



UNIVERSIDADE D  
COIMBRA

Adriana Filipa Loureiro Lourenço

**SOLDADURA DE MATERIAIS POLIMÉRICOS POR  
FSW COM AQUECIMENTO DA FERRAMENTA**

**Dissertação no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, no ramo de Produção e Projeto orientada pela Professora Doutora Ana Paula Bettencourt Martins Amaro e pelo Professor Doutor Rui Manuel Ferreira Leal apresentada à Universidade de Coimbra/Departamento de Engenharia Mecânica**

Fevereiro de 2022



1 2



9 0

FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE  
COIMBRA

## **Soldadura de materiais poliméricos por FSW com aquecimento da ferramenta**

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

### **FSW of polymeric materials with heated tool**

**Autor**

**Adriana Filipa Loureiro Lourenço**

**Orientadores**

**Ana Paula Bettencourt Martins Amaro**

**Rui Manuel Ferreira Leal**

**Júri**

<b>Presidente</b>	<b>Professor Doutor Altino de Jesus Roque Loureiro</b> <b>Professor Catedrático da Universidade de Coimbra</b> <b>Professor Doutor Ivan Rodolfo Pereira Garcia Galvão</b> <b>Professor Adjunto do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa</b>
<b>Vogais</b>	<b>Mestre Miguel Ângelo Reis Pereira</b> <b>Doutorando da Universidade de Coimbra</b> <b>Professora Doutora Ana Paula Bettencourt Martins</b>
<b>Orientador</b>	<b>Amaro</b> <b>Professora Auxiliar com Agregação da Universidade de Coimbra</b>

**Coimbra, fevereiro, 2022**



## **Agradecimentos**

A realização deste trabalho só foi possível graças à colaboração e ao apoio de algumas pessoas, às quais quero deixar o meu reconhecimento:

Ao professor Doutor Rui Manuel Ferreira Leal e à professora Doutora Ana Paula Bettencourt Martins Amaro pelo tema, pelo apoio ao longo da tese e pela sempre disponibilidade em ajudar.

Ao Professor Doutor Altino de Jesus Roque Loureiro que sempre se mostrou disponível em auxiliar em todas as etapas

Ao Sr. Fernando pela ajuda que prestou na montagem do sistema, preparação das placas e realização das soldaduras.

Ao Professor Doutor Carlos Miguel Almeida Leitão que ajudou a realizar os ensaios à tração.

À professora Maria Augusta Neto pela ajuda que prestou na realização dos ensaios de tração na utilização do sistema digital de correlação de imagem.

Ao Doutor Luís Miguel Cardoso Vilhena Pereira da Silva pela ajuda que prestou na realização das análises SEM.

À minha família e amigos, que sempre me incentivaram e apoiaram.



## Resumo

Esta dissertação de mestrado tem como finalidade produzir e caracterizar a soldadura por fricção linear (*Friction Stir Welding* – FSW) com adição de calor externo na ferramenta, para a ligação similar de placas de polietileno (PE) e de acrilonitrila butadieno estireno (ABS), ambas com 6 mm de espessura. As soldaduras foram realizadas no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra.

Neste estudo os parâmetros utilizados foram duas velocidades de avanço ( $v$ ) diferentes, 60 e 120 mm/min, e velocidades de rotação ( $w$ ) de 870, 1140 e 1500 rpm, sendo que a temperatura utilizada para aquecer a ferramenta foi de 85°C para o PE e 100°C para o ABS. Para a monitorização da temperatura usou-se termopares no lado do avanço e no lado do recuo durante a soldadura e, após as mesmas, foram realizadas fotografias numa lupa *Zeiss*, ensaios de dureza, ensaios à tração e análises às superfícies de fratura com recurso a microscopia eletrónica de varrimento (SEM - *scanning electron spectroscopy*).

Verificou-se que a adição de calor externo na ferramenta melhora a qualidade da soldadura, reduzindo a ocorrência de defeitos. O aumento do rácio das velocidades ( $w/v$ ) influencia a resistência à tração, sendo possível verificar que as soldaduras de PE obtiveram melhores eficiências de junta para velocidades de rotação ( $w$ ) maiores e menor velocidade de avanço ( $v$ ). No ABS as melhores eficiências de junta foram obtidas em velocidades de rotação maiores ( $w$ ) e maior velocidade de avanço ( $v$ ). Ainda assim, todas as soldaduras realizadas com adição de calor externo na ferramenta obtiveram melhor eficiência de soldadura, quando comparadas com soldaduras realizadas sem adição de calor externo na ferramenta. A influência de calor externo na ferramenta não é significativa nos resultados da medição da dureza tanto em PE como em ABS. Por fim, as imagens SEM das superfícies de fratura permitiram estudar os diferentes modos de fratura das soldaduras produzidas neste estudo.

**Palavras-chave:** *Friction Stir Welding*, Resistência à tração, Defeitos, Polietileno, Acrilnitrila Butadieno Estireno, Ferramenta Aquecida



## Abstract

This master's thesis aims to produce and characterize welds by Friction Stir Welding (FSW) with external heat addition in the tool, for the similar joining of polyethylene (PE) and acrylonitrile butadiene styrene (ABS) plates, both with 6 mm of thickness. The welds were performed at the Mechanical Engineering Department of the University of Coimbra.

In this study the parameters used were two different welding speeds ( $v$ ), 60 and 120 mm/min, and rotational speeds ( $w$ ) of 870, 1140 and 1500 rpm, and the temperature used to heat the tool was 85°C for PE and 100°C for ABS. For temperature monitoring, thermocouples were used on the retreating and advancing sides during welding, and afterwards, Zeiss magnifying glass photographs, hardness tests, tensile tests, and analysis of the fracture surfaces using scanning electron spectroscopy (SEM) were performed.

It was found that adding external heat to the tool improves weld quality by reducing the occurrence of defects. The increase in speed ratio ( $w/v$ ) influences the tensile strength, and it was possible to verify that the PE welds obtained better joint efficiencies for higher rotational speeds ( $w$ ) and lower welding speed ( $v$ ). In ABS the best joint efficiencies were obtained at higher rotational speeds ( $w$ ) and higher welding speed ( $v$ ). Still, all welds made with external heat added to the tool obtained better weld efficiency when compared to welds made without external heat added to the tool. The influence of external heat in the tool is not significant on the hardness measurement results in both PE and ABS. Finally, SEM images of the fracture surfaces allowed to study the different fracture modes of the welds produced in this study.

**Keywords** Friction Stir Welding, Tensile Strength, Defects, Polyethylene, Acrylonitrile Butadiene Styrene, Heated Tool



## ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS .....	xiii
ÍNDICE DE TABELAS .....	xvii
SIMBOLOGIA E SIGLAS.....	xix
Simbologia.....	xix
Siglas	xix
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	3
2.1. Polímeros .....	3
2.1.1. Classificação dos Polímeros .....	4
2.2. Soldadura de polímeros .....	5
2.2.1. Soldadura por placas aquecidas .....	5
2.2.2. Soldadura por gás quente.....	6
2.2.3. Soldadura por extrusão .....	6
2.2.4. Soldadura por ultrassons.....	7
2.2.5. Soldadura por resistência.....	7
2.2.6. Soldadura Laser .....	8
2.2.7. Soldadura por fricção.....	8
2.3. <i>Friction Stir Welding</i> (FSW) .....	9
2.3.1. Parâmetros de soldadura.....	10
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	17
3.1. Material Base .....	17
3.1.1. Polietileno – PE .....	17
3.1.2. Acrilonitrila butadieno estireno – ABS .....	18
3.2. Ferramenta e sistema de calibração .....	18
3.2.1. Ferramenta .....	18
3.2.2. Calibração do sistema de aquecimento.....	19
3.3. Preparação das placas e sistema de aplicação.....	22
3.4. Realização das soldaduras e extração de provetes .....	23
3.1. Análise morfológica.....	26
3.2. Análise de microdureza .....	26
3.3. Ensaio à tração .....	27
3.4. Análise de SEM .....	28
4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	29
4.1. Ciclos térmicos .....	29
4.2. Análise morfológica.....	34
4.2.1. Polietileno.....	34
4.2.2. Acrilonitrila butadieno estireno .....	36
4.3. Análise de dureza.....	38
4.3.1. Polietileno.....	38

4.3.2. Acrilonitrila Butadieno Estireno.....	41
4.4. Comportamento à tração .....	43
4.4.1. Polietileno.....	43
4.4.2. Acrilonitrila Butadieno Estireno.....	46
4.5. Análise SEM .....	49
4.5.1. Polietileno.....	49
4.5.2. Acrilonitrila Butadieno Estireno.....	51
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	53
5.1. Conclusões .....	53
5.2. Trabalhos Futuros .....	53
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	55
ANEXO A .....	61
APÊNDICE A .....	63
APÊNDICE B.....	65
APÊNDICE C.....	67
APÊNDICE D .....	69
APÊNCIDE E.....	71
APÊNDICE F .....	75
APÊNDICE G .....	79

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Representação do processo de FSW [25].....	9
<b>Figura 2</b> Geometrias de pino: a) cilíndrico liso; b) cilíndrico cónico; c) cilíndrico roscado; d) quadrado; e) triangular e f) hexagonal; ([33]).....	11
<b>Figura 3</b> Ferramenta com base estacionária ([28]). .....	12
<b>Figura 4</b> Ferramenta utilizada para componente experimental [45].....	19
<b>Figura 5</b> a) Base estacionária com as resistências e termopar do controlador; b) Termopar Hanna.....	20
<b>Figura 6</b> Controlador de temperaturas. ....	20
<b>Figura 7</b> Temperatura dos testes de calibração com o controlador a 70°C. ....	21
<b>Figura 8</b> Temperatura dos testes de calibração com o controlador a 80°C .....	21
<b>Figura 9</b> Placa de PE pronta para colocar o termopar. ....	22
<b>Figura 10</b> Sistema de fixação [46].....	23
<b>Figura 11</b> Realização das soldaduras.....	25
<b>Figura 12</b> provetes de PE.....	26
<b>Figura 13</b> Marcação das linhas para os ensaios de dureza. ....	27
<b>Figura 14</b> Ciclo térmico da soldadura PEH03.....	30
<b>Figura 15</b> Ciclo térmico da soldadura PEH04.....	30
<b>Figura 16</b> Ciclos térmicos da soldadura PE03 [46] e soldadura PEH03. ....	31
<b>Figura 17</b> Ciclos térmicos da soldadura PE05 [53] e soldadura PEH05. ....	31
<b>Figura 18</b> Ciclo térmico da soldadura ABSH03.....	32
<b>Figura 19</b> Ciclo térmico da soldadura ABSH04.....	32
<b>Figura 20</b> Ciclos térmicos da soldadura ABS03 e soldadura ABSH03. ....	33
<b>Figura 21</b> Ciclos térmicos da soldadura ABS04 e soldadura ABSH04. ....	33
<b>Figura 22</b> Macrografia de topo das soldaduras: a) PE03 b) PE04 c) PEH03 d) PEH04. ...	35
<b>Figura 23</b> Macrografia de corte transversal das soldaduras: a) PE02 [53] b) PE04 [53] c) PEH03 d) PEH04.....	36
<b>Figura 24</b> Macrografia de topo das soldaduras: a) ABS03 b) ABS04 c) ABSH03 d) ABSH04. ....	37
<b>Figura 25</b> Macrografia de corte transversal das soldaduras: a) ABS03 b) ABS04 c) ABSH03 d) ABSH04. ....	38
<b>Figura 26</b> Resultados obtidos no ensaio de dureza num provete de material base de PE. ....	39

---

<b>Figura 27</b> Resultados do ensaio de dureza da soldadura PEH03.....	39
<b>Figura 28</b> . Resultados dos ensaios da dureza do provete PEH04.....	40
<b>Figura 29</b> Comparação resultados da dureza média na zona da soldadura em função da razão da velocidade (PE).....	41
<b>Figura 30</b> Resultados obtidos no ensaio de dureza num provete de material base de ABS. ....	41
<b>Figura 31</b> Resultados dos ensaios da dureza do provete ABSH03.....	42
<b>Figura 32</b> Resultados dos ensaios da dureza do provete ABSH04.....	42
<b>Figura 33</b> Comparação resultados da dureza média na zona da soldadura em função da razão da velocidade (ABS).....	43
<b>Figure 34</b> Curva tensão- alongamento do material base PE. ....	44
<b>Figura 35</b> curvas tensão - alongamento das soldaduras PE.....	44
<b>Figura 36</b> Efeito da velocidade de avanço e velocidade de rotação na resistência à tração no PE. ....	46
<b>Figura 37</b> Curva tensão- material base ABS. ....	47
<b>Figura 38</b> Curva tensão das soldaduras de ABS.....	47
<b>Figura 39</b> Efeito da velocidade de rotação e da velocidade de avanço na resistência à tração no ABS. ....	49
<b>Figura 40</b> Imagens SEM da soldadura PEH03: a) a 1 mm b) a 1 mm c) 200 $\mu\text{m}$ .....	50
<b>Figura 41</b> Imagens SEM da soldadura PEH04: a) a 1 mm b) a 1 mm c) 30 $\mu\text{m}$ .....	50
<b>Figura 42</b> Imagens SEM da soldadura ABSH03: a) a 1 mm b) a 100 $\mu\text{m}$ c) a 1 mm.....	51
<b>Figura 43</b> Imagens SEM da soldadura ABSH04: a) a 1 mm b) a 200 $\mu\text{m}$ c) 1 mm.....	51
<b>Figura 44</b> Imagens SEM da soldadura ABSH06: a) a 1 mm b) a 100 $\mu\text{m}$ c) 1 mm.....	52
<b>Figura 45</b> Ciclo térmico da soldadura PEH01.....	63
<b>Figura 46</b> Ciclo térmico da soldadura PEH02.....	63
<b>Figura 47</b> Ciclo térmico da soldadura PEH04.....	63
<b>Figura 48</b> Ciclo térmico da soldadura PEH06.....	64
<b>Figura 49</b> Ciclo térmico da soldadura ABSH01.....	65
<b>Figura 50</b> Ciclo térmico da soldadura ABSH02.....	65
<b>Figura 51</b> Ciclo térmico da soldadura ABSH05.....	65
<b>Figura 52</b> Ciclo térmico da soldadura ABSH06.....	66
<b>Figura 53</b> Macrografia de corte longitudinal da soldadura PEH01.....	67
<b>Figura 54</b> Macrografia de corte longitudinal da soldadura PEh02.....	67
<b>Figura 55</b> Macrografia de corte longitudinal da soldadura PEH05.....	68
<b>Figura 56</b> Macrografia de corte longitudinal da soldadura PEH06.....	68

---

---

<b>Figura 57</b> Macrografia de corte longitudinal da soldadura ABSH01.....	69
<b>Figura 58</b> Macrografia de corte longitudinal da soldadura ABSH02.....	69
<b>Figura 59</b> Macrografia de corte longitudinal da soldadura ABSH05.....	70
<b>Figura 60</b> Macrografia de corte longitudinal da soldadura ABSH06.....	70
<b>Figura 61</b> Resultados do ensaio de dureza da soldadura PEH01.....	71
<b>Figura 62</b> Resultados do ensaio de dureza da soldadura PEH02.....	71
<b>Figura 63</b> Resultados do ensaio de dureza da soldadura PEH05.....	72
<b>Figura 64</b> Resultados do ensaio de dureza da soldadura PEH06.....	72
<b>Figura 65</b> Comparação resultados, dureza média da zona da soldadura em função do rácio da velocidade sem adição de calor na ferramenta [53] .....	73
<b>Figura 66</b> Resultados do ensaio de dureza da soldadura de ABSH01.....	75
<b>Figura 67</b> Resultados do ensaio de dureza da soldadura de ABSH02.....	75
<b>Figura 68</b> Resultados do ensaio de dureza da soldadura de ABSH05.....	76
<b>Figura 69</b> Resultados do ensaio de dureza da soldadura de ABSH06.....	76
<b>Figura 70</b> Comparação resultados da dureza média na zona da soldadura em função da razão da velocidade (ABS) sem adição de calor na ferramenta. ....	77
<b>Figura 71</b> Resistência à tração em função do alongamento da soldadura PEH01.....	79
<b>Figura 72</b> Resistência à tração em função do alongamento da soldadura PEH02.....	79
<b>Figura 73</b> Resistência à tração em função do alongamento da soldadura PEH03.....	80
<b>Figura 74</b> Resistência à tração em função do alongamento da soldadura PEH04.....	80
<b>Figura 75</b> Resistência à tração em função do alongamento da soldadura PEH05.....	81
<b>Figura 76</b> Resistência à tração em função do alongamento da soldadura PEH06.....	81
<b>Figura 77</b> Resistência à tração das soldaduras de PE sem adição de calor na ferramenta. ....	82
<b>Figura 78</b> Resistência à tração das soldaduras de ABS sem adição de calor na ferramenta. ....	82



## ÍNDICE DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> Principais propriedades do PE (Matweb [41]).....	18
<b>Tabela 2</b> Principais propriedades do ABS (Matweb [44]). .....	18
<b>Tabela 3</b> Parâmetros de soldaduras realizadas nesta dissertação com adição de calor externo. ....	24
<b>Tabela 4</b> Parâmetros de soldaduras realizadas anteriormente no DEM sem adição de calor externo. ....	25
<b>Tabela 5</b> Temperaturas iniciais e finais das soldaduras.....	34
<b>Tabela 6</b> Propriedades mecânicas resultantes dos ensaios de tração das séries de soldadura de PE.....	45
<b>Tabela 7</b> Propriedades resultantes das soldaduras de ABS. ....	48
<b>Tabela 8</b> Propriedades mecânicas das soldaduras de PE com adição de calor na ferramenta. ....	83
<b>Tabela 9</b> Propriedades mecânicas das soldaduras de ABS.....	83



## SIMBOLOGIA E SIGLAS

### Simbologia

$T_g$  – Temperatura de transição vítrea

$T_m$  – Temperatura de fusão

$v$  – Velocidade de avanço

$w$  – Velocidade de rotação

### Siglas

ABS – Acrilonitrila Butadieno Estireno

CPE – Polietileno Clorado

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

EVA – Acetato de Etileno Vinil

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

FSW – *Friction Stir Welding*

HDXLPE – Polietileno de Muito Baixa Densidade

HMWPE – Polietileno de Alto Peso Molecular

HV – Dureza em Vickers

LA – Lado de Avanço

LR – Lado do Recuo

MDPE – Polietileno de Média Densidade

PE – Polietileno

PEBD – Polietileno de Baixa Densidade

PEBDL – Polietileno de Baixa Densidade Linear

PEAD – Polietileno de Alta densidade

PEEK – Polimetilmetacrilato

PEUAPM – Polietileno de Ultra-Alto Peso Molecular

PEX – Polietileno reticulado

PP – Polipropileno

PVC – Cloreto de Polivinilo

SEM – Microscopia eletrónica de varrimento

ULMWPE – Polietileno de Ultra-Baixo Peso Molecular

VLDPE – Polietileno de Muito Baixa Densidade

## 1. INTRODUÇÃO

O método de soldadura por fricção linear, *Friction Stir Welding* (FSW), foi originalmente criado para realizar soldaduras em ligas leves de alumínio, uma vez que oferece vantagens interessantes sobre os processos tradicionais, como por exemplo, a ausência de fumo, a inexistência de material de adição e baixas tensões. Após alguns anos iniciaram-se os estudos com esta técnica em polímeros.

Os polímeros são muito importantes e fazem parte de várias indústrias na substituição dos materiais metálicos devido às suas propriedades interessantes em aplicações industriais, por exemplo, no isolamento elétrico e térmico, uma vez que existe uma redução de peso e por estarem associados a menores custos de produção.

Este método de soldadura é relativamente recente, existem muitas limitações práticas, e não foram encontradas aplicações na indústria dos polímeros. É também difícil definir um conjunto de parâmetros otimizados para cada situação e tipo de material a ser soldado.

Esta dissertação de mestrado tem como objetivo produzir e analisar soldaduras por FSW em placas de polietileno (PE), e acrilonitrila butadieno estireno (ABS), ambas de 6 mm de espessura. Estas soldaduras foram produzidas com uma ferramenta de base estacionária com adição de calor externo.

Esta dissertação de mestrado está dividida em cinco capítulos, sendo este o primeiro, onde é apresentado o tema. No Capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica que aborda polímeros, tipos de soldaduras em polímeros, a FSW, e a influência dos parâmetros de soldadura. No Capítulo 3 é descrito todo o processo experimental, bem como a execução do trabalho. O Capítulo 4 inclui a apresentação e discussão dos resultados, é sobre o ciclo térmico, a morfologia das soldaduras, a dureza das zonas de soldadas, a resistência à tração e a análise de microscopia eletrônica de varrimento (SEM do inglês *scanning electron microscopy*) das superfícies de fratura. Estes resultados foram comparados com os de um estudo realizado anteriormente no Departamento de Engenharia Mecânica (DEM) sem adição externa de calor na ferramenta. Por fim, no Capítulo 5 são referidas as principais conclusões, e propostos alguns trabalhos para o futuro.



## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Polímeros

A ciência dos polímeros é uma disciplina relativamente nova que envolve materiais muito comuns nos dias de hoje, como é o caso de plásticos, fibras naturais e sintéticas, borracha, revestimentos, adesivos, selantes e muito mais. O conceito de polímeros é uma das grandes ideias do século XX [1].

Os polímeros estão na base de bens industriais importantes. O rápido crescimento na produção é causado pela necessidade de substituir os clássicos materiais de produção, tais como metais, por outros mais competitivos que confirmam a mesma eficiência dos materiais ditos convencionais [1].

Inicialmente, um polímero foi compreendido como o resultado da polimerização, que é o processo pelo qual as ligações covalentes entre duas ou mais moléculas idênticas (monómeros) dão origem a polímeros [2]. Os monómeros unidos em dois, três e quatro são chamados de *dimers*, *trimers* e *tetramers*, respetivamente, e estas unidades de repetição curtas são denominadas de oligómeros. Dependendo das circunstâncias, estes oligómeros podem também ser denominados prepolímeros [3]. Os polímeros podem, ainda, ser classificados de acordo com a sua presença no ambiente como naturais, ou sintéticos [3].

Os polímeros apresentam uma importante vantagem que é a possibilidade de alterar as suas propriedades de forma a satisfazer os requisitos e as aplicações específicas pretendidas, como por exemplo o aumento da condutividade, resistência mecânica, piezoelectricidade e estabilidade dimensional [4].

Os polímeros podem ser ligados por 3 métodos diferentes, fixação mecânica, ligação adesiva e soldadura [5]. Os adesivos conseguem dar boas propriedades e articulações completamente sólidas, mas são de difícil manipulação e a ligação adesiva é tradicionalmente um processo lento. Também é importante dar atenção à preparação das juntas e à limpeza da superfície na ligação adesiva. As ligações mecânicas podem rapidamente unir dois componentes, mas não proporcionam uma junta impermeável, e as

tensões residuais podem fazer com que exista falhas no material polimérico. A soldadura pode ser utilizada para obter juntas ligadas com as propriedades mecânicas que se podem associar às do material de base [5].

### **2.1.1. Classificação dos Polímeros**

Os polímeros podem ser distinguidos em duas classes principais:

- Termoplásticos;
- Termoendurecíveis.

Sendo que apenas os termoplásticos podem ser soldados, visto que os termoendurecíveis não podem ser transformados e reutilizados [6].

#### **2.1.1.1. Termoplásticos**

Os termoplásticos são polímeros lineares que se apresentam como semicristalinos ou amorfos no estado sólido. Quando os termoplásticos semicristalinos são aquecidos acima do ponto de fusão, ou os termoplásticos amorfos acima da temperatura de transição vítrea, as cadeias poliméricas ficam livres para se mover [7]. Estes polímeros apresentam baixo ponto de fusão, e podem ser reciclados. Os polímeros termoplásticos podem ser transformados várias vezes através do uso de calor e podem ser modificados diretamente na produção de novos componentes. No entanto, é necessário observar que a contínua transformação pode degradar algumas das suas propriedades. Os processos de produção mais comuns para fazer componentes termoplásticos são a moldagem por injeção, moldagem por sopro e termoformagem [8].

Exemplos de termoplásticos incluem nylon, policloreto de vinilo, polietileno (linear), poliestireno, polipropileno, resinas de fluorocarbono, poliuretano, acrilateresinas, poli (ácido glicólico), poli (ácido láctico), e copolímeros de várias descrições incluindo poli (láctico-glicólico)[3].

#### **2.1.1.2. Termoendurecíveis**

Os termoendurecíveis são geralmente polímeros reticulados e permanecem no estado sólido enquanto as ligações químicas covalentes não forem destruídas. Alguns polímeros lineares, tais como o poli (tetrafluoroetileno), não fluem quando são aquecidos devido à presença de fortes ligações não covalentes manterem as cadeias juntas [7].

Contrariamente ao que sucede com os polímeros termoplásticos, os polímeros termoendurecíveis podem suportar elevadas temperaturas sem que as suas propriedades sejam alteradas. Estes polímeros não podem ser reciclados.

Os plásticos termoendurecíveis têm uma utilização generalizada como adesivos, revestimentos, isolamentos e compostos de molde. Além disso, têm muitas aplicações devido à sua boa estabilidade e resistência à deformação, resistência química e rigidez [9].

São classificados como termoendurecíveis as resinas de amido, resinas epóxicas, resinas de poliéster, os polituretanos, poliésteres insaturados e resinas fenólicas [10].

## **2.2. Soldadura de polímeros**

A soldadura dos polímeros ocorre quando as cadeias de um polímero na região de ligação são suficientemente móveis para se envolverem com cadeias de um outro polímero [11]. Os métodos de soldadura para juntar materiais plásticos implicam três etapas: a) aquecimento das zonas de soldadura até um estado viscoso ou fundido; b) constituição da ligação por aplicação de pressão e c) conservação da pressão até ao seu endurecimento [5].

Na soldadura de polímeros existem diversos métodos, como por exemplo: por placas aquecidas, gás quente, extrusão, ultrassons, resistência, laser e fricção.

### **2.2.1. Soldadura por placas aquecidas**

A soldadura por placas aquecidas é uma das técnicas mais simples de soldadura disponíveis, sendo uma tecnologia muito utilizada em ambientes industriais para unir componentes termoplásticos em produção de larga escala [12].

A soldadura por placas aquecidas pode ser utilizada para fundir todos os termoplásticos e elastómeros termoplásticos, em que o intervalo de temperatura de fusão esteja abaixo da sua temperatura de decomposição. Na maioria das indústrias, a soldadura por placas aquecidas é um processo automatizado de fabrico sequencial e pode ser dividido em 4 fases: *squaring*, aquecimento, soldadura, arrefecimento [13].

Este processo de soldadura é importante e tem um impacto na qualidade de fabrico e no desempenho térmico final. Os parâmetros relacionados com a máquina e os parâmetros ambientais, tais como a temperatura da placa quente, humidade e temperatura do ar, tempo de arrefecimento, força e tempo de aperto, têm efeitos na resistência final da soldadura [14].

### **2.2.2. Soldadura por gás quente**

Esta é uma tecnologia de soldadura de baixo custo e de fácil uso. A soldadura a gás quente tem sido utilizada na união e reparação de materiais termoplásticos tais como PE, polipropileno (PP), cloreto de polivinilo (PVC) e acetato de etileno vinil (EVA). Neste processo de soldadura a ranhura e a haste de soldadura são aquecidas pelo gás quente até estes materiais ficarem suficientemente macios para derreterem. Logo a seguir, o cordão de soldadura é pressionado para dentro da ranhura da soldadura e, depois, arrefecido para realizar a ligação das soldaduras [15]. No entanto, uma desvantagem óbvia é a distribuição desigual do calor na área de soldadura devido às características de fluxo do gás quente, que causa defeitos no material não soldado na área de baixa temperatura, e degradação térmica ou oxidação do polímero na área de alta temperatura [16].

### **2.2.3. Soldadura por extrusão**

A soldadura por extrusão é uma técnica que foi desenvolvida no início da década de 1960 para o fabrico de estruturas termoplásticas. Por norma é realizada de forma manual, mas é possível ser automatizada para soldadura contínua. Esta técnica envolve continuamente a passagem de termoplástico derretido do mesmo material que as peças que estão a ser soldadas [17].

Para a sua preparação, a solda é pré-aquecida à sua temperatura de fusão por uma corrente de ar quente antes de ser forçada a entrada na junta sob pressão. Isto assegura que a extrusão e as peças se fundam e produzam uma soldadura [17].

A vantagem mais significativa do processo de soldadura por extrusão é que um cordão de solda contínuo é formado numa única passagem, em comparação com várias passagens para a soldadura a gás quente. Devido ao aumento do volume de material dispensado, os tempos de produção são significativamente mais curtos do que para a soldadura a gás quente [17].

Uma das maiores desvantagens da soldadura por extrusão em comparação com a soldadura a gás quente é o peso e o tamanho do equipamento, que pode ser superior a 12 kg [17].

#### **2.2.4. Soldadura por ultrassons**

A soldadura por ultrassons utiliza uma frequência alta (20 a 50 kHz) e uma amplitude baixa (15 a 60 mm) de vibração para formar uma soldadura localizada. As placas a serem soldadas são mantidas juntas sob pressão (tipicamente 1-10 MPa), e depois sujeitas a um movimento vibratório, quer na direção normal, quer numa direção paralela entre as duas placas. Para uma vibração com direção normal, uma das superfícies deve conter uma saliência em forma de cunha. O contato entre as duas superfícies é mantido através destas saliências. A energia de vibração concentrada nas saliências gera o calor que as derrete.

A soldadura por ultrassons é utilizada em pequenas áreas e pode ser usada para soldar por pontos em secções finas. É um processo rápido, com tempos de ciclo normalmente na ordem de 1 segundo. Por exemplo, na indústria automóvel, esta soldadura é utilizada para unir o porta-luvas, conjuntos de instrumentos, válvulas, conectores e terminais elétricos [18].

#### **2.2.5. Soldadura por resistência**

Foram desenvolvidos diversos processos de soldadura para vários tipos de aplicações e geometrias, sendo que um desses processos é a soldadura por resistência. De forma a soldar as partes que se pretende unir através deste tipo de soldadura, o calor é criado a partir de um elemento de aquecimento poroso e condutor de eletricidade, que se encontra localizado no elemento da soldadura e ligado a uma fonte de energia. É aplicada uma corrente elétrica ao elemento de aquecimento para criar calor [19].

A conexão entre a fonte de energia e o elemento de aquecimento é, normalmente, estabelecida por conectores de cobre que se encontram fixos a uma distância previamente determinada dos bordos dos aderentes (distância de aperto). Durante o processo da soldadura, é aplicada pressão para ser possível um contacto entre as partes e promover as fases de fusão e consolidação [19].

A vantagem mais importante reside no potencial para uma produção rápida e de baixo custo. Contudo, os componentes termoplásticos atualmente produzidos por este método têm uma geometria bastante simples, o que implica que, para obter estruturas complexas, terá que existir um processo de união dos componentes [20].

### **2.2.6. Soldadura Laser**

No modo geral, existem 4 etapas comuns no processo de soldadura a laser de polímeros [21]. Numa primeira fase as peças devem estar em contacto e devem ser postas de modo que a radiação do laser esteja virada para o feixe do laser. Numa segunda fase, é feito o aquecimento da região onde ocorrerá a solda. O processo de aquecimento pode variar, dependendo da geometria, dimensão da peça, do produto final pretendido e dos materiais utilizados. Na terceira fase ocorre a aplicação de pressão, destinada a promover a soldadura através da difusão da cadeia molecular. De salientar que pode ocorrer em simultâneo com o aquecimento e numa etapa subsequente. Por fim, na quarta fase acontece o arrefecimento [22].

A soldadura a laser tem diversas vantagens quando comparada com outras técnicas de soldadura, tais como requerer uma quantidade reduzida de calor a ser colocada a uma área limitada, tem uma maior resistência de juntas, a soldadura é de maior qualidade, permite a soldadura de componentes com formas complexas, ausência de contato entre as ferramentas de soldadura e as peças e não tem tensão mecânica sobre os componentes. Ainda assim, é mais sensível ao material polimérico, processamento, pigmentação e aditivos. Esta técnica apresenta características distintas de processamento e desempenho, permitindo uma soldadura local e precisa de chapas ou peças moldadas [22].

### **2.2.7. Soldadura por fricção**

Neste tipo de soldadura, as duas superfícies que se pretende unir são mantidas sob pressão (por norma entre 0,5 e 10 MPa) e o calor por fricção é criado através da vibração de uma superfície em relação à outra a 120-240 Hz de frequência, e a menos de 0,5 mm de amplitude. A vibração é contínua até as superfícies começarem a derreter. A película fundida criada arrefece e solidifica sob pressão, que resulta em uma junta soldada. Geralmente o tempo de soldadura varia entre 1 e 10 segundos.

A soldadura por rotação (*spin welding*) é um tipo de soldadura por fricção e é aplicável a peças com secções transversais circulares. Também pode ser usada para soldar peças tubulares a superfícies planas. Neste processo, a superfície de uma parte roda em relação à outra com um movimento de rotação circular, enquanto estas são mantidas sob pressão. É mais utilizada para unir peças grandes, por exemplo na indústria automóvel, e

pode incluir feixes de para-choques, conjuntos para painéis de instrumentos, faróis e coletores de admissão [23].

### 2.3. Friction Stir Welding (FSW)

A *Friction Stir Welding* foi desenvolvida no *The Welding Institute* no Reino Unido em 1991 e é considerada uma técnica de soldadura em estado sólido. A FSW é uma técnica em que uma ferramenta não consumível de tipo rotativo é inserida entre as interfaces de duas placas para criar a difusão das suas fronteiras e, assim, permitir a união dos materiais [24]. Durante o processo, o pino que se encontra situado no interior da junta de soldadura amolece o material por fricção rotativa e possibilita o fluxo do polímero, dando origem à mistura dos materiais. Ao mesmo tempo, a base colocada na superfície da junta aquece e arrasta o material da frente para a parte de trás da ferramenta, evita a fuga de material para fora da junta de soldadura, e alisa a junta da parte superior para proporcionar uma superfície lisa [25].

Dado o recente aumento na procura de componentes mais leves, são necessários novos métodos de união para lidar com novos desafios. A FSW é um dos métodos mais atrativos a este respeito, devido à sua filosofia de estado sólido, e à sua total capacidade de automatização. Embora a FSW tenha sido originalmente desenvolvida para a união de ligas de alumínio, este tipo de soldadura é também atualmente estudado para unir outros materiais, tais como, polímeros, materiais metálicos e materiais dissimilares [26]. Este processo de soldadura está ilustrado na Figura 1.

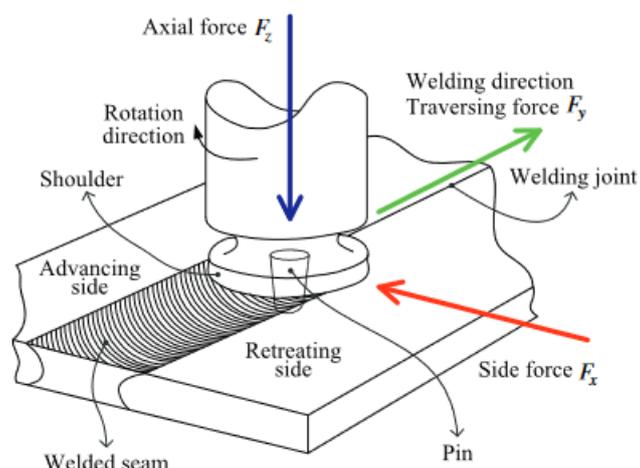


Figura 1 Representação do processo de FSW [25].

### **2.3.1. Parâmetros de soldadura**

Durante o processo FSW de polímeros e compósitos poliméricos, existem três fatores principais que afetam a morfologia e a qualidade da junta: parâmetros do equipamento, parâmetros da ferramenta e propriedades do material [27].

#### **2.3.1.1. Parâmetros do equipamento**

Os equipamentos utilizados em FSW possuem diferentes características que podem alterar a sua configuração física. Dependendo da aplicação (junta de soldadura), o equipamento que apresente as características mais indicadas deve ser selecionado, de modo a ter em conta diferentes capacidades técnicas: sensibilidade, força, precisão e flexibilidade [28].

A sensibilidade traduz-se na possibilidade do equipamento ser criterioso em relação a alguns acontecimentos que ocorrem na junta de soldadura, ou seja, situações e valores de variáveis de soldadura diretamente, e indiretamente, implicadas no processo FSW que expressam a progressão do material da soldadura e conseqüentemente da soldadura [28].

As forças mais importantes que atuam sobre o equipamento durante o processo FSW são a força axial ( $F_z$ ), a força transversal ( $F_x$ ), a força lateral ( $F_y$ ), e o momento torçor ( $M_z$ ), sendo que todas estas forças têm um papel importante no referido processo. São um requisito prévio para selecionar ou no desenvolvimento de equipamentos para FSW. Representam também uma função relevante no controlo do processo FSW, por exemplo, manter uma dada força axial, ou momento torçor, permite atribuir qualidade às juntas soldadas [28].

Quando um equipamento de FSW oferece baixa rigidez, a ferramenta afasta-se do trajeto de soldadura pretendido e afeta gravemente a qualidade da soldadura. Para além disso, os equipamentos de baixa rigidez tendem a causar vibrações excessivas que, por sua vez, podem conduzir à instabilidade do processo [28].

A flexibilidade de um equipamento limita a complexidade de um trajeto de soldadura que pode ser executado. O número de eixos (graus de liberdade) que um equipamento de FSW possui estabelece, normalmente, a flexibilidade do equipamento [28].

#### **2.3.1.2. Parâmetros da ferramenta**

Dado que a ferramenta exerce uma função essencial neste tipo de soldadura (FSW), foram necessárias várias adaptações para se conseguir soluções adequadas para a

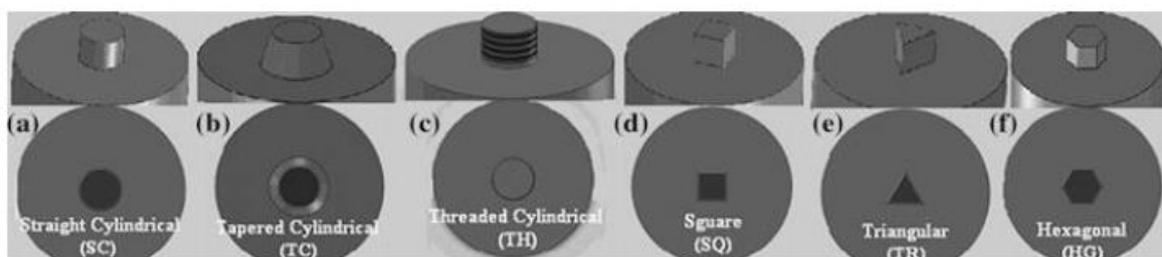
soldadura de polímeros. Uma vez que os polímeros se portam de forma distinta dos materiais metálicos durante o FSW, são precisos novos desenvolvimentos de ferramentas para minimizar os defeitos, a fim de se obter soldaduras fiáveis e o mais isentas de defeitos possível [29].

#### **2.3.1.2.1. Parâmetros da ferramenta convencional**

Uma vez que com o uso de FSW em materiais metálicos se obteve soldaduras resistentes com propriedades mecânicas elevadas, alguns investigadores têm tentado soldar materiais poliméricos através de ferramentas FSW convencionais, de forma a analisar a qualidade e força das soldaduras [29].

Juntas sem defeitos foram obtidas com pinos quadrados e triangulares ranhurados através de uma força de aplicação linear mínima. Ao avaliar as forças da ferramenta, e os defeitos das juntas para a junta de topo FSW de placas de 10 mm de polipropileno (PP), foi verificado que as ferramentas roscadas aplicam menor força linear do que as ferramentas não roscadas [30]. A ferramenta roscada produziu soldaduras com a maior dureza sem defeitos, ao mesmo tempo que o pino triangular produziu uma superfície de boa qualidade, mas com alguns defeitos no interior da soldadura [31]. O ABS e o polietileno de alta densidade (PEAD) foram soldados com sucesso usando um pino roscado cónico com diâmetro de 8-10 mm e 6 mm de comprimento [32].

Na Figura 2 é possível ver vários tipos de geometria de pino de ferramenta convencional.



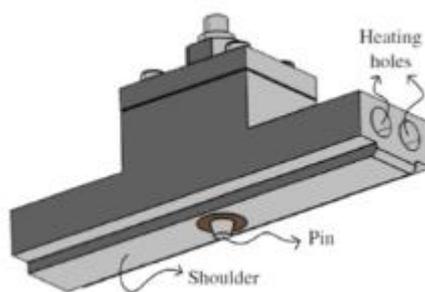
**Figura 2** Geometrias de pino: a) cilíndrico liso; b) cilíndrico cónico; c) cilíndrico roscado; d) quadrado; e) triangular e f) hexagonal; ([33]).

#### **2.3.1.2.2. Ferramenta com base estacionária**

Uma vez que é difícil obter uma boa qualidade na superfície e propriedades mecânicas elevadas da peça soldada com ferramentas FSW convencionais em polímeros de soldadura, Nelson *et al.* [34] desenvolveram, e patentearam, uma ferramenta com uma base estacionária aquecida por resistências com um pino rotativo. Nesta solução, o calor não é

produzido por fricção a partir da base da ferramenta, mas sim a partir das resistências e da rotação do pino [35].

Mendes *et al.* [28] investigaram a morfologia e a força axial do método de FSW usando um robô como máquina e placas de ABS de 6 mm de espessura, tendo desenvolvido uma base estacionária, de forma a permitir o aquecimento à frente e atrás do pino. A forma da base é retangular com um buraco no centro onde irá o pino (Figura 3). Esta ferramenta produziu soldaduras com uma superfície com bom acabamento e boa resistência à tração.



**Figura 3** Ferramenta com base estacionária ([28]).

### **2.3.1.3. Revisão da literatura da FSW em polímeros**

Para obter juntas sólidas de alta qualidade, é necessário ajustar e controlar os parâmetros do processo, ou alterar o modo de pré-aquecimento, uma vez que variam de acordo com o tipo de polímero. A baixa condutividade e a cristalinidade dos polímeros são os principais fatores que levam ao declínio das propriedades mecânicas da junta soldada. Para melhorar as propriedades mecânicas, pode ser necessário utilizar novos métodos de FSW, tais como o uso de ferramentas de base estacionária, com ou sem sistema de aquecimento [36].

#### **2.3.1.3.1. Polietileno**

Mustapha *et al.* [38] realizaram um estudo em que utilizaram PEAD. Foi utilizada uma fresadora vertical para fornecer velocidade de rotação, velocidade de avanço, e ângulo de inclinação. Foram usadas velocidades de avanço entre 710 e 2000 rpm, velocidades de avanço entre 40 e 100 mm/min e um ângulo de 1°. Foram usadas 2 ferramentas convencionais nestes testes, uma com a base plana, e outra com a base concava. Estes autores concluíram que ao utilizar uma velocidade de rotação de 1400 rpm e velocidade de avanço de 80 mm/min, o calor gerado é muito elevado, portanto, o material é completamente degradado baixando a sua resistência. A melhor soldadura foi obtida com a

---

ferramenta concava com uma velocidade de rotação de 710 rpm, e uma velocidade de avanço de 40 mm/mim obtendo uma eficiência de junta de 81,25%. Por outro lado, a ferramenta com a base plana obteve a sua melhor eficiência de junta com uma velocidade de 1000 rpm e uma velocidade de avanço de 80 mm/mim. A eficiência de junta é obtida a partir do rácio entre a resistência da soldadura e a resistência do polímero base.

Num outro trabalho Mishra *et al.* [39] prepararam amostras de PEAD com dimensões de 100 × 100 × 6 mm para efetuar as soldaduras. A ferramenta utilizada para a soldadura foi fabricada em aço H13 com a base e o pino da ferramenta feitos de forma cilíndrica. As dimensões da ferramenta são com um diâmetro da base de 14,5 mm e 5 mm de diâmetro do pino, sendo que a altura do pino é de 5,4 mm. Nestas soldaduras foram utilizados como parâmetros velocidade de rotação de 500, 600 e 800 rpm, uma velocidade de avanço de 10, 20 e 30 mm/mim, e um ângulo de ataque 1°. Os autores verificaram que a resistência à tração subiu ao aumentar a velocidade de rotação e diminuiu com o aumento da velocidade de avanço. A resistência à tração máxima alcançada foi de 14,63 MPa com 800 rpm, 10 mm/min e 1° de inclinação da ferramenta.

Romero *et al.* [40] usaram placas de PEAD com dimensões de 61,5 x 122 x 8,5 mm para realizar soldaduras por FSW com duas ferramentas, uma convencional e uma não convencional de base estacionária. Estas ferramentas foram desenvolvidas em aço AISI H-13. Os parâmetros utilizados na realização destas soldaduras foram uma velocidade de rotação de 846 e 1036 rpm e uma velocidade de avanço de 14 e 25 mm/min. A partir de macroscópicos e microscópicos concluíram que existe uma falta de furos nas juntas soldadas, e ainda mostraram que as juntas foram completamente consolidadas com a ferramenta não-convencional. Na análise da dureza não verificaram variações significativas nas áreas de soldadura, exceto no interior da soldadura, onde ocorreu uma ligeira diferença da dureza no lado do avanço e no lado de recuo [37].

Moreno *et al.* [41] usaram placas de PEAD com as dimensões de 246 x 60 x 8,5 mm para a realização de soldaduras por FSW, a ferramenta utilizada nestas soldaduras foi uma ferramenta de base estacionária com um pino cilíndrico. Os parâmetros adotados na execução destas soldaduras foram 846 e 1036 rpm para a velocidade de rotação e para a velocidade de avanço usou-se 14 e 25 mm/min. Observou-se que na realização destas soldaduras não existiu descontinuidade nem sobreaquecimento na região da soldadura. No

caso do ensaio da dureza pode-se concluir que os valores da dureza são fortemente afetados pela velocidade de rotação, e não pela velocidade de avanço.

Eslami *et al.* [42] usaram placas de polietileno de alto peso molecular de 3 mm de espessura e foram soldadas com uma fresadora de três eixos. O material de base escolhido para este estudo tinha um intervalo de temperatura de fusão de 130-135°C. A ferramenta utilizada neste estudo consiste numa base estacionária feita de teflon, com um rolamento de contacto angular que permite movimento rotativo independente entre o pino e a base. Uma manga de cobre de conceção inovadora é utilizada em torno do pino para gerar calor e compensar a falta do calor gerado devido à ausência de uma base rotativa. O calor gerado pela fricção entre a base e a manga de cobre pré-aquece o material antes da passagem da ferramenta. Os parâmetros utilizados neste estudo foram 1500 e 2000 rpm para a velocidade de rotação e para a velocidade de avanço os parâmetros utilizados foram de 30, 50 e 70 mm/min. As análises estatísticas mostraram que todos os parâmetros tiveram um efeito estatisticamente significativo na qualidade da soldadura. A velocidade de rotação teve a maior contribuição (40%) seguida pela velocidade de avanço (21%), diâmetro da ferramenta (12%), e força axial (6%). As soldaduras com maior qualidade foram obtidas ao usar uma elevada velocidade de rotação e uma elevada velocidade de avanço. A medição da temperatura da manga mostrou que durante o tempo de permanência, que corresponde ao tempo que o pino se encontra na mesma posição no início da soldadura, a rodar, até ser atingida a penetração máxima, os movimentos rotativos do pino dentro da manga geraram calor através da fricção, o que tornou possível usar elevada velocidade de avanço, evitando desta forma a geração de calor excessivo e consequente degradação do material. A eficiência de junta máxima foi de 97% comparando com o material base.

#### **2.3.1.3.2. Acrilonitrila Butadieno Estireno**

Num outro estudo [43] foram usadas placas de ABS com 8 mm de espessura cortadas na dimensão de 150 x 100 mm. Com base em ensaios anteriores, são seleccionados dois tipos de ferramentas FSW: a) de base cilíndrica com um pino cilíndrico, e (b) base cilíndrica com um pino cónico. Os parâmetros seleccionados foram 900, 1400 e 1800 rpm para a velocidade de rotação, para a velocidade de avanço foram seleccionados 6, 16 e 25 mm/min. Os autores verificaram que a ferramenta com o pino cónico tem uma eficiência máxima de junta de 97%. A maior eficiência de resistência foi de 101% para o pino cónico

e 99% para o pino cilíndrico. Quanto maior a velocidade de avanço melhores foram os resultados na resistência da junta.

Mendes *et al.* [29] produziram soldaduras de topo entre placas de ABS de 300 x 80 x 6 mm. Neste estudo foi usada uma ferramenta FSW constituída por uma base estacionária com adição de calor externo e um pino cónico. Foram utilizados parâmetros de soldadura com a velocidade de rotação a variar entre 1000 e 1500 rpm, a velocidade de avanço a situar-se entre 50 e 200 mm/min, e a força axial entre 1 e 2 kN. Foi possível concluir que uma temperatura de 115°C na ferramenta melhora a qualidade da soldadura, especialmente a superfície da soldadura. A velocidade de rotação é o principal fator de geração de calor, favorecendo a plastificação adequada e a mistura do polímero, melhorando, também, a resistência à tração das soldaduras. Soldaduras sem defeitos revelaram a mesma dureza que o material base. Por fim, soldaduras de qualidade podem ser obtidas com uma temperatura 115°C de ferramenta, uma força axial superior a 1,5kN, uma velocidade de rotação superior a 1250 rpm e uma baixa velocidade de avanço que estará entre 50 e 100 mm/min.

#### **2.3.1.4. Influência da ferramenta com aquecimento externo**

Para melhorar a qualidade da soldadura do polímero é fundamental o aquecimento adicional no pino da ferramenta FSW. Todavia, esta ferramenta "*hot shoe*" requer equipamento elétrico extra para aquecer a ferramenta, juntamente com aparelhos secundários que consomem mais espaço perto da superfície de soldadura, o que pode ser inconveniente em condições de espaço limitado [38].

Nath *et al.* [45] realizaram experiências com placas de PEEK. Foram efetuadas soldaduras em placas de 100 x 60 x 3 (mm) por FSW, tendo sido utilizada uma ferramenta com aquecimento externo. Foi possível verificar que a ferramenta com aquecimento externo produziu soldaduras satisfatórias de PEEK.



### **3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL**

Neste capítulo irá ser descrito todo o processo experimental e metodologias utilizadas nesta dissertação de mestrado. Inicialmente será descrito o material e de seguida será apresentada a ferramenta e como foi realizada a calibração do sistema de aquecimento da ferramenta. Em seguida, será descrita a preparação do sistema de fixação e a preparação das placas. Posteriormente serão descritas as soldaduras e os seus parâmetros. Para terminar, são apresentados os ensaios realizados, nomeadamente a análise morfológica, ensaios de dureza, ensaios de tração e análise SEM.

#### **3.1. Material Base**

##### **3.1.1. Polietileno – PE**

O polietileno é um polímero termoplástico semicristalino utilizado muito frequentemente em todo o mundo. O seu nome teve origem no monómero etileno utilizado para a criação do polímero. Pode ser produzido através da polimerização radical, polimerização de aniões, e polimerização de catiões [39]. Este polímero é geralmente classificado em polietileno de baixa densidade (PEBD), polietileno de baixa densidade linear (PEBDL), polietileno de alta densidade (PEAD) e polietileno de ultra alto peso molecular (PEUAPM). Existem outros tipos de polietileno que são o de média densidade (MDPE), polietileno de ultrabaixo peso molecular (ULMWPE ou PE-WAX), polietileno de alto peso molecular (HMWPE), polietileno reticulado de alta densidade (HDXLPE), Polietileno reticulado (PEX ou XLPE), polietileno de muito baixa densidade (VLDPE), e Polietileno clorado (CPE) [40].

A partir da Tabela 1 é possível verificar que a temperatura de transição vítrea do PE é inferior a 0°C tornando-o assim num polímero dúctil à temperatura ambiente.

**Tabela 1** Principais propriedades do PE (Matweb [41]).

Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Resistência à tração (MPa)	Temperatura de transição vítrea (°C)	Ponto de Fusão (°C)	Alongamento (%)	Dureza (R)
0,933- 1,27	15,2 - 45	-120	101 - 135	3,0 - 1900	80-112

### 3.1.2. Acrilonitrila butadieno estireno – ABS

O ABS é um termoplástico amorfo e apresenta alta resistência ao impacto, resistência ao calor e tenacidade, e baixa condutividade térmica, sendo usado no campo da construção civil [42]. Este polímero é constituído por três monómeros: acrilonitrilo, butadieno e estireno. No caso do acrilonitrilo trata-se de um monómero sintético produzido a partir de propileno e amoníaco (este componente contribui para a resistência química e estabilidade térmica), por sua vez o butadieno é produzido como um subproduto da produção de etileno a partir de *crackers* a vapor (este componente proporciona tenacidade e resistência ao impacto) e o estireno é fabricado por desidrogenação do etil benzeno (proporciona rigidez e processabilidade) [43]. Na Tabela 2 é possível ver algumas das principais propriedades do ABS.

**Tabela 2** Principais propriedades do ABS (Matweb [44]).

Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Resistência à tração (MPa)	Temperatura de transição vítrea (°C)	Ponto de Fusão (°C)	Alongamento (%)	Dureza (R)
0,882- 3,50	2,6 – 73,1	105 - 109	149-323	1,4 - 110	90 - 122

## 3.2. Ferramenta e sistema de calibração

A ferramenta utilizada nesta dissertação de mestrado foi elaborada por Mendes et al. [45] e o sistema de calibração foi melhorado em comparação ao que anteriormente existia.

### 3.2.1. Ferramenta

Na Figura 4 é possível visualizar uma esquematização da ferramenta, constituída por um pino cónico e uma base estacionária. A ferramenta foi fixada à fresadora através do encabadouro na outra ponta do veio da ferramenta.

O pino é roscado e cónico tendo sido fabricado com o mesmo material do veio, aço H13, com uma dureza de 50 HRC. O pino é caracterizado por 5,5 mm de comprimento, 10 mm a 6 mm de diâmetro, com um passo de 2 mm.

A base tem um formato aproximadamente retangular com um furo no centro, sendo as dimensões 177 x 25 mm, aproximadamente, e foi reduzida a partir de um bloco de alumínio AA5083. Nas extremidades existem 4 furos (dois em cada lado da base) com 65 mm de comprimento e 12,5 mm de diâmetro de modo a colocar até quatro resistências de cartucho. Esta base foi criada de forma a permitir o aquecimento da ferramenta.

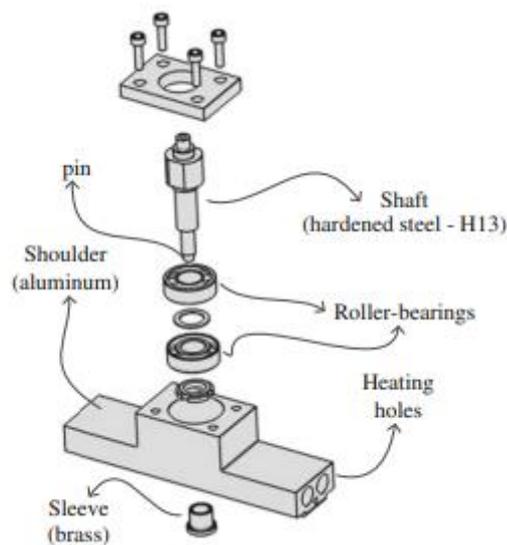


Figura 4 Ferramenta utilizada para componente experimental [45].

### 3.2.2. Calibração do sistema de aquecimento

Neste trabalho as soldaduras foram realizadas com adição de calor externo na ferramenta, existia a necessidade de colocar duas resistências na base estacionária em lados opostos como é possível ver na Figura 5 a). De forma a perceber o comportamento da temperatura ao longo do tempo na ferramenta provocado pelas resistências, realizaram-se testes de modo a definir as temperaturas de controlo para realizar as soldaduras.

Esses testes foram executados com o auxílio de um termopar (Figura 5 b)), de um controlador de temperatura (Figura 6) e de dois cronómetros. Foram realizados 8 testes com intervalos de 10°C, tendo-se iniciado aos 70°C de temperatura de controlo e terminado aos 140°C, em cada teste foram efetuados 2 ensaios. De salientar que a fresadora estava desligada quando foram realizados os testes do sistema de calibração.



**Figura 5** a) Base estacionária com as resistências e termopar do controlador; b) Termopar Hanna.

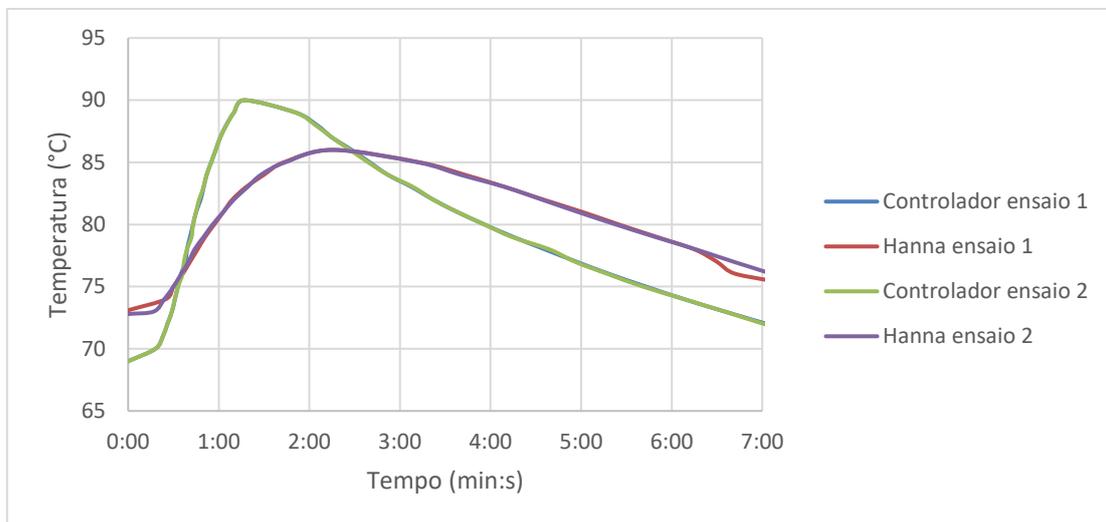


**Figura 6** Controlador de temperaturas.

Na Figura 7 é possível observar que, ao utilizar uma temperatura de entrada de 70°C nas resistências, atinge-se uma temperatura de aquecimento máxima de 90°C na ferramenta baixando aos 85°C e permanecendo estável durante 2 minutos, sendo possível assim realizar a soldadura a uma temperatura de próxima dos 85°C neste intervalo de tempo. Uma vez que a própria ferramenta gera calor e a temperatura de fusão do PE está entre os 101°C e os 135°C foi selecionado uma temperatura de controlador de 70°C de forma a realizar as soldaduras a uma temperatura de funcionamento de 85°C  $\pm$  5°C.

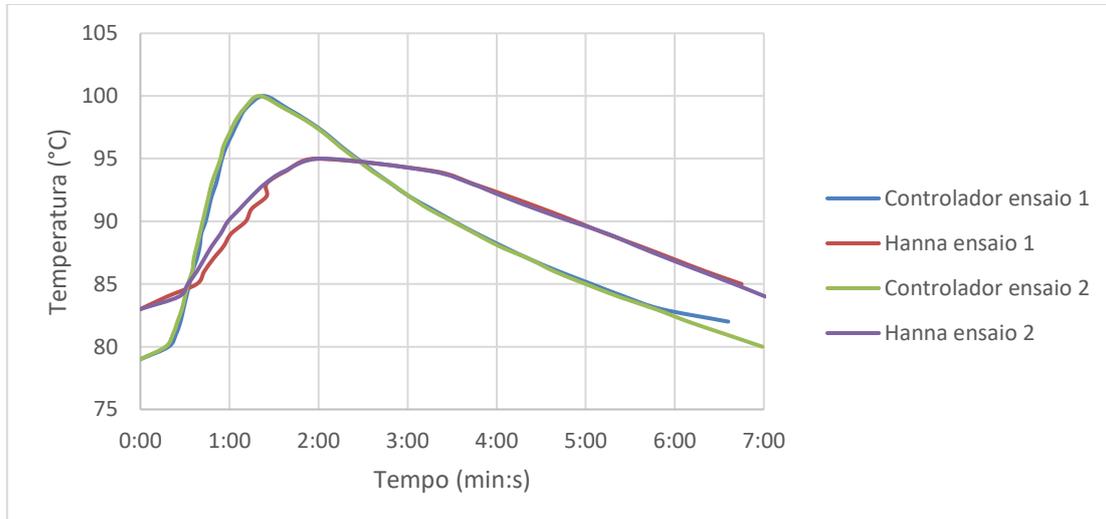
No caso do ABS a temperatura de controlo selecionada foi superior, uma vez que a temperatura de fusão deste material é mais elevada (149°C). Com base nos testes de

calibração a 80°C e a 90°C foi possível observar que a temperatura de 85°C permite uma temperatura de ferramenta de  $100 \pm 5^\circ\text{C}$ .



**Figura 7** Temperatura dos testes de calibração com o controlador a 70°C.

A partir da Figura 8 é possível ver que se atinge uma temperatura de 100°C.

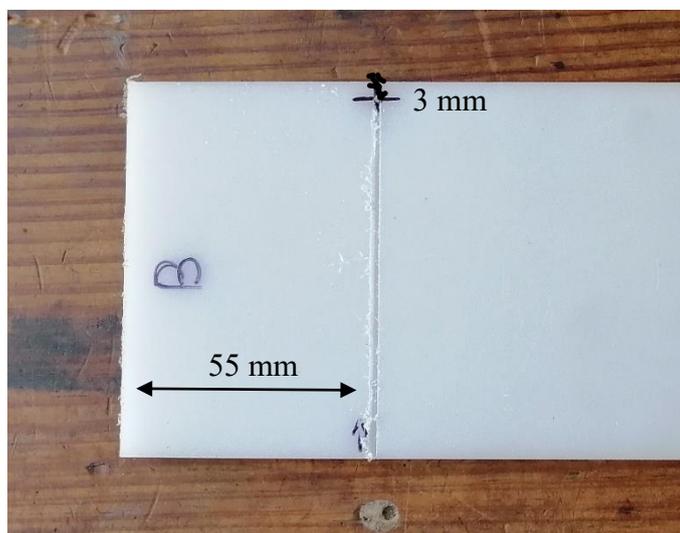


**Figura 8** Temperatura dos testes de calibração com o controlador a 80°C

### 3.3. Preparação das placas e sistema de aplicação

Inicialmente foi feita uma preparação das placas de PE e ABS, tendo havido a necessidade de cortar e fresar as mesmas. As placas de PE e ABS foram cortadas com as dimensões de 290 x 84 mm e 300,5 x 68 mm e ambas as placas têm 6mm de espessura.

As temperaturas no LR (lado do recuo) e no LA (lado do avanço) da soldadura foram registadas. Foi feito um rasgo em cada placa de forma a alojar termopares do tipo K. Para realizar esses rasgos utilizou-se um disco de 1,2 mm de espessura. Os cortes ficaram com uma largura de 1,2 mm e uma profundidade de 1,2 mm. Este corte foi criado a 55 mm da extremidade final. O furo encontra-se a 3 mm do lado soldado para introdução da extremidade de leitura do termopar, como se pode ver Figura 9.



**Figura 9** Placa de PE pronta para colocar o termopar.

Foi criado um sistema de fixação de modo a prender as placas de PE e ABS, garantindo o correto posicionamento e alinhamento das placas.

Este sistema é constituído por uma placa na base onde se podem fixar grampos e calços. É possível ver na Figura 10 o esquema do sistema de fixação. Existiu a necessidade de colocar uma cantoneira de perfil L no lado direito da mesa. Desta forma garantiu-se a fixação da placa de polímero do lado direito e um trajeto linear da ferramenta, enquanto no lado esquerdo foi colocada uma chapa de aço contra a lateral do polímero de forma a prendê-lo. A chapa foi fixa por grampos, assim como a cantoneira. Por fim, e de forma a evitar o escorregamento das placas de polímero, foram adicionados calços nos lados opostos às soldaduras.

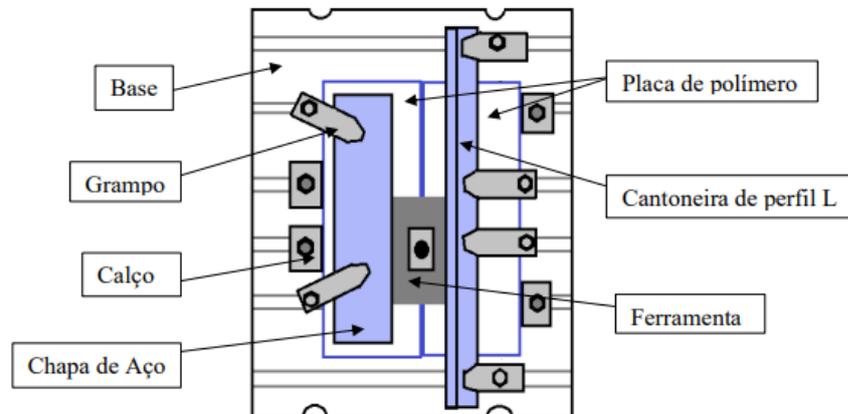


Figura 10 Sistema de fixação [46].

### 3.4. Realização das soldaduras e extração de provetes

Para a soldadura, foi utilizada uma fresadora *Cincinnati Milacron 207MK*, que existe no Laboratório de Ensaios Mecânicos do DEM da Universidade de Coimbra. Esta fresadora possui alta rigidez e opera sob condições de controle de posição. Com esta fresadora, é possível ajustar a rotação da ferramenta e o avanço da mesa, o ângulo de inclinação e a profundidade de penetração.

Os parâmetros usados nestas soldaduras são 870, 1140 e 1500 rpm para a velocidade de rotação, 60 e 120 mm/min para a velocidade de avanço e 5,7 mm para a profundidade de penetração. Foi ainda utilizada a adição de calor na ferramenta tendo sido 85°C e 100°C. Na Tabela 3 é possível ver os parâmetros utilizados nestas soldaduras. Foi ainda adicionado o rácio w/v uma vez que nos dará uma ferramenta de comparação de calor produzido durante a soldadura.

De forma a tornar a leitura mais fácil, ao longo da dissertação as soldaduras serão representadas pelo material (PE ou ABS), por um H de *heated* e pela numeração que representa a ordem que foram feitas, como por exemplo: PEH01.

Após a realização da soldadura PEH01, esta foi retirada da máquina e arrefecida sem compressão. Já a soldadura PEH02 foi retirada após a realização e arrefecida com compressão. Todas as outras soldaduras (PEH03, PEH04, PEH05 e PEH06) foram arrefecidas com compressão durante algum tempo na máquina e após a desmontagem ainda ficaram sobre compressão. Nas soldaduras de ABS todas foram arrefecidas com compressão na máquina e compressão após desmontagem. Nas soldaduras ABSh05 e ABSh01 foi-lhes

colocado um topo no final das placas de forma a evitar fuga de material devido à inclinação da ferramenta por perda de apoio. Por sua vez as soldaduras ABSH02 e ABSH03 para além do topo ainda tiveram um tempo de permanência de 10 segundos cada.

**Tabela 3** Parâmetros de soldaduras realizadas nesta dissertação com adição de calor externo.

Material	Designação	Velocidade de avanço (mm/min)	velocidade de rotação (rpm)	Penetração (mm)	Temperatura de pré-aquecimento (°C)	w/v (rot/mm)
PE	PEH01	60	870	5,7	85	14,5
PE	PEH02	60	1140	5,7	85	19
PE	PEH03	60	1500	5,7	85	25
PE	PEH04	120	870	5,7	85	7,25
PE	PEH05	120	1140	5,7	85	9,5
PE	PEH06	120	1500	5,7	85	12,5
ABS	ABSH01	60	870	5,7	100	14,5
ABS	ABSH02	60	1140	5,7	100	19
ABS	ABSH03	60	1500	5,7	100	25
ABS	ABSH04	120	870	5,7	100	7,25
ABS	ABSH05	120	1140	5,7	100	9,5
ABS	ABSH06	120	1500	5,7	100	12,5

Na Tabela 4 são apresentadas 12 soldaduras realizadas anteriormente no DEM sem adição de calor externo na ferramenta. Têm como objetivo servir de comparação com as soldaduras realizadas nesta dissertação de forma a perceber se a adição de calor externo na ferramenta é uma vantagem ou não.

**Tabela 4** Parâmetros de soldaduras realizadas anteriormente no DEM sem adição de calor externo.

Material	Designação	Velocidade de avanço (mm/min)	velocidade de rotação (rpm)	Penetração (mm)	w/v (rot/mm)
PE	PE01	60	870	5,7	14,5
PE	PE02	60	1140	5,5	19
PE	PE03	60	1500	5,7	25
PE	PE04	120	870	5,7	7,25
PE	PE05	120	1140	5,7-5,8	9,5
PE	PE06	120	1500	5,6-5,7	12,5
ABS	ABS01	60	870	5,7-5,8	14,5
ABS	ABS02	60	1140	5,9	19
ABS	ABS03	60	1500	5,9	25
ABS	ABS04	120	870	5,7	7,25
ABS	ABS05	120	1140	5,6	9,5
ABS	ABS06	120	1500	5,6	12,5

Na Figura 11 é possível ver a realização de uma soldadura e o resultado final.



**Figura 11** Realização das soldaduras.

No final das soldaduras estarem todas realizadas e corretamente identificadas, foram preparados provetes de acordo com a norma ASTM638 (anexo A). Estes provetes têm dimensões de 24 x 183 mm tendo sido em seguida maquinados em CNC de acordo com a norma ASTM638 (anexo A) e foram utilizados nos ensaios de tração. Foi também obtida uma secção de material por soldadura com dimensões de 15 x 70 mm para a análise da microdureza e caracterização morfológica. Estes provetes foram designados de P1 a P4 como se pode ver na Figura 12, como por exemplo: PEH01.P1

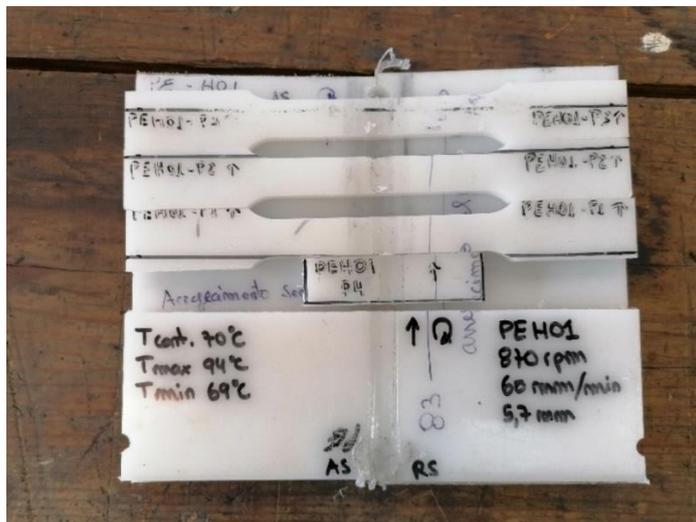


Figura 12 provetes de PE.

### 3.1. Análise morfológica

Os ensaios foram realizados com os mesmos provetes utilizados para o estudo da microdureza, mas na face oposta. Cada provete foi marcado permanentemente com o auxílio de um gravador elétrico manual. De seguida, efetuou-se a preparação da superfície dos provetes de modo a remover todos os riscos presentes na face em estudo, para que seja possível ser visualizado em microscópico.

### 3.2. Análise de microdureza

Foram realizadas sucessivas operações de polimento com o recurso a lixas de água com granulometria fina, sempre sob meio húmido. Primeiro foi utilizada a lixa P320, P600 de seguida uma lixa P1000 e, por fim, uma lixa P2500. Para se obter um acabamento superficial com a ausência de riscos, foi passado um pano de polimento, adicionada uma suspensão de diamante de granulometria de 1 $\mu$ m e um lubrificante. Tanto o pano de polimento como as lixas foram acopladas ao disco rotativo da máquina de polir. A seguir, os provetes foram observados numa lupa Zeiss, de modo a evidenciar a área da soldadura e a eventual presença de defeitos.

Os testes foram realizados com provetes de 15 x 70 mm. Foi utilizado um micrômetro *Shimadzu HMV\_G*, no qual a dureza do provete foi medida em dureza *Vickers*. Foi aplicada uma carga de 245,2 mN por 15 segundos.

A medição iniciou-se no lado de recuo, começando assim a primeira indentação, tendo sido realizadas 20 indentações com intervalos de 1mm. No total foram realizadas 3 linhas como é possível ver na Figura 13.

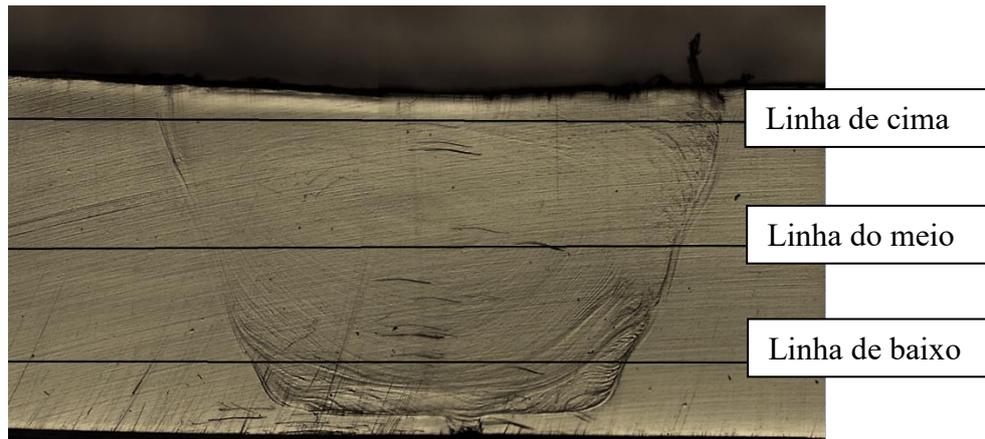


Figura 13 Marcação das linhas para os ensaios de dureza.

### 3.3. Ensaios à tração

Com este tipo de ensaio pretende-se determinar as resistências à tração e deformação máxima e comparar com a resistência mecânica do material base, de forma a verificar qual é a eficiência de cada junta soldada. Foram ensaiados dois provetes de cada série de soldadura e material base.

O equipamento utilizado para realização dos ensaios à tração foi uma máquina de ensaios universal *SHIMADZU, AGS – X 100kN*, a qual tem uma célula de carga de 100 kN. Inicialmente usou-se velocidade média de deslocação de 10 mm/min, passando para uma velocidade de deslocação de 5 mm/min. Esta diminuição de velocidade de deslocação permitiu-nos obter imagens com mais pormenores no programa ARAMIS.

De forma a medir as deformações locais existentes durante os ensaios, foi utilizado um extensómetro ótico ARAMIS da marca GOM. Previamente, os provetes foram pintados de branco mate e, por fim, pulverizados com *spray* preto de modo a criar uma textura de pontos pretos na superfície. O sistema ARAMIS recolhe imagens durante o ensaio,

com uma frequência específica, sendo as imagens processadas e analisadas posteriormente, com o intuito de avaliar os deslocamentos e deformações locais dos provetes.

### **3.4. Análise de SEM**

Estas análises foram realizadas no DEM da Universidade de Coimbra, nas superfícies de fratura das soldaduras PEH03, PEH04, ABSH03, ABSH04 e ABSH06 nos provetes previamente utilizados nos ensaios à tração no LR.

Primeiramente existiu a necessidade de passar uma película fina de ouro nas amostras, uma vez que a máquina utilizada para tirar as imagens SEM não faz a leitura de superfícies não condutoras de eletricidade, como é o caso da maioria dos polímeros. Essa película foi aplicada na *Cressington Sputter Coater 108 Auto*. Após a aplicação em todas amostras, foram colocadas na *SU3800 Scanning Electron Microscope* de forma a obter as imagens SEM para serem posteriormente analisadas.

## 4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

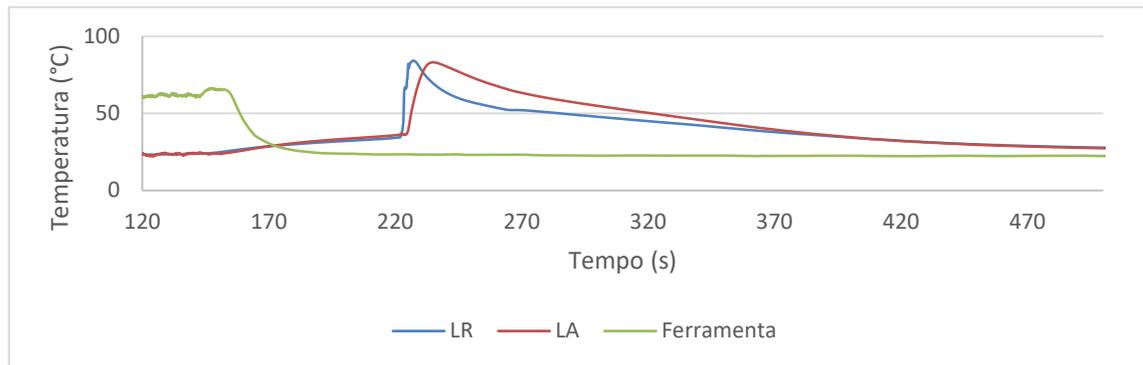
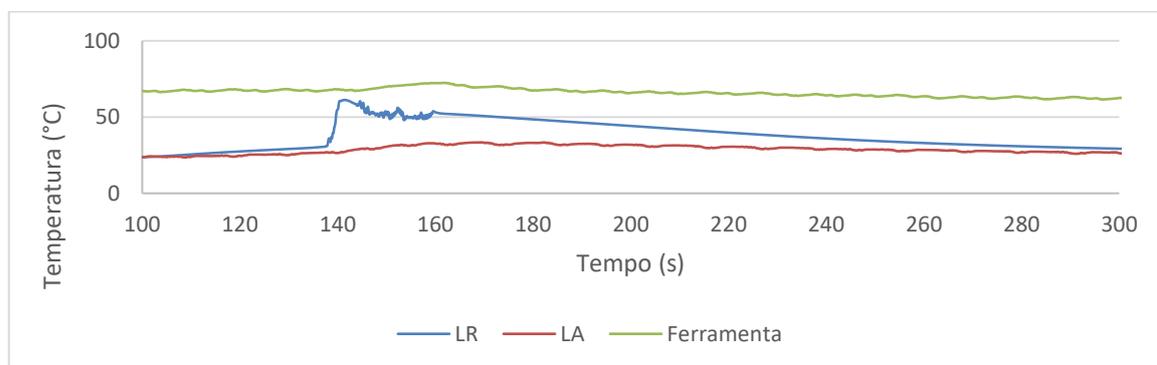
Neste capítulo serão apresentados todos os resultados e a respetiva discussão. Começando pelos ciclos térmicos, passando para a análise morfológica, de seguida a análise de dureza, o comportamento à tração e por fim, análise SEM.

### 4.1. Ciclos térmicos

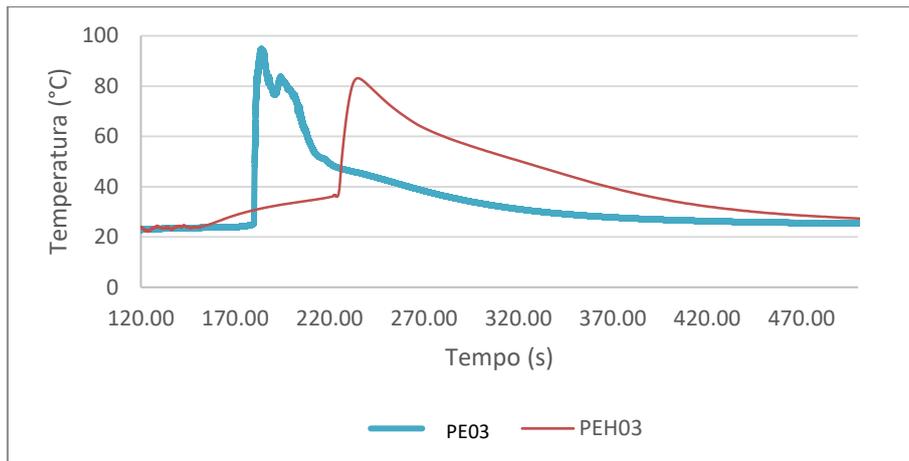
Neste subcapítulo irá ser feita uma análise dos gráficos dos ciclos térmicos das soldaduras PEH03, PEH04, ABSH03 e ABSH04, todos os outros ciclos térmicos podem ser consultados no apêndice A e B. As soldaduras apresentadas são a soldaduras em que foi gerado mais e menos calor.

Na Figura 14 é possível visualizar o ciclo térmico da soldadura PEH03 onde o rácio  $w/v$  é de 25 rot/mm. No decorrer desta soldadura o termopar conectado à ferramenta sofreu um acidente e não foi possível retirar conclusões do mesmo. É possível perceber que a temperatura é semelhante em ambos os lados (LR, LA), tendo atingido temperaturas máximas de 82,20°C e 82,62°C. É de salientar que a temperatura inicial da soldadura foi de 73°C. Na Figura 15 é possível ver o ciclo térmico da soldadura onde o rácio  $w/v$  foi menor (PEH04), apesar de a ferramenta ter sido aquecida à mesma temperatura da soldadura PEH03 a temperatura máxima no LR foi de 61,07°C e no LA foi de 32°C, esta variação pode ter acontecido devido a uma má colocação do termopar no LA.

Comparando a soldadura PEH03 com a soldadura PEH04 é perceptível o aumento de calor com uma maior velocidade de rotação ( $w$ ) e menor velocidade de avanço ( $v$ ).

**Figura 14** Ciclo térmico da soldadura PEH03.**Figura 15** Ciclo térmico da soldadura PEH04

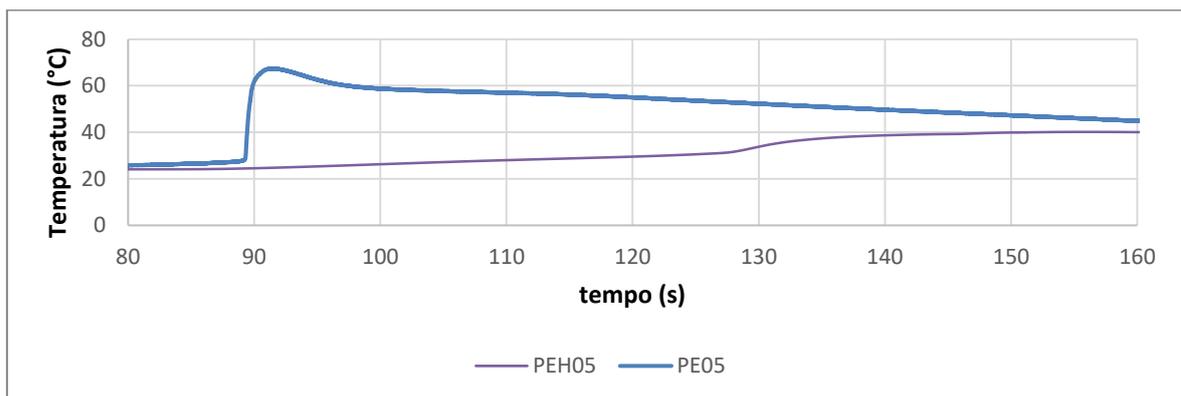
Na Figura 16 é possível constatar os ciclos térmicos de duas soldaduras realizadas no DEM com os mesmos parâmetros, sendo a única diferença a adição de calor na ferramenta PEH03. Na soldadura PE03 a temperatura é de 91°C e na soldadura PEH03 é de 82,62°C. Este resultado não é espetável uma vez que existe adição de calor externo na ferramenta na soldadura PEH03, sendo que o previsível seria uma maior temperatura na soldadura PEH03 e não na soldadura PE03. Este resultado pode-se justificar com uma má colocação do termopar na placa de PE da soldadura PEH03, ou ainda o termopar ter sido colocado a 3 mm e não 2 mm como na placa de PE da soldadura PE03.



**Figura 16** Ciclos térmicos da soldadura PE03 [46] e soldadura PEH03.

A medição da temperatura da soldadura PEH04 não teve um resultado desejável devido a um erro de funcionamento do termopar e foi utilizada a soldadura PEH05 e PE05 por terem o rácio de velocidades mais próximo.

A partir da figura 17 conclui-se que a soldadura PEH05 teve uma temperatura máxima de 44°C aos 160 segundos, enquanto a soldadura PE05 atingiu uma temperatura de 67,43°C aos 91 segundos. Mais uma vez este resultado não foi de acordo com a expectativas, podendo ter ocorrido um erro de leitura no termopar uma vez que era suposto a soldaduras atingirem a temperatura máxima aproximadamente ao mesmo tempo inclusive.



**Figura 17** Ciclos térmicos da soldadura PE05 [53] e soldadura PEH05.

No caso do ABS foram obtidas conclusões semelhantes, na Figura 18 é possível ver que o LR ultrapassa a temperatura da ferramenta atingido uma temperatura de 193,075°C enquanto o LA atinge a temperatura da ferramenta atingindo uma temperatura de 111,21°C,

estas diferenças de temperatura podem acontecer devido a uma incorreta colocação dos termopares.

Na

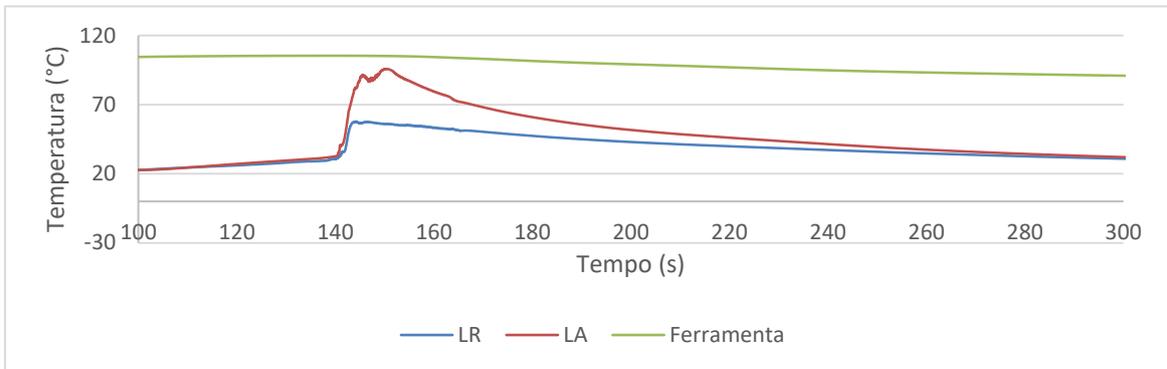
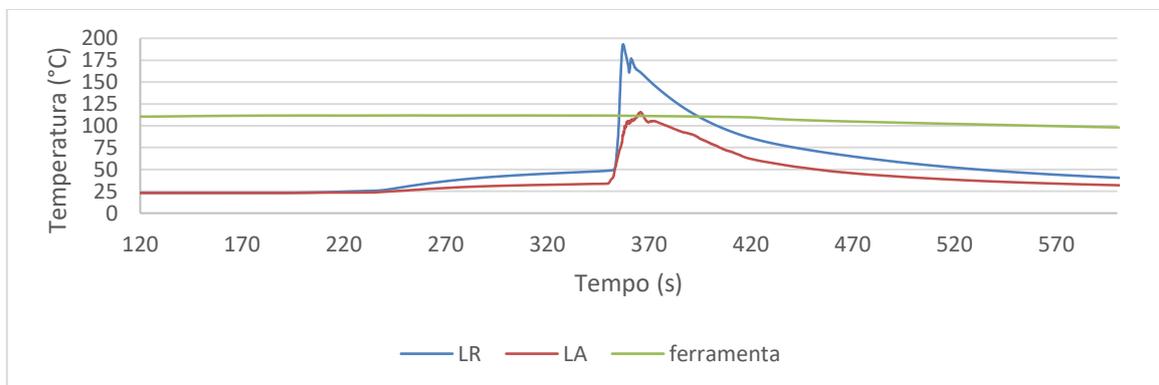
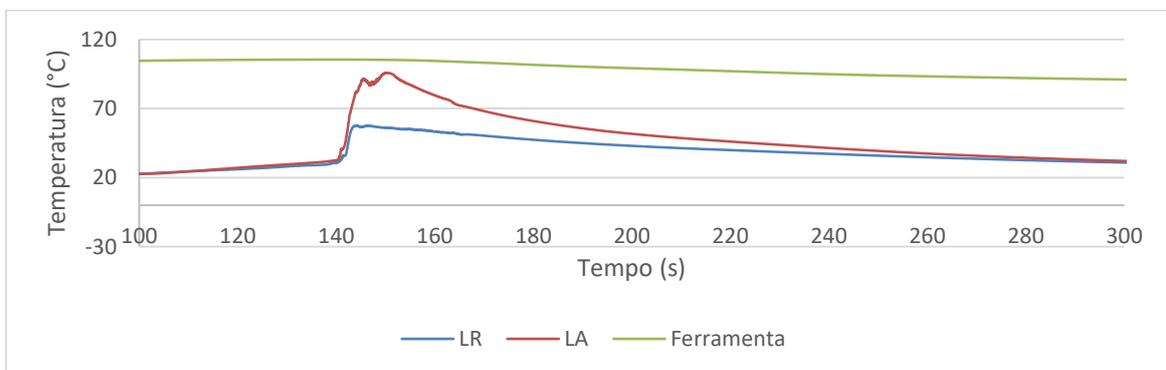


Figura 19 é possível ver que o LR atinge uma temperatura de 57,07°C enquanto o LA atinge uma temperatura superior igual a 95,79°C onde nenhum dos lados atinge a temperatura da ferramenta. Mais uma vez é possível verificar que o aumento da velocidade de rotação provoca um aumento de temperatura na soldadura.



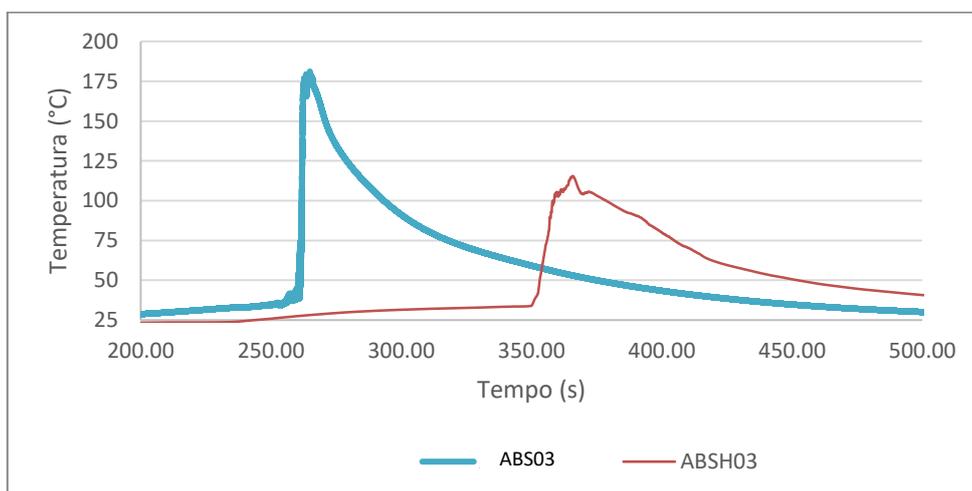
**Figura 18** Ciclo térmico da soldadura ABSH03.



**Figura 19** Ciclo térmico da soldadura ABSH04.

Na

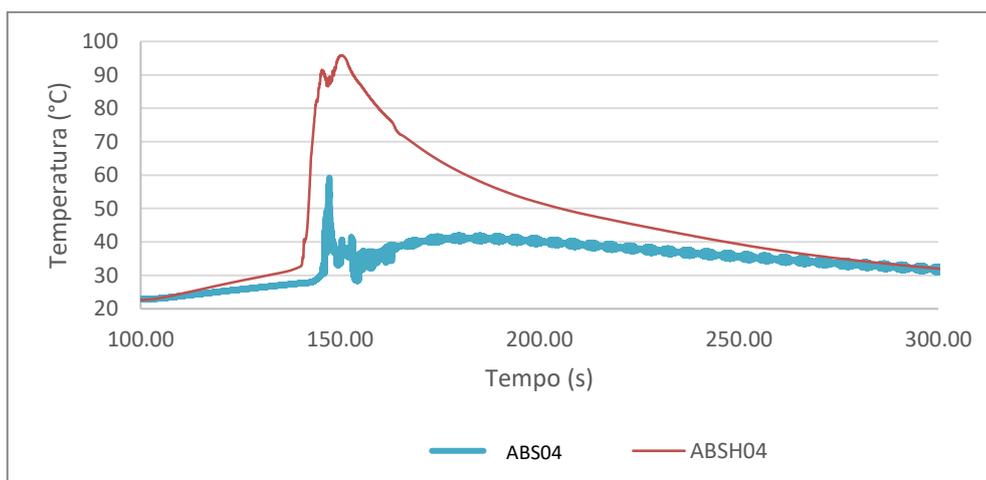
Figura 20 é possível observar dois ciclos térmicos de duas soldaduras (ABSH03 e ABS03) realizadas com os mesmos parâmetros, sendo que a soldadura ABS03 não tem adição de calor na ferramenta. A soldadura ABS03 atingiu uma temperatura de 181,17°C enquanto a soldadura ABSH03 atingiu uma temperatura de 112,30°C. Estas diferenças de temperatura nos termopares e sabendo que a soldadura ABSH03 tem adição de calor na ferramenta pode-se supor uma má colocação do termopar nessa mesma soldadura. As temperaturas máximas das temperaturas foram atingidas em intervalos de tempo diferentes, isto aconteceu uma vez que a soldadura ABSH03 teve um tempo de permanência ao contrário da soldadura ABS03.



**Figura 20** Ciclos térmicos da soldadura ABS03 e soldadura ABSH03.

Na

Figura 21 é possível ver o ciclo térmico das soldaduras ABSH04 e ABS04, tendo sido o único resultado o expectável com um aumento de temperatura na soldadura ABSH04 influenciada pela adição de calor na ferramenta em relação à soldadura ABS04.



**Figura 21** Ciclos térmicos da soldadura ABS04 e soldadura ABSH04.

Na Tabela 5 estão apresentadas as temperaturas iniciais das soldaduras assim como as finais. Pode-se observar que a temperatura nas placas de ABS é superior à temperatura das placas de PE. Isto poderá acontecer devido a uma adição de calor na ferramenta ser superior no ABS em relação ao PE. Devido ao tipo de aquecimento externo é possível observar que no decorrer das soldaduras ocorre uma diminuição de temperatura.

**Tabela 5** Temperaturas iniciais e finais das soldaduras.

Material	Designação	w/v (rot/mim)	Temperatura inicial °C	Temperatura final °C
PE	PEH01	14,5	83	94
PE	PEH02	19	85	79
PE	PEH03	25	73	85
PE	PEH04	7,25	85	71
PE	PEH05	9,5	87	76
PE	PEH06	12,5	88	79
ABS	ABSH01	14,5	105	98
ABS	ABSH02	19	100	110
ABS	ABSH03	25	100	110
ABS	ABSH04	7,25	98	105
ABS	ABSH05	9,5	100	108
ABS	ABSH06	12,5	100	112

## 4.2. Análise morfológica

Neste subcapítulo serão analisadas macrografias das soldaduras assim como a comparação com imagens de soldaduras com os mesmos parâmetros, mas sem adição de calor externo na ferramenta. O lado esquerdo da soldadura é sempre o LA e o lado direito da soldadura é o LR.

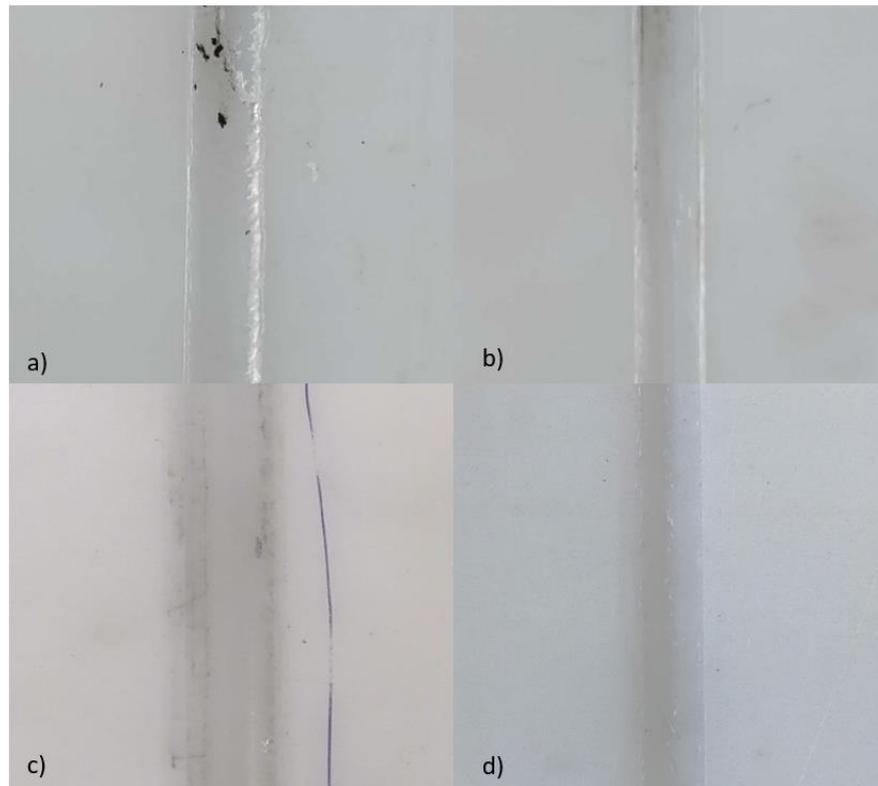
Foram apenas observadas as soldaduras com maior rácio das velocidades ( $w/v$ ) e menor rácio das velocidades ( $w/v$ ), todas as outras soldaduras e imagens morfológicas podem ser encontradas no apêndice C e D.

### 4.2.1. Polietileno

Na Figura 22 a) é possível ver uma imagem do topo da soldadura PE03 enquanto na Figura 22 c) é possível ver o mesmo tipo de imagem da soldadura PEH03. Comparando a soldadura PE03 com a soldadura PEH03 é possível ver cavidades em ambos os lados na soldadura PE03 enquanto na soldadura PEH03 essas cavidades são inexistentes. Sendo possível assim concluir que a adição de calor externo na ferramenta foi uma vantagem neste aspeto.

Já a Figura 22 b) (PE04) e Figura 22 d) (PEH04) têm uma aparência semelhante, ainda assim é possível ver uma soldadura com fronteiras sem rebarbas na PEH04 ao contrário da PE04. Concluindo assim que existe melhorias com a adição de calor externo na ferramenta.

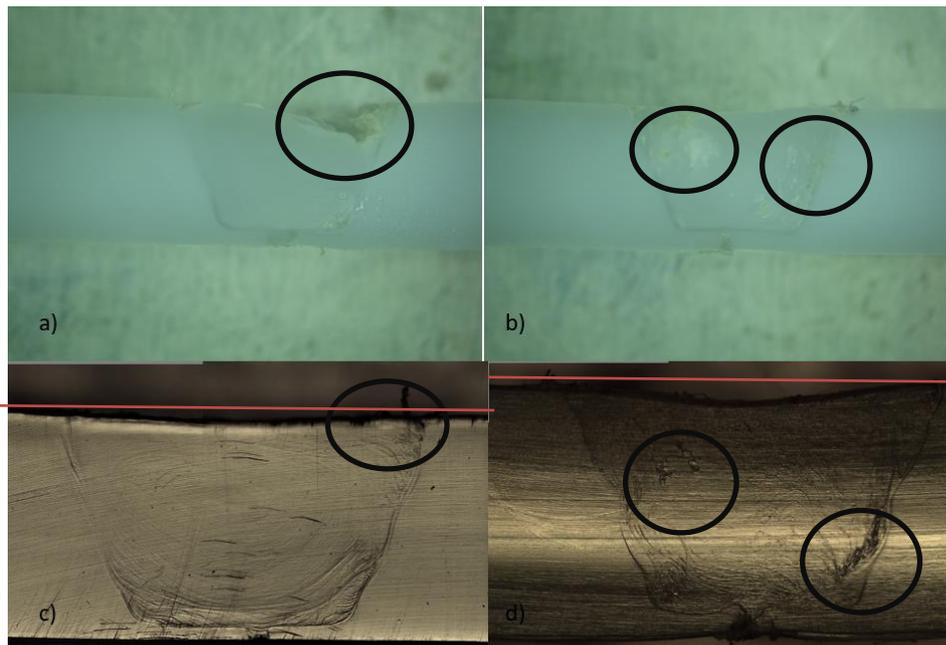
Na Figura 22 c) é possível observar uma soldadura sem cavidades, já na Figura 22 d) existe uma pequena cavidade podendo representar uma falta de material, o que difere estas duas soldaduras é a velocidade de rotação e velocidade de avanço sendo a PEH03 de 1500 rpm e 60 mm/min e a PEH04 de 870 rpm e 120 mm/min, contribuindo para uma diminuição de calor na soldadura.



**Figura 22** Macrografia de topo das soldaduras: a) PE03 b) PE04 c) PEH03 d) PEH04.

Na Figura 23 a) é possível observar a soldadura PE03, onde existe uma grande cavidade indicando falta de material contrariamente na figura 23 c) (PEH03) existe um preenchimento geral de material. Na Figura 23 b) (PE04) consegue-se ver a formação de vários defeitos e porosidades, apesar da soldadura PEH03 (figura 23 d)) conter alguns defeitos a soldadura PE04 apresenta maior defeitos indicando assim que a adição de calor externo na ferramenta foi uma vantagem.

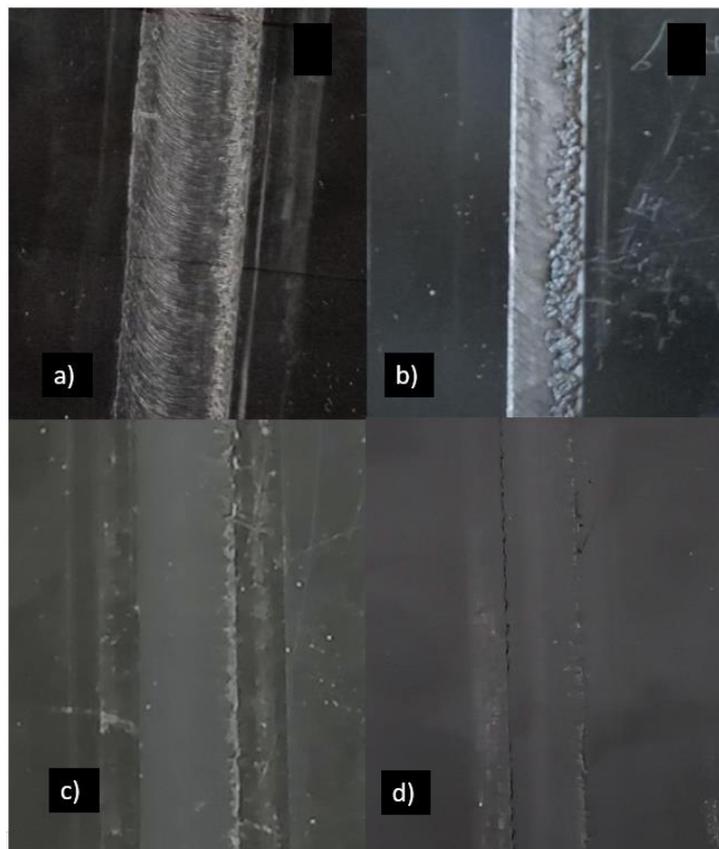
Assim, num modo geral na realização das soldaduras de PE a adição de calor na ferramenta melhorou consideravelmente as soldaduras, reduzindo a aparência de poros e defeitos.



**Figura 23** Macrografia de corte transversal das soldaduras: a) PE02 [53] b) PE04 [53] c) PEH03 d) PEH04.

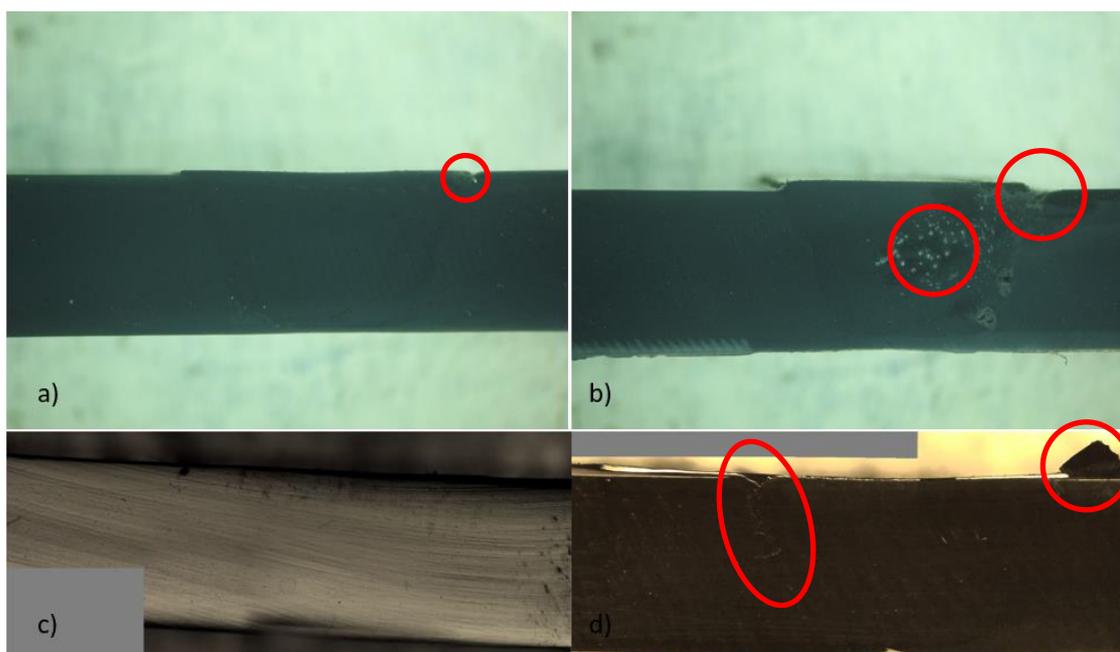
#### **4.2.2. Acrilonitrila butadieno estireno**

Comparando a Figura 24 a) (ABS03) e a Figura 24 b) (ABS04) com a Figura 24 c) (ABSH03) e a Figura 24 d) (ABSH04) é visível a olho nu um melhor acabamento devido à adição de calor externo.



**Figura 24** Macrografia de topo das soldaduras: a) ABS03 b) ABS04 c) ABSH03 d) ABSH04.

Na macrografia de corte transversal é perceptível as diferenças entre a Figura 25 a), Figura 25 b), Figura 25 c) e Figura 25 d). A Figura 25 c) mostra a completa ausência de defeitos na zona da soldadura, sendo quase imperceptível as fronteiras entre a zona de soldadura e o material base, já a Figura 25 d) é possível ver uma pequena cavidade assim como uma pequena rebarba, concluindo assim que para além de ser uma vantagem usar calor adicionado externamente também existe melhorias ao usar uma maior velocidade de rotação e uma menor velocidade de avanço.



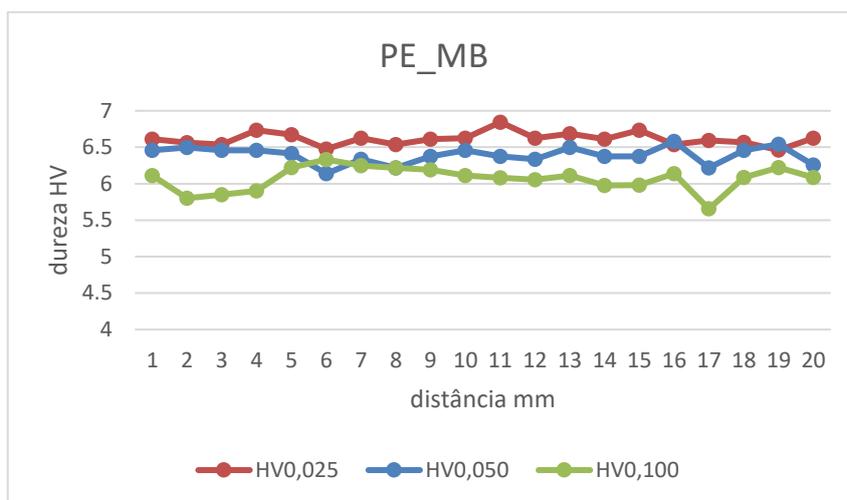
**Figura 25** Macrografia de corte transversal das soldaduras: a) ABS03 b) ABS04 c) ABSH03 d) ABSH04.

### 4.3. Análise de dureza

Neste subcapítulo irão ser apresentados todos os resultados obtidos nos ensaios de dureza realizados nas soldaduras. Foram realizadas 3 linhas ao longo do provete com 20 pontos cada. Serão apresentados resultados em forma de gráfico onde estarão divididos ao centro para diferenciar o lado do recuo e o lado de avanço.

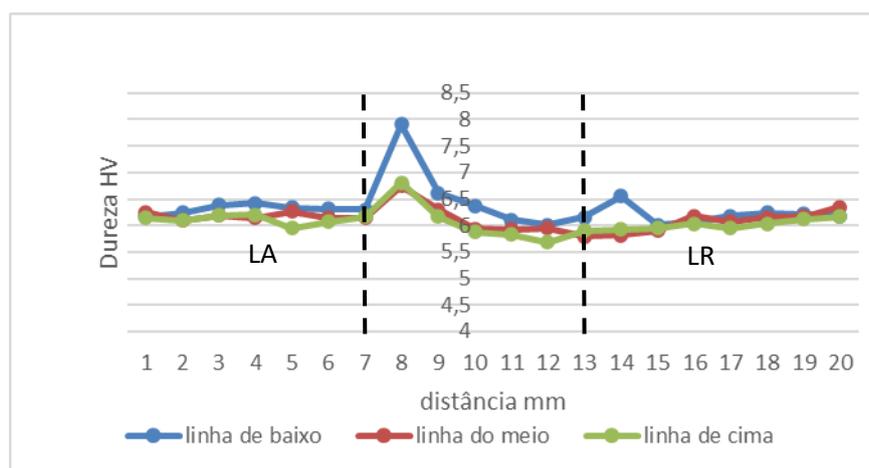
#### 4.3.1. Polietileno

Primeiramente foi realizado um ensaio de dureza ao material base de forma a comparar com os provetes soldados. Foi utilizado o mesmo número de indentações por linha tanto para o provete do material base como para os outros 6 provetes soldados, estes dados podem ser encontrados no apêndice E. No material base, de forma a perceber qual seria a melhor força a aplicar ao longo destes ensaios, foram realizadas 3 linhas onde se aplicaram cargas diferentes. Percebeu-se que a carga de HV0,025 (245,5 mN) seria a que teria menos desvio padrão, optando-se assim por realizar os ensaios com a mesma (é possível ver este gráfico na Figura 26). O material base revelou uma dureza num intervalo de 6 HV a 7 HV ao longo do provete.



**Figura 26** Resultados obtidos no ensaio de dureza num provete de material base de PE.

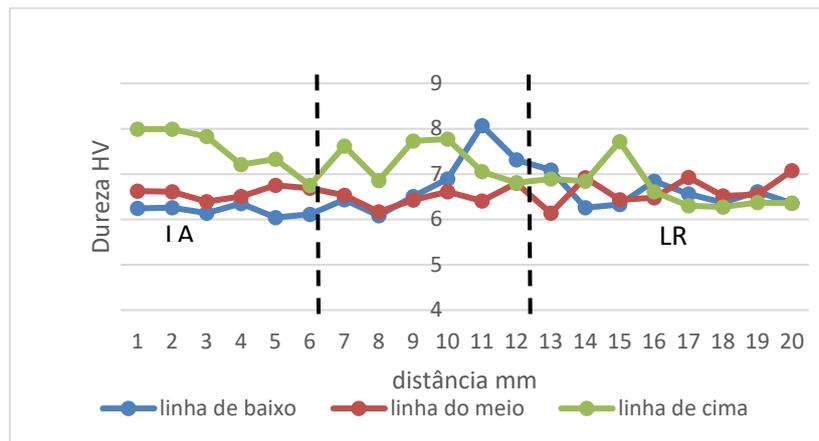
Na Figura 27 é possível encontrar o gráfico do ensaio de dureza do provete PEH03 onde foi realizada a soldadura com maior calor gerado pela velocidade de avanço e velocidade de rotação, sendo este rácio de 25 rot/mim. É possível ver que a dureza na zona da soldadura não diminui, mantendo uma dureza de 6 HV, no ponto 8 a dureza atinge um valor de 8 HV na linha de baixo e pode ser explicado devido a um defeito no material localizado naquele mesmo ponto, que dificultou a leitura da indentação. Fora da zona de soldadura pode-se verificar que a dureza é semelhante à zona de soldadura.



**Figura 27** Resultados do ensaio de dureza da soldadura PEH03.

Na Figura 28 é possível ver o gráfico do ensaio de dureza do provete PEH04 em que houve menor geração calor, na figura 28 é possível verificar que ao longo do material

base a dureza é de 6 HV existindo alguns pontos (linha de cima ponto 1, 2, 3, 15) na zona de soldadura. Dentro da zona de soldadura existe uma discrepância entre valores, sendo a linha do meio com menos discrepância das 3 linhas. Estas discrepâncias podem ocorrer pelo facto de existir poros na zona da soldadura ou pelo facto de ser a soldadura onde menos calor foi gerado, concluindo que o calor não foi suficiente para diminuir a dureza.



**Figura 28** . Resultados dos ensaios da dureza do provete PEH04.

No gráfico da Figura 29, os pontos da dureza foram determinados com a média das indentações dos gráficos anteriores, todos os pontos onde a dureza ou era muito maior, ou muito menor foram retirados uma vez que são pontos obtidos em zonas de defeitos. O gráfico do apêndice E figura 65 mostra-nos os valores da dureza das 6 soldaduras de PE sem adição de calor externo. Comparando com os valores obtidos a partir do gráfico da Figura 29 pode-se perceber que não houve alterações significativas nos valores da dureza. Assim, a adição de calor externo na ferramenta não significou uma melhoria nos valores da dureza. Ainda assim, é possível ver um aumento da dureza média com a diminuição da velocidade de avanço, que passa de 120 mm/mim para 60 mm/mim.

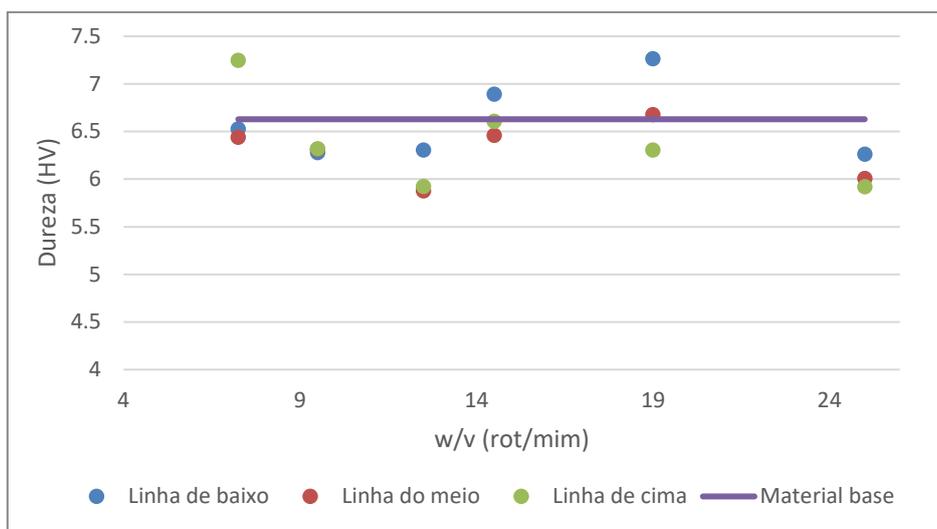


Figura 29 Comparação resultados da dureza média na zona da soldadura em função da razão da velocidade (PE).

### 4.3.2. Acrilonitrila Butadieno Estireno

Assim como no PE, foram realizados ensaios de dureza ao ABS, inicialmente como material base e depois com as 6 amostras de ABS. Foram realizadas 3 linhas com 20 indentações cada. Serão discutidas as soldaduras ABSH03 (maior calor) e ABSH04 (menor calor), os dados referentes às outras soldaduras podem ser encontrados em apêndice F.

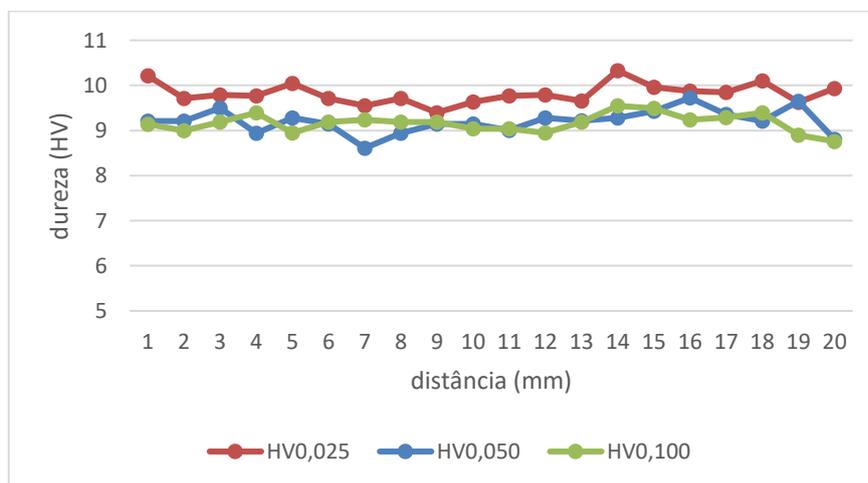
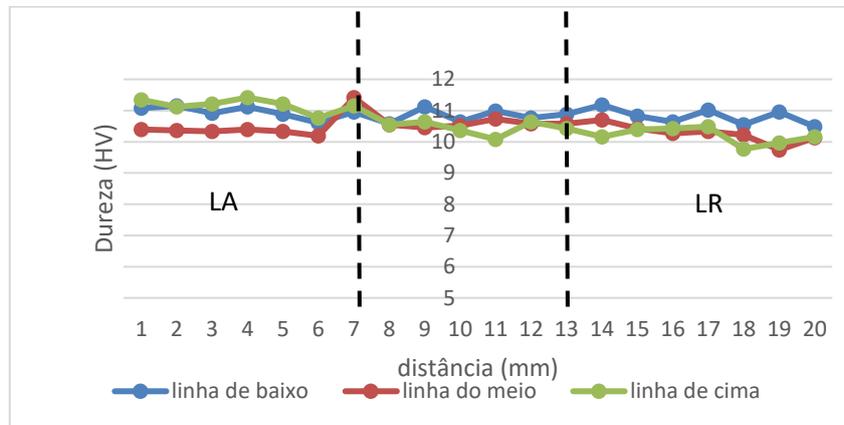


Figura 30 Resultados obtidos no ensaio de dureza num provete de material base de ABS.

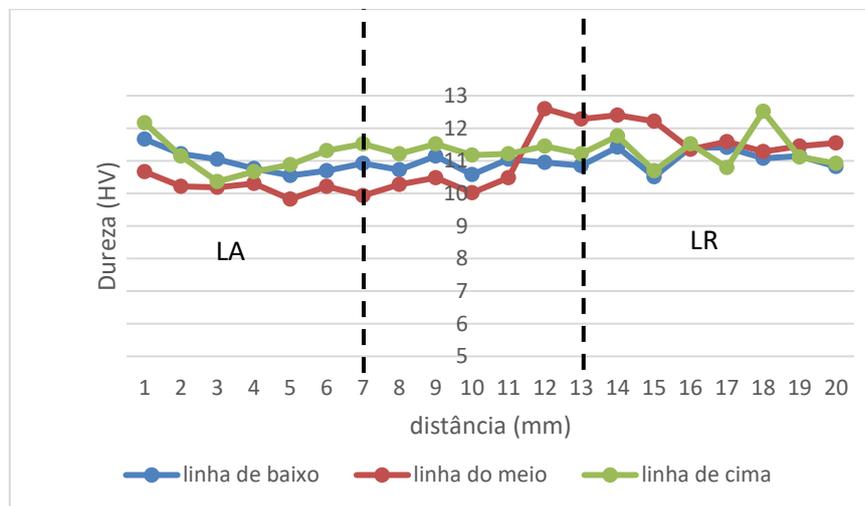
No material base de ABS obteve-se uma dureza entre 9 HV e 10 HV como é possível ver na Figura 30. Por sua vez, a dureza na zona de soldadura encontra-se na Figura 31 aumentou 1 valor, passando para um valor entre os 10 HV e os 11 HV, no ponto 7 em

todas as linhas existiu um aumento de dureza que pode ser justificado por se encontrar na fronteira da soldadura ou por existir um defeito no local da indentação.



**Figura 31** Resultados dos ensaios da dureza do provete ABSH03.

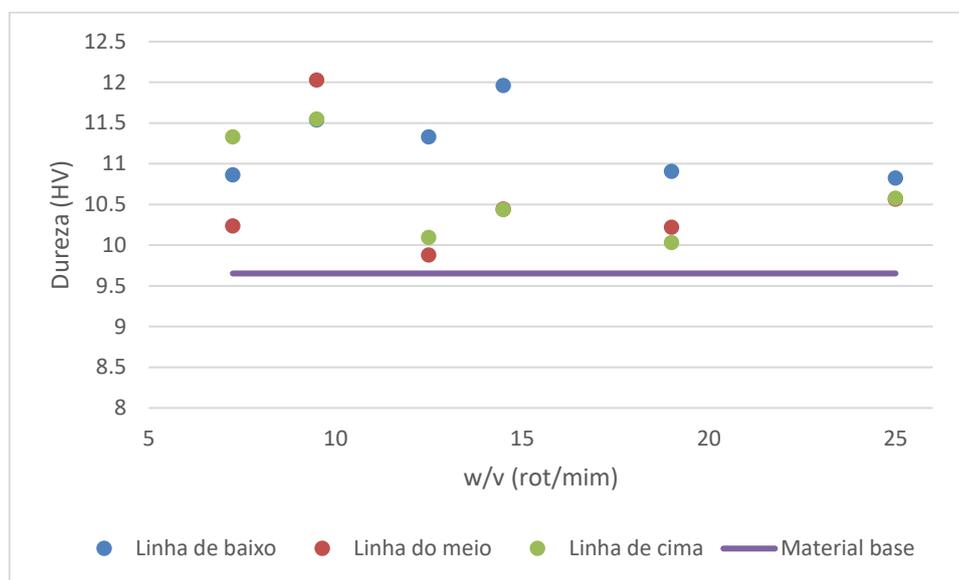
Na Figura 32 é apresentado o ensaio de dureza feito na soldadura ABSH04, tendo sido a soldadura feita com o menor rácio de velocidades originando menos calor na ferramenta. Ainda assim, os valores desta soldadura variam entre 10 HV e 12 HV. Na linha do meio entre o ponto 12 e 15 existe um pique que pode indicar uma zona com porosidade ou defeito provocado pela ferramenta.



**Figura 32** Resultados dos ensaios da dureza do provete ABSH04.

Na Figura 33 os pontos da dureza foram determinados a partir da média das indentações dos gráficos presentes na Figura 31, Figura 32 e nas figuras que se encontram no apêndice F. Retiraram-se todos os pontos que pudessem conter defeito provocando uma discrepância de valores na linha de indentações. No ABS ao contrário do PE uma diminuição na velocidade de avanço não reflete um aumento de dureza. No apêndice F figura 70, é

possível observar o gráfico dos valores da dureza das soldaduras de ABS sem adição de calor, comparando ao gráfico da Figura 33 é possível observar um aumento nos valores da dureza em relação ao material base. Assim, a adição de calor externo a ferramenta provocou um aumento da dureza nas soldaduras.



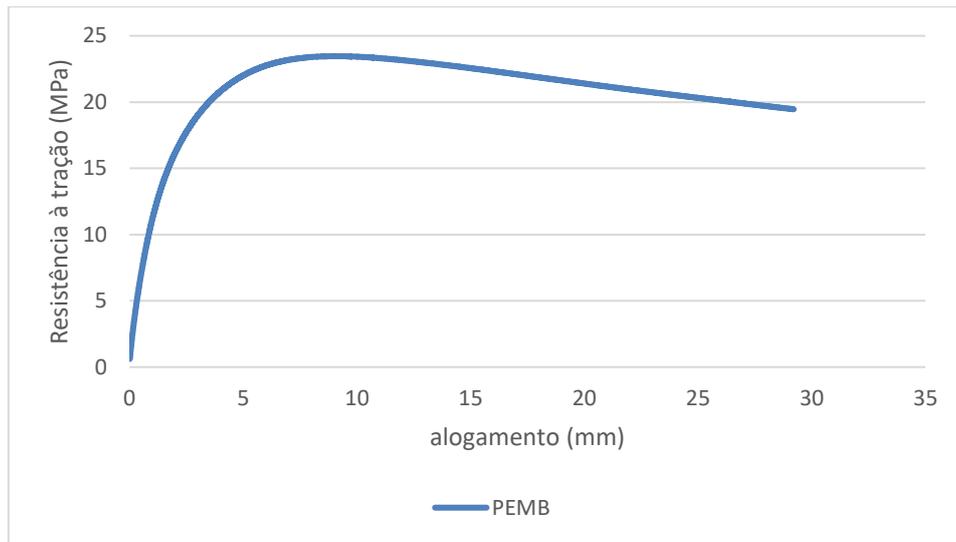
**Figura 33** Comparação resultados da dureza média na zona da soldadura em função da razão da velocidade (ABS).

## 4.4. Comportamento à tração

Neste subcapítulo serão apresentadas as análises dos gráficos referentes à resistência à tração em função do alongamento. Salientar que serão feitos 2 tipos de comparação. Inicialmente será feita uma comparação dos parâmetros entre soldaduras e, por fim, as soldaduras serão comparadas com soldaduras de parâmetros iguais, mas sem adição de calor externo.

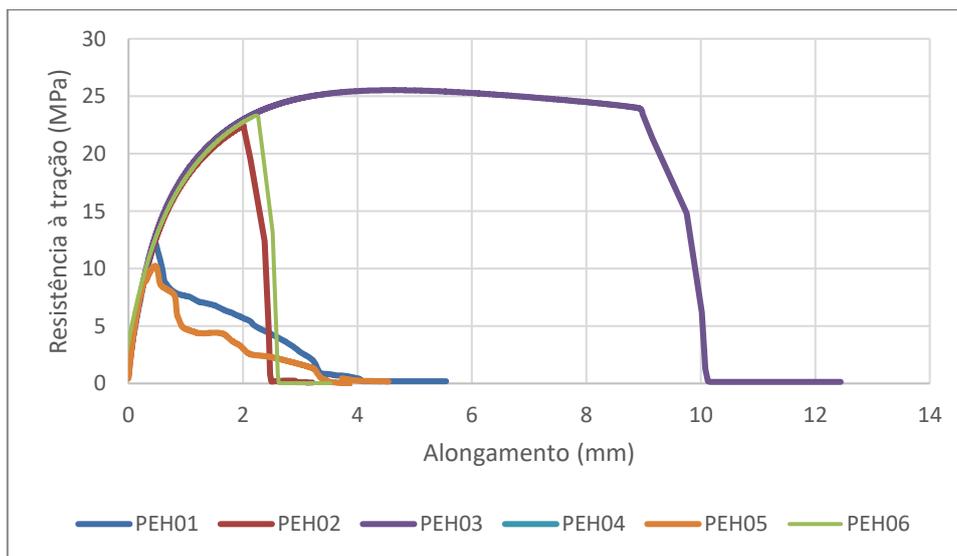
### 4.4.1. Polietileno

Na Figura 34 pode-se encontrar o ensaio à tração realizado a um provete de material base, apresenta uma resistência à tração máxima de 23,46 MPa. A partir do extensómetro do computador foi possível retirar um alongamento de 375 mm tendo sido interrompido antes da rotura do provete de PE.



**Figure 34** Curva tensão- alongamento do material base PE.

Na Figura 35 é possível verificar que aumentar a velocidade de rotação fez com que a resistência à tração também aumentasse, assim como se obteve melhores resultados com uma velocidade de avanço de 60 mm/min em vez de 120 mm/min.



**Figura 35** curvas tensão - alongamento das soldaduras PE.

Ao comparar com as soldaduras feitas anteriormente sem adição de calor externo na ferramenta (apêndice G Figura 77) é possível constatar melhorias em todas as soldaduras. A soldadura PE03 teve uma resistência à tração máxima de 22,06 MPa enquanto a soldadura PEH03 teve uma resistência à tração máxima de 25,53 MPa tendo sido estas as soldaduras com mais calor gerado pela ferramenta. Por outro lado, as soldaduras PE04 e PEH04 foram

as soldaduras com menos calor gerado pela ferramenta com resistência à tração de 5,10 MPa e 11,96 MPa.

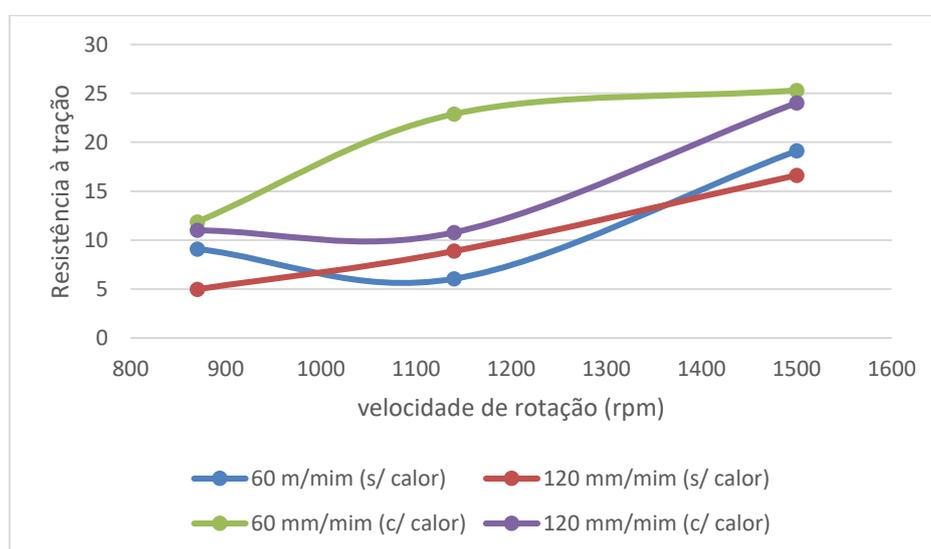
Na Tabela 6 é possível encontrar parte das propriedades mecânicas das soldaduras realizadas nesta dissertação. O resto das propriedades encontram-se no apêndice G Tabela 8. A partir da Tabela 6 verifica-se uma melhor eficiência ao longo das soldaduras com adição de calor, apenas pelo rácio de velocidades. A soldadura PEH03 obteve uma eficiência de 108,80% enquanto a soldadura PE03 obteve uma eficiência de 92%, já as soldaduras com menor rácio de velocidades obtiveram uma eficiência de junta de 51% para a soldadura PEH04 e 21,30% para a soldadura PE04. Assim, é possível ver uma melhoria nas soldaduras apenas pela adição de calor externo, mas as velocidades de rotação e avanço têm uma grande influência na eficiência das juntas. A eficiência de junta de 108,8% da soldadura PEH03 é superior a 100%. Mesmo que essa fosse a eficiência da soldadura propriamente dita, a resistência do provete não deveria passar os 100% pois essa é a resistência do material base. Este valor pode dever-se ao facto da direção do provete do material base ser diferente da direção do provete do PEH03 e pelo facto de haver alguma heterogeneidade do material.

**Tabela 6** Propriedades mecânicas resultantes dos ensaios de tração das séries de soldadura de PE.

Soldaduras	w/v (rot/mim)	Tensão Máxima (MPa)	Eficiência (%)	Região da rotura
PEH01	14,50	12,35	52,63	LR
PEH02	19,00	22,46	95,71	LR
PEH03	25,00	25,53	108,80	LR
PEH04	7,25	11,97	51,00	LR
PEH05	9,50	10,22	43,56	LR
PEH06	12,50	23,32	99,37	LR
PE01	14,50	14,02	58,90	LR
PE02	19,00	6,27	26,20	LR
PE03	25,00	22,06	92,00	LR
PE04	7,25	5,10	21,30	LR
PE05	9,50	10,52	43,90	LR
PE06	12,50	18,10	75,50	LR

Na Figura 36 encontra-se o gráfico de resistência à tração em função da velocidade de rotação. Os valores da resistência à tração são o valor médio das tensões de rotura máximas dos provetes analisados nos ensaios.

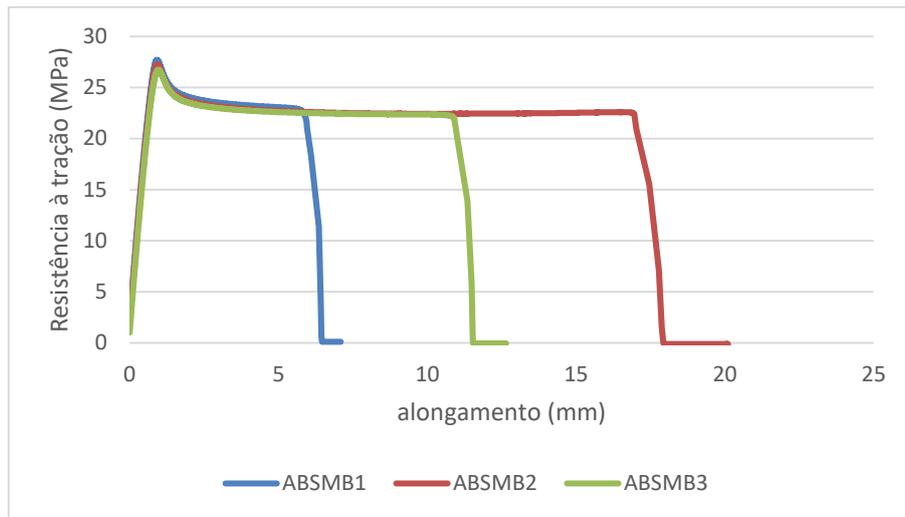
Uma primeira análise mostra que se obteve maiores tensões de rotura para as soldaduras com adição de calor externo na ferramenta. Ao comparar a velocidade 60 mm/min sem adição de calor com a velocidade 60 mm/min com adição de calor é possível ver que, estas têm comportamento e valores diferentes. Enquanto a tensão de rotura da curva azul diminui até 1140 rpm, na curva verde existe um aumento da tensão de rotura até 1140 rpm. A curva roxa tem um comportamento semelhante à curva azul. Apesar de a velocidade de avanço ser de 120 mm/min a curva roxa consegue ter valores de tensão de rutura superiores. Pode-se concluir que a adição de calor externo aumentou a resistência das soldaduras.



**Figura 36** Efeito da velocidade de avanço e velocidade de rotação na resistência à tração no PE.

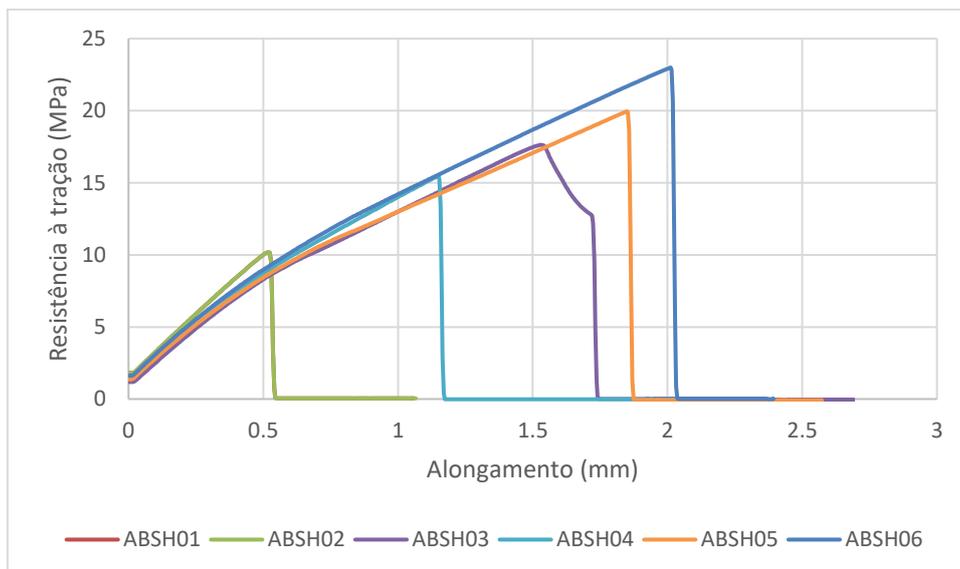
#### 4.4.2. Acrilonitrila Butadieno Estireno

Na Figura 37 encontra-se o gráfico da resistência à tração em função do alongamento no ABS. É possível ver a curva de 3 ensaios onde a resistência máxima é muito semelhante apesar de terem alongamentos diferentes. A resistência máxima ocorreu no provete ABSMB.P1 (material base de ABS provete 1) (27,69 MPa). Por sua vez o alongamento máximo ocorreu no provete ABSMB.P2 (material base de ABS provete 2) (20,107 mm).



**Figura 37** Curva tensão- material base ABS.

Na Figura 38 está representado o gráfico das curvas de tensão das 6 soldaduras de ABS com adição de calor na ferramenta. Sendo possível ver que para uma maior velocidade de rotação existe uma maior resistência à tração, assim como existe uma melhor resistência à tração ao passar de uma velocidade de 60 mm/min para 120 mm/min, contrariamente do que acontece no gráfico de tensão das 6 soldaduras sem adição de calor (apêndice G Figura 78). Ainda assim, existe um aumento de resistência à tração em todas as soldaduras com adição de calor comparado com as soldaduras sem adição de calor.



**Figura 38** Curva tensão das soldaduras de ABS.

Na Tabela 7 é possível ver algumas das propriedades mecânicas das 6 soldaduras de ABS com adição de calor na ferramenta e as 6 soldaduras sem adição de calor externo, no apêndice G Tabela 9 encontram-se as restantes propriedades mecânicas das soldaduras com adição de calor na ferramenta.

A tensão máxima é superior nas 6 soldaduras com adição de calor na ferramenta em relação às 6 soldaduras sem adição de calor na ferramenta. A soldadura ABSH03 que apresenta maior rácio de velocidades obteve uma tensão máxima de 17,63 MPa já a soldadura ABS03 obteve uma tensão máxima de 16,13 MPa. Nas soldaduras com menor rácio de velocidades (ABSH04 e ABS04) é possível observar uma tensão máxima de 15,48 MPa e de 7,93 MPa, nestas soldaduras a tensão máxima melhorou bastante. Por outro lado, observou-se uma eficiência máxima de 83,05% na soldadura ABSH06 onde a velocidade de rotação foi de 1500 rpm e a velocidade de avanço foi de 120 mm/min, a melhor eficiência de soldadura sem adição de calor foi atingida na soldadura ABS02 (59,43%).

**Tabela 7** Propriedades resultantes das soldaduras de ABS.

Soldaduras	w/v (rot/mim)	Tensão Máxima (MPa)	Eficiência (%)	Região da rotura
ABSH01	14,50	10,18	36,77	LR
ABSH02	19,00	19,10	68,97	LR
ABSH03	25,00	17,63	63,66	LR
ABSH04	7,25	15,48	55,90	LR
ABSH05	9,50	19,96	72,07	LR
ABSH06	12,50	23,00	83,05	LR
ABS01	14,50	5,42	19,16	LR
ABS02	19,00	16,89	59,53	LR
ABS03	25,00	16,13	57,02	LR
ABS04	7,25	7,93	28,03	LR
ABS05	9,50	7,08	25,03	LR
ABS06	12,50	8,61	30,43	LR

Na Figura 39 é apresentado o gráfico da resistência à tração em função da velocidade de rotação. Os valores da resistência à tração foram calculados da mesma forma que os valores da resistência à tração da Figura 36. Os valores da tensão de rotura são mais elevados na velocidade de 1140 rpm com 60 mm/min e em 1500 rpm com 120 mm/min nas soldaduras com adição de calor na ferramenta, sendo que a 120 mm/min o aumento da resistência à tração ocorre de uma forma suave ao longo da velocidade de rotação, enquanto

a 60 mm/min ocorre um aumento acentuado entre 870 rpm e 1140 rpm e uma descida acentuada entre 1140 rpm e 1500 rpm.

Ao comparar as mesmas curvas de velocidade de avanço onde a diferença é a adição de calor na ferramenta existe uma melhoria para a velocidade de 120 mm/min e uma pequena melhoria para 60 mm/min. Conclui-se assim que a adição de calor na ferramenta melhorou a resistência à tração quando comparada com os mesmos parâmetros de soldadura.

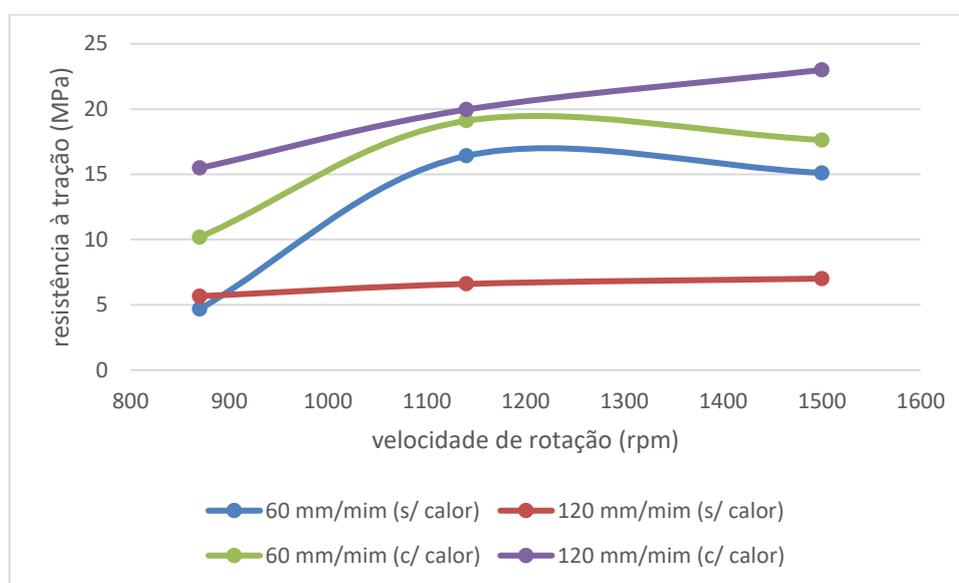


Figura 39 Efeito da velocidade de rotação e da velocidade de avanço na resistência à tração no ABS.

## 4.5. Análise SEM

Foram obtidas imagens em SEM no LR das superfícies de fratura das soldaduras PEH03, PEH04, ABS03, ABS04 e ABSH06.

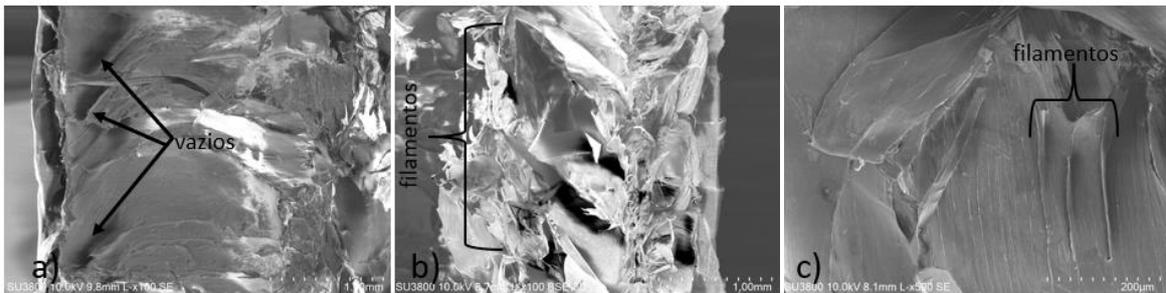
### 4.5.1. Polietileno

No lado da raiz existe uma maior ductilidade em comparação com o topo da soldadura. As zonas planas estão mais associadas a ruturas frágeis enquanto zonas com filamentos alongados normalmente associadas a comportamentos mais dúcteis.

Na Figura 40 a) (PEH03) consegue-se observar 2 zonas, uma zona plana e uma zona com filamentos alongados. Estes filamentos são possíveis de observar em melhor detalhe na Figura 40 b). Estes filamentos indicam uma fratura mais dúctil. A Figura 40 c)

tem uma aproximação maior de 200  $\mu\text{m}$  onde é possível observar uma zona mais plana, revelando uma menor ductilidade nessa zona.

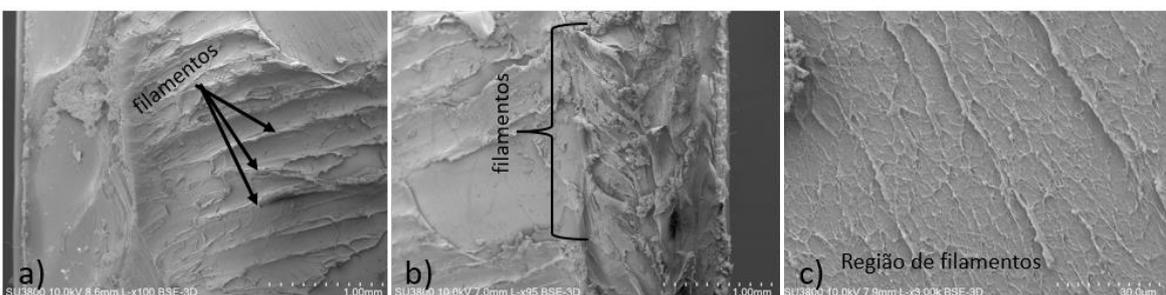
Semelhantes conclusões foram retiradas num estudo realizado em julho de 2018 no *College Station, TX, USA* [47].



**Figura 40** Imagens SEM da soldadura PEH03: a) a 1 mm b) a 1 mm c) 200  $\mu\text{m}$ .

Na Figura 41 é possível ver imagens SEM da soldadura PEH04. Na figura 41 a) existe a percepção de pequenos filamentos indicando que apesar de ser um material dúctil não sofreu um grande alongamento. Na figura 41 a) existe uma região que separa a superfície da soldadura dos filamentos. Já na Figura 41 b) é possível ver filamentos com um maior comprimento indicando uma diferente ductilidade de material nessa zona da soldadura. A Figura 41 c) é uma aproximação de uma região da figura 41 a) a 30  $\mu\text{m}$ . É possível ver filamentos ainda menores, q ainda uma menor ductilidade nessa zona.

Um artigo realizado na *Khalifa University of Science and Technolog* retirou conclusões semelhantes [48].



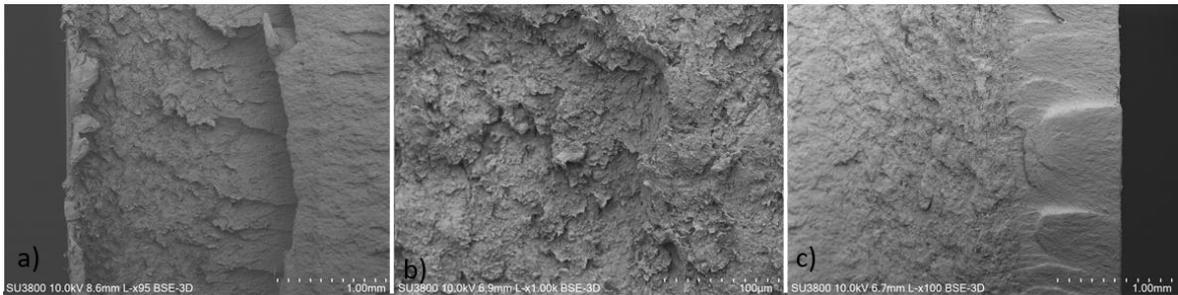
**Figura 41** Imagens SEM da soldadura PEH04: a) a 1 mm b) a 1 mm c) 30  $\mu\text{m}$ .

Comparando PEH03 e PEH04 verifica-se que os filamentos formados durante a rutura do PEH03 são em maior número e com maior dimensão indicando por isso que à

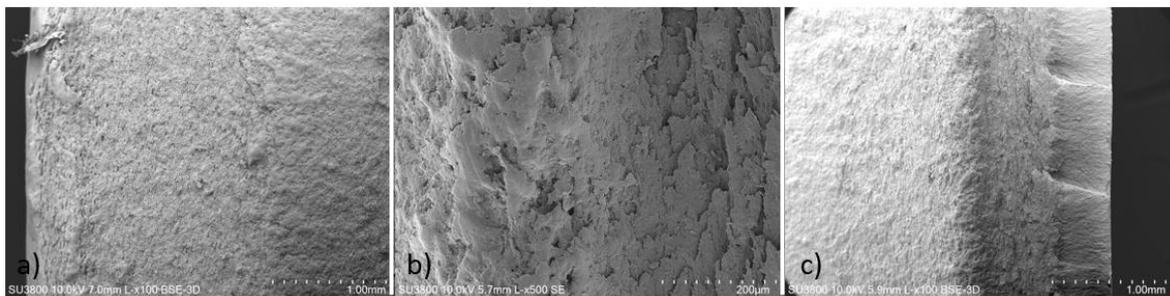
partida a fratura no PEH03 é mais dúctil do que a PEH04. Estas conclusões estão de acordo com os ensaios de tração onde o PEH03 teve um maior alongamento.

#### 4.5.2. Acrilonitrila Butadieno Estireno

Na Figura 42 e 43 é possível ver várias zonas aplanadas, mas rugosas, que indicam rutura frágil e baixa ductilidade da soldadura ABSH03.



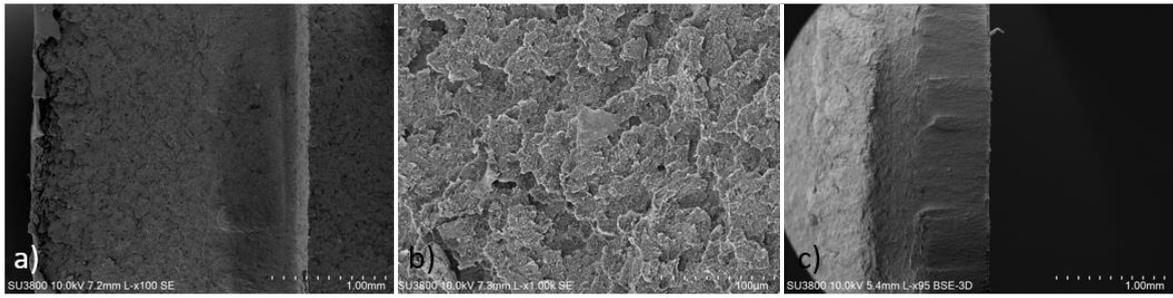
**Figura 42** Imagens SEM da soldadura ABSH03: a) a 1 mm b) a 100 μm c) a 1 mm.



**Figura 43** Imagens SEM da soldadura ABSH04: a) a 1 mm b) a 200 μm c) 1 mm.

A Figura 44 mostra uma fratura mais uniforme comparando com a figura 42 e 43. Ao contrário do PE onde foi possível comparar as soldaduras entre si e retirar algumas conclusões, no caso do ABS não é possível fazer essa comparação uma vez que existe uma semelhança nas imagens.

Resultados semelhantes foram retirados num artigo realizado na Faculty of Engineering, Urmia University [49].



**Figura 44** Imagens SEM da soldadura ABSH06: a) a 1 mm b) a 100 µm c) 1 mm.

## 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

### 5.1. Conclusões

Esta dissertação de mestrado permitiu concluir que:

- A adição de calor externo na ferramenta mostrou melhorar os resultados relativamente à redução de defeitos e resistência à tração.
- Um maior rácio das velocidades ( $w/v$ ) mostrou melhores soldaduras no PE;
- Nas soldaduras de ABS um maior rácio das velocidades ( $w/v$ ) não significou melhores resultados nas soldaduras;
- O aumento da velocidade de rotação tanto no PE como no ABS aumentaram a eficiência de junta das soldaduras;
- Nas soldaduras de ABS a dureza aumentou com a velocidade de rotação, enquanto no PE no modo geral existiu uma diminuição da dureza;

### 5.2. Trabalhos Futuros

Nesta dissertação de mestrado ficaram alguns pontos por estudar, sendo assim sugerido como trabalhos futuros:

- Realizar e analisar soldaduras com uma maior profundidade de penetração;
- Analisar a influência dos esferolites nas soldaduras;
- Medir a dureza nas soldaduras em *shore*;
- Estudar a possibilidade de aquecer o pino na realização de novas soldaduras.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] D. Feldman, "Polymer history," *Des. Monomers Polym.*, vol. 11, no. 1, pp. 1–15, 2008, doi: 10.1163/156855508X292383.
- [2] O. Physical and C. Platform, "Chapter 3. 아두이노 프로그램의 구조," pp. 25–47, doi: 10.1016/B978-0-08-101035-8.50003-1.
- [3] S. E. Gad, "Polymers," *Encycl. Toxicol. Third Ed.*, vol. 3, pp. 1045–1050, 2014, doi: 10.1016/B978-0-12-386454-3.00912-X.
- [4] A. Zafar, M. Awang, and S. R. Khan, "Friction stir welding of polymers: An overview," in *Awang M. (eds) 2nd International Conference on Mechanical, Manufacturing and Process Plant Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering*, Springer Heidelberg, 2017, pp. 19–36.
- [5] A. Arici and T. Sinmaz, "Effects of double passes of the tool on friction stir welding of polyethylene," in *Journal of Materials Science*, Jun. 2005, vol. 40, no. 12, pp. 3313–3316, doi: 10.1007/s10853-005-2709-x.
- [6] J. Rotheiser, "Joining of Plastics," *Join. Plast.*, pp. i–xxxii, 2009, doi: 10.3139/9783446445956.fm.
- [7] J.-P. Pascault and R. J. J. Williams, "Overview of thermosets: structure, properties and processing for advanced applications," *Thermosets*, pp. 3–27, 2012, doi: 10.1533/9780857097637.1.3.
- [8] P. K. Mallick, "Thermoplastics and thermoplastic-matrix composites for lightweight automotive structures," *Mater. Des. Manuf. Light. Veh.*, pp. 174–207, 2010, doi: 10.1533/9781845697822.1.174.
- [9] M. Radzi Ali, M. S. Salit, M. Jawaid, M. R. Mansur, and M. F. A. Manap, *Polyurethane-Based Biocomposites*. Elsevier Inc., 2017.
- [10] A. Dotan, *Biobased Thermosets*. Elsevier Inc., 2014.
- [11] "Solvent Cementing of Plastics," *Adhes. Technol. Handb.*, pp. 209–229, 2009, doi: 10.1016/b978-0-8155-1533-3.50012-8.
- [12] M. S. Haque and M. A. Siddiqui, "Plastic Welding: Important Facts and Developments," *Am. J. Mech. Ind. Eng.*, vol. 1, no. 2, pp. 15–19, 2016, doi: 10.11648/j.ajmie.20160102.12.

- 
- [13] P. Martinez, M. Al-Hussein, and R. Ahmad, "Online vision-based inspection system for thermoplastic hot plate welding in window frame manufacturing," *Procedia CIRP*, vol. 93, pp. 1316–1321, 2020, doi: 10.1016/j.procir.2020.03.035.
- [14] H. Potente and J. Schnieders, "Influence of process parameters on the phenomenon of stress cracking during hot plate welding," *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 21, no. 6, pp. 489–496, 2002, doi: 10.1177/0731684402021006828.
- [15] J. Diani and K. Gall, "Finite Strain 3D Thermoviscoelastic Constitutive Model," *Society*, no. 1, pp. 1–10, 2006, doi: 10.1002/pen.
- [16] X. Cui, L. Tian, P. Zhao, D. Wang, Y. Wang, and W. Wang, "The morphology and mechanical property of hot gas implant welding joint of polypropylene," *Mater. Lett.*, vol. 293, p. 129729, 2021, doi: 10.1016/j.matlet.2021.129729.
- [17] "Extrusion Welding," in *Handbook of Plastics Joining*, Elsevier, 2009, pp. 73–79.
- [18] T. G. Unnikrishnan and P. Kavan, "A review study in ultrasonic-welding of similar and dissimilar thermoplastic polymers and its composites," *Mater. Today Proc.*, no. xxxx, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.09.540.
- [19] E. C. Eveno and J. W. Gillespie, "Resistance Welding of Graphite Polyetheretherketone Composites: An Experimental Investigation," *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, vol. 1, no. 4, pp. 322–338, 1988, doi: 10.1177/089270578800100402.
- [20] M. Hou, L. Ye, and Y. W. Mai, "An Experimental Study of Resistance Welding of Carbon Fibre Fabric Reinforced Polyetherimide (CF Fabric/PEI) Composite Material," *Appl. Compos. Mater.*, vol. 6, no. 1, pp. 35–49, 1999, doi: 10.1023/A:1008879402267.
- [21] M. Ilie, E. Cicala, D. Grevey, S. Mattei, and V. Stoica, "Diode laser welding of ABS: Experiments and process modeling," *Opt. Laser Technol.*, vol. 41, no. 5, pp. 608–614, 2009, doi: 10.1016/j.optlastec.2008.10.005.
- [22] A. C. A. Asséko, B. Cosson, F. Schmidt, Y. Le Maoult, and E. Lafranche, "Laser transmission welding of composites-Part A: Thermo-physical and optical characterization of materials," *Infrared Phys. Technol.*, vol. 72, pp. 293–299, 2015, doi: 10.1016/j.infrared.2015.02.004.
- [23] A. Yousefpour, M. Hojjati, and J. P. Immarrigeon, "Fusion bonding/welding of thermoplastic composites," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol. 17,

- no. 4. pp. 303–341, Jul. 19, 2004, doi: 10.1177/0892705704045187.
- [24] R. Kumar, R. Singh, I. P. S. Ahuja, R. Penna, and L. Feo, “Weldability of thermoplastic materials for friction stir welding- A state of art review and future applications,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 137, pp. 1–15, Mar. 2018, doi: 10.1016/J.COMPOSITESB.2017.10.039.
- [25] 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, Jun. 2014, doi: 10.1016/j.matdes.2014.02.036.
- [26] S. Eslami, T. Ramos, P. J. Tavares, and P. M. G. P. Moreira, “Shoulder design developments for FSW lap joints of dissimilar polymers,” *J. Manuf. Process.*, vol. 20, pp. 15–23, Oct. 2015, doi: 10.1016/J.JMAPRO.2015.09.013.
- [27] P. C. Sharma, A. Kumar, P. K. Mehta, R. Singh, H. Pradesh, and H. Pradesh, “Survey studies on insect-pests associated with important medicinal plants in Himachal Pradesh,” *Indian J. Sci. Res. Technol.*, vol. 2, no. 4, pp. 2–7, 2014.
- [28] N. Mendes, P. Neto, A. Loureiro, and A. P. Moreira, “Machines and control systems for friction stir welding: A review,” *Mater. Des.*, vol. 90, pp. 256–265, Jan. 2016, doi: 10.1016/J.MATDES.2015.10.124.
- [29] S. Eslami, P. J. Tavares, and P. M. G. P. Moreira, “Friction stir welding tooling for polymers: review and prospects,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 89, no. 5–8. Springer London, pp. 1677–1690, Mar. 01, 2017, doi: 10.1007/s00170-016-9205-0.
- [30] P. Engineering, “Available online at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com),” vol. 38, pp. 3927–3940, 2012, doi: 10.1016/j.proeng.2012.06.450.
- [31] K. Panneerselvam and K. Lenin, “EFFECTS AND DEFECTS OF THE POLYPROPYLENE PLATE FOR DIFFERENT PARAMETERS IN FRICTION STIR WELDING PROCESS,” *IJRET Int. J. Res. Eng. Technol.*, Accessed: Jul. 20, 2020. [Online]. Available: <http://www.ijret.org>.
- [32] J. Gao, C. Li, U. Shilpakar, and Y. Shen, “Improvements of mechanical properties in dissimilar joints of HDPE and ABS via carbon nanotubes during friction stir welding process,” *Mater. Des.*, vol. 86, pp. 289–296, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.matdes.2015.07.095.

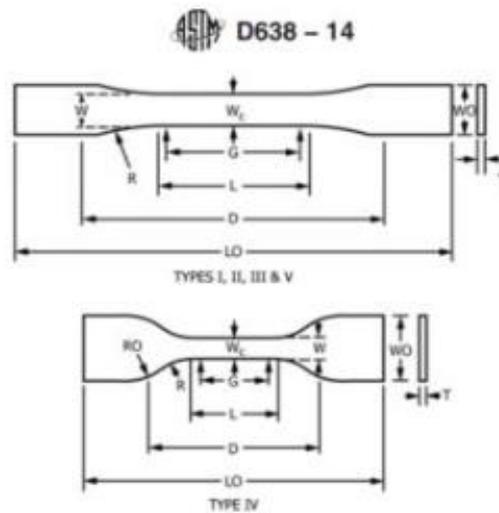
- 
- [33] P. Sas, S. Kadam, Y. Chavhan, M. Parate, O. Kotulkar, and V. S. Jatti, “Friction Stir Welding of Polymer : A Review.”
- [34] C. D. Sorenson, “W 7 111 115,” vol. 2, no. 12, 2004.
- [35] A. Scialpi *et al.*, “Viblade™ : friction stir welding for plastics,” vol. 7116, 2009, doi: 10.1080/09507110902843271.
- [36] 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, Feb. 2018, doi: 10.1016/J.COMPOSITESA.2017.12.005.
- [37] Y. M. Romero, M. Moreno Moreno, B. Arrieta Cardozo, W. Plata Rueda, S. Consuegra Pacheco, and J. Unfried-Silgado, “Weldability of high-density polyethylene using friction stir welding with a non-rotational shoulder tool,” *Weld. Int.*, vol. 32, no. 9, pp. 640–649, Sep. 2018, doi: 10.1080/09507116.2017.1347353.
- [38] R. Kanti, N. Pabitra, M. John, and D. Barma, “Development of a Self - Heated Friction Stir Welding tool for welding of polypropylene sheets,” *J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.*, vol. 41, no. 12, pp. 1–13, 2019, doi: 10.1007/s40430-019-2059-2.
- [39] G. R. Koerner and R. M. Koerner, *POLYMERIC GEOMEMBRANE COMPONENTS IN LANDFILL*. Elsevier Inc.
- [40] T. Rogers, “Creative Mechanisms,” *Everthing you need to know about polyethylene (PE)*, 2015. .
- [41] “Matweb,” *Overview of materials for High Density Polyethylene (HDPE), Extruded*. .
- [42] R. Kumar, R. Singh, G. Nanak, and D. Engineering, *Application of Nano Porous Materials for Energy Conservation and Storage*. Elsevier Ltd., 2018.
- [43] “Omnexus The material selection platform,” *A detailed Guide on Acrylonitrile Butadiene Styrene*. .
- [44] “Matweb,” *Overview of materials for Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS), Molded*. .
- [45] N. Alberto and M. Mendes, “Robotic friction stir welding of polymers,” no. July, 2014.
- [46] D. Antunes, “Jo ã o Dias Antunes,” Universidade de Coimbra, 2021.
- [47] J. Sheikh-Ahmad, D. Ali, F. Jarrar, and S. Deveci, “A study of friction stir welding of high density polyethylene,” *ASME 2018 13th Int. Manuf. Sci. Eng. Conf. MSEC*
-

- 2018, vol. 2, pp. 1–8, 2018, doi: 10.1115/MSEC2018-6318.
- [48] D. S. Ali, S. Deveci, F. Almaskari, and F. Jarrar, “Friction stir welding of high density polyethylene — Carbon black composite,” *J. Mater. Process. Tech.*, vol. 264, no. September 2018, pp. 402–413, 2019, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2018.09.033.
- [49] A. Bagheri, T. Azdast, and A. Doniavi, “An experimental study on mechanical properties of friction stir welded ABS sheets,” *Mater. Des.*, vol. 43, pp. 402–409, Jan. 2013, doi: 10.1016/J.MATDES.2012.06.059.



## ANEXO A

### a) Dimensões dos provetes



Specimen Dimensions for Thickness,  $T$ , mm (in.)<sup>a</sup>

Dimensions (see drawings)	7 (0.28) or under		Over 7 to 14 (0.28 to 0.55), incl		4 (0.16) or under		Tolerances
	Type I	Type II	Type III	Type IV <sup>b</sup>	Type V <sup>c,d</sup>		
W—Width of narrow section <sup>e,f</sup>	13 (0.50)	6 (0.25)	19 (0.75)	6 (0.25)	3.18 (0.125)	±0.5 (±0.02) <sup>h,c</sup>	
L—Length of narrow section	57 (2.25)	57 (2.25)	57 (2.25)	33 (1.30)	9.53 (0.375)	+0.5 (±0.02) <sup>c</sup>	
WO—Width overall, min <sup>g</sup>	19 (0.75)	19 (0.75)	29 (1.13)	19 (0.75)	...	+ 6.4 ( + 0.25)	
WO—Width overall, min <sup>g</sup>	...	...	...	...	9.53 (0.375)	+ 3.18 ( + 0.125)	
LO—Length overall, min <sup>h</sup>	165 (6.5)	183 (7.2)	246 (9.7)	115 (4.5)	63.5 (2.5)	no max (no max)	
G—Gage length <sup>i</sup>	50 (2.00)	50 (2.00)	50 (2.00)	...	7.62 (0.300)	±0.25 (±0.010) <sup>c</sup>	
G—Gage length <sup>i</sup>	...	...	...	25 (1.00)	...	±0.13 (±0.005)	
D—Distance between grips	115 (4.5)	135 (5.3)	115 (4.5)	65 (2.5) <sup>j</sup>	25.4 (1.0)	±5 (±0.2)	
R—Radius of fillet	76 (3.00)	76 (3.00)	76 (3.00)	14 (0.56)	12.7 (0.5)	±1 (±0.04) <sup>c</sup>	
RO—Outer radius (Type IV)	...	...	...	25 (1.00)	...	±1 (±0.04)	

<sup>a</sup>Thickness,  $T$ , shall be  $3.2 \pm 0.4$  mm ( $0.13 \pm 0.02$  in.) for all types of molded specimens, and for other Types I and II specimens where possible. If specimens are machined from sheets or plates, thickness,  $T$ , shall be the thickness of the sheet or plate provided this does not exceed the range stated for the intended specimen type. For sheets of nominal thickness greater than 14 mm (0.55 in.) the specimens shall be machined to  $14 \pm 0.4$  mm ( $0.55 \pm 0.02$  in.) in thickness, for use with the Type III specimen. For sheets of nominal thickness between 14 and 51 mm (0.55 and 2 in.) approximately equal amounts shall be machined from each surface. For thicker sheets both surfaces of the specimen shall be machined, and the location of the specimen with reference to the original thickness of the sheet shall be noted. Tolerances on thickness less than 14 mm (0.55 in.) shall be those standard for the grade of material tested.

<sup>b</sup>For the Type IV specimen, the internal width of the narrow section of the die shall be  $6.00 \pm 0.05$  mm ( $0.250 \pm 0.002$  in.). The dimensions are essentially those of Die C in Test Methods D412.

<sup>c</sup>The Type V specimen shall be machined or die cut to the dimensions shown, or molded in a mold whose cavity has these dimensions. The dimensions shall be:

- $W = 3.18 \pm 0.03$  mm ( $0.125 \pm 0.001$  in.),
- $L = 9.53 \pm 0.08$  mm ( $0.375 \pm 0.003$  in.),
- $G = 7.62 \pm 0.02$  mm ( $0.300 \pm 0.001$  in.), and
- $R = 12.7 \pm 0.08$  mm ( $0.500 \pm 0.003$  in.).

The other tolerances are those in the table.

<sup>d</sup>Supporting data on the introduction of the L specimen of Test Method D1822 as the Type V specimen are available from ASTM Headquarters. Request RR.D20-1038.

<sup>e</sup>The tolerances of the width at the center  $W_c$  shall be  $+0.00$  mm,  $-0.10$  mm ( $+0.000$  in.,  $-0.004$  in.) compared with width  $W$  at other parts of the reduced section. Any reduction in  $W$  at the center shall be gradual, equally on each side so that no abrupt changes in dimension result.

<sup>f</sup>For molded specimens, a draft of not over 0.13 mm (0.005 in.) is allowed for either Type I or II specimens 3.2 mm (0.13 in.) in thickness. See diagram below and this shall be taken into account when calculating width of the specimen. Thus a typical section of a molded Type I specimen, having the maximum allowable draft, could be as follows:

<sup>g</sup>Overall widths greater than the minimum indicated are used for some materials in order to avoid breaking in the grips.

<sup>h</sup>Overall lengths greater than the minimum indicated are used for some materials to avoid breaking in the grips or to satisfy special test requirements.

<sup>i</sup>Test marks or initial extensometer span.

<sup>j</sup>When self-tightening grips are used, for highly extensible polymers, the distance between grips will depend upon the types of grips used and may not be critical if maintained uniform once chosen.



## APÊNDICE A

### Ciclos térmicos de PE:

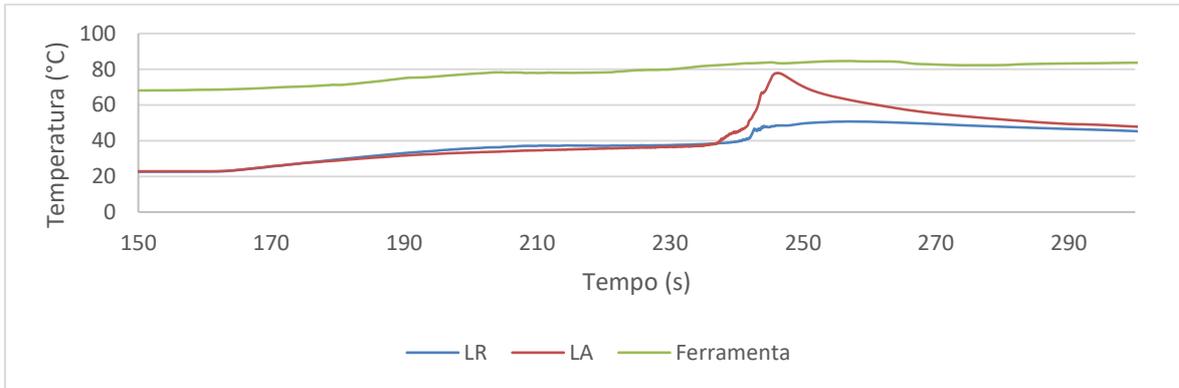


Figura 45 Ciclo térmico da soldadura PEH01.

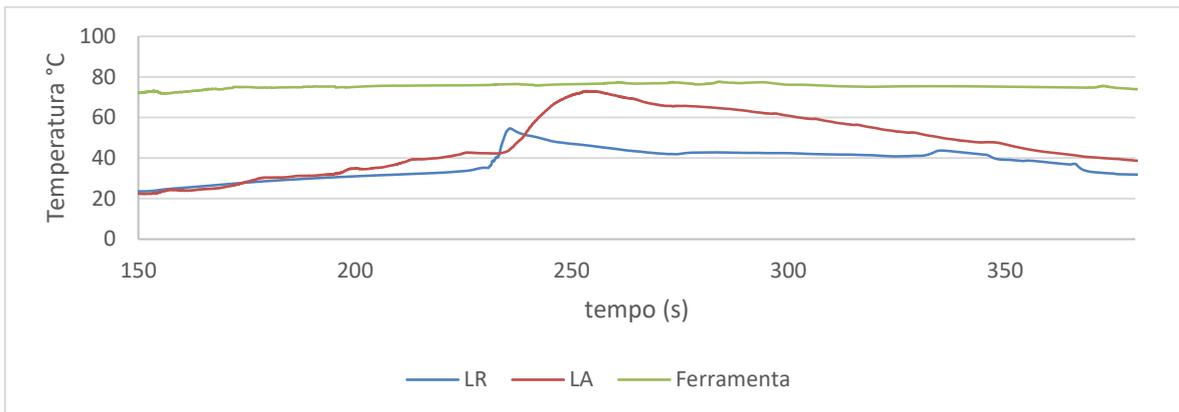


Figura 46 Ciclo térmico da soldadura PEH02.

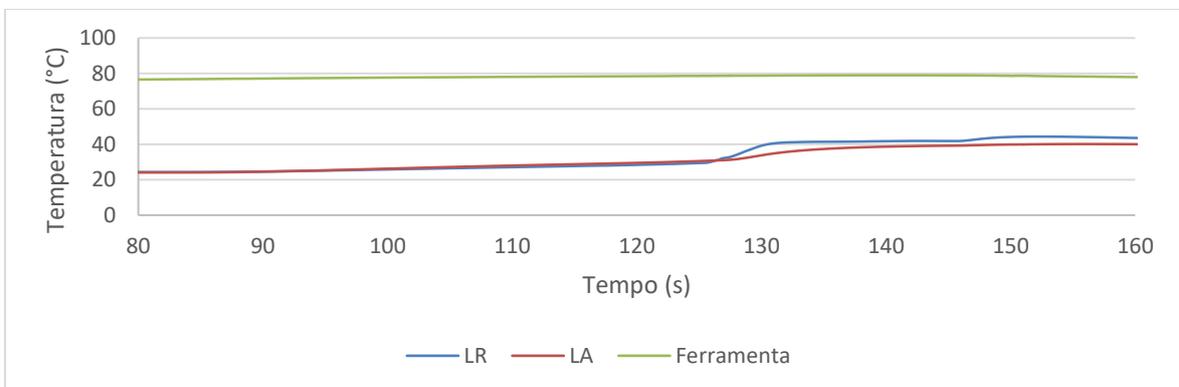
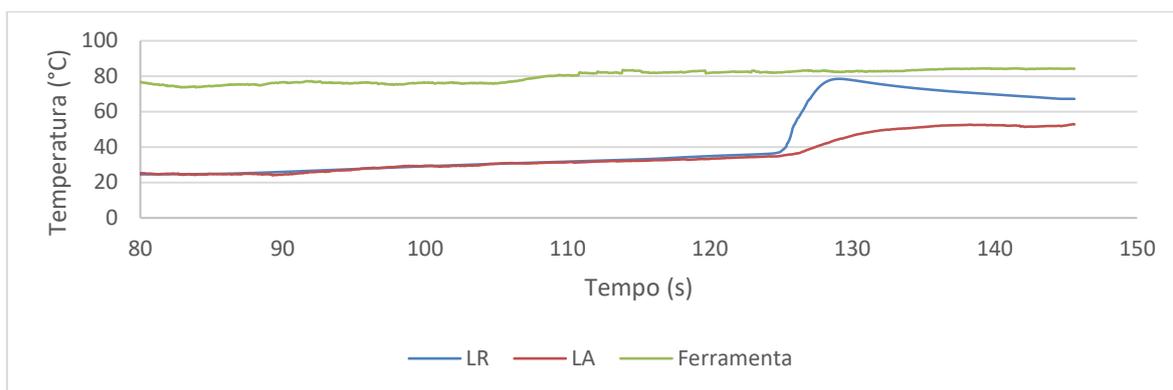


Figura 47 Ciclo térmico da soldadura PEH04.



**Figura 48** Ciclo térmico da soldadura PEH06.

## APÊNDICE B

### Ciclos térmicos das soldaduras ABS:

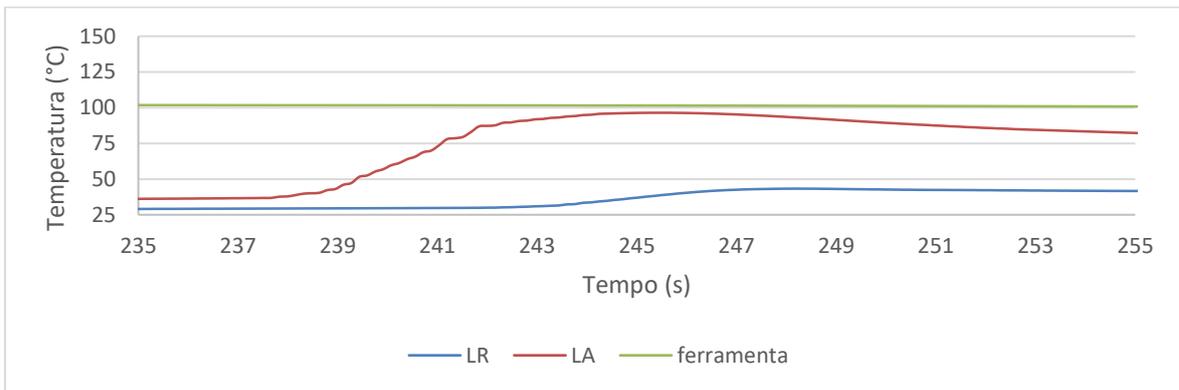


Figura 49 Ciclo térmico da soldadura ABSH01.

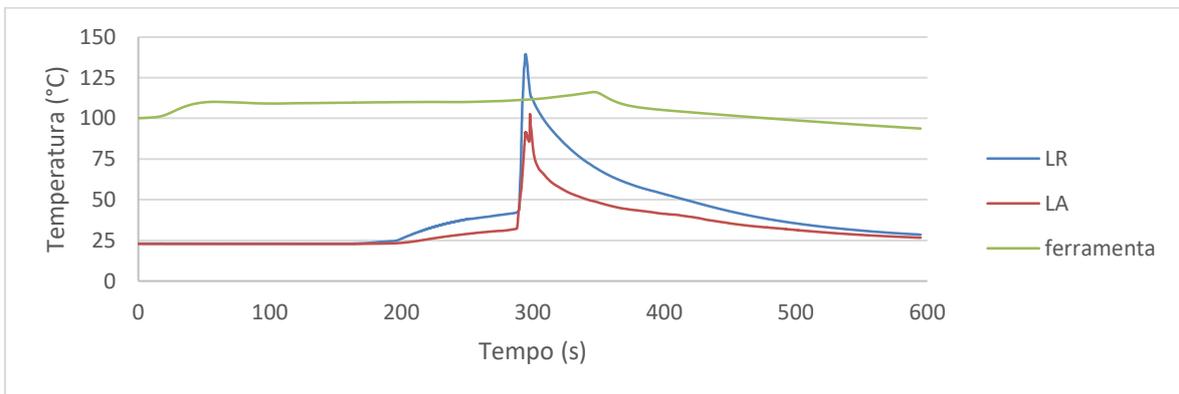
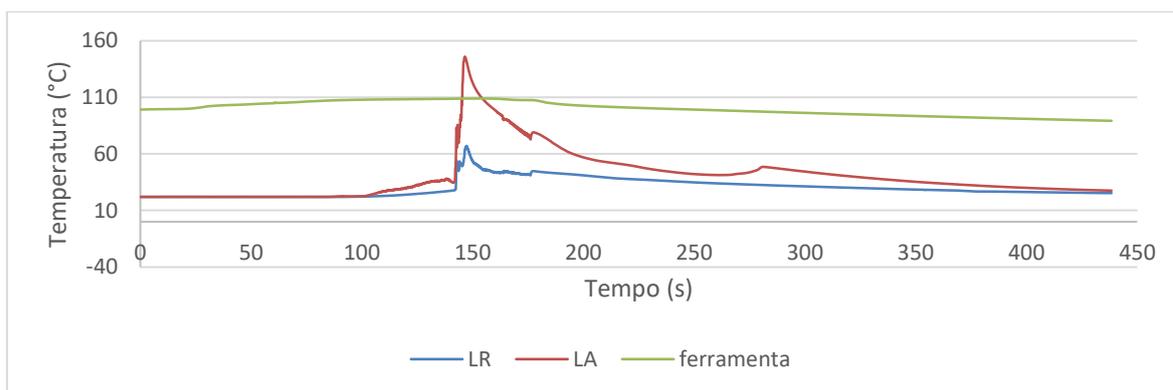
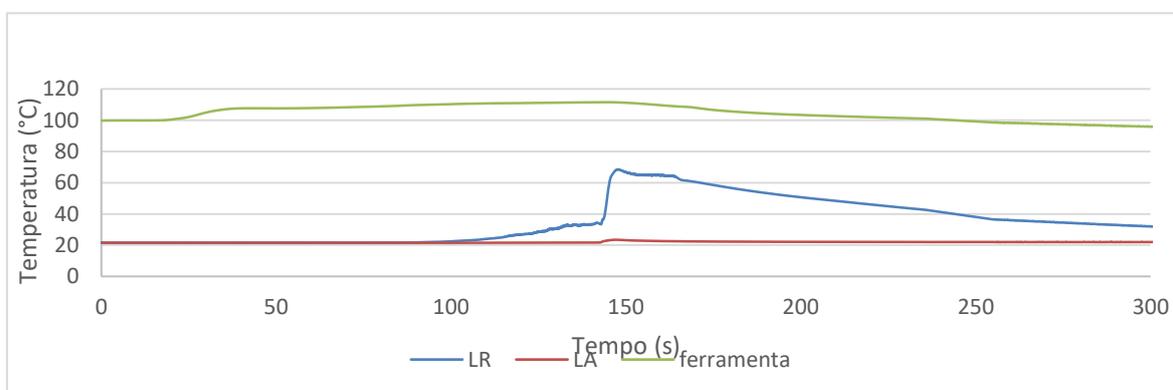


Figura 50 Ciclo térmico da soldadura ABSH02.



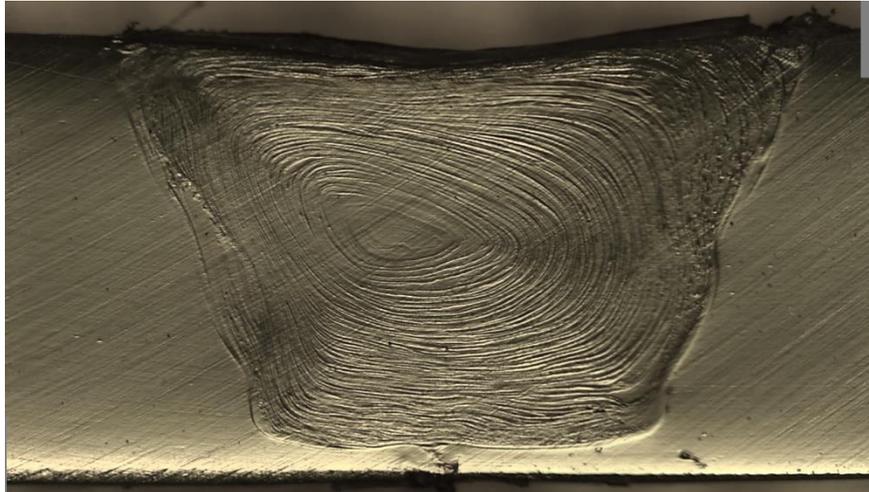
**Figura 51** Ciclo térmico da soldadura ABSH05.



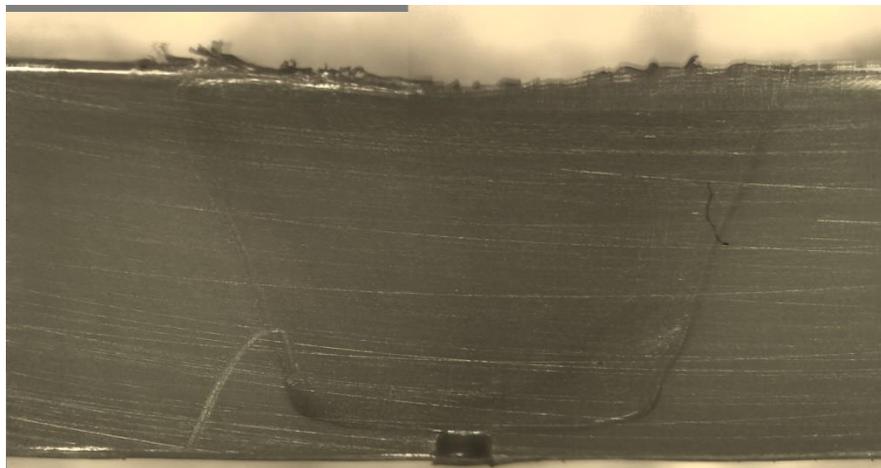
**Figura 52** Ciclo térmico da soldadura ABSH06.

## APÊNDICE C

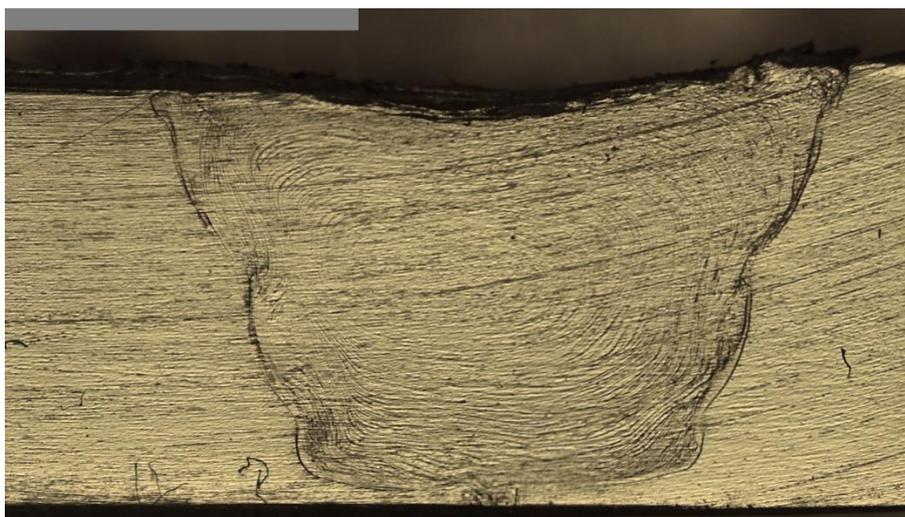
**Imagens morfológicas das restantes soldaduras de PE:**



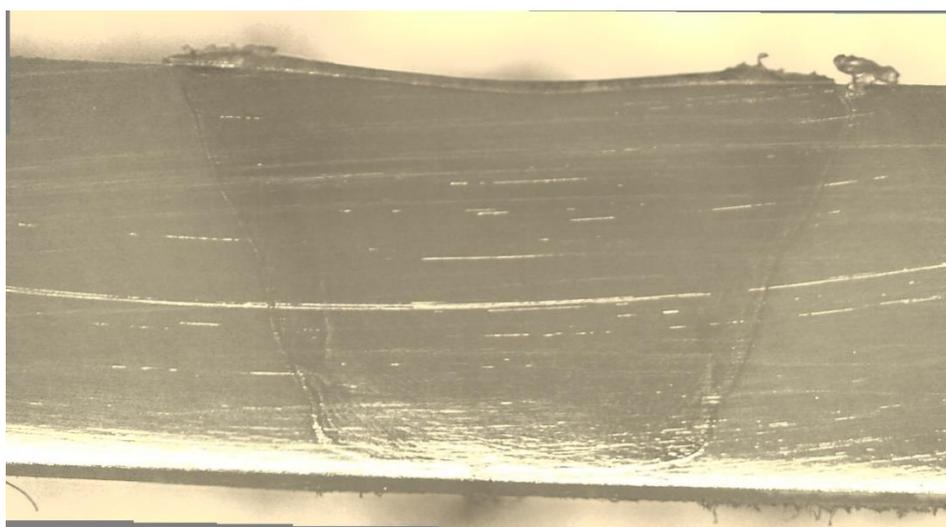
**Figura 53** Macrografia de corte longitudinal da soldadura PEH01.



**Figura 54** Macrografia de corte longitudinal da soldadura PEh02.



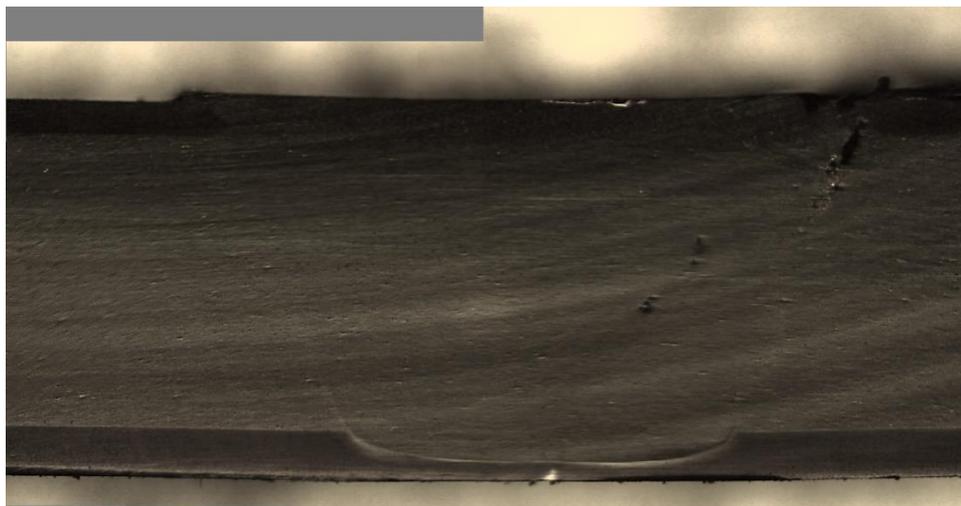
**Figura 55** Macrografia de corte longitudinal da soldadura PEH05.



**Figura 56** Macrografia de corte longitudinal da soldadura PEH06.

## APÊNDICE D

### Imagens de macrografia das soldaduras de ABS:



**Figura 57** Macrografia de corte longitudinal da soldadura ABSH01.



**Figura 58** Macrografia de corte longitudinal da soldadura ABSH02.



**Figura 59** Macrografia de corte longitudinal da soldadura ABSH05.



**Figura 60** Macrografia de corte longitudinal da soldadura ABSH06.

## APÊNCIDE E

### Resultados do ensaio de dureza nas soldaduras de PE:

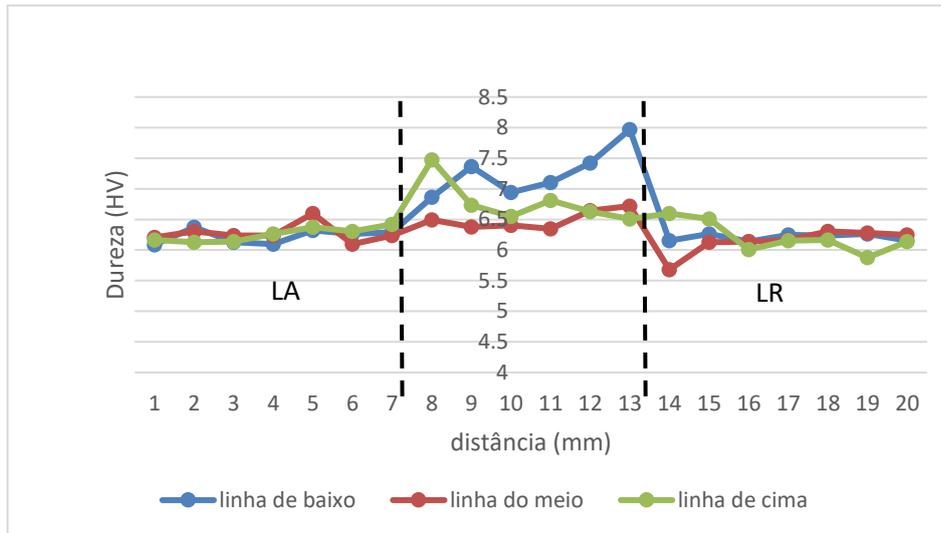


Figura 61 Resultados do ensaio de dureza da soldadura PEH01.

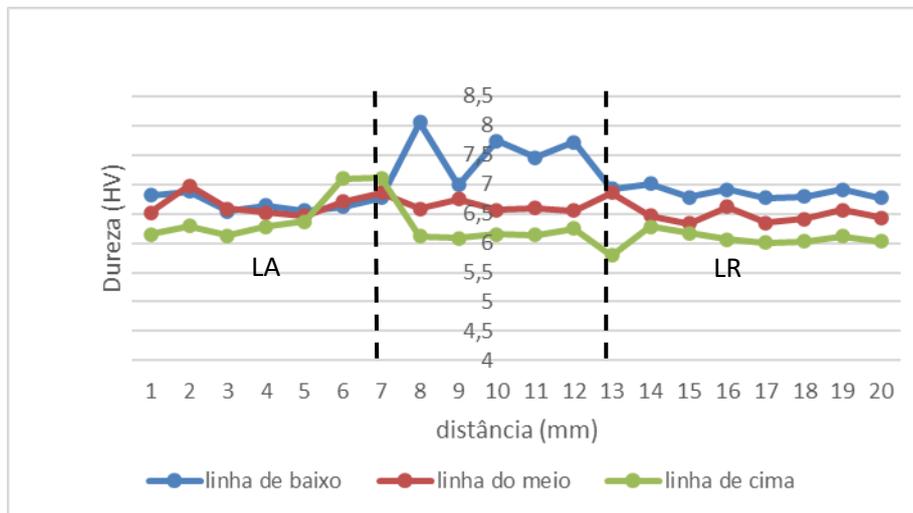
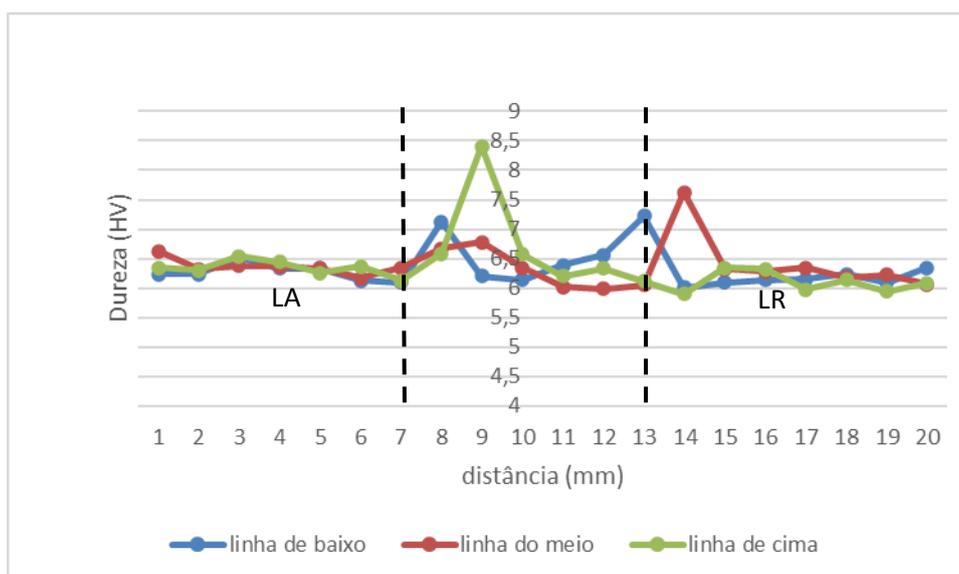
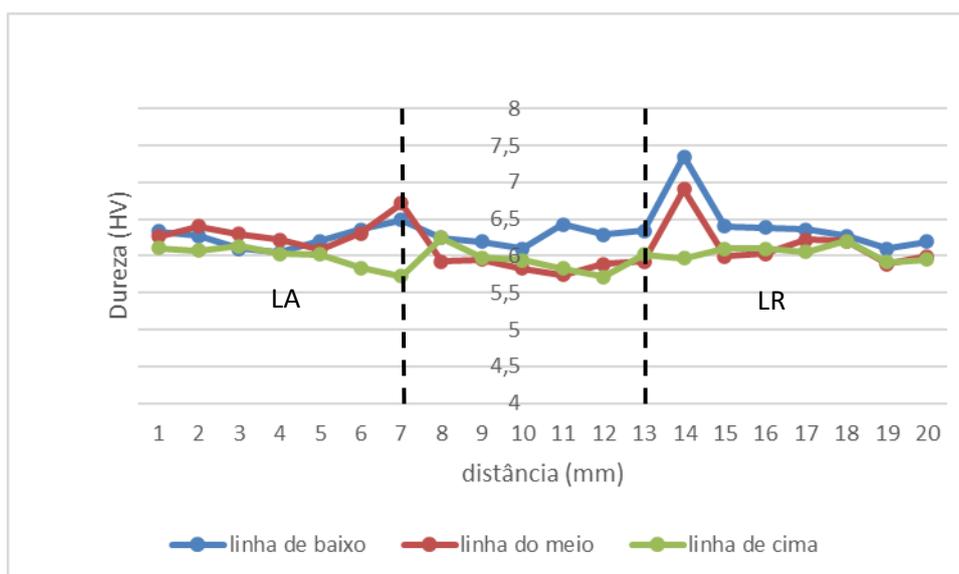


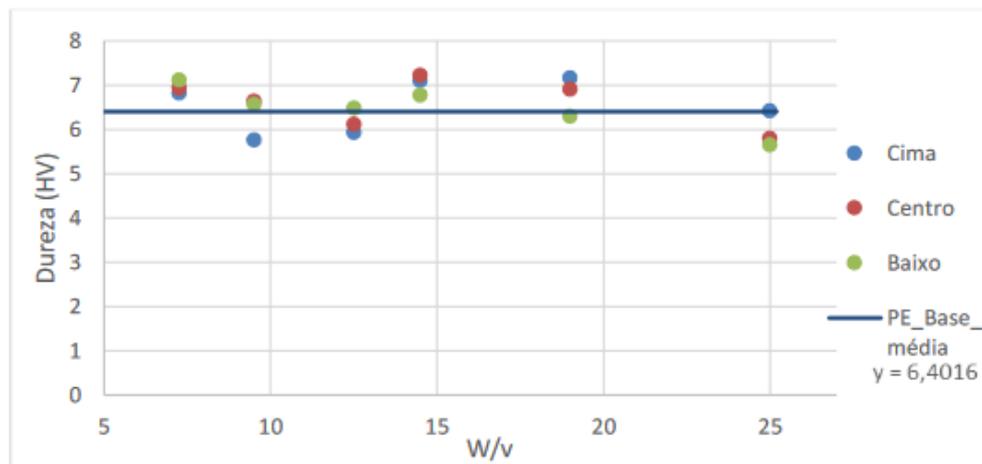
Figura 62 Resultados do ensaio de dureza da soldadura PEH02.



**Figura 63** Resultados do ensaio de dureza da soldadura PEH05.



**Figura 64** Resultados do ensaio de dureza da soldadura PEH06.



**Figura 65** Comparação resultados, dureza média da zona da soldadura em função do rácio da velocidade sem adição de calor na ferramenta [53]



## APÊNDICE F

### Resultados do ensaio de dureza nas soldaduras de ABS:

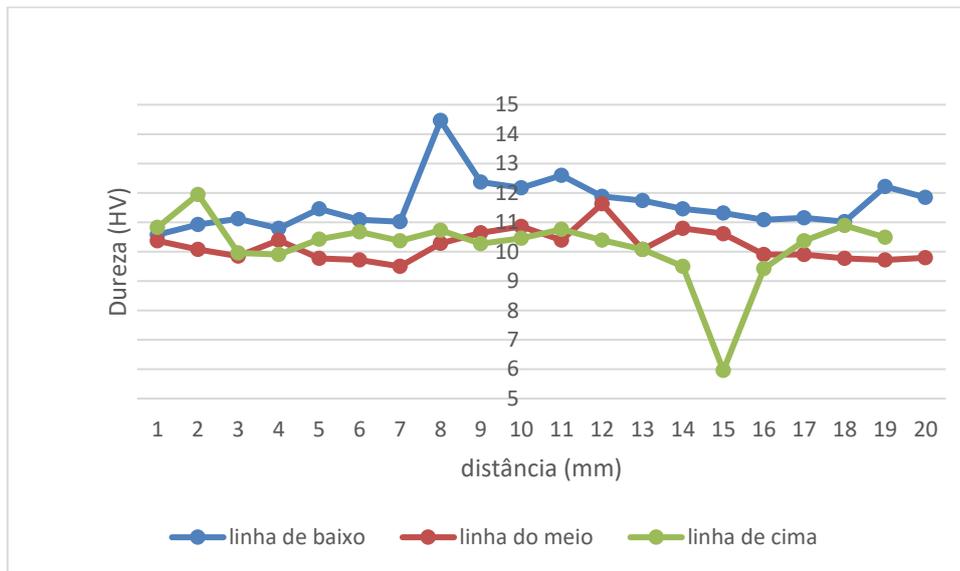


Figura 66 Resultados do ensaio de dureza da soldadura de ABSH01.

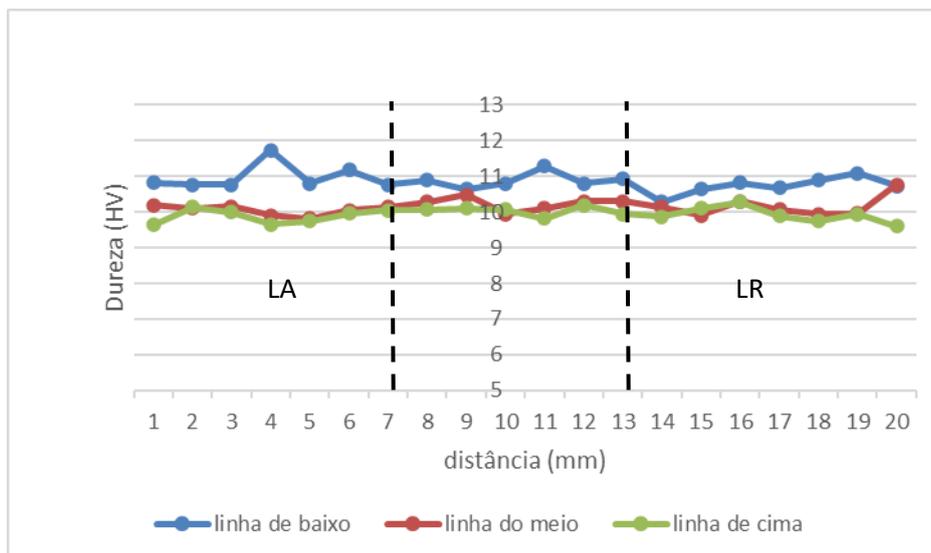
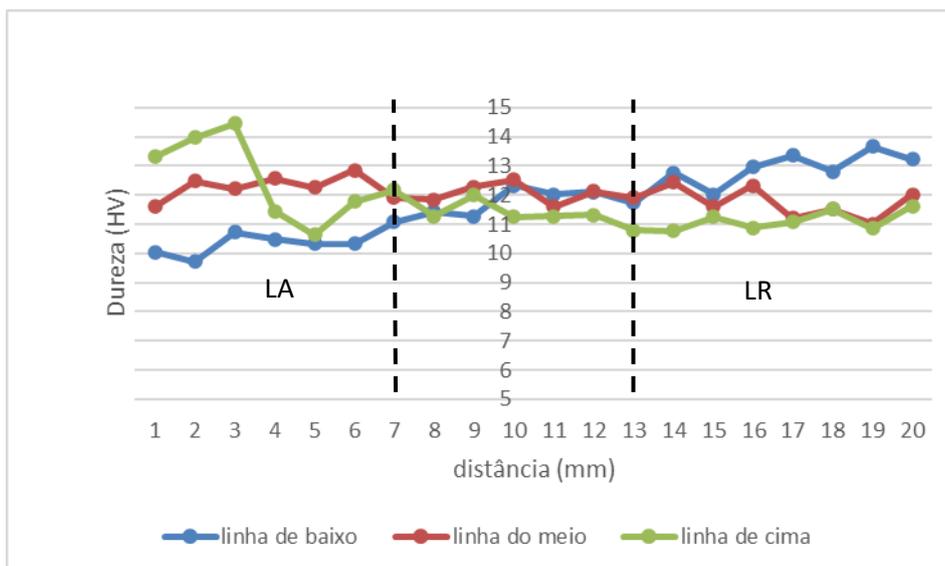
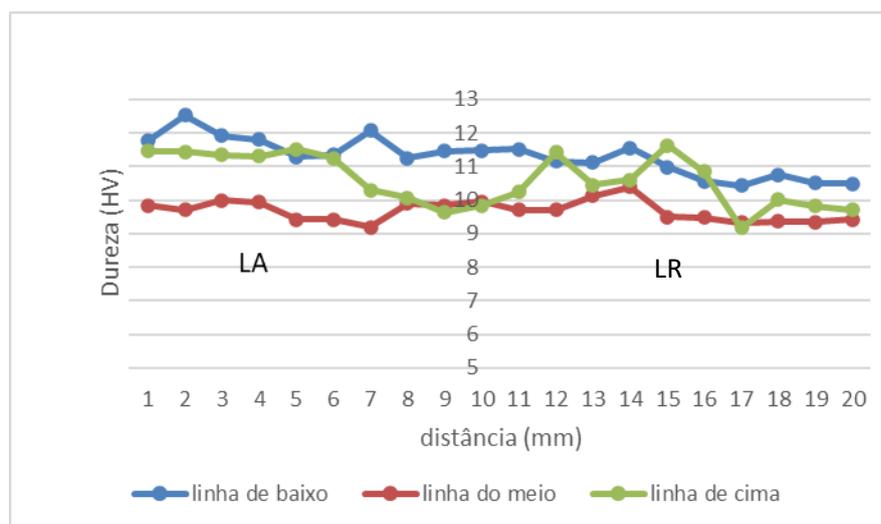


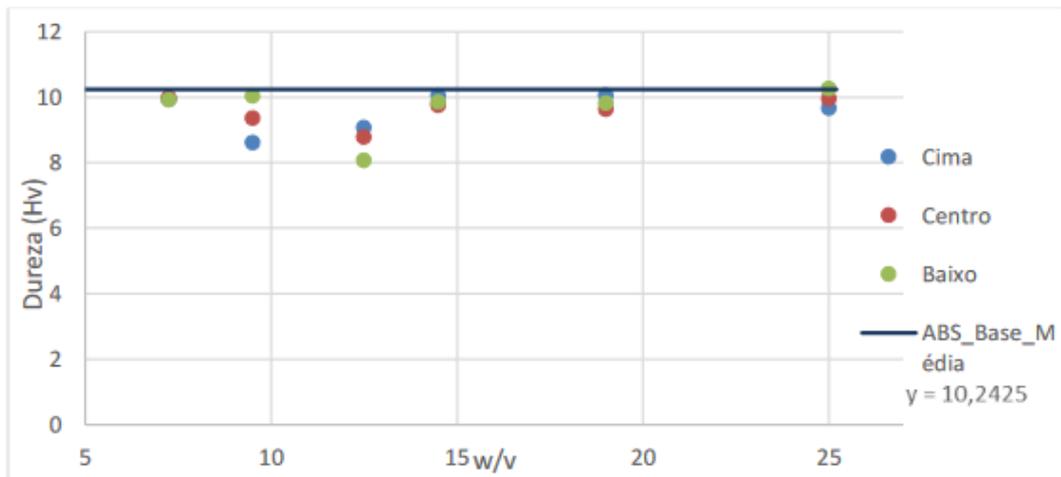
Figura 67 Resultados do ensaio de dureza da soldadura de ABSH02.



**Figura 68** Resultados do ensaio de dureza da soldadura de ABSH05.



**Figura 69** Resultados do ensaio de dureza da soldadura de ABSH06.

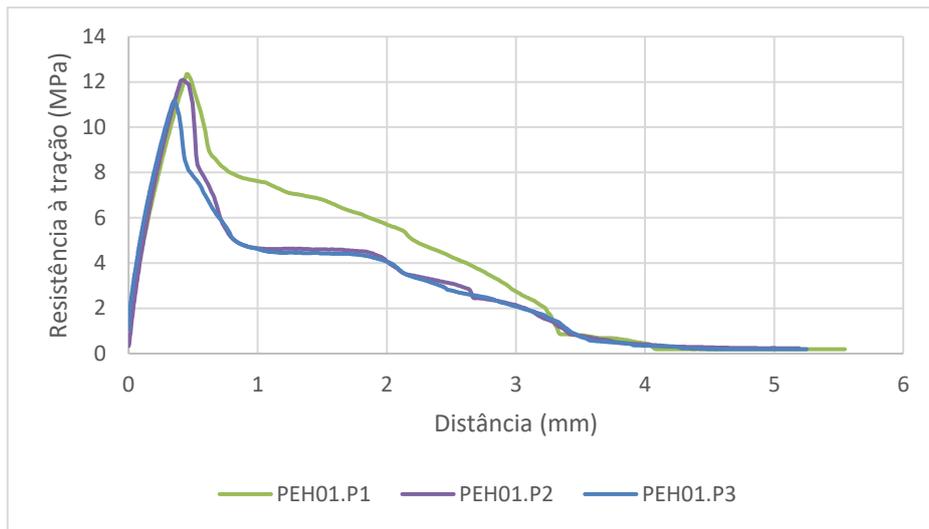


**Figura 70** Comparação resultados da dureza média na zona da soldadura em função da razão da velocidade (ABS) sem adição de calor na ferramenta.

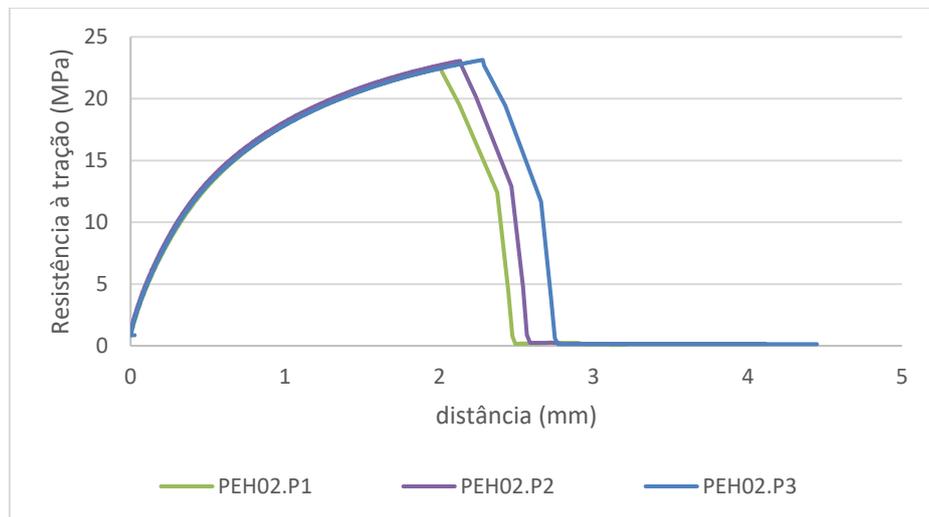


## APÊNDICE G

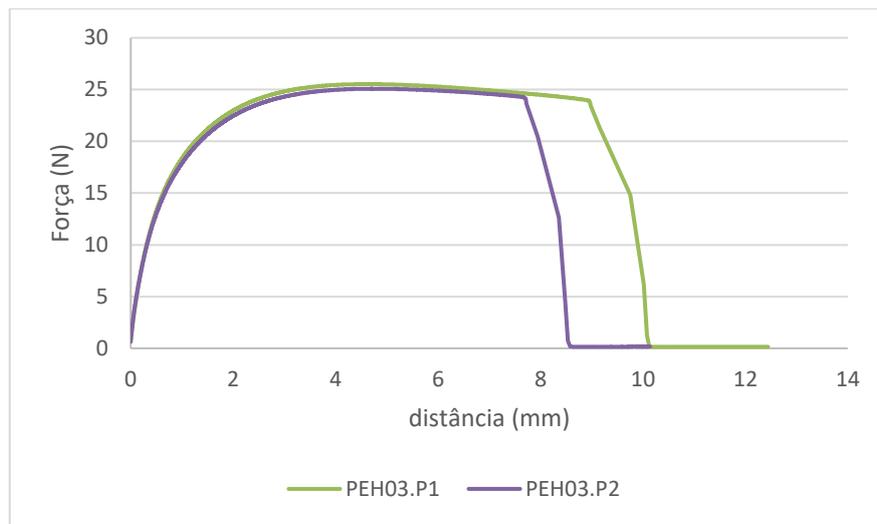
### Resultados dos ensaios de tração nas várias soldaduras de PE e ABS:



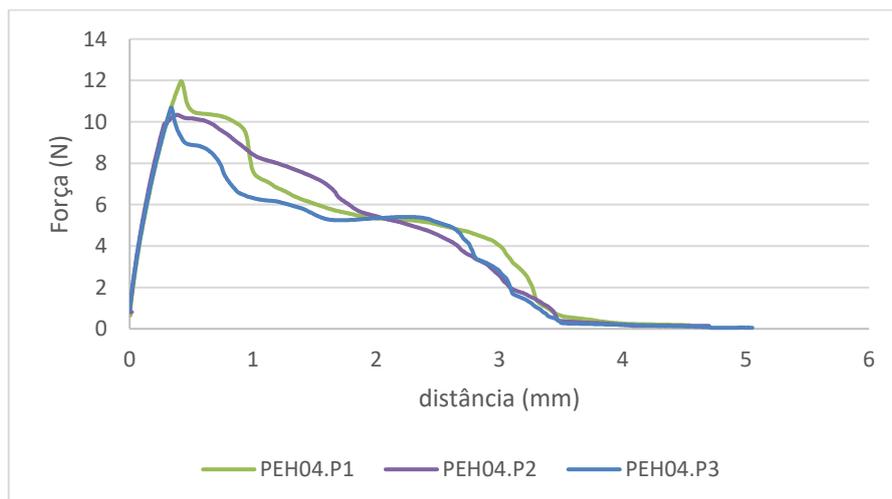
**Figura 71** Resistência à tração em função do alongamento da soldadura PEH01.



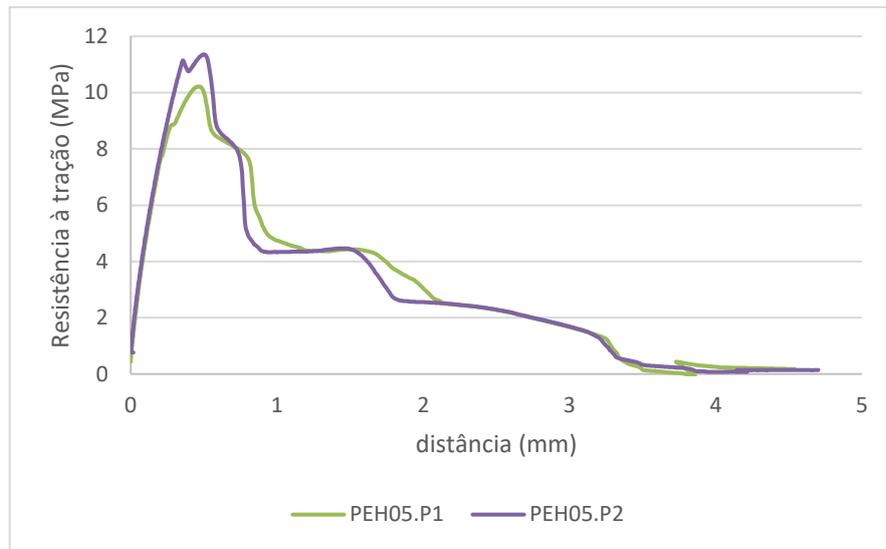
**Figura 72** Resistência à tração em função do alongamento da soldadura PEH02.



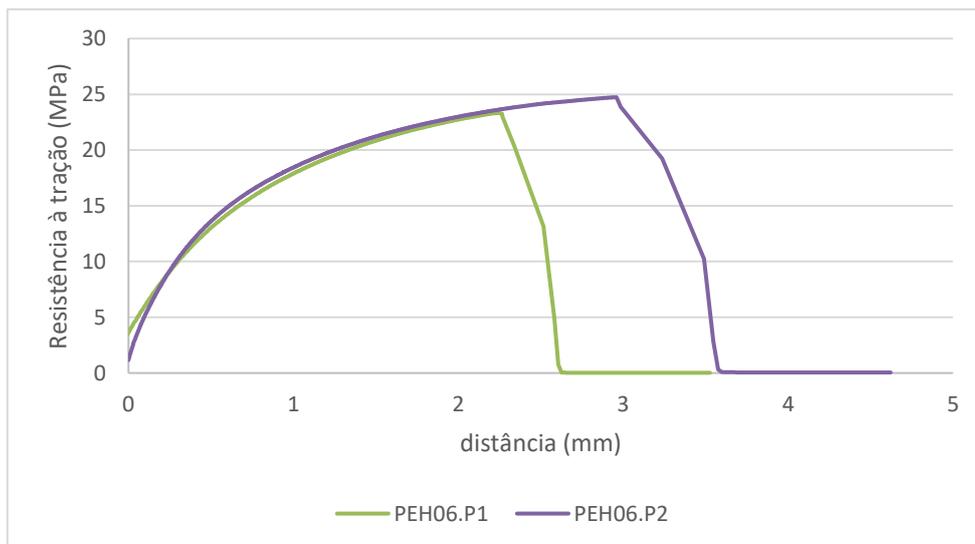
**Figura 73** Resistência à tração em função do alongamento da soldadura PEH03.



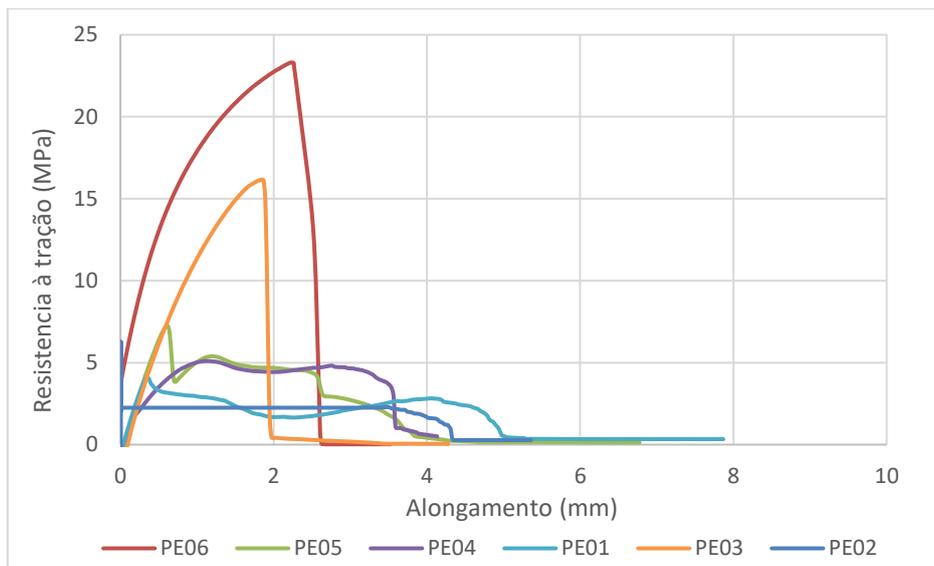
**Figura 74** Resistência à tração em função do alongamento da soldadura PEH04.



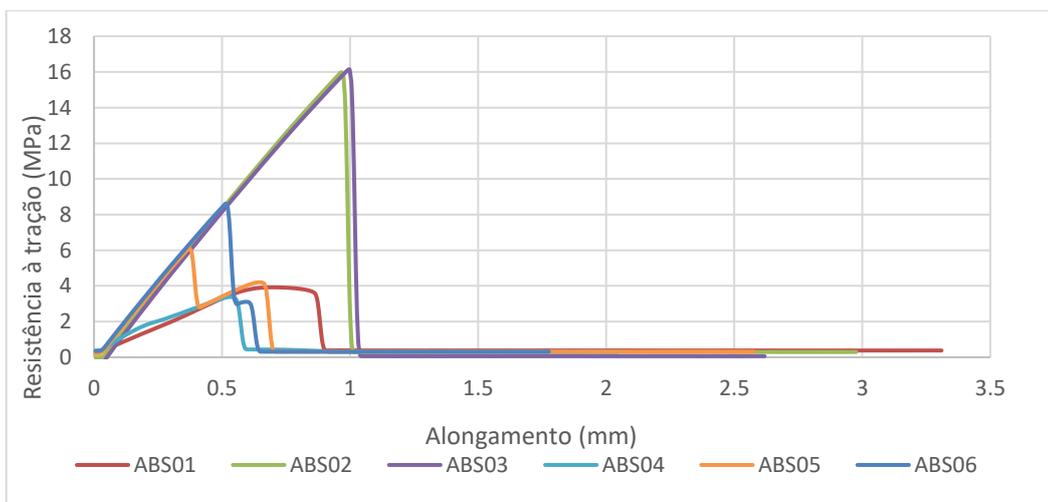
**Figura 75** Resistência à tração em função do alongamento da soldadura PEH05.



**Figure 76** Resistência à tração em função do alongamento da soldadura PEH06.



**Figura 77** Resistência à tração das soldaduras de PE sem adição de calor na ferramenta.



**Figura 78** Resistência à tração das soldaduras de ABS sem adição de calor na ferramenta.

**Tabela 8** Propriedades mec4nicas das soldaduras de PE com adi73o de calor na ferramenta.

Soldaduras	W/v (rot/mim)	Tens3o M4xima (Mpa)	Alongamento (mm)	Efici4ncia (%)	Regi3o de rotura
PEH01.P1	14,50	12,35	5,55	52,63	LR
PEH01.P2	14,50	12,09	5,19	51,54	LR
PEH01.P3	14,50	11,18	5,25	47,64	LR
PEH02.P1	19,00	22,46	3,21	95,71	LR
PEH02.P2	19,00	23,06	5,19	98,27	LR
PEH02.P3	19,00	23,14	11,18	98,61	LR
PEH03.P1	25,00	25,53	12,44	108,80	LR
PEH03.P2	25,00	25,08	10,14	106,90	LR
PEH04.P1	7,25	11,97	4,54	51,00	LR
PEH04.P2	7,25	10,35	4,70	44,09	LR
PEH04.P3	7,25	10,69	5,05	45,54	LR
PEH05.P1	9,50	10,22	4,54	43,56	LR
PEH05.P2	9,50	11,36	4,70	48,40	LR
PEH06.P1	12,50	23,32	3,53	99,37	LR
PEH06.P2	12,50	24,74	4,62	105,43	LR

**Tabela 9** Propriedades mec4nicas das soldaduras de ABS

Soldaduras	W/v (rot/mim)	Tens3o M4xima (Mpa)	Alongamento (mm)	Efici4ncia (%)	Regi3o de rotura
ABSH01	14,50	10,18	1,06	36,77	LR
ABSH02	19,00	19,10	1,71	68,97	LR
ABSH03	25,00	17,63	2,69	63,66	LR
ABSH04	7,25	15,48	2,04	55,90	LR
ABSH05	9,50	19,96	2,57	72,07	LR
ABSH06	12,50	23,00	2,39	83,05	LR