicabilidade da ferramenta de SFL e da influência da temperatura de fontes externas.

Os ensaios de SFL realizados em PEEK foram organizados em sete grupos listados de seguida:

Tabela 4.2 - Ensaios de SFL realizados em PEEK.

Ensaio	Parâmetros do ensaio			
	Aquecimento externo	Localização do aquecimento	Ferramenta utilizada	Extruder Multiplier
1	Não	N.A	SE	0.9
2	125 °C	BSF	SE	0.9
3	145 °C	BSF	SE	0.9
4	165 °C	BSF	SE	0.9
5	165 °C	BSF	SE	1.0
6	165 °C	BS	SE	0.9
7	165 °C	BSF	SR	0.9

**Legenda:** N.A-Não Aplicável; BSF-Base do Sistema de Fixação; BS - Base do *Shoulder*

Foram realizadas 3 repetições de cada um deste grupo de ensaios, a repetição escolhida para apresentação análise neste documento, foi a repetição de cada ensaio com valor superior de tensão máxima, as restantes repetições foram.

As Figura 4.7 a Figura 4.10 apresentam a face superior do cordão de soldadura, no entanto, no Anexo C.2 apresenta-se também a raiz do cordão de soldadura, também analisada na Tabela 4.3. Na Tabela 4.3 analisam-se as principais características visuais da superfície e da raiz do cordão dos 7 grupos de ensaios de SFL efetuados em PEEK.

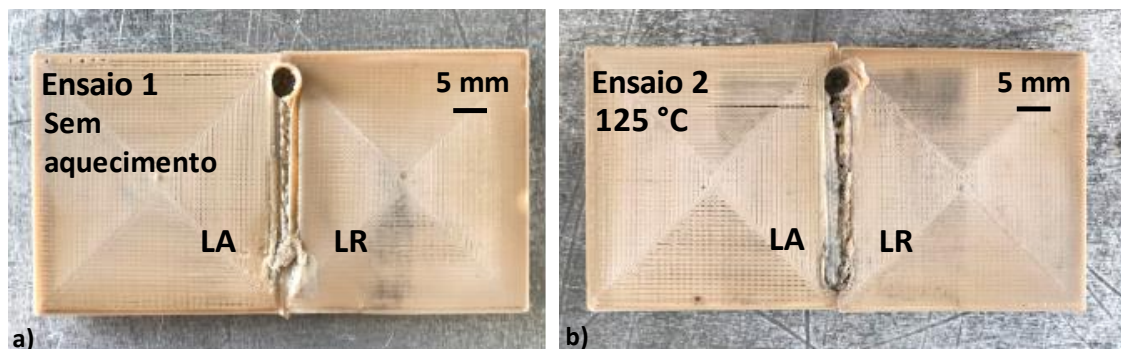


Figura 4.7 - Aspeto visual da superfície das placas soldadas de PEEK: a) Ensaio 1, b) Ensaio 2.

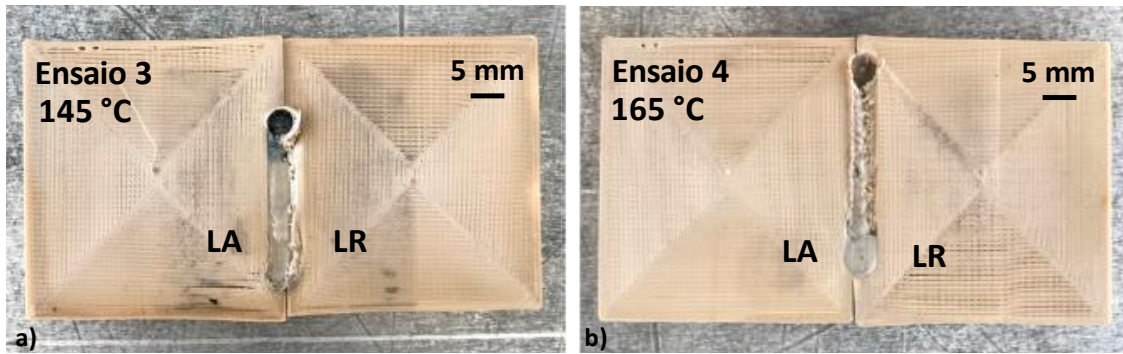


Figura 4.8 - Aspeto visual da superfície das placas soldadas de PEEK: a) Ensaio 3, b) Ensaio 4.

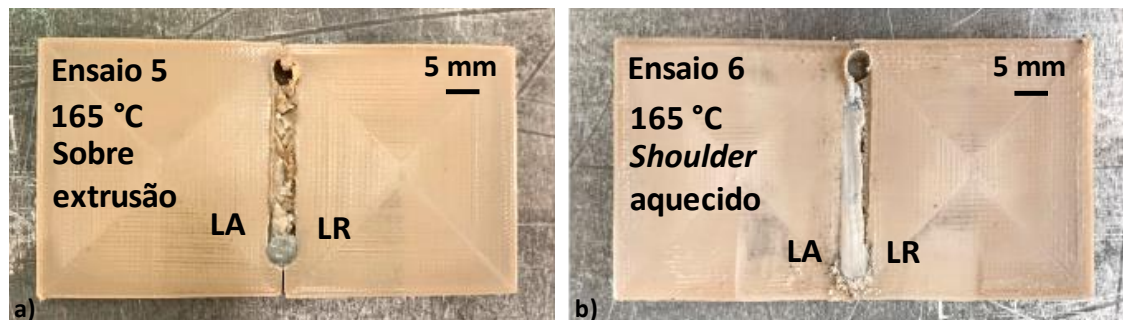


Figura 4.9 - Aspeto visual da superfície das placas soldadas de PEEK: a) Ensaio 5, b) Ensaio 6.

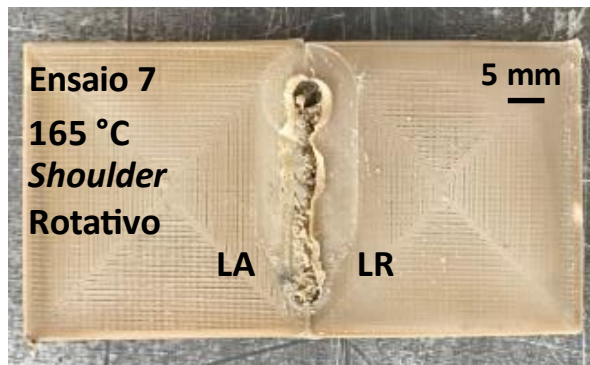


Figura 4.10 - Aspeto visual da superfície das placas soldadas de PEEK do ensaio 7.

Tabela 4.3 - Análise qualitativa do aspeto visual dos diferentes cordões de soldadura obtidos em PEEK.

Ensaio	Face superior do cordão									Raiz do cordão						Observações		
	Rebarba			Largura do Cordão		Rasgo			Esmagamento			Abatimento		Aparenta ligação			Largura do cordão	
	Nenhuma	Pouca	Muita	Regular	Variável	Lado em retrocesso	Lado em avanço	Centro do cordão	Inexistente	Suave	Marcado	Marcado	Suave	Sim	Não		Regular	Variável
1	X			X		X	X			X		X		X		X		
2		X			X	X					X	X		X			X	Rebarba resultante da remoção do pino. Abatimento pontual da raiz.
3	X			X		N.A	N.A	N.A			X		X	X				Cordão com menor comprimento devido a problema com o rolamento.
4	X			X		N.A	N.A	N.A		X		X		X		X		Raiz do cordão aparenta estar desviada da junta das placas.
5	X			X		N.A	N.A	N.A	X			X		X			X	Abatimento aumenta no fim do cordão.
6		X			X	X				X		X		X		X		Rebarba no início do cordão. Abatimento aumenta no fim do cordão
7			X		X	N.A	N.A	N.A	X				X		X		X	Não é possível identificar rasgo uma vez que o cordão não estabilizou.

Legenda: N.A - Não aplicável ao ensaio em questão

#### 4.1.4 Análise dos Resultados em PEEK

A inspeção visual dos cordões obtidos permite observar que nos 6 primeiros ensaios, efetuados com a ferramenta com *shoulder* estacionário a rebarba é pouca ou inexistente, contrastando com o ensaio 7, efetuado com a ferramenta de *shoulder* rotativo, que apresenta muita rebarba. Esta observação permite constatar que a ferramenta desenvolvida melhora significativamente a qualidade superficial dos cordões de soldadura obtidos, evitando a ejeção de material.

Observa-se também que os rasgos identificados, resultado da falta de adesão entre o cordão de soldadura e o material base aparecem majoritariamente no LR, tal como descrito na literatura consultada. À exceção do ensaio 1 em que se identificam rasgos no LA e no LR. Este ensaio foi realizado à temperatura ambiente, portanto a falta de adesão entre o cordão de soldadura e ambos os lados do material base pode dever-se à baixa de temperatura de trabalho que fez com que o escoamento e mistura de material não fosse eficiente. Desta forma demonstra-se também a importância da utilização de fontes externas de temperatura.

O esmagamento continua a ser importante para a mistura eficiente de material evitando o aparecimento de rasgos, no entanto devido à maior resistência mecânica do PEEK em relação ao PLA, torna-se mais difícil identificar evidências visuais do esmagamento. Observa-se, no entanto, que o aumento da temperatura de trabalho facilita o esmagamento devido ao amolecimento do material. Relativamente à raiz do cordão, todos os ensaios com a ferramenta de *shoulder* estacionário aparentam ligação, à exceção do ensaio 4 em que devido a um erro de posicionamento do pino, o cordão está ligeiramente desviado da junta das placas. A variação da largura do cordão em alguns dos ensaios deve-se essencialmente a um problema de nivelamento da mesa da fresadora relativamente à ferramenta. Este desnivelamento causa um aumento progressivo da profundidade de penetração do pino ao longo do ensaio, causando a variação e abatimento pontual na raiz do cordão. Também o aquecimento do material ao longo do ensaio contribui para a variação da largura do cordão.

## 4.2 Caracterização macrográfica das juntas soldadas de PEEK

Foi realizada uma análise macrográfica das juntas soldadas, recorrendo ao microscópio digital ISM-PM200SA que permite uma ampliação das amostras até 200x. Esta análise possibilita a comparação da morfologia dos cordões obtidos em cada ensaio e a identificação de defeitos macroestruturais existentes.

## 4.2.1 Resultados em PEEK

Nas Figura 4.11 a Figura 4.13 apresenta-se a secção transversal dos cordões de soldadura de cada um dos 6 ensaios efetuados em PEEK.

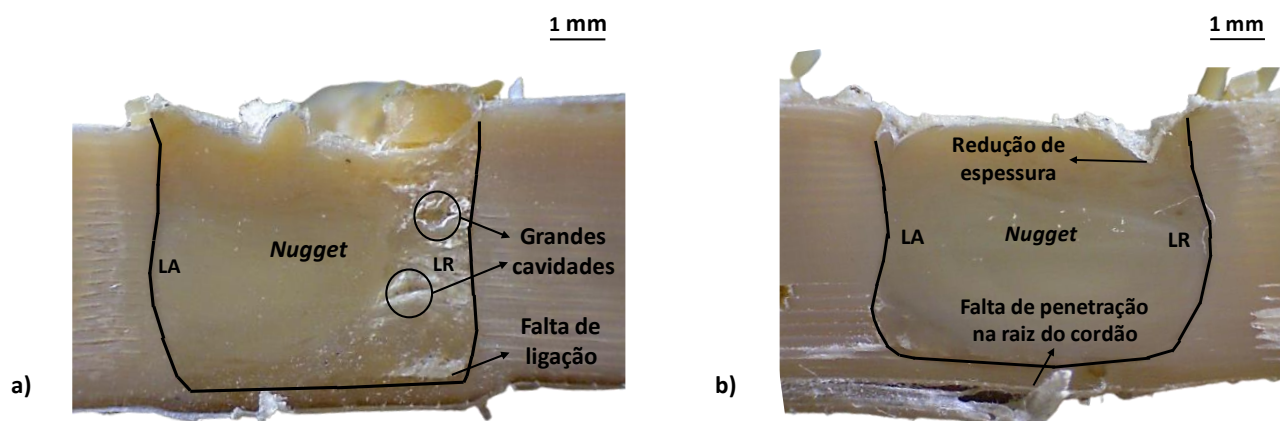


Figura 4.11 - Macrografia dos cordões de SFL em PEEK: a) Ensaio 1, b) Ensaio 2.

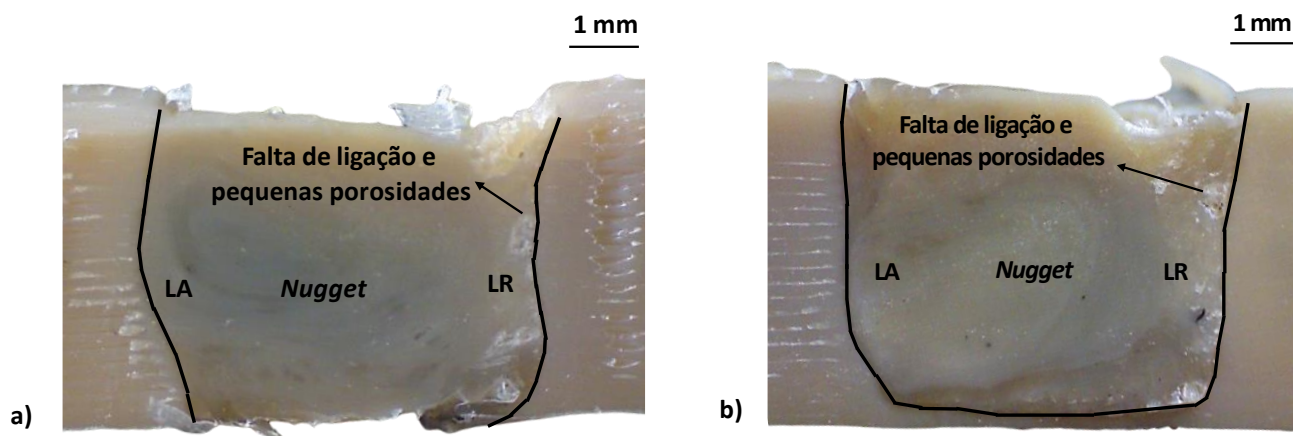


Figura 4.12 - Macrografia dos cordões de SFL em PEEK: a) Ensaio 3, b) Ensaio 4.

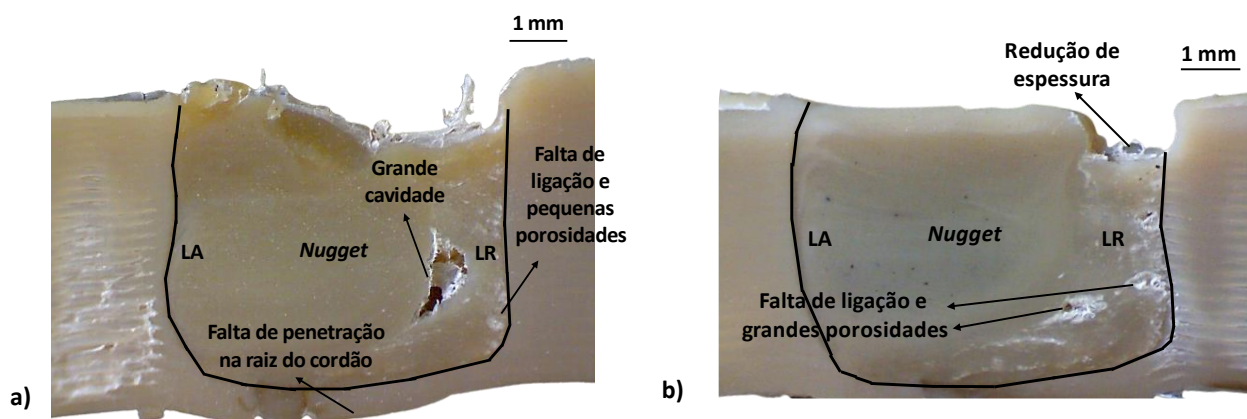


Figura 4.13 - Macrografia dos cordões de SFL em PEEK: a) Ensaio 5, b) Ensaio 6.

## 4.2.2 Análise de Resultados em PEEK

Analisando a geometria do *Nugget* dos diferentes ensaios verifica-se que no ensaio 1, sem aquecimento, o *Nugget* é mais estreito do que nos ensaios com aquecimento externo. Nos ensaios 2 e 5, representados na Figura 4.11 e Figura 4.13, respetivamente, observa-se a diminuição da altura do *Nugget* em toda a sua largura, resultado do defeito na raiz do cordão de soldadura por falta de penetração do pino. A espessura deste defeito é aproximadamente correspondente à distância a que a base do pino passou relativamente à superfície inferior das placas. O aparecimento deste defeito nos ensaios 2 e 5 pode dever-se à baixa força vertical de forjamento exercida. Só através da realização de ensaios de SFL com controlo de carga vertical de forjamento seria possível confirmar esta hipótese. Nestas condições, a distância a que o pino passaria da superfície inferior das placas a soldar poderia ser menor, uma vez que o eventual contacto do pino com a base de fixação causaria um aumento abrupto da força vertical, imediatamente captado pelos sensores que corrigiriam a sua posição.

No ensaio 6, representado na Figura 4.13, é possível identificar também a diminuição da altura do *Nugget*. no entanto esta diminuição não é constante ao longo da largura do mesmo. Na zona central do *Nugget* não se verifica o defeito na raiz do cordão, contudo, no LA e especialmente no LR verifica-se a redução da altura do *Nugget*. Neste caso o defeito não se deve à falta de penetração do pino, mas sim ao modo de aquecimento do material. Tendo a fonte de aquecimento neste ensaio sido a base do *shoulder*, o aquecimento do material não foi uniforme, gerando-se gradientes de temperatura desde a superfície superior até ao cordão da soldadura. Estes gradientes resultam num escoamento menos eficiente do material em redor do pino nas zonas de menor temperatura devido à diminuição da viscosidade do material. O

resultado é a concentração do material na zona central do *Nugget* junto ao pino, e na diminuição da altura do *Nugget* nas zonas laterais, mais afastadas do pino.

Relativamente aos restantes defeitos observados, tal como descrito na literatura consultada, verifica-se que o seu aparecimento se dá quase exclusivamente no LR.

Nos ensaios 2 e 6, Figura 4.11 e Figura 4.13, respetivamente, observa-se a redução de espessura na zona superior do cordão. Este defeito é resultado da ejeção de material da superfície e resulta na diminuição de resistência à tração destes ensaios. Sendo o *shoulder* estacionário, a ejeção do material deve-se principalmente à entrada de material na zona entre o pino em rotação e a base do *shoulder*, como mostra a Figura 4.14.

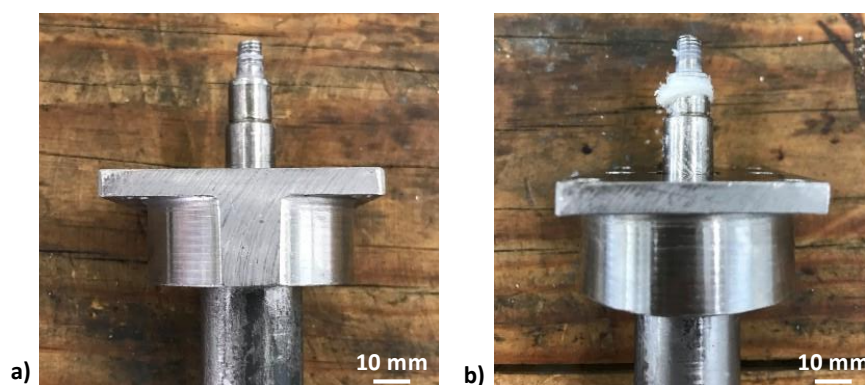


Figura 4.14 - Entrada de material através do casquilho de Teflon: a) Pino antes do ensaio, b) Pino após ensaio.

Embora tenha sido colocado um casquilho de teflon ajustado ao pino e à base do *shoulder*, ao longo dos ensaios o casquilho sofreu algum desgaste, permitindo a entrada de material.

Nos ensaios 1, 3, 4, 5 e 6 observam-se zonas com falta de ligação na interface entre o cordão de soldadura e o material base, no LR e porosidades de dimensões variáveis. O aparecimento destes defeitos no LR sugere que o processo não gerou calor suficiente para que houvesse uma mistura eficiente de material nesta zona. Como é referido em [36], o processo de SFL gera mais calor no LA do que no LR e a baixa condutividade térmica do material em estudo restringe a condução do calor gerado do LA para o LR. No ensaio 5 observa-se uma cavidade de grande dimensão que exige uma análise aprofundada. Este ensaio foi efetuado nas placas impressas com sobre extrusão, ou seja, valor de *Extruder Multiplier* igual a 1.0. Apesar do nível médio de vazios destas placas ser inferior ao das anteriormente impressas, o facto de existir mais material a ser expelido pela *nozzle* no mesmo espaço de tempo, resultou no arrastamento de porções de material depositado. Em algumas zonas das placas isto pode resultar também no

aparecimento de vazios de maior dimensão causados por instabilidades de extrusão durante a impressão, que apesar de existirem em menor número comparados com as porosidades existentes nas placas com sub extrusão, podem ser de maior dimensão, como ilustra a Figura 4.15.

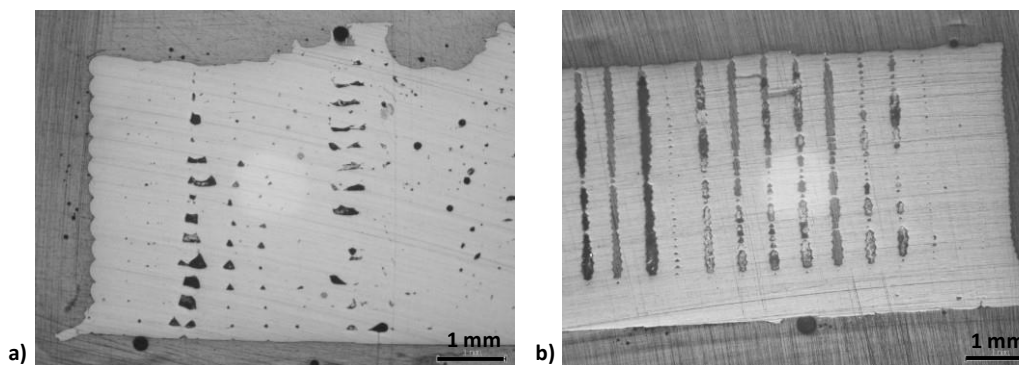


Figura 4.15 - Macrografia das amostras de PEEK impressas: a) Com sobre extrusão. b) Com sub extrusão

Assim, o aparecimento da cavidade de grande dimensão no ensaio 5 é explicado por este fenómeno, acrescentando às limitações deste estudo a qualidade das placas produzidas por fabrico aditivo utilizadas neste estudo

### 4.3 Ensaios de Tração Uniaxial

Os ensaios mecânicos de tração uniaxial foram realizados com o objetivo de quantificar a resistência mecânica à tração dos provetes obtidos, relacionando-a com os parâmetros em estudo. Para levar a cabo estes ensaios foi necessário retirar um provete com o cordão de soldadura realizado na direção transversal, cujas dimensões estão representadas no Anexo A.6. Para a extração destes provetes projetou-se uma moldura para fixação das placas que permitiu o corte das mesmas na CNC com a precisão necessária. Os desenhos técnicos desta moldura, são apresentados no Anexo A.7 e o procedimento para o corte dos provetes é descrito no Anexo B.2. Os ensaios foram realizados de acordo com a norma ISO 527-2:2012(E) para ensaios de tração uniaxial em polímeros, num equipamento da marca MTS, com uma célula de carga de 100 kN e um extensómetro também da MTS (Figura 4.16). A velocidade dos ensaios foi de 0.6 mm/min. O procedimento destes ensaios é descrito detalhadamente no Anexo B.3.

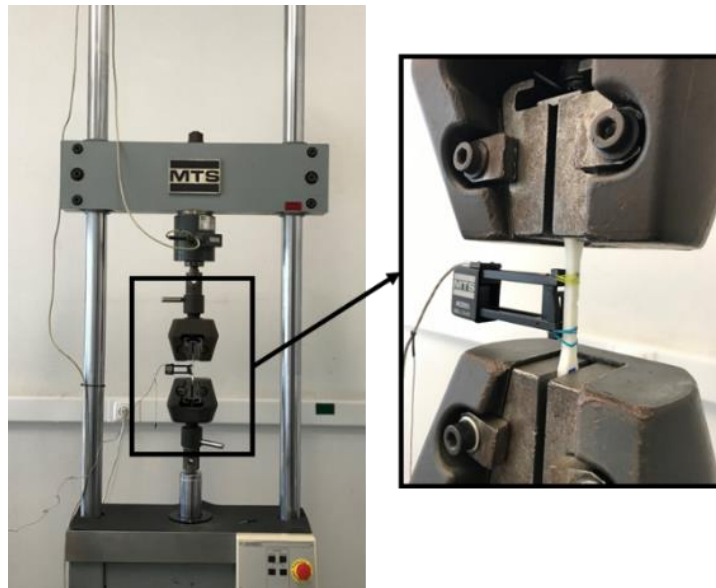


Figura 4.16 - Equipamento utilizado para os ensaios de tração uniaxial.

Do decorrer dos ensaios de tração uniaxial extraem-se os pares de valores de força e deformação registados em cada ensaio. De modo que se pudessem estabelecer as curvas Tensão Nominal ( $\sigma$ ) versus Extensão Nominal (E) foi necessário tratar estes dados recorrendo ao sistema de Equações 4.1.

$$\begin{cases} E = \frac{l - l_0}{l_0} \\ \sigma = \frac{F}{A_0} \end{cases} \quad \text{Equação 4.1}$$

### 4.3.1 Resultados em PLA

Tal como referido no Capítulo 3.1, o objetivo dos ensaios preliminares em PLA foi a otimização de parâmetros, aplicando o Método *Taguchi* com vista a encontrar a combinação paramétrica que permitisse melhorar o aspeto visual e o comportamento mecânico das juntas soldadas de PLA, sendo a propriedade utilizada para otimizar o processo, a tensão máxima, calculada a partir dos dados extraídos dos ensaios de tração uniaxial.

No entanto, o desvio padrão da tensão máxima entre repetições do mesmo grupo foi demasiado elevado, levando a que os resultados obtidos não fossem estatisticamente significativos. Por esta razão, os resultados de otimização do processo e de análise de variância, a partir dos Ensaio de Tração Uniaxial, não são apresentados neste capítulo, mas sim no Anexo C.3. Ainda

assim, apesar da elevada variabilidade entre resultados, a combinação com valor mais elevado de ERJS foi C4 ( $\Omega = 1120$  rev/min,  $v = 11$  mm/min e  $T = 65^\circ\text{C}$ ) com ERJS = 58.9%, seguindo-se C5 ( $\Omega = 1120$  rev/min,  $v = 18$  mm/min e  $T = 85^\circ\text{C}$ ) com ERJS = 49.9%. Estes resultados são consideravelmente mais elevados do que os resultados apresentados em [37], artigo que estuda a FSW de placas de PLA produzidas por fabrico aditivo com shoulder rotativo. São, por isso, notórias as melhorias impostas pela utilização da ferramenta desenvolvida.

### 4.3.2 Resultados em PEEK

Nas Figura 4.17 a Figura 4.23 apresentam-se as curvas Tensão Nominal ( $\sigma$ ) versus Extensão Nominal ( $\epsilon$ ) obtidas para cada ensaio em PEEK. Tendo em conta que todos os provetes apresentaram fratura frágil, a resistência à tração do material foi analisada através da tensão máxima ( $\sigma_{\text{máx}}$ ). A partir do valor médio de  $\sigma_{\text{máx}}$ , Figura 4.24, calculou-se a eficiência relativa da junta soldada (ERJS) de cada ensaio, a partir da Equação 4.2. Em que  $\sigma_{\text{máx}}(X)$  é a tensão máxima de cada ensaio e  $\sigma_{\text{máx}}(\text{MB})$  é a tensão máxima de um provete de material base.

$$ERJS = \frac{\sigma_{\text{máx}}(X)}{\sigma_{\text{máx}}(\text{MB})} \quad \text{Equação 4.2}$$

Na Tabela 4.4 apresentam-se os resultados de ERJS de cada ensaio de SFL realizado em PEEK.

Tabela 4.4 - Eficiência Relativa da Junta Soldada dos ensaios de SFL realizados em PEEK

Ensaio	Parâmetros do ensaio				ERJS (%)			
	Aquecimento externo	Localização do aquecimento	Ferramenta utilizada	Extruder Multiplier	Rep1	Rep2	Rep3	Média
1	Não	N.A	SE	0.9	24.3	11.8	18.0	18.0
2	125 °C	BSF	SE	0.9	29.4	21.7	14.0	21.7
3	145 °C	BSF	SE	0.9	14.8	26.3	15.6	18.9
4	165 °C	BSF	SE	0.9	20.0	25.4	25.1	23.5
5	165 °C	BSF	SE	1.0	26.1	14.8	26.7	22.5
6	165 °C	BS	SE	0.9	17.3	12.0	7.1	12.1
7	165 °C	BSF	SR	0.9	N.L	N.L	N.L	N.A

**Legenda:** N.A - Não aplicável ao ensaio em questão; BSF - Base do Sistema de Fixação; BS - Base do *shoulder*; SE - *Shoulder* estacionário; SR - *Shoulder* rotativo; N.L - Não apresenta ligação

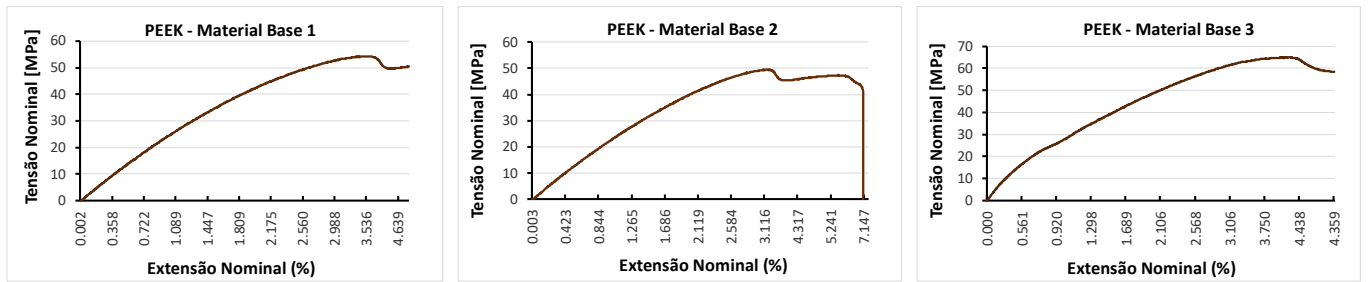


Figura 4.17 - Material Base

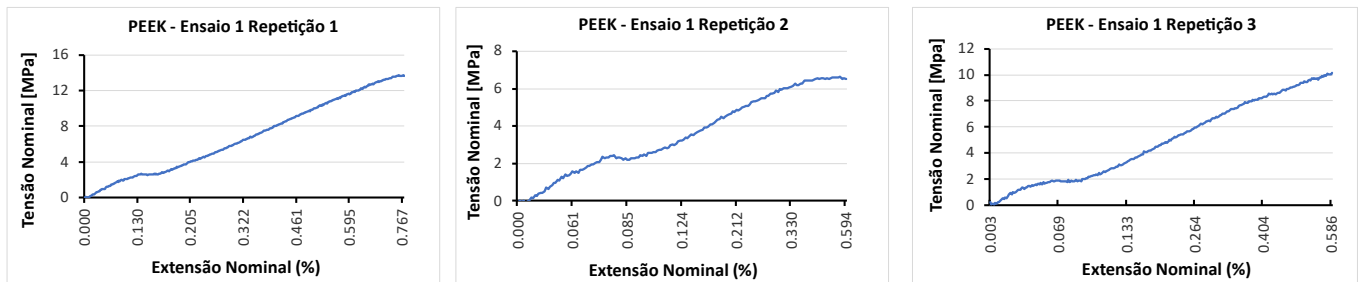


Figura 4.18 - Série de 3 ensaios com combinação de parâmetros 1.

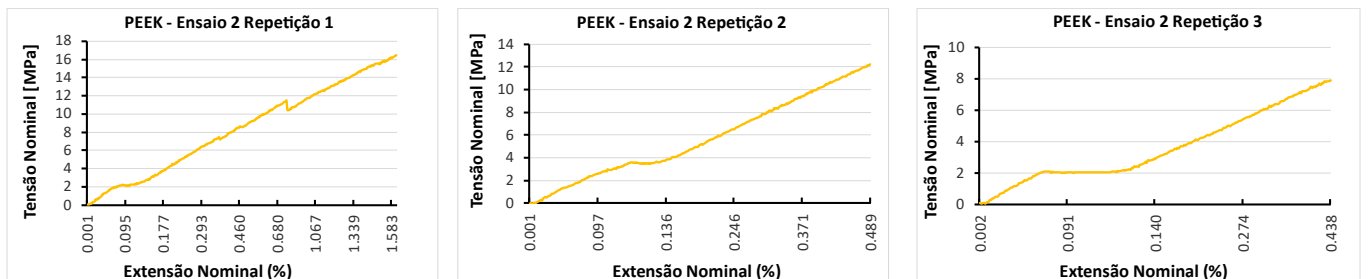


Figura 4.19 - Série de 3 ensaios com combinação de parâmetros 2.

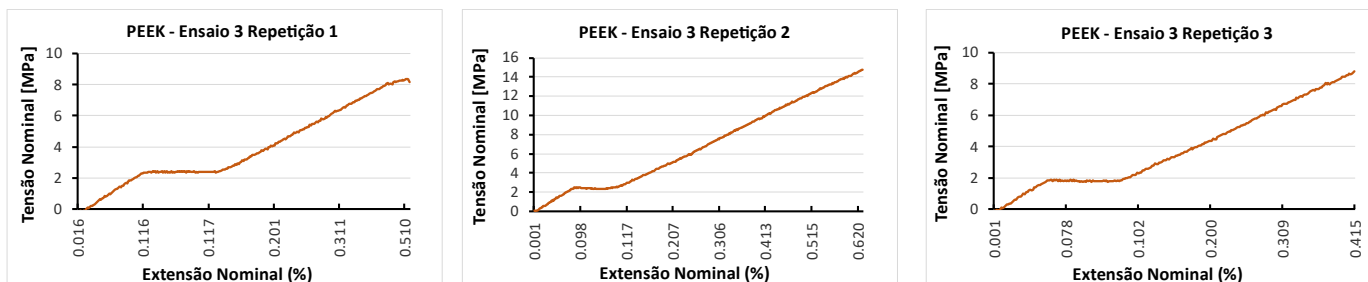


Figura 4.20 - Série de 3 ensaios com combinação de parâmetros 3.

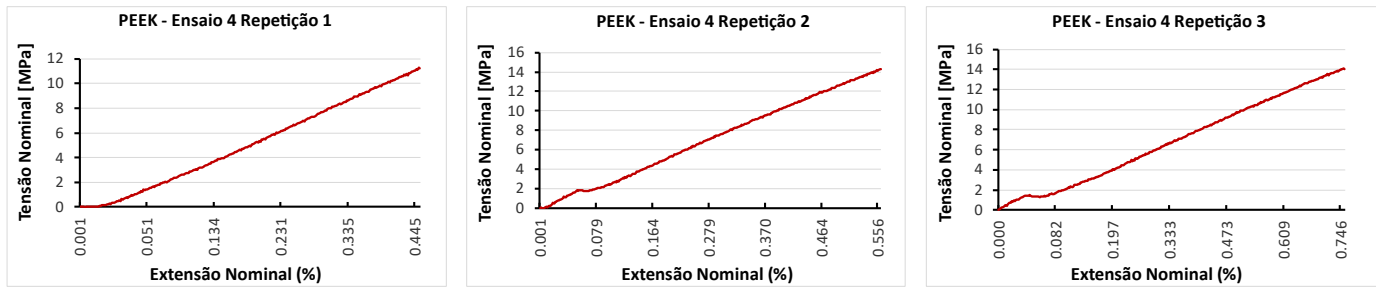


Figura 4.21 - Série de 3 ensaios com combinação de parâmetros 4.

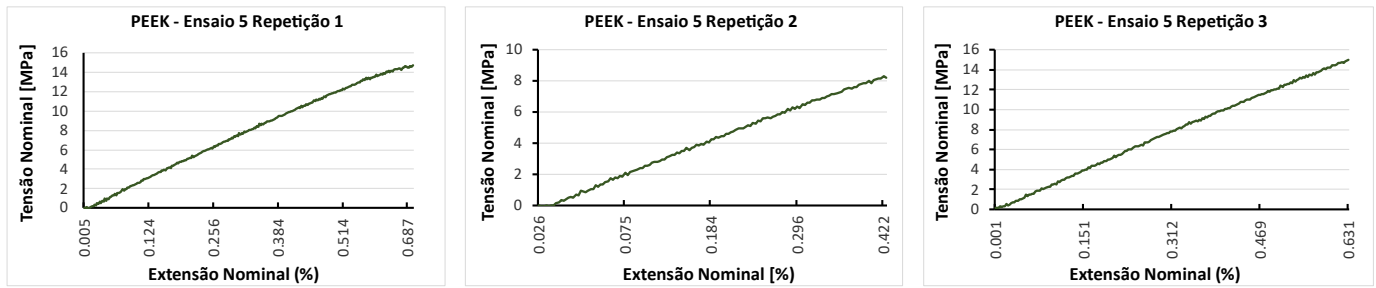


Figura 4.22 - Série de 3 ensaios com combinação de parâmetros 5.

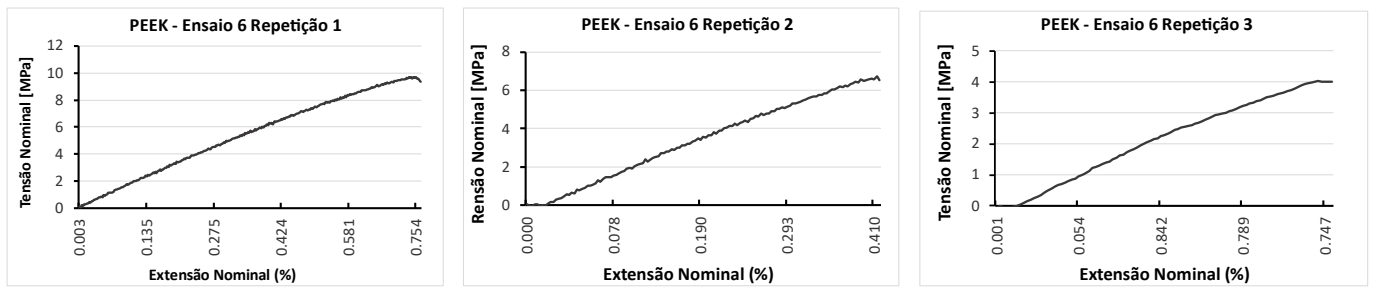


Figura 4.23 - Série de 3 ensaios com combinação de parâmetros 6.

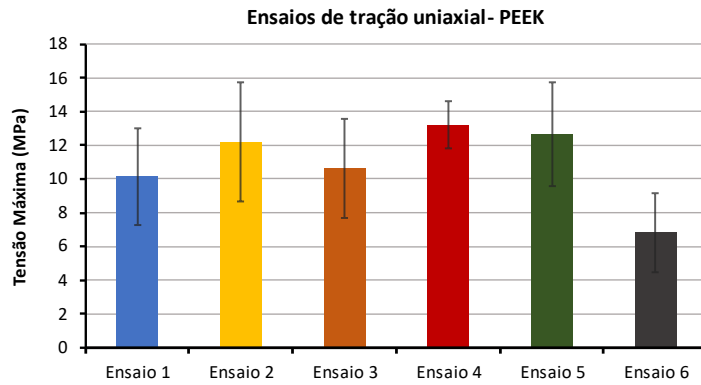


Figura 4.24 - Valor médio de Tensão Máxima dos 6 ensaios e respetivo desvio padrão.

Nas Figura 4.25 a Figura 4.31 apresentam-se as macrografia das faces superiores dos provetes ensaiados e respetivas superfícies de fratura resultantes do ensaio de tração uniaxial. Tal como referido anteriormente, é apresentada somente a repetição com maior ERJS de cada um dos grupos de ensaios, à exceção do grupo 3 em que se apresenta os provetes com maior e menor valor de ERJS.

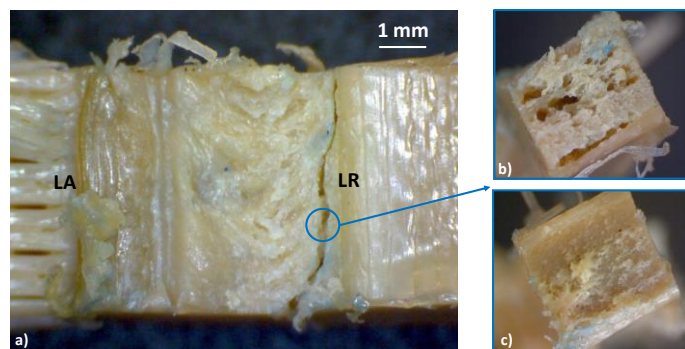


Figura 4.25 - Macrografia do provete após Ensaio 1: a) Superfície superior do provete, b) Superfície de fratura do cordão de soldadura do LR, c) Superfície de fratura da interface do material base com o LR.

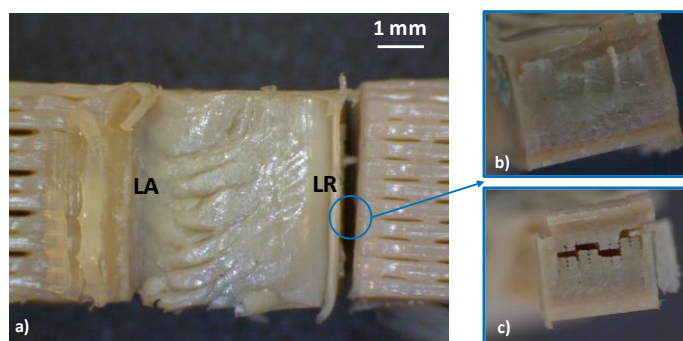


Figura 4.26 - Macrografia do provete após Ensaio 2: a) Superfície superior do provete, b) Superfície de fratura do cordão de soldadura do LR, c) Superfície de fratura da interface do material base com o LR.

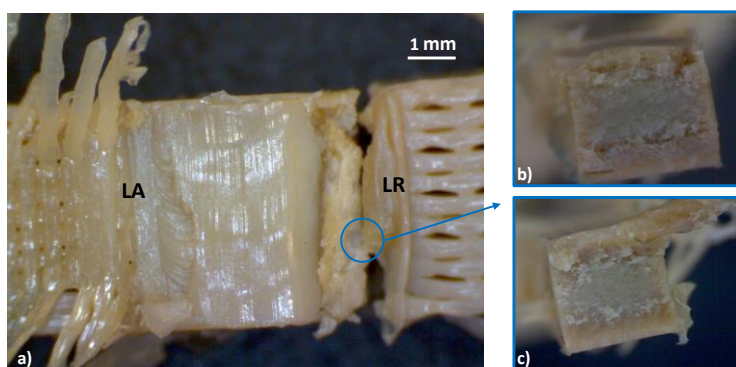


Figura 4.27 - Macrografia do provete após Ensaio 3: a) Superfície superior do provete, b) Superfície de fratura do cordão de soldadura do LR, c) Superfície de fratura da interface do material base com o LR.

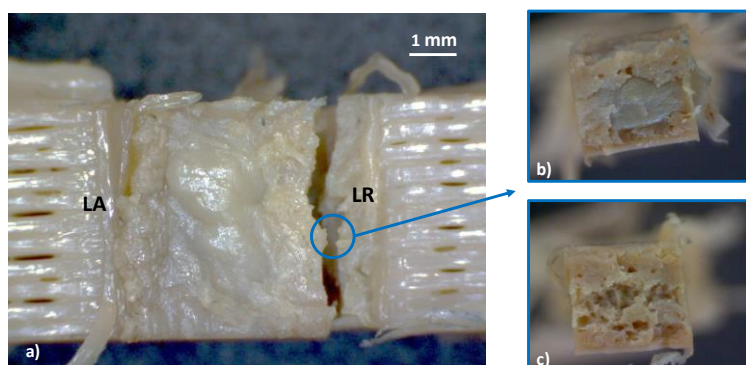


Figura 4.28 - Macrografia do provete após Ensaio 4: a) Superfície superior do provete, b) Superfície de fratura do cordão de soldadura do LR, c) Superfície de fratura da interface do material base com o LR.

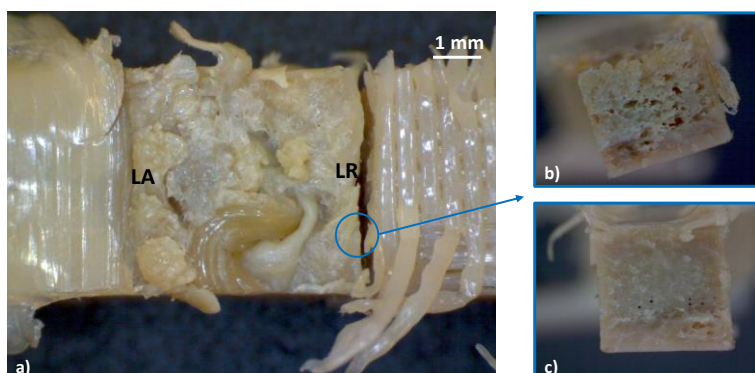


Figura 4.29 - Macrografia do provete após Ensaio 5: a) Superfície superior do provete, b) Superfície de fratura do cordão de soldadura do LR, c) Superfície de fratura da interface do material base com o LR.

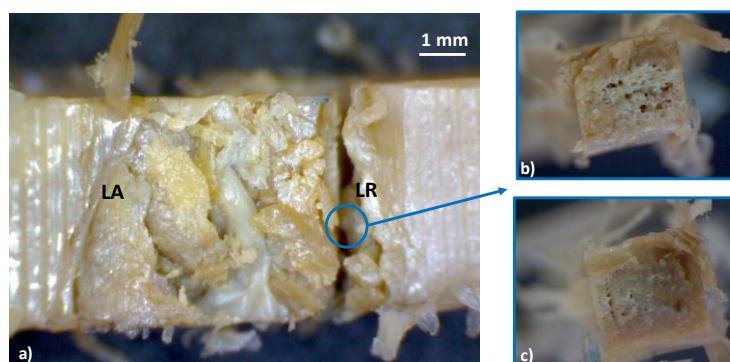


Figura 4.30 - Macrografia do provete após Ensaio 6: a) Superfície superior do provete, b) Superfície de fratura do cordão de soldadura do LR, c) Superfície de fratura da interface do material base com o LR.

Apresenta-se na Figura 4.31 a repetição do ensaio 3 com piores resultados de ERJS de modo a auxiliar a análise e comparação de resultados.

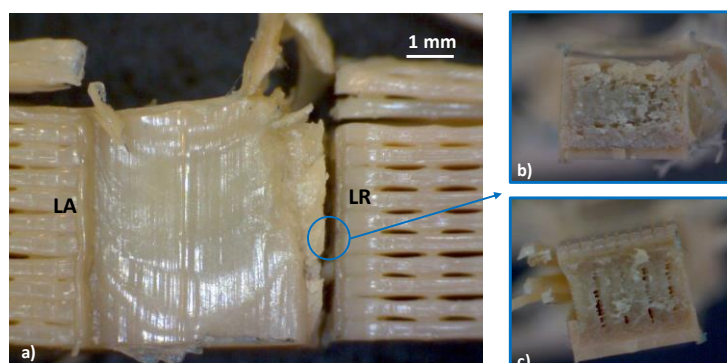


Figura 4.31 - Macrografia do provete com pior valor de ERJS após Ensaio 3: a) Superfície superior do provete, b) Superfície de fratura do cordão de soldadura do LR, c) Superfície de fratura da interface do material base com o LR.

Segue-se na Tabela 4.5 a classificação do tipo de fratura e a localização do seu início para cada ensaio.

Tabela 4.5 - Análise do tipo de fratura obtido em cada ensaio.

Ensaio	Localização do início e desenvolvimento da fratura	Classificação da fratura
1	Inicia-se na raiz do cordão e propaga-se para a interface LR - MB	<b>Frágil</b> por ligação deficiente (colapso)
2	Totalmente na interface LR - MB	<b>Frágil</b> por ligação deficiente (colapso)
3	Totalmente no LR, dentro do cordão	<b>Frágil</b> por ligação deficiente (colapso)
4	Totalmente no LR, dentro do cordão	<b>Frágil</b> com ligeira deformação plástica
5	Inicia-se na raiz dentro do cordão propaga-se para a interface LR - MB	<b>Frágil</b> por ligação deficiente (colapso)
6	Totalmente no LR, dentro do cordão	<b>Frágil</b> por ligação deficiente (colapso)

### 4.3.3 Análise de Resultados em PEEK

A primeira observação aos resultados de ERJS dos provetes de PEEK é a elevada variabilidade entre repetições dentro do mesmo grupo de ensaios, evidenciada pelos valores de desvio padrão apresentados na Figura 4.24. Deve-se essencialmente a dois fatores: variação da força vertical de forjamento exercida entre ensaios, devido a limitações do equipamento utilizado e à baixa qualidade das placas de PEEK, que apesar de impressas com os mesmos parâmetros e nas mesmas condições, não têm qualidade uniforme, principalmente no que diz respeito à existência de vazios entre camadas de material. Este fator é evidente através da observação dos resultados obtidos em duas das repetições do ensaio 3, comparando as Figura 4.27 e Figura 4.31, é possível observar uma quantidade de vazios substancialmente superior na Figura 4.31.

Porém, é ainda assim possível retirar algumas conclusões a partir dos resultados de ERJS, e das superfícies de fratura que permitem avaliar os modos de fratura dos mesmos, apresentados na Tabela 4.5.

Relativamente ao tipo de fratura dos ensaios, todos apresentaram fratura frágil. Nenhum dos ensaios apresentou deformação plástica apreciável durante o Ensaio de Tração Uniaxial antes de fraturar e as superfícies de fratura são praticamente planas em todos os ensaios, comportamento típico de materiais com fratura frágil. Este tipo de fratura é indicativo da existência de defeitos que precipitam a iniciação e propagação de fissuras que culminam na fratura do material, ainda no domínio elástico. Estes defeitos foram identificados e analisados detalhadamente nos resultados da macrografia das juntas soldadas de PEEK e localizam-se essencialmente no LR do cordão de soldadura, sendo este o motivo pelo qual a fratura de todos os ensaios se dá nesta zona, e a causa para os baixos resultados de ERJS obtidos.

Os resultados de ERJS variam entre 11.3% e 23.4%, devido à existência dos defeitos previamente identificados que dificultam a aderência da interface entre o cordão de soldadura e o material base. Ainda assim, permitem afirmar que o processo de SFL com *shoulder* estacionário e aquecimento constitui uma importante melhoria relativamente ao processo de SFL com *shoulder* rotativo. Com a ferramenta de SFL-SE obteve-se um resultado máximo de ERJS de 23,4%, que apesar de baixo, é significativamente superior ao resultado obtido com o *shoulder* rotativo, em que não existiu ligação do material. As tensões obtidas nos ensaios são também em média superiores às reportadas na literatura para a SFL de PEEK com ferramentas de *shoulder* rotativo, ERJS máxima de 11,5% em [38]. Conclui-se também que o aquecimento externo por via do aquecimento da base do *shoulder* não é viável, tendo o resultado deste ensaio sido inferior a todos os restantes, inclusivamente ao ensaio sem aquecimento. Isto deve-se a um aquecimento do material pouco uniforme, com gradientes de temperatura entre as superfícies superior e inferior o que propicia o aparecimento de defeitos na raiz do cordão.

A análise da Tabela 4.4 permite concluir que a temperatura que permite obter melhores resultados de ERJS é 165°C, sendo a superfície de fratura deste ensaio a mais irregular de todos os ensaios, Figura 4.28, podendo ser considerada moderadamente dúctil, o que indica que esta temperatura é a que resulta na obtenção de cordões de soldadura mais resistentes à tração.

## 4.4 Análise da temperatura dos Ensaios de SFL em PEEK

Em todos os ensaios de SFL efetuados em PEEK mediu-se a temperatura do cordão de soldadura na superfície superior das placas de PEEK, antes e após o ensaio. No decorrer do ensaio monitorizou-se a temperatura do rolamento. Utilizou-se uma câmara termográfica de infravermelhos, *Fluke Ti400*, posicionada a cerca de 500 mm da superfície superior das placas e foi utilizado o software *Fluke SmartView®* para tratamento e análise dos dados captados pela câmara.

O objetivo da medição de temperatura na superfície das placas foi a análise da influência dos diferentes níveis de temperatura de fontes externas na temperatura das placas de PEEK. Quanto à medição da temperatura do rolamento, visou garantir que este componente não ultrapassava o limite de temperatura operacional, tendo sido captado em cada ensaio o momento em que este componente atingiu a temperatura máxima, como se ilustra na Figura 4.32.

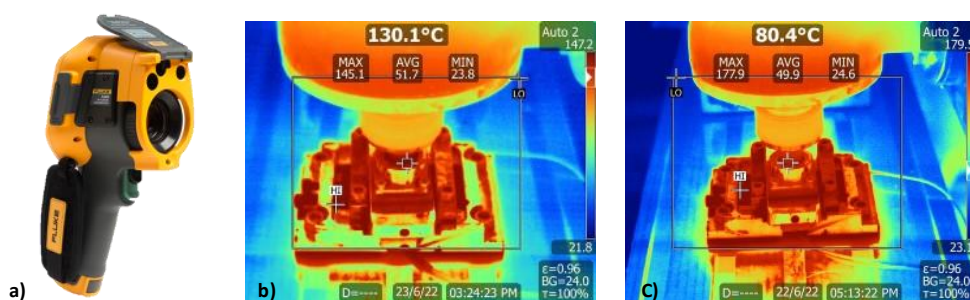


Figura 4.32 - Medição da temperatura do rolamento: a) Câmara termográfica *Fluke Ti400*, b) Temperatura do rolamento durante o ensaio 1, c) Temperatura do rolamento durante o ensaio 4.

Não foi possível monitorizar continuamente a temperatura da superfície das placas durante o ensaio uma vez que no decorrer do mesmo as placas encontravam-se totalmente sobrepostas pela ferramenta de SFL. Foram medidas as temperaturas antes e após o ensaio, o que permitiu observar os efeitos do aquecimento no início e no fim do processo, tanto nos ensaios realizados a temperatura ambiente como com aquecimento na base e no *shoulder*.

Relativamente à temperatura do rolamento, apesar do limite de temperatura operacional para a gaiola do rolamento utilizado ser de 150°C, verificou-se durante os ensaios que ao atingir temperaturas superiores a 120°C este componente libertava vapores, resultado da evaporação do lubrificante. Isto deve-se ao tipo de esforços a que o rolamento estava sujeito, previamente discutidos no Capítulo 3.4. Tal como é descrito neste capítulo foi utilizada um bloco espaçador,

que garantiu o nivelamento da base do *shoulder* e permitiu manter a temperatura operacional do rolamento inferior a 120°C. Na Figura 4.32 apresenta-se a medição de temperatura nos ensaios 1 e 4, sendo que é perceptível o efeito da utilização do espaçador ao reduzir a temperatura do rolamento de 130.1°C para 80.4°C. A Figura 4.32 evidencia ainda que o aquecimento do rolamento se deveu essencialmente aos esforços a que este componente foi sujeito, mais do que à temperatura da base do sistema de fixação, uma vez que o ensaio 4 foi efetuado com a base a 165°C e o ensaio 1 com a base a 125°C.

No Anexo C.4, apresentam-se os valores de temperatura registados na superfície das placas de PEEK antes e depois dos diferentes ensaios. A análise das medições de temperatura antes dos diferentes ensaios permite concluir que o aquecimento das placas de PEEK a partir do aquecimento da base do sistema de fixação foi mais eficiente, permitindo um aquecimento mais uniforme das placas até à temperatura definida. Pelo contrário, relativamente ao aquecimento do *shoulder*, verifica-se que apesar de ter sido aquecido até 165°C e mantido em contacto com a superfície do material durante 10 segundos antes do início do ensaio, a temperatura do material antes do ensaio era de 59.3°C e após o ensaio 87.0°C.

A temperatura registada após os ensaios é relevante uma vez que é indicativa do nível de temperatura que foi atingido no cordão de soldadura obtido. Verifica-se que no ensaio 4, Figura C.12, após o ensaio, a superfície das placas atingiu os 178°C. Esta observação permite concluir que o cordão de soldadura se estabeleceu a uma temperatura superior à temperatura de transição vítrea do material, portanto ocorreu amolecimento do material permitindo a sua mistura, sendo este um dos motivos pelos quais este ensaio obteve o maior valor de ERJS. Os restantes ensaios com a temperatura das fontes externas inferiores resultaram em temperaturas de superfície do PEEK inferiores a 151°C, sendo notória a influência da temperatura externa nos resultados.

## CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo apresentam-se as principais conclusões retiradas do trabalho experimental realizado. São ainda apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros que visam contribuir para o desenvolvimento do processo de SFL em placas de PEEK produzidas por fabrico aditivo.

### 5.1 Conclusões

A aplicação da SFL em polímeros levanta alguns desafios. Para a resolução dos mesmos foram desenvolvidas variantes deste processo, como é o exemplo da SFL-SE ou SFL utilizando fontes externas de aquecimento, que levaram a melhorias substanciais dos resultados obtidos. Assim neste trabalho foi desenvolvida uma ferramenta que permite a aplicação de ambas as variantes para o estudo da aplicação de SFL em polímeros impressos por 3D, e a partir do qual se retiraram conclusões importantes para o desenvolvimento futuro desta tecnologia:

- É necessário garantir que as condições do material base produzido, nomeadamente a qualidade de impressão das placas, não afeta o estudo da aplicação da SFL;
- A utilização da ferramenta de SFL-SE resulta em soldaduras com melhorias significativas na qualidade superficial, sem a presença de rebarba, independentemente dos parâmetros utilizados;
- O aparecimento de rasgos, observados maioritariamente no LR das amostras, está relacionado com a força vertical de forjamento exercida. A falta de esmagamento, que corresponde a uma baixa força vertical de forjamento exercida, resulta num escoamento de material menos eficiente prejudicando a ligação entre o material;

- A utilização de fontes de temperatura externa para o aquecimento do material, aproximando-o do seu estado visco-plástico, facilita o referido esmagamento;
- A profundidade de penetração insuficiente do pino da ferramenta promove o aparecimento de defeitos na raiz do cordão de soldadura por falta de mistura de material nesta zona;
- A utilização do *shoulder* como fonte externa de aquecimento do material resulta na formação de um gradiente térmico entre a face superior e a raiz do cordão, que pode resultar na falta de temperatura na raiz. Assim, existe uma redução de altura do *Nugget* junto da raiz do cordão nos LR e LA, ou seja, nas zonas mais afastadas da influência do pino;
- A redução de espessura na superfície de algumas soldaduras deve-se à entrada de material na ferramenta devido à degradação do casquilho de teflon da mesma;
- O aparecimento de defeitos no cordão de soldadura é dependente da qualidade do material base. Nas placas produzidas com sub extrusão a grande quantidade de vazios provoca diferenças de densidade entre o cordão e o material base resultando em descontinuidades. Estas descontinuidades, na interface entre cordão e material base constituem pontos de concentração de tensão, promovendo assim a propagação de fissuras que resulta na fratura frágil dos provetes. Por outro lado, a utilização de placas impressas com sobre extrusão propicia o aparecimento de cavidades de grandes dimensões, devido à grande dimensão dos vazios previamente existentes no material, comparando com placas impressas sem sobre extrusão;
- Os provetes ensaiados apresentam fratura frágil, no LR, resultado da iniciação de fissuras a partir dos defeitos identificados na secção transversal do cordão de soldadura nesta zona. A exceção é o ensaio 4, cuja temperatura da base do sistema de fixação foi de 165°C que, apesar de também apresentar uma fratura frágil, mostra indícios de deformação plástica das regiões entre os vazios;
- Os resultados de ERJS obtidos com a ferramenta desenvolvida, entre 11 e 23,4%, indicam que esta ferramenta resulta em melhorias significativas quando comparada com a ferramenta tradicional de *shoulder* rotativo que, por sua vez não se mostrou eficaz na ligação das placas de PEEK;
- O ensaio 4 apresentou o valor de ERJS mais elevado, 23,4%, indicando que a o aquecimento da base do sistema de fixação a 165°C é o modo de aquecimento que resulta em soldaduras mais resistentes à tração;

- A monitorização da temperatura durante os ensaios permitiu concluir que as elevadas temperaturas favoráveis à SFL do PEEK, colocam em causa a longevidade da ferramenta projetada. Assim, são necessários desenvolvimentos futuros no projeto da ferramenta no sentido de melhorar o suporte dos esforços resultantes do processo e o condicionamento da temperatura do rolamento;
- A monitorização da temperatura antes e após os ensaios permitiu concluir também que a obtenção do maior valor de ERJS se deu para o ensaio em que foi ultrapassada a temperatura de transição vítrea, sendo esta uma observação a ter em conta para a definição futura de parâmetros operacionais para a SFL em PEEK. Os resultados indicam que a utilização de temperaturas superiores resultará em soldaduras de qualidade superior.

## 5.2 Trabalhos futuros

Sendo este o primeiro trabalho de investigação de aplicação de SFL em PEEK produzido por fabrico aditivo realizado com a ferramenta desenvolvida, são necessárias melhorias à ferramenta e a todo o processo experimental para que futuramente se consigam melhorar os resultados obtidos. Apresentam-se as seguintes sugestões de melhoria e novos focos de investigação para o desenvolvimento desta tecnologia:

- Realização de um trabalho de investigação relacionado com o fabrico aditivo de PEEK e da influência dos parâmetros de impressão na qualidade e propriedades mecânicas das placas obtidas de modo a otimizar as condições do material base utilizado para a aplicação de SFL;
- Alterações ao equipamento ou ferramenta utilizados possibilitando a realização de ensaios de SFL com controlo de força vertical de forjamento;
- Melhorar a ferramenta de SFL, tendo como objetivo a diminuição dos esforços a que o rolamento está sujeito, principalmente os esforços transversais produzidos pelo movimento de avanço linear da ferramenta. Neste sentido, podem também ser incluídos sistemas de arrefecimento do rolamento e respetiva caixa para melhorar as suas condições de funcionamento;
- Alterar o casquilho de teflon, de modo a evitar a sua degradação e melhorar a sua durabilidade que resulta na melhoria da qualidade superficial das soldaduras;
- Depois de estabilizar o processo e obter repetibilidade entre ensaios, realizar um estudo de parametrização de SFL em PEEK como o Método de *Taguchi*, que permitirá

concluir quais os parâmetros que permitem otimizar o processo e perceber a influência relativa dos mesmos na qualidade das soldaduras obtidas.

- Avaliar a temperatura do material durante o ensaio de SFL, com recurso a termopares colocados junto à zona de influência do pino, de forma a estudar a evolução térmica do material durante o processo de SFL e relacioná-la com o aparecimento de defeitos e a sua localização;
- Avaliar a cristalinidade dos cordões de soldadura dos ensaios. Permitirá compreender a influência dos efeitos térmicos dos parâmetros dos diferentes ensaios no grau de cristalinidade das soldaduras obtidas, que por sua vez influencia as propriedades mecânicas do material como a resistência à tração.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] W. M. Thomas, E. D. Nicholas, J. C. Needham, M. G. Murch, P. Temple-Smith, and C. J. Dawes, "Friction Welding, United States Patent," US Patent 5.460.317, 1995.
- [2] S. M. Kurtz, *An Overview of PEEK Biomaterials*, 2nd ed. Elsevier Inc., 2019.
- [3] D. J. Blundell and B. N. Osborn, "The morphology of poly(aryl-ether-ether-ketone)," *Polymer (Guildf)*, vol. 24, no. 8, pp. 953–958, 1983, doi: 10.1016/0032-3861(83)90144-1.
- [4] M. F. Talbott, G. S. Springer, and L. A. Berglund, "The Effects of Crystallinity on the Mechanical Properties of PEEK Polymer and Graphite Fiber Reinforced PEEK," *J. Compos. Mater.*, vol. 21, no. 11, pp. 1056–1081, 1987, doi: 10.1177/002199838702101104.
- [5] H. Gupta and R. Salovey, "Thermal Behavior of Transparent Poly(etheretherketOne) (PEEK) Film," *Polym. Eng. Sci.*, vol. 30, no. 8, pp. 453–458, 1990.
- [6] M. Flanagan *et al.*, "Comparative manufacture and testing of induction- welded and adhesively bonded carbon fibre PEEK stiffened panels," *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, vol. 32, no. 12, pp. 1622–1649, 2019, doi: 10.1177/0892705718792362.
- [7] M. Russello, G. Catalanotti, S. C. Hawkins, and B. G. Falzon, "Welding of thermoplastics by means of carbon-nanotube web," *Compos. Commun.*, vol. 17, pp. 56–60, 2020, doi: 10.1016/j.coco.2019.11.001.
- [8] M. J. Troughton, Ed., "Chapter 2 - Ultrasonic Welding," in *Handbook of Plastics Joining (Second Edition)*, Second Edi., Boston: William Andrew Publishing, 2009, pp. 15–35.
- [9] S. Hamdan and G. M. Swallowe, "The strain-rate and temperature dependence of the mechanical properties of polyetherketone and polyetheretherketone," *J. Mater. Sci.*, vol. 31, no. 6, pp. 1415–1423, 1996, doi: 10.1007/BF00357847.
- [10] M. K. B. Givi and P. Asadi, "General introduction," in *Advances in Friction Stir Welding and Processing*, Woodhead Publishing Limited, pp. 1–19.
- [11] R. A. Gite, P. K. Loharkar, and R. Shimpi, "Friction stir welding parameters and application: A review," *Mater. Today Proc.*, vol. 19, pp. 361–365, 2019, doi: 10.1016/j.matpr.2019.07.613.
- [12] 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," *Weld. World*, no. 0123456789, 2021, doi: 10.1007/s40194-021-01178-0.
- [13] M. A. R. Pereira, A. M. Amaro, P. N. B. Reis, and A. Loureiro, "Effect of friction stir welding techniques and parameters on polymers joint efficiency—a critical review," *Polymers*

- (*Basel*), vol. 13, no. 13, 2021, doi: 10.3390/polym13132056.
- [14] 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," *Weld. World*, no. 0123456789, 2021, doi: 10.1007/s40194-021-01178-0.
- [15] S. H. Iftikhar, A. H. I. Mourad, J. Sheikh-Ahmad, F. Almaskari, and S. Vincent, "A comprehensive review on optimal welding conditions for friction stir welding of thermoplastic polymers and their composites," *Polymers (Basel)*, vol. 13, no. 8, 2021, doi: 10.3390/polym13081208.
- [16] Y. Bozkurt, "The optimization of friction stir welding process parameters to achieve maximum tensile strength in polyethylene sheets," *Mater. Des.*, vol. 35, pp. 440–445, 2012, doi: 10.1016/j.matdes.2011.09.008.
- [17] S. Hoseinlghab, S. S. Mirjavadi, N. Sadeghian, I. Jalili, M. Azarbarmas, and M. K. Besharati Givi, "Influences of welding parameters on the quality and creep properties of friction stir welded polyethylene plates," *Mater. Des.*, vol. 67, pp. 369–378, 2015, doi: 10.1016/j.matdes.2014.11.039.
- [18] A. K. R. Sharma, M. R. Choudhury, and K. Debnath, "Experimental investigation of friction stir welding of PLA," *Weld. World*, vol. 64, pp. 1011–1021, 2020, doi: <https://doi.org/10.1007/S40194-020-00890-7>.
- [19] A. Zafar, M. Awang, S. R. Khan, and S. Emamian, "Investigating friction stir welding on thick nylon 6 plates," *Weld. J.*, vol. 95, no. 6, pp. 210s–218s, 2016.
- [20] 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.
- [21] F. Simões and D. M. Rodrigues, "Material flow and thermo-mechanical conditions during Friction Stir Welding of polymers : Literature review , experimental results and empirical analysis," vol. 59, pp. 344–351, 2014, doi: 10.1016/j.matdes.2013.12.038.
- [22] S. Eslami, J. F. Miranda, L. Mourão, P. J. Tavares, and P. M. G. P. Moreira, "Polyethylene friction stir welding parameter optimization and temperature characterization," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 99, no. 1–4, pp. 127–136, 2018, doi: 10.1007/s00170-018-2504-x.
- [23] M. Moreno-Moreno, Y. Macea Romero, H. Rodríguez Zambrano, N. C. Restrepo-Zapata, C. R. M. Afonso, and J. Unfried-Silgado, "Mechanical and thermal properties of friction-stir welded joints of high density polyethylene using a non-rotational shoulder tool," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 97, no. 5–8, pp. 2489–2499, 2018, doi: 10.1007/s00170-018-2102-y.
- [24] Y. Huang *et al.*, "Friction stir welding/processing of polymers and polymer matrix composites," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 105, pp. 235–257, 2018, doi: 10.1016/j.compositesa.2017.12.005.
- [25] F. Lambiase, H. A. Derazkola, and A. Simchi, "Friction Stir Welding and Friction Spot Stir Welding Processes of Polymers—State of the Art," *Materials (Basel)*, vol. 13(10), no. Innovative Technologies and Materials for High-Performance Components, 2020, doi: 10.3390/ma13102291.
- [26] M. Aydin, "Effects of Welding Parameters and Pre-Heating on the Friction Stir Welding of UHMW-Polyethylene Effects of Welding Parameters and Pre-Heating on the Friction

- Stir Welding of UHMW-Polyethylene," *Polym. Plast. Technol. Eng.*, vol. 2559, 2010, doi: 10.1080/03602551003664503.
- [27] 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, 2015, doi: 10.1016/j.jmapro.2015.07.005.
- [28] A. Mostafapour and F. T. Asad, "Investigations on joining of Nylon 6 plates via novel method of heat assisted friction stir welding to find the optimum process parameters," *Sci. Technol. Weld. Join.*, vol. 21, no. 8, pp. 660–669, 2016, doi: 10.1080/13621718.2016.1169669.
- [29] E. Azarsa and A. Mostafapour, "Experimental investigation on flexural behavior of friction stir welded high density polyethylene sheets," *J. Manuf. Process.*, vol. 16, no. 1, pp. 149–155, 2014, doi: 10.1016/j.jmapro.2013.12.003.
- [30] 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," *Weld. World*, vol. 63, no. 1, pp. 181–190, 2019, doi: 10.1007/s40194-018-00677-x.
- [31] Dielectric Manufacturing, "Material Properties of Thermoplastic PEEK - Polyetheretherketone," 2021. <https://dielectricmfg.com/knowledge-base/peek/> (accessed Feb. 15, 2022).
- [32] M. S. Barkhad, B. Abu-Jdayil, A. H. I. Mourad, and M. Z. Iqbal, "Thermal insulation and mechanical properties of polylactic acid (PLA) at different processing conditions," *Polymers (Basel)*, vol. 12, no. 9, pp. 1–16, 2020, doi: 10.3390/POLYM12092091.
- [33] S. M. Bhasney, P. Bhagabati, A. Kumar, and V. Katiyar, "Morphology and crystalline characteristics of polylactic acid [PLA]/linear low density polyethylene [LLDPE]/microcrystalline cellulose [MCC] fiber composite," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 171, no. November 2018, pp. 54–61, 2019, doi: 10.1016/j.compscitech.2018.11.028.
- [34] V. C. Pinto *et al.*, "Comparative Failure Analysis of PLA, PLA/GNP and PLA/CNT-COOH Biodegradable Nanocomposites thin Films," *Procedia Eng.*, vol. 114, pp. 635–642, 2015, doi: 10.1016/j.proeng.2015.08.004.
- [35] SKF, "Rolamentos de esferas de contato angular," 2022. <https://www.skf.com/pt/products/rolling-bearings/ball-bearings/angular-contact-ball-bearings> (accessed Jul. 12, 2022).
- [36] N. Mendes, A. Loureiro, C. Martins, P. Neto, and J. N. Pires, "Effect of friction stir welding parameters on morphology and strength of acrylonitrile butadiene styrene plate welds," *Mater. Des.*, vol. 58, pp. 457–464, 2014, doi: 10.1016/j.matdes.2014.02.036.
- [37] S. M. Senthil, "Effect of Tool Rotational Speed and Traverse Speed on Friction Stir Welding of 3D-Printed Polylactic Acid Material," vol. 15, no. 1, pp. 1–9, 2021, doi: 10.14416/j.asep.2021.09.002.
- [38] J. V. Jose and K. Panneerselvam, "Joining of PEEK plates by friction stir welding process," *Mater. Today Proc.*, vol. 39, pp. 1635–1639, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.05.768.





## A.2 Especificações técnicas para o rolamento 7200 BEP produzido pela SKF



### 7200 BEP



#### Single row angular contact ball bearing

These single row angular contact ball bearings can accommodate radial and axial loads acting simultaneously, where the axial load acts in one direction only. They can operate at high speeds and, depending on the variant, even very high speeds. They are more suitable than deep groove ball bearings for supporting large axial forces acting in one direction.

- High-speed capability
- Accommodate relatively high radial loads and large unilateral axial loads

#### Overview

##### Dimensions

Bore diameter	10 mm
Contact angle	40 °
Outside diameter	30 mm
Width	9 mm

##### Performance

Basic dynamic load rating	7.02 kN
Basic static load rating	3.35 kN
Limiting speed	30 000 r/min
Reference speed	30 000 r/min

Figura A.2 - Especificações técnicas para o rolamento 7200 BEP.

Anel externo										
D	$\Delta_{0mp}$		$V_{Dp}^{2)}$ Série de diâmetros 7, 8, 9 0, 1 2, 3, 4			Rolamentos tampados <sup>3)</sup> máx.	$V_{0mp}^{2)}$ máx.	$\Delta_{Cs}, \Delta_{C1s}, V_{Cs}$	$K_{Ca}$ máx.	
	sobre incl.	alta baixa	máx.	máx.	máx.					
mm	$\mu m$		$\mu m$			$\mu m$	$\mu m$		$\mu m$	
2,5	18	0	-8	10	8	6	10	6	Os valores são idênticos àqueles do anel interno do mesmo rolamento.	15
18	30	0	-9	12	9	7	12	7		15
30	50	0	-11	14	11	8	16	8		20

Figura A.3 - Tabela de tolerância de fabrico para o Anel externo do rolamento 7200 BEP.

Diâmetro nominal do furo da caixa de mancal		Tolerância do diâmetro externo do rolamento		Desvios do diâmetro do furo do mancal, ajustes resultantes <sup>4)</sup>		
D		$f_{D0mp}$		Classes de tolerância		
				N6@ N7@		
				Desvios (diâmetro do furo da caixa de mancal)		
				Interferência (-)/folga (+) teórica		
				Interferência (-)/folga (+) provável		
mm		$\mu m$		$\mu m$		
18	30	0	-9	-24	-11	-28

Figura A.4 - Tolerâncias e ajustes resultantes para montagem com aperto do rolamento 7200 BEP.

### A.3 Desenho técnico da Caixa de Montagem do Rolamento

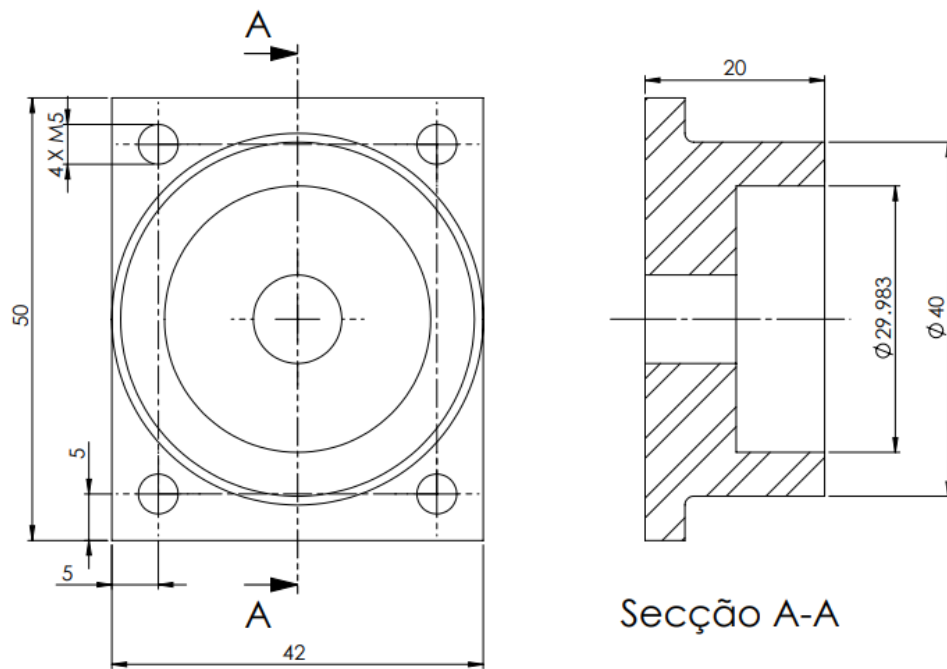


Figura A.5 - Desenho técnico da caixa de montagem do rolamento.

#### A.4 Desenho técnico da Base do *Shoulder*

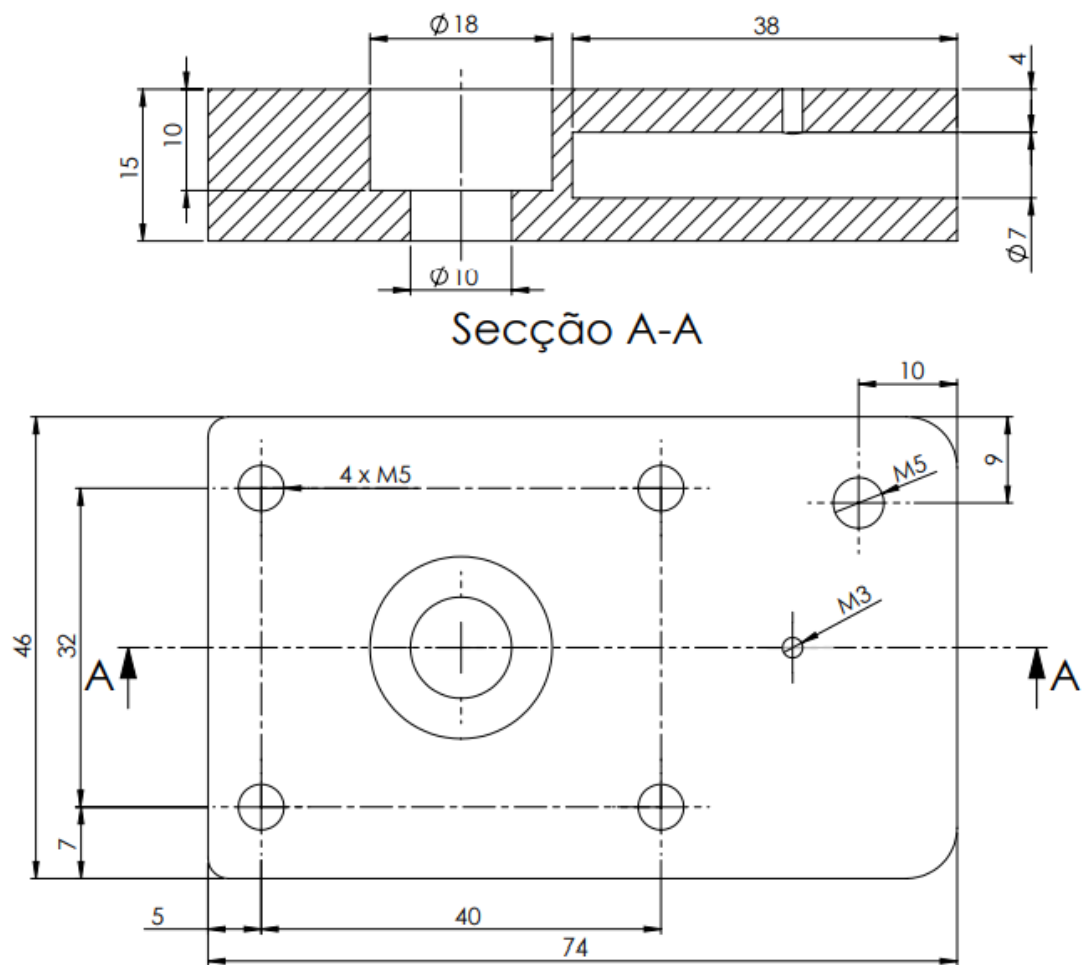


Figura A.6 - Desenho técnico da Base do *Shoulder*.

## A.5 Desenho técnico do Pino da ferramenta

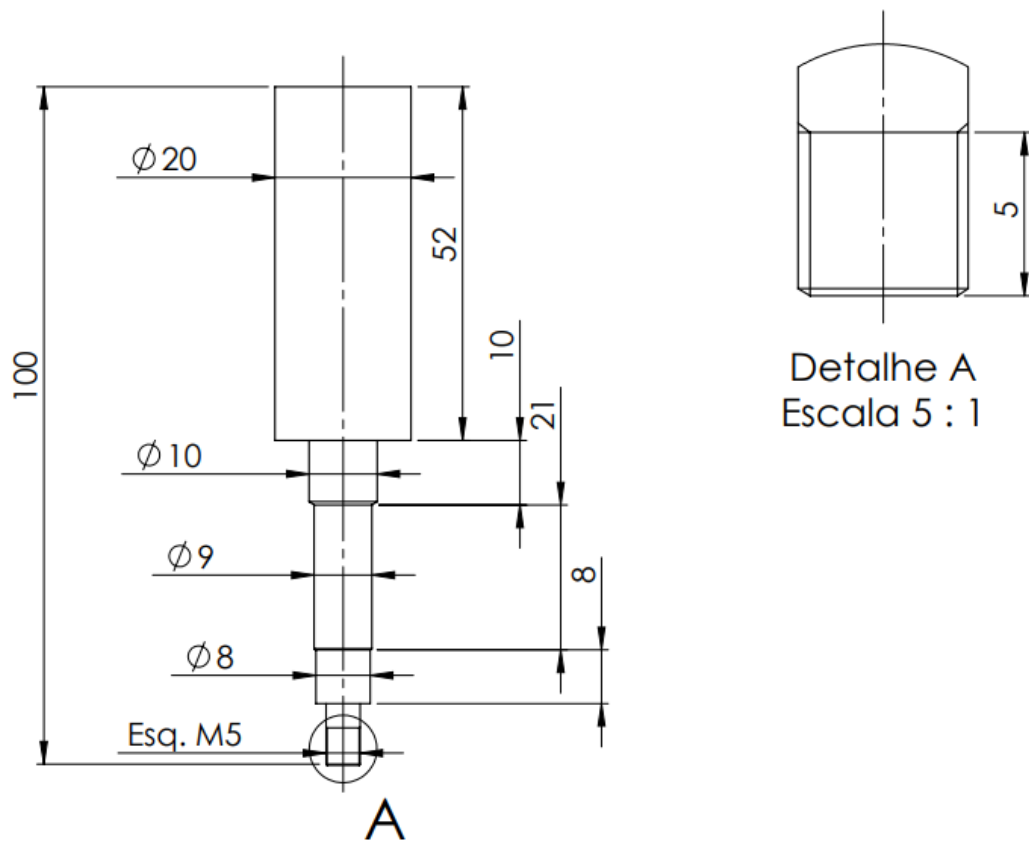


Figura A.7 - Desenho técnico do pino da ferramenta.

## A.6 Geometria dos provetes para ensaio de tração uniaxial

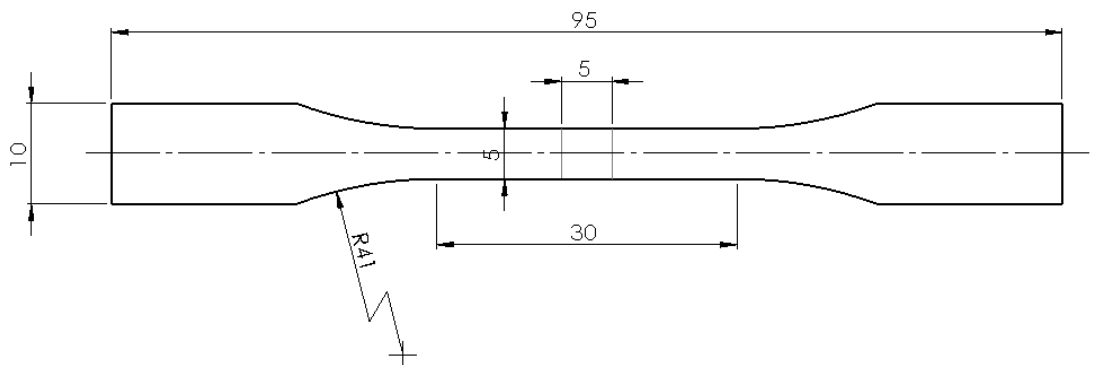


Figura A.8 - Desenho técnico dos provetes para ensaio de tração uniaxial.

## A.7 Desenho técnico da moldura desenvolvida para o corte de provetes do ensaio de tração uniaxial

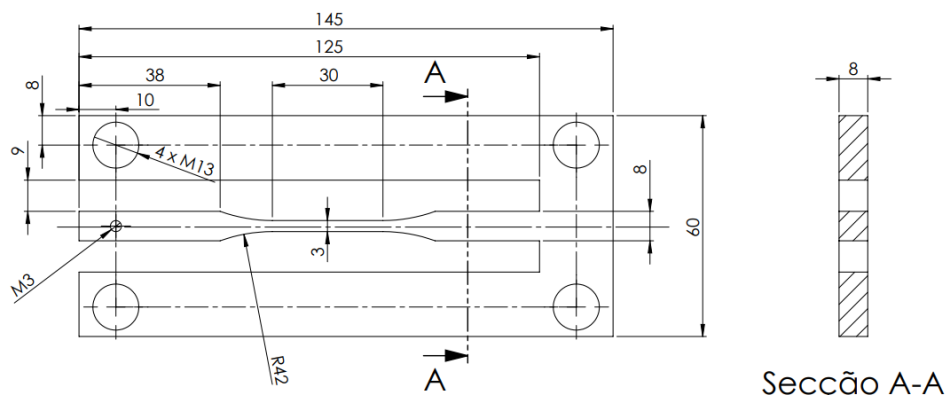


Figura A.9 - Componente 1 da moldura de fixação para corte de provetes do ensaio de tração uniaxial.

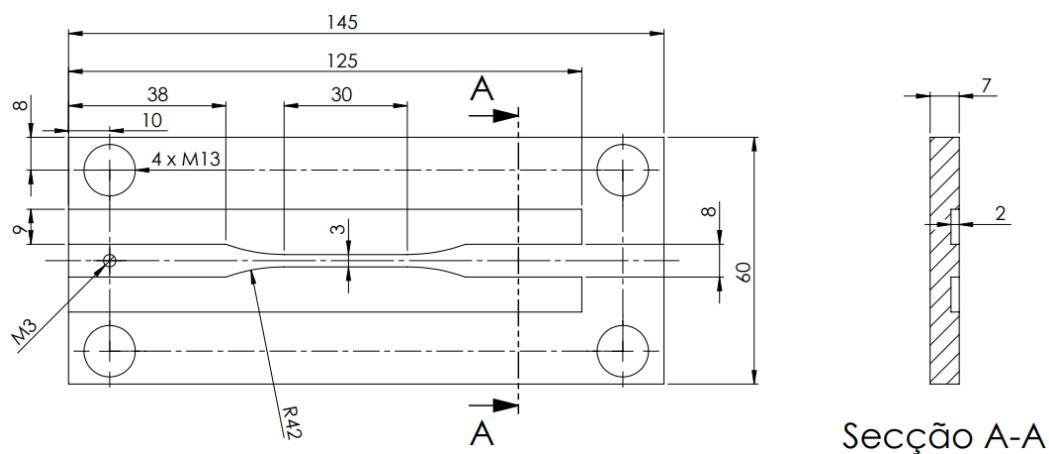


Figura A.10 - Componente 2 da moldura de fixação para corte de provetes do ensaio de tração uniaxial.

A moldura desenvolvida é constituída pelos dois componentes apresentados nas A.10 e A.9. O componente 1 é o módulo inferior da moldura e fica fixo à mesa da CNC, o componente 2 é o módulo superior da moldura e constrange todos os movimentos das placas soldadas. Os dois componentes são separados entre si por 3 espaçadores de 4.5 mm de espessura que não interferem com o processo de corte e garantem o constrangimento das placas por compressão.

## ANEXOS - PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

### B.1 Procedimento dos Ensaios de Soldadura por Fricção Linear

Nesta secção é detalhado todo o procedimento experimental seguido para a realização de todos os ensaios de SFL.

Em primeiro lugar descreve-se a fase preparatória e montagem comum a todos ensaios e de grande importância para a obtenção de resultados satisfatórios, com repetibilidade de forma que não sofram influência de outras condições ou parâmetros para além daqueles que se pretendem analisar. Esta fase é constituída pelos seguintes passos:

- i. Produção das placas de material base (PEEK ou PLA) através de fabrico aditivo com os parâmetros definidos;
- ii. Limpeza e retificação das superfícies de encosto de forma a garantir o encaixe perfeito das placas entre si e na base do sistema de fixação;
- iii. Limpeza da mesa da fresadora com ar comprimido;
- iv. Montagem da base do sistema de fixação com auxílio de um esquadro, garantindo o correto posicionamento e orientação relativamente aos movimentos da fresadora;
- v. Montagem dos componentes da ferramenta de SFL;
- vi. Montagem da ferramenta de SFL na fresadora;
- vii. Colocação das placas de material no sistema de fixação, perfeitamente encostadas às faces adequadas da base do sistema de fixação, posicionando a interface das mesmas na zona de avanço linear da ferramenta;
- viii. Colocação e aperto parcial das barras de constrangimento das placas no eixo zz de forma a garantir o nivelamento das mesmas;
- ix. Colocação e aperto parcial dos parafusos de constrangimento lateral das placas de forma a garantir a manutenção de pressão na interface das mesmas;

- x. Aperto total dos parafusos das barras de constrangimento no eixo zz, seguido do aperto total dos parafusos laterais garantindo o encastramento de todos os movimentos das placas;
- xi. Montagem da câmara termográfica para monitorização da temperatura.

Após concluir estas etapas de trabalho preparatório, o procedimento para cada ensaio de SFL é o seguinte:

1. Seleção dos parâmetros de SFL a utilizar no ensaio, velocidade de rotação, velocidade de avanço, ângulo de ataque e temperatura.
2. Medição do zero peça, relativo ao eixo zz, na superfície superior das placas, com auxílio de uma folha de papel, garantindo a maior precisão possível. Através da aproximação da ferramenta das placas até o pino entrar em contacto com a superfície superior destas, até que já não seja possível movimentar a folha de papel. Nessa altura roda-se o nóvio de controlo de posição (localizado na base da manivela), para a posição, "0";
3. Descer ligeiramente a mesa da fresadora de modo que as placas não estejam em contacto com a ferramenta;
4. Caso o ensaio tenha aquecimento, iniciar o processo de aquecimento da base do sistema de fixação ou da base do *shoulder*. Caso não tenha, saltar para o passo 5;
  - a. Consoante se pretenda aquecer a base do sistema de fixação ou a base do *shoulder*, fazer a ligação dos terminais da mica ou do cartucho de aquecimento à caixa do sistema eléctrico, respetivamente;
  - b. Aparafusar o termopar na superfície da base do sistema de fixação ou na base do *shoulder*;
  - c. Caso o aquecimento seja da base do sistema de fixação, colocar a caixa de isolamento térmico para facilitar e acelerar o processo de aquecimento;
  - d. Ligar o sistema eléctrico e definir no controlador a temperatura pretendida.
5. Captar a temperatura da superfície das placas com a câmara termográfica;
6. Iniciar o movimento de rotação da ferramenta;
7. Iniciar a penetração do pino nas placas até à profundidade estabelecida de 4.8 mm;

8. Aguardar 10 segundos e iniciar o movimento linear de avanço automático;
9. Apontar a câmara termográfica para o rolamento e monitorizar a sua temperatura;
10. Chegada a ferramenta ao fim das placas, parar o movimento linear de avanço e retirar o pino da ferramenta das placas com a maior rapidez possível;
11. Parar o movimento de rotação da ferramenta e descer a mesa até uma posição que permita retirar as placas;
12. Captar a temperatura da superfície das placas com a câmara termográfica;
13. Aguardar o tempo necessário até que as placas arrefeçam até à temperatura ambiente, de modo a não prejudicar a cristalinidade das mesmas e do cordão de soldadura;
14. Desapertar os parafusos das barras de constrangimento no eixo zz, desapertar os parafusos de aperto lateral e retirar as placas do sistema de fixação;
15. Identificar e fotografar as placas soldadas;
16. Recolher um novo grupo de placas e voltar ao ponto 1.

## **B.2 Procedimento de Corte de Provetes de Tração Uniaxial**

O corte dos provetes foi efetuado na CNC de forma a garantir uma elevada precisão dimensional do mesmo, respeitando a norma ISO 527-2:2012(E) para o ensaio de polímeros. Para tal escolheu-se uma fresa de 5 mm adequada para o corte de polímeros e os parâmetros de corte utilizados foram os seguintes:  $\Omega = 3500 \text{ rev/min}$  e  $\nu = 200 \text{ mm/min}$ . O procedimento seguido para o corte dos provetes foi o seguinte:

1. Montar o módulo inferior da moldura na mesa da CNC com o auxílio do esquadro, garantindo o correto posicionamento e orientação concordantes com os eixos de movimento da CNC. A fixação deste módulo é feita com 4 grampos de aperto rasteiro (Figura B.1);
2. Montar a ferramenta no carrossel de ferramentas da CNC;
3. Medir o zero peça relativo aos eixos xx e yy no vértice do módulo inferior com o auxílio de uma folha de papel para maior precisão;
4. Colocar as placas soldadas e os 3 espaçadores;

5. Posicionar e aparafusar o módulo superior da moldura;
6. Medir o zero peça relativo ao eixo zz (*offset* da ferramenta) na superfície do módulo superior da moldura, com o auxílio de uma folha de papel para maior precisão;
7. Verificar a abertura das torneiras de ejeção de líquido lubrificante;
8. Introduzir o GCODE na CNC e verificar a trajetória da ferramenta e os parâmetros de corte utilizados;
9. Dar início ao corte do provete;
10. Desaparafusar o módulo superior da moldura e retirar o provete cortado;
11. Recolher um novo grupo de placas soldadas e voltar ao ponto 4.

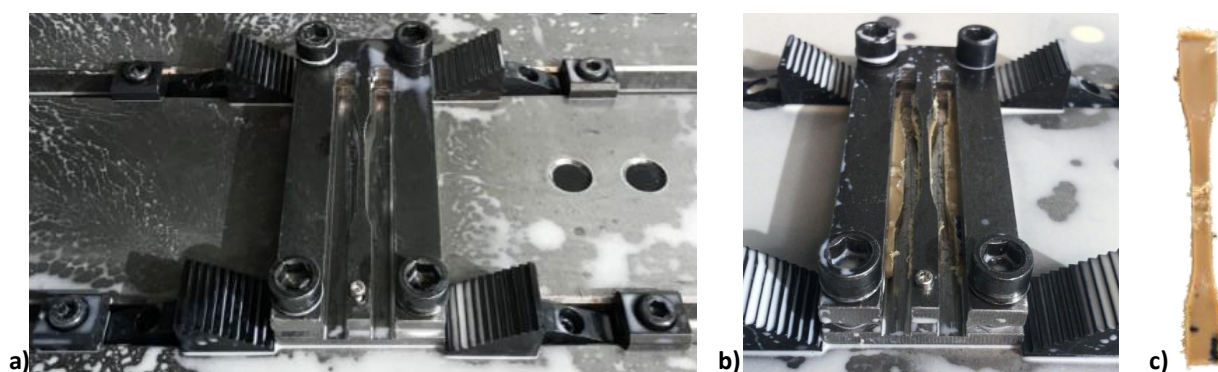


Figura B.1 - Procedimento para corte de provetes de tração uniaxial: a) Montagem e fixação dos dois módulos da moldura, b) Resultado após procedimento de corte do provete, c) Provette cortado.

### B.3 Procedimento de Ensaios de Tração Uniaxial

Os ensaios foram realizados com um deslocamento de 0.6 mm/min segundo a norma ISO 527-2:2012(E) para o ensaio de polímeros. O procedimento seguido em todos os ensaios foi o seguinte:

1. Passagem com lixa nas arestas dos provetes para remoção da rebarba resultante do processo de corte;
2. Para cada provete fazer três medições da largura e espessura da zona útil do provete para cálculo do valor médio destas grandezas;
3. Calcular a área de secção inicial da zona útil = Largura média x Espessura média
4. Em cada provete marcar uma distância de 60 mm, alinhada com o centro do provete, para garantir o correto espaçamento dos mordentes do equipamento;

5. Colocar o provete e apertar os mordentes da máquina, em primeiro lugar o mordente inferior e só depois o mordente superior;
6. Medir a distância vertical exata entre os mordentes;
7. Colocar o extensómetro no provete;
8. Dar início ao ensaio de tração uniaxial com velocidade de 0.6 mm/min;
9. Assim que se dê a fratura do provete, parar o ensaio, retirar o extensómetro e retirar as duas partes do provete dos mordentes, por esta ordem;
10. Identificar ambas as partes do provete para possibilitar a análise do tipo de fratura e da superfície de fratura;
11. Guardar o ficheiro de dados produzido pelo software e identificá-lo com a seguinte nomenclatura: "Trat\_dados\_PEEK\_xxgraus\_ROxx";
12. Escolher um novo provete e regressar ao ponto 1.

## ANEXOS - RESULTADOS EXPERIMENTAIS

### C.1 DOE inicialmente planeado para a aplicação do método de Taguchi para o estudo de SFL em PEEK

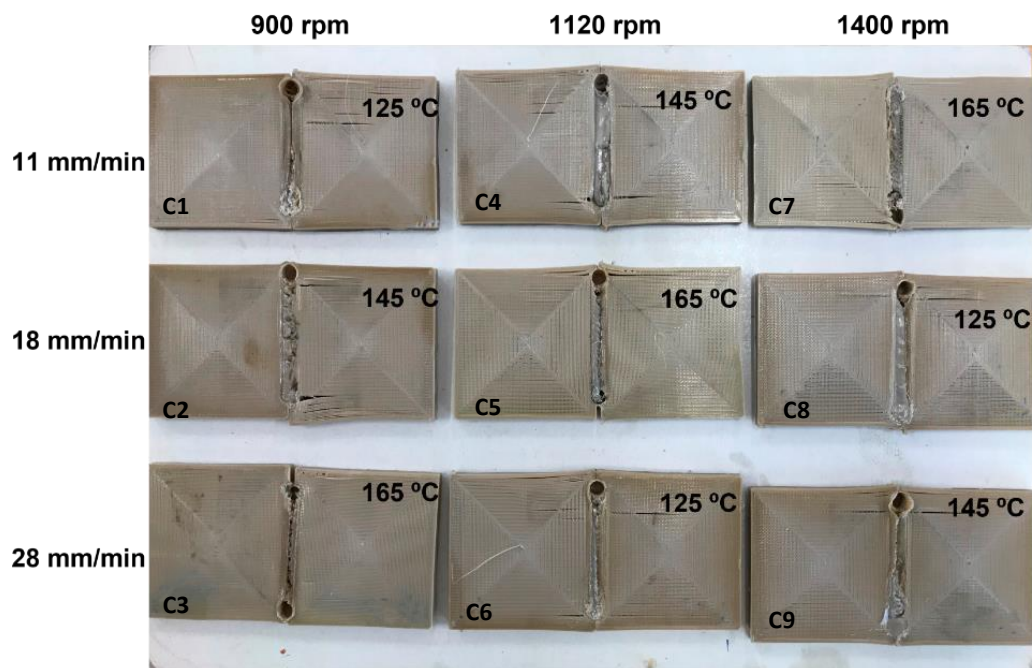


Figura C.1 - DOE para aplicação do método de Taguchi inicialmente planeado para os ensaios de SFL em PEEK.

## C.2 Aspeto visual da face superficial e da raiz do cordão das placas de PEEK soldadas

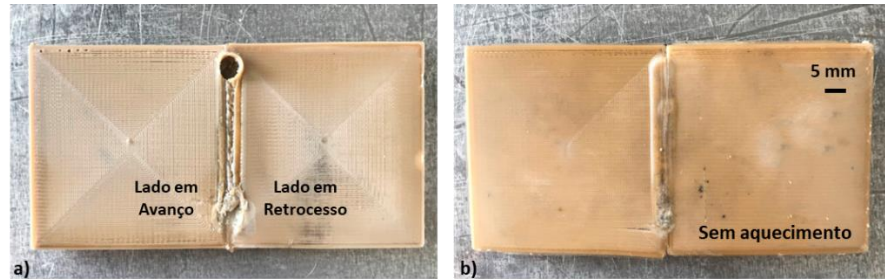


Figura C.2 - Aspeto visual resultante do ensaio 1: a) Face superior do cordão, b) Raiz do Cordão.

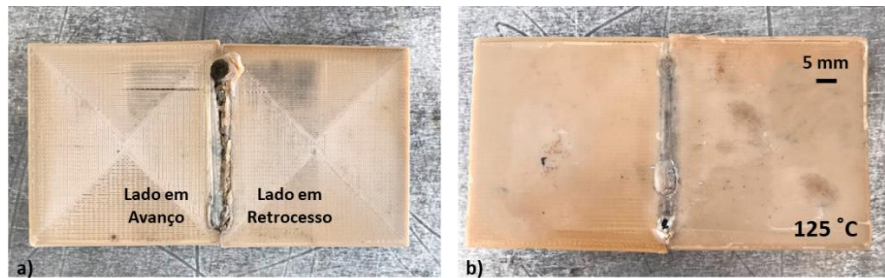


Figura C.3 - Aspeto visual resultante do ensaio 2: a) Face superior do cordão, b) Raiz do Cordão.

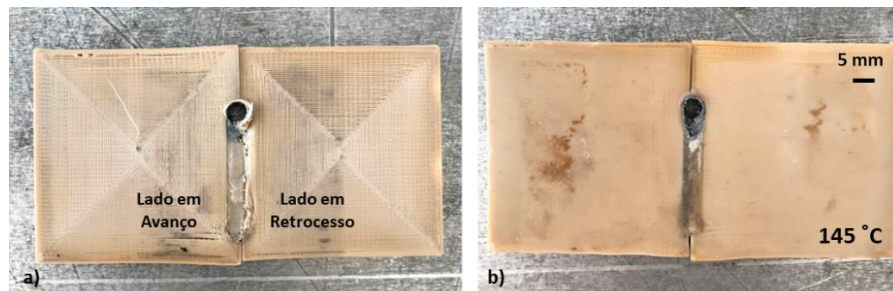


Figura C.4 - Aspeto visual resultante do ensaio 3: a) Face superior do cordão, b) Raiz do Cordão.

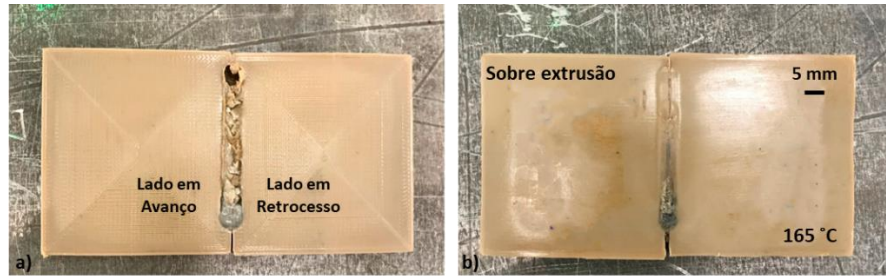


Figura C.5 - Aspeto visual resultante do ensaio 4: a) Face superior do cordão, b) Raiz do Cordão.

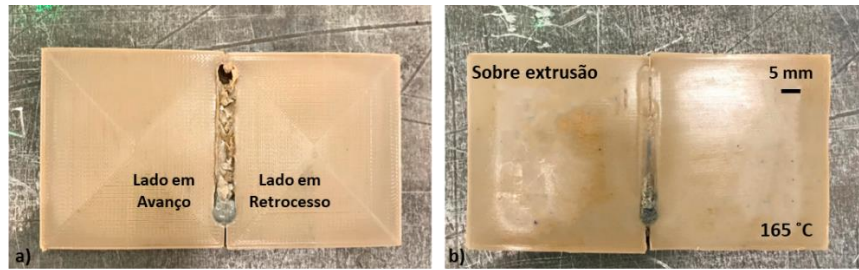


Figura C.6 - Aspeto visual resultante do ensaio 5: a) Face superior do cordão, b) Raiz do Cordão.

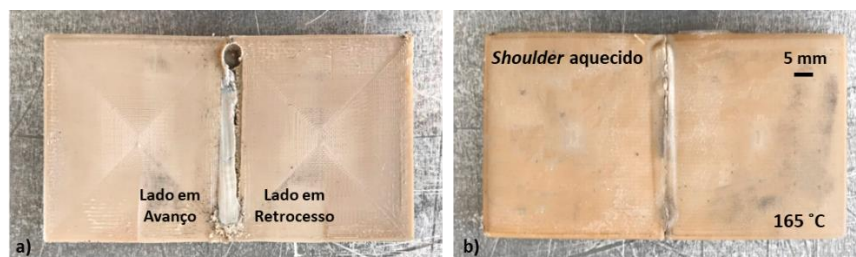


Figura C.7 - Aspeto visual resultante do ensaio 6: a) Face superior do cordão, b) Raiz do Cordão.

### C.3 Ensaios de Tração Uniaxial em PLA

Os ensaios de Tração Uniaxial em PLA permitiram calcular o valor de tensão máxima de cada ensaio, a partir dos dados extraídos. Como os ensaios em PLA foram projetados de acordo com o método de Taguchi, os valores de tensão máxima foram por sua vez utilizados para otimizar os parâmetros de processo de SFL de acordo com o cálculo de proporção Sinal-Ruído (*Signal-to-noise (S/n) ratio*) utilizando o método "Maior é Melhor" (*The larger, The better*). Esta análise, ilustrada na Figura C.8, mostra que a otimização do processo de SFL é obtida com os parâmetros  $\Omega = 1120$  rev/min,  $v = 18$  mm/min e Temperatura = 85 °C.

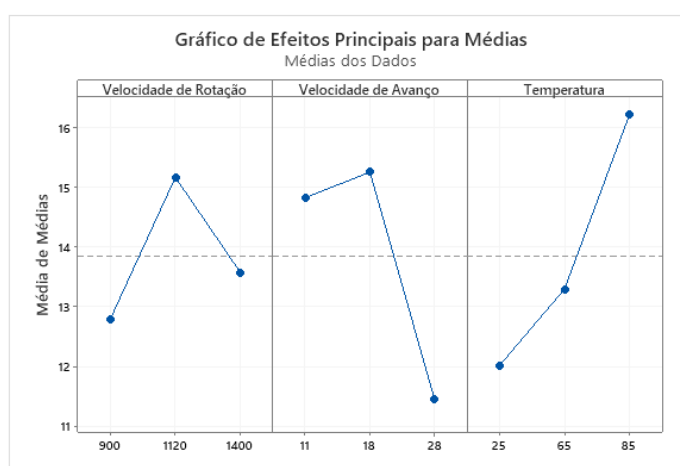


Figura C.8 - Gráfico dos efeitos principais para as médias.

Por sua vez, a análise de variância dos resultados de tensão máxima de cada ensaio permitiu calcular a contribuição relativa de cada parâmetro nas propriedades mecânicas avaliadas, neste caso a tensão máxima. Estes dados apresentam-se na Tabela C.1.

Tabela C.1 - Análise da Variância e Percentagem de contribuição.

Fonte	Graus de Liberdade	Soma dos quadrados	Média dos quadrados	Valor F	Valor P	Percentagem de Contribuição
Velocidade de Rotação (rev/min)	2	26.32	13.16	0.51	0.606	3.76%
Velocidade de Avanço (mm/min)	2	77.89	38.95	1.52	0.243	11.1%
Temperatura (°C)	2	83.57	41.78	1.63	0.221	11.94%
Erro	20	512.41	25.62	-	-	73.19%
Total	26	700.19	-	-	-	-

## C.4 Medição de temperatura superficial das placas de PEEK, antes e após os ensaios de SFL-

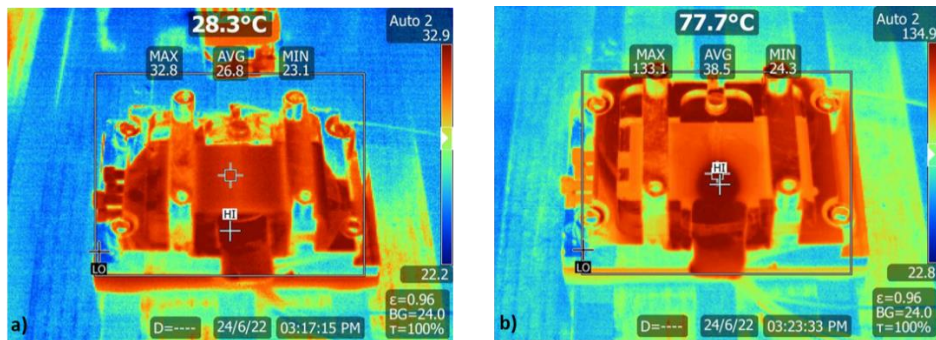


Figura C.9 - Medição da temperatura superficial das placas no ensaio 1: a) Temperatura da superfície do PEEK antes do ensaio ,b) Temperatura da superfície do PEEK após o ensaio.

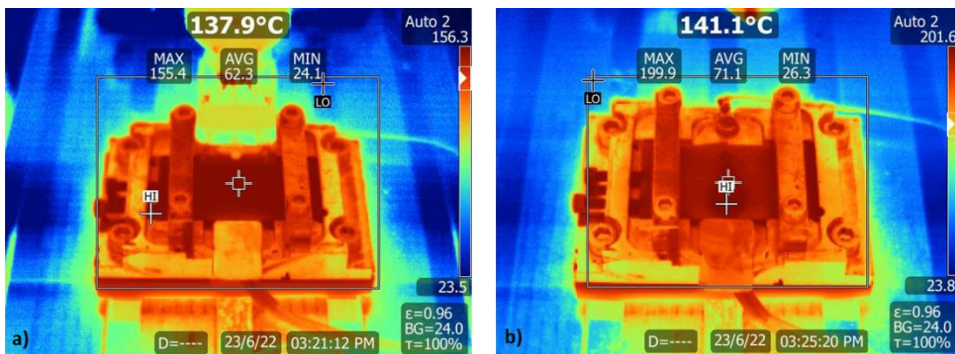


Figura C.10 - Medição da temperatura superficial das placas no ensaio 2: a) Temperatura da superfície do PEEK antes do ensaio ,b) Temperatura da superfície do PEEK após o ensaio.

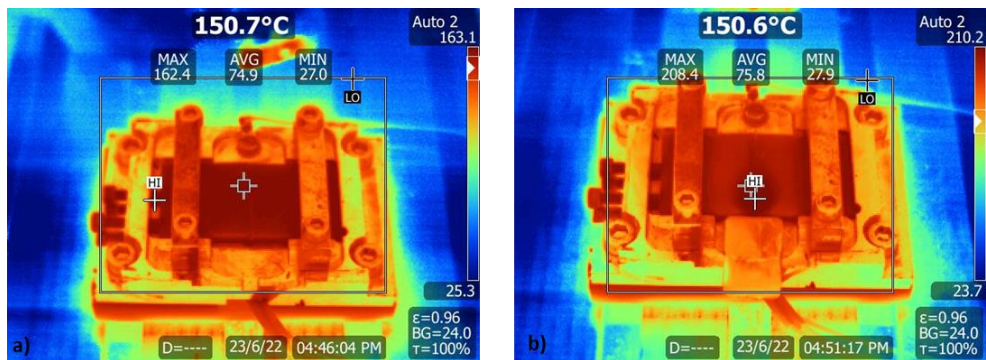


Figura C.11 - Medição da temperatura superficial das placas no ensaio 3: a) Temperatura da superfície do PEEK antes do ensaio ,b) Temperatura da superfície do PEEK após o ensaio.

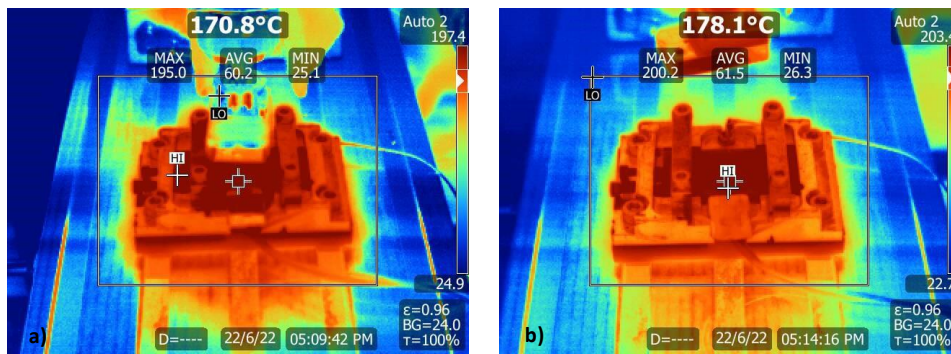


Figura C.12 - Medição da temperatura superficial das placas no ensaio 4: a) Temperatura da superfície do PEEK antes do ensaio ,b) Temperatura da superfície do PEEK após o ensaio.

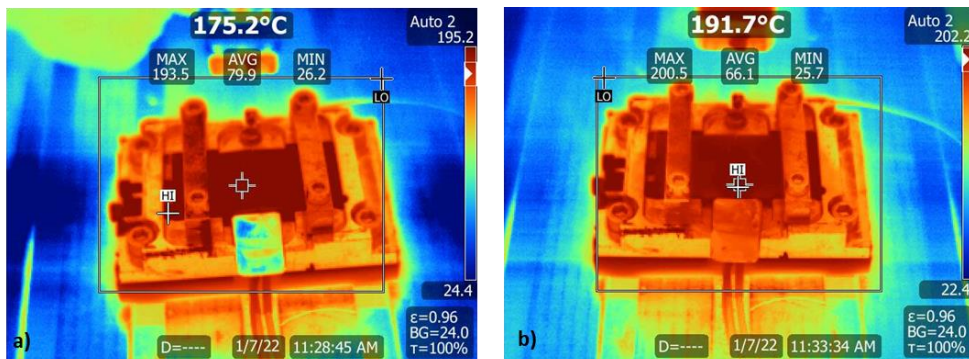


Figura C.13 - Medição da temperatura superficial das placas no ensaio 5: a) Temperatura da superfície do PEEK antes do ensaio ,b) Temperatura da superfície do PEEK após o ensaio.

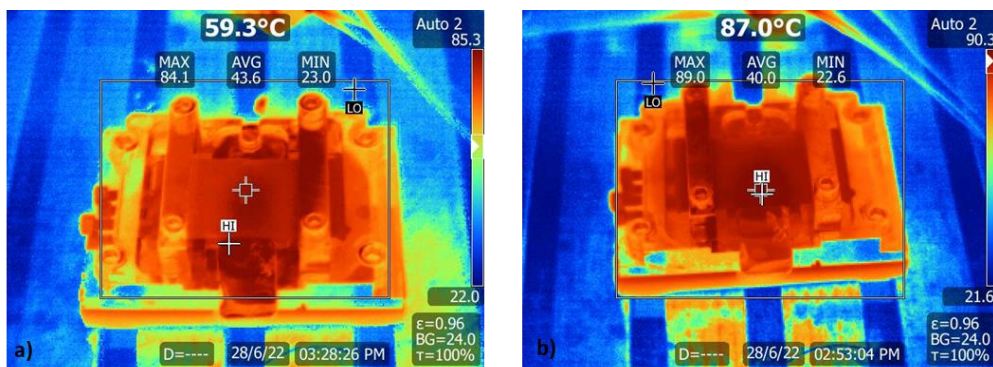


Figura C.14 - Medição da temperatura superficial das placas no ensaio 6: a) Temperatura da superfície do PEEK antes do ensaio ,b) Temperatura da superfície do PEEK após o ensaio.





2022

PEDRO VIEIRA DE MELO

DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO DE SOI DADIJIRA POR FRICÇÃO I INFAR