



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

João Dias Antunes

FSW DE MATERIAIS POLIMÉRICOS

VOLUME 1

Dissertação no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, no ramo de produção e projeto orientada pelo Professor Doutor Altino de Jesus Roque Loureiro e pelo Professor Doutor Rui Manuel Ferreira Leal apresentada à Universidade de Coimbra/ Departamento de Engenharia Mecânica.

Julho de 2021

1 2



9 0

FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

FSW de materiais poliméricos

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

FSW of polymeric materials

Autor

João Dias Antunes

Orientadores

Altino de Jesus Roque Loureiro

Rui Manuel Ferreira Leal

Júri

| | |
|-------------------|---|
| Presidente | Professor Doutor Ana Paula Bettencourt Martins Amaro Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra |
| Orientador | Professor Doutor Altino de Jesus Roque Loureiro Professor Catedrático da Universidade de Coimbra Professor Doutor Ivan Rodolfo Pereira Garcia Galvão |
| Vogais | Professor Adjunto do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa |

Coimbra, Julho, 2021

Agradecimentos

Esta dissertação de mestrado é o culminar de muitas horas de tralhado, sendo importante agradecer a algumas pessoas que ajudaram a completar mais uma etapa da minha vida.

Em primeiro lugar agradecer aos meus orientadores Doutor Altino de Jesus Roque Loureiro e Doutor Rui Manuel Ferreira Leal, por todo o conhecimento transmitido, paciência, ajuda e sentido prático que me orientaram nesta dissertação. Ao Doutor Neves Manuel, por toda a ajuda prestada e esclarecimentos dados durante a realização da mesma.

Também gostava de agradecer ao Doutor Carlos Leitão, que me ajudou na utilização devida dos equipamentos de laboratório e no tratamento de dados. Ao Sr. Fernando também uma palavra de agradecimento, na ajuda na fabricação das soldaduras, bem como na preparação os provetes para os ensaios.

Obrigado a todos os colegas do Departamento, em particular ao Pedro Lourenço pela ajuda prestada durante a realização da parte prática da dissertação, e aos restantes pelos momentos de estudo, lazer e partilha durante estes últimos anos.

Por fim e não menos importante, um obrigado muito especial à minha família e pessoas mais próximas que me apoiaram e me incentivaram durante todo este percurso da minha vida.

A todos, um grande obrigado.

Resumo

O objetivo desta dissertação é estudar a influência dos parâmetros de Friction Stir Welding (FSW) na qualidade de soldaduras de topo em placas de Polietileno (PE) e Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS) com 6 mm de espessura. As soldaduras foram realizadas com uma ferramenta de base estacionária e pino cônico, sem aquecimento externo. Os parâmetros estudados foram a velocidade de rotação da ferramenta, com valores de 870, 1140 e 1500rpm, e a velocidade de soldadura, com 60 e 120mm/min. Durante a soldadura foram registrados os ciclos térmicos na vizinhança da soldadura. Depois de ser feita a inspeção visual, as soldaduras foram submetidas a microscopia ótica e a análise tomográfica, para caracterizar a morfologia das soldaduras, e a ensaios de microdureza, e a testes de tração, para caracterizar as propriedades mecânicas das soldaduras.

Verificou-se que a morfologia das soldaduras, e em particular, a presença de defeitos, é muito influenciada pelo calor adicionado no processo. O aumento do rácio entre a velocidade de rotação e avanço da ferramenta (w/v) aumenta a temperatura na soldadura, principalmente nas soldaduras em ABS. O aumento de temperatura local facilita o fluxo de material e reduz a formação defeitos. O aumento do rácio w/v não alterou sensivelmente a dureza das soldaduras, mas aumentou a eficiência de soldadura. A resistência das soldaduras foi sempre inferior aos respetivos materiais de base, mas as soldaduras em PE apresentaram eficiência superior às realizadas em ABS. A eficiência de soldadura é muito condicionada pela presença de defeitos.

Palavras-chave: Friction Stir Welding, Polímeros, Defeitos, Tomografia, Propriedades mecânicas.

Abstract

The aim of this dissertation is to study the influence of Friction stir Welding (FSW) parameters on the quality of butt welds in 6 mm thick Polyethylene (PE) and Acrylonitrile butadiene styrene (ABS) plates. The welds were carried out using a tool with a stationary shoulder and conical pin, without external heating. The parameters studied were the tool rotation speed, with values of 870, 1140 and 1500rpm, and the welding speed, with 60 and 120mm/min. During welding, thermal cycles in the vicinity of the weld were recorded. After visual inspection, the welds were submitted to optical microscopy and tomographic analysis, to characterize the morphology of the welds, and microhardness tests and tensile tests, to characterize the mechanical properties of the welds. It was found that the morphology of the welds, and in particular the presence of defects, is greatly influenced by the heat input in the process. Increasing the ratio between rotation speed and tool feed (w/v) increases the temperature in the weld, especially in ABS welds. On-site temperature rise facilitates material flow and reduces the formation of defects. Increasing the w/v ratio did not noticeably change the hardness of the welds, but it did increase the welding efficiency. The strength of the welds was always lower than the respective base materials, but the PE welds showed greater efficiency than those made in ABS. Welding efficiency is greatly affected by the presence of defects.

Keywords Friction Stir Welding, Polymers, Defects, Tomography, Mechanical Properties.

Índice

| | |
|---|-----|
| Índice de Figuras | ix |
| Índice de Tabelas | xi |
| Simbologia e Siglas | xii |
| Simbologia..... | xii |
| Siglas | xii |
| 1. INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 3 |
| 2.1. Introdução aos Polímeros..... | 3 |
| 2.1.1. Polímeros..... | 4 |
| 2.1.2. Classificação dos polímeros | 4 |
| 2.1.3. Compósitos de matriz polimérica | 5 |
| 2.2. Soldadura de polímeros..... | 6 |
| 2.2.1. Soldadura por placas aquecidas | 8 |
| 2.2.2. Soldadura por gás quente..... | 9 |
| 2.2.3. Soldadura por extrusão | 10 |
| 2.2.4. Soldadura por ultrassons..... | 11 |
| 2.2.5. Soldadura por resistência..... | 12 |
| 2.2.6. Soldadura LASER | 12 |
| 2.2.7. Soldadura por fricção..... | 13 |
| 2.3. Friction Stir Welding (FSW) | 15 |
| 2.3.1. Parâmetros de soldadura..... | 16 |
| 2.3.2. Influência do tipo de polímero..... | 18 |
| 2.3.3. Conclusões da pesquisa bibliográfica..... | 22 |
| 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL | 23 |
| 3.1. Materiais base e ferramenta | 23 |
| 3.1.1. Polietileno (PE)..... | 23 |
| 3.1.2. Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS) | 24 |
| 3.1.3. Ferramenta | 24 |
| 3.2. Preparação das placas e sistema de fixação | 25 |
| 3.3. Realização das soldaduras e extração de provetes | 28 |
| 3.4. Análise morfológica..... | 30 |
| 3.5. Análise de microdureza..... | 31 |
| 3.6. Ensaio à tração..... | 31 |
| 4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS..... | 33 |
| 4.1. Ciclos térmicos..... | 33 |
| 4.2. Análise morfológica..... | 35 |
| 4.2.1. Polietileno..... | 35 |
| 4.2.2. Acrilonitrila butadieno estireno | 40 |
| 4.3. Análise de dureza..... | 44 |
| 4.3.1. Polietileno..... | 44 |
| 4.3.2. Acrilonitrila butadieno estireno | 47 |

| | |
|--|----|
| 4.4. Comportamento à tração..... | 50 |
| 4.4.1. Polietileno..... | 51 |
| 4.4.2. Acrilonitrila butadieno estireno..... | 55 |
| 5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS..... | 61 |
| 5.1. Conclusões..... | 61 |
| 5.2. Trabalhos futuros..... | 61 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 65 |
| ANEXO A..... | 71 |
| APÊNDICE A..... | 72 |
| APÊNDICE B..... | 74 |
| APÊNDICE C..... | 76 |
| APÊNDICE D..... | 79 |
| APÊNDICE E..... | 82 |
| APÊNDICE F..... | 83 |
| APÊNDICE G..... | 89 |
| APÊNDICE H..... | 91 |
| APÊNDICE I..... | 92 |
| APÊNDICE J..... | 98 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Sequencia de processos de soldura por placas quentes (adaptado de [20]). | 9 |
| Figura 2. Esquema do processo de gás quente (adaptado de [22]). | 10 |
| Figura 3. Tipos de junta padrão de soldadura ultrassônica(adaptado de [24]). | 11 |
| Figura 4. Principio de soldadura por resistência (adaptado de [25]). | 12 |
| Figura 5. Esquema de soldadura laser, com um adesivo de absorção de infravermelho (adaptado de [28]). | 13 |
| Figura 6. Representação esquemática do processo de FSW(adaptado de[30]). | 15 |
| Figura 7. Vários tipos de geometria de pino; a) cilíndrico liso; b) cilíndrico cónico; c) cilíndrico roscado; d) quadrado; e)triangular; f)hexagonal; [37]. | 17 |
| Figura 8. Ferramenta FSW. | 25 |
| Figura 9. Ferramenta FSW, imagens reais. | 25 |
| Figura 10. Placas preparadas, com os termopares inseridos. | 26 |
| Figura 11. Configuração do sistema de fixação. | 27 |
| Figura 12. Sistema de fixação para realizar as soldaduras. | 27 |
| Figura 13. Realização de uma soldadura. | 29 |
| Figura 14. Marcação das amostras para os diferentes ensaios. | 30 |
| Figura 15. Ciclo térmico da soldadura PE: a) PE02; b) PE04. | 34 |
| Figura 16. Ciclo térmico da soldadura: a) ABS06; b) ABS03. | 34 |
| Figura 17. Macrografia superior dos provetes: a) PE01(w1140v60p5,5); b) PE02(w1500v60p5,7); c) PE03(w870v60p5,7). | 36 |
| Figura 18. Macrografia de corte longitudinal dos provetes: a) PE01(w1140v60p5,5); b) PE02(w1500v60p5,7); c) PE03(w870v60p5,7). | 36 |
| Figura 19. Macrografia superior dos provetes: a) PE04(w870v120p5,7); b) PE05(w1140v120p5,7-5,8); c) PE06(w1500v120p5,6-5,7). | 37 |
| Figura 20. Macrografia de corte longitudinal dos provetes: a) PE04(w870v120p5,7); b) PE05(w1140v120p5,7-5,8); c) PE06(w1500v120p5,6-5,7). | 38 |
| Figura 21. Tomografia realizada ao provete PE02-M (w1500v60): a) Vista geral, com corte transversal; b) Cortes da peça. | 39 |
| Figura 22. Tomografia realizada ao provete PE06-M (w1500v120): a) Vista geral, com corte longitudinal ; b) Cortes da peça. | 39 |
| Figura 23. Macrografia superior dos provetes: a) ABS01(w1500v120p5,6); b) ABS02(w1140v120p5,6); c) ABS03(w870v120p5,7). | 40 |

| | |
|---|----|
| Figura 24. Macrografia de corte longitudinal dos provetes: a) ABS01(w1500v120p5,6); b) ABS02(w1140v120p5,6); c) ABS03(w870v120p5,7)..... | 40 |
| Figura 25. Macrografia superior dos provetes: a) ABS04(w870v60p5,7-5,8); b) ABS05(w1140v60p5,9); c) ABS06(w1500v60p5,9)..... | 41 |
| Figura 26. Macrografia de corte longitudinal dos provetes: a) ABS04(w870v60p5,7-5,8); b) ABS05(w1140v60p5,9); c) ABS06(w1500v60p5,9)..... | 42 |
| Figura 27. Tomografia realizada ao provete ABS03-M (w870v120): a) Vista geral, com corte transversal; b) Cortes da peça. | 43 |
| Figura 28. Tomografia realizada ao provete ABS06-M (w1500v60): a) Vista geral, com corte longitudinal; b) Cortes da peça. | 43 |
| Figura 29. Resultados obtidos no ensaio de dureza num provete de material base. | 45 |
| Figura 30. Resultados dos ensaios da dureza do provete PE04-M(w870v120p5,7). | 45 |
| Figura 31. Resultados dos ensaios da dureza do provete PE02-M(w1500v60p5,7). | 46 |
| Figura 32. Comparação resultados, dureza média na zona da soldadura em função da razão da velocidade de rotação por a velocidade de avanço..... | 47 |
| Figura 33. Resultados obtidos num ensaio de dureza de um provete de material base. | 48 |
| Figura 34. Resultados dos ensaios da dureza do provete ABS03-M(w870v120p5,7). | 48 |
| Figura 35. Resultados dos ensaios da dureza do provete ABS06-M(w1500v60p5,9). | 49 |
| Figura 36. Comparação resultados, dureza média na zona da soldadura em função da razão da velocidade de rotação por a velocidade de avanço..... | 50 |
| Figura 37. Curva tensão – alongamento do material base..... | 51 |
| Figura 38. Curva tensão - alongamento da série de soldura PE06-P1. | 53 |
| Figura 39. Efeito da velocidade de rotação na resistência à tração máxima. | 54 |
| Figura 40. Mapeamento das deformações locais, no instante próximo da rotura, na série PE06-P1..... | 55 |
| Figura 41. Curva tensão – alongamento do material base..... | 55 |
| Figura 42. Curva tensão - alongamento da soldura ABS06-P4..... | 57 |
| Figura 43. Efeito da velocidade de rotação e da velocidade de soldadura na resistência à tração máxima. | 58 |
| Figura 44. Mapeamento das deformações locais, no instante em que ocorre a rotura, no provete ABS05-P4. | 59 |
| Figura 45. Curvas tensão-deformação de um exemplo de cada material soldado. | 60 |
| Figura 46. Ilustração da zona de rotura de todos os provetes de PE. | 82 |

ÍNDICE DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1. Comparação de diferentes processos de soldadura para união de polímeros em PP de 0,25 pol de espessura (adaptado de [15]). | 14 |
| Tabela 2. Principais propriedades do PE [Matweb]. | 24 |
| Tabela 3. Principais propriedades do material ABS [Matweb]. | 24 |
| Tabela 4. Parâmetros usados para a soldadura dos polímeros, sem aquecimento externo. . | 29 |
| Tabela 5. Temperaturas de pico dos termopares. | 35 |
| Tabela 6. Propriedades mecânicas resultantes dos ensaios de tração das séries de soldadura de PE..... | 52 |
| Tabela 7. Propriedades mecânicas resultantes dos ensaios de tração das séries de soldadura de ABS. | 56 |

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

T_g – Temperatura de transição vítrea

V – Velocidade de avanço

W – Velocidade de rotação

Siglas

ABS - Acrilonitrila Butadieno Estireno

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

EP- Resina Epóxy

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

FM - Fricção Metalografia

FP - Fricção Polímero

FSW- Friction Stir Welding

HDPE - Polietileno de Alta Densidade

HV - Dureza Vickers

LA - Lado de Avanço

LR - Lado de Recuo

MF, UF - Resinas de Amido

PA - Poliamida

PC - Policarbonato

PE - Polietileno

PEEK - Polietercetona

PF -Fenólicas

PMMA - Polimetilmetacrilato

PP - Polipropileno

PTFE - Politetrafluoretileno

PUR - Poliuretanos
PVC - Policloreto de Vinila
PVDF - Fluoreto de Polivinilideno
SEM – *Scanning Electron Microscope*
TWI- *The Welding Institute*
UP - Poliésteres Insaturados
UV - Radiação Ultravioleta
ZM - Zona de Mistura

1. INTRODUÇÃO

Hoje em dia os polímeros têm uma grande importância, estando presentes em diversas indústrias, substituindo os materiais metálicos devido às suas interessantes características em aplicações industriais, como redução de custos de fabricação, isolamento térmico e elétrico, redução de peso, entre outras.

Os polímeros estudados nesta dissertação, o Polietileno (PE) e Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS), tem uma grande utilidade, em diversas indústrias, sendo utilizado para o fabrico de embalagens, reservatórios, capacetes de segurança, tubos, entre outros. Devido à sua resistência química, resistência ao impacto, e a sua resistência específica.

Friction Stir Welding (FSW) foi inicialmente criado para soldar metais macios, como o alumínio, pois apresentava vantagens interessantes em comparação com os processos convencionais, tais como a ausência de material de adição, baixas tensões residuais e distorções, sem libertação de fumos, entre outros. Uns anos mais tarde esta técnica de soldadura foi aplicada em polímeros, utilizando a mesma ferramenta do FSW convencional, aquela que servia para realizar a soldadura nos alumínio. Em 2005 foram iniciados estudos, mas desta vez com um a ferramenta nova, criada para este efeito de soldar polímero, tendo sido obtidos resultados muito mais satisfatórios.

Este processo ainda é muito recente, apresentando ainda muitas limitações práticas, não havendo ainda aplicação direta do FSW na indústria dos polímeros. Não existindo ainda um conjunto de parâmetros otimizados para cada caso e tipo de material a soldar.

O objetivo desta dissertação é produção e análise de soldaduras por Friction Stir Welding (FSW) de materiais poliméricos termoplásticos, em placas de Polietileno (PE) e Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS) com 6mm de espessura.

A dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos. No segundo capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica, na qual contextualizada os polímeros, os tipos de união de polímeros existentes e o processo de soldadura em tudo, com base em investigações realizadas anteriormente. O terceiro descreve todo o processo experimental, bem como realização de trabalho. No quarto capítulo é constituído pela apresentação e discussão de

resultados, no qual é descrito os ciclos térmicos, a morfologia da soldadura, a dureza da zona soldada, bem como a resistência mecânica. Por último, o quinto capítulo, encontram-se resumidas as principais conclusões obtidas, e também são apresentados alguns trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Introdução aos Polímeros

Os materiais poliméricos são atualmente usados em um grande número de aplicações, como nas indústrias da construção civil, aeroespacial e automóvel e na eletrônica, entre outras [1]. Na última década o consumo de polímeros tem aumentado muito, substituindo os metais por causa da redução de custos de fabricação, redução de peso, aumento de flexibilidade e isolamento térmico, entre outras [2].

Em 1910 foi desenvolvido o primeiro polímero, bem como as primeiras ligas leves de alumínio [3]. O peso dos produtos está cada a vez mais a ser reduzido, com a utilização de materiais leves, como polímeros e compósitos, substituindo as ligas metálicas. Um exemplo é o uso destes materiais em substituição de metais na indústria automóvel, reduzindo o peso de veículos, devido à introdução de leis rígidas sobre a emissão de gases poluentes.

Os materiais poliméricos têm muitas vantagens, incluindo: elevada resistência específica (relação resistência / densidade), rigidez específica alta (relação módulo / densidade), resistência à corrosão elevada, isolamento térmico e elétrico elevados, custos de fabricação reduzidos, excelente liberdade de design e capacidade de processamento, etc. [4].

Existe atualmente uma grande variedade de polímeros e compósitos no mercado, conseguindo abranger uma grande gama de propriedades, sendo possível selecionar e até personalizar o material para uma aplicação específica. Devido à investigação de novos polímeros, bem como à modificação da microestrutura de polímeros já existentes, criando novas combinações, aumentando ainda mais o uso dos polímeros [1].

De acordo com a uma análise feita pela European Plastic Association, a fabricação de polímeros no ano de 2005 era de 230 milhões de toneladas, aumentando para 322 milhões toneladas no final de 2015 [3].

2.1.1. Polímeros

Os polímeros são constituídos por monómeros, que unidos por um processo de polimerização, originam cadeias longas designadas macromoléculas. O nome polímero vem da combinação das palavras gregas “polys” que significa muitos, e de “meros” que significa parte [1].

Os polímeros podem ser divididos em naturais, semi-sintéticos e sintéticos. Os de origem natural existem desde sempre, tais como borracha natural, celulose, lignina (componente da madeira), proteínas entre outros. Os semi-sintéticos, são polímeros naturais modificados quimicamente em laboratório, tais como metil-celulose, nitreto-celulose, entre outros. Por fim os polímeros sintéticos são desenvolvidos em laboratório, como o poliestireno, polietileno, poliamida entre outros[5],[3]. Hoje em dia a indústria de polímeros sintéticos é maior que a indústria do alumínio, cobre e aço combinadas [3].

2.1.2. Classificação dos polímeros

Quanto à fusibilidade, os materiais poliméricos podem ser divididos em termoplásticos e termoendurecíveis.

2.1.2.1. Termoplásticos

Os termoplásticos são constituídos por macromoléculas lineares polimerizadas. Este processo de polimerização origina fortes ligações covalentes dentro das cadeias entre os monómeros, e ligações secundárias fracas entre as cadeias, sendo estas ligações secundárias facilmente quebradas através de energia térmica, tornando os termoplásticos moldáveis a alta temperatura [1],[6]. Após serem aquecidos acima da temperatura de transição vítrea (T_g) os termoplásticos amolecem, tomando-se mais dúcteis.[7] Após o arrefecimento, ocorre a solidificação, podendo ser repetido este processo, sem que ocorra degradação grave nas propriedades do material [2].

Os polímeros termoplásticos, para além de amolecem com o aquecimento, apresentam boa resistência à fadiga, alta tenacidade à fratura, resistência a produtos químicos e capacidade autolubrificante, podendo ser descritos com três R's, como reprocessável, reparável e reformável, isto é, com capacidade para adquirir novas formas. Isto torna fácil o seu processamento, garantindo a redução de custos [3]. Estes polímeros termoplásticos

podem ser unidos partir de diversos processos, como a ligação adesiva, a fixação mecânica ou a soldadura, sendo os únicos que podem ser soldados [8].

Exemplos de polímeros termoplásticos são o Polipropileno (PP), o Polietileno (PE), a Polietercetona (PEEK), o Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS), o Polimetilmetacrilato (PMMA), a Poliamida (PA) e o Policarbonato (PC) [9].

2.1.2.2. Termoendurecíveis

Os polímeros termoendurecíveis, apresentam ligações químicas covalentes entre os monómeros da cadeia e também nas ligações entre cadeias, tornando a sua estrutura complexa, evitando o escorregamento das cadeias umas em relação às outras [10].

Esta propriedade permite que o material resista ao amolecimento provocado pelo aquecimento, resultando apenas em decomposição química, degradando-se.

Os termoendurecíveis, quando são formados, tornam-se duros de forma permanentemente e quebradiços devido a alta densidade de reticulação entre as moléculas, não amolecendo com temperaturas altas e pressões, não podendo ser moldados de novo nem reciclados [5]. Embora os termoendurecíveis sejam difíceis de remodelar, eles têm vantagens distintas em aplicações de engenharia, devido à alta estabilidade térmica, alta rigidez, estabilidade dimensional, resistência à fluência, entre outras. Em aplicações comuns os termoendurecíveis são utilizados em forma de epóxis (adesivos), peças de carroceria de automóveis, adesivos para madeiras e como matriz de compósitos em tanques e cascos de barcos [1],[2]. O método de soldadura não pode ser aplicado para unir polímeros termoendurecidos, em vez disso, podem empregar-se os processos de ligação adesiva e fixação mecânica [3].

Alguns exemplos de termoendurecíveis são as resina de poliéster, as resinas fenólicas (PF), as resinas de amido (MF, UF), as resinas epóxy (EP), os poliésteres insaturados (UP) e os poliuretanos (PUR) [11].

2.1.3. Compósitos de matriz polimérica

Nas últimas duas décadas, os compósitos de matriz polimérica têm sido objeto de extensa pesquisa. As propriedades físicas e mecânicas dos compósitos de matriz polimérica são muito importantes, sendo influenciadas pelas estruturas e composição das camadas moleculares [4].

Os compósitos de matriz polimérica são constituídos por duas partes, uma denominada por matriz e outra designado de reforço. O material da matriz envolve e suporta o material do reforço, mantendo as posições relativas. O reforço confere as características mecânicas e físicas, melhorando as propriedades do conjunto em relação à matriz [12]. Os constituintes retêm as suas identidades, ou seja, eles não se misturam completamente, podendo os componentes ser fisicamente identificados, exibindo uma interface entre si.

A maioria dos compósitos produzidos comercialmente usam um polímero como matriz, chamado frequentemente de resina, podendo ser poliéster, éster vinílico, epóxi, fenólico, poliamida, polipropileno, polieteretercetona, entre outros. Os materiais de reforço mais usados normalmente são fibras, tais como fibras de vidro, carbono e fibras de aramida [1].

Atualmente, as principais técnicas de realização de compósitos de matriz polimérica são a polimerização in situ, por mistura de solução ou mistura de fusão [4].

Os compósitos de matriz polimérica podem ser unidos através de ligação adesiva, fixação mecânica ou por processo de soldadura.

O reforço é constituído por diversos arranjos de fibras em cada camada de compósito. O reforço pode ser dividido em dois grupos, fibras longas/contínuas e fibras curtas. As fibras longas podem ser unidirecionais, são dispostas apenas numa direção em cada camada, e podem ser em forma de tecido/manta, ou seja, na mesma camada as fibras estão dispostas em duas direções e entrelaçadas umas nas outras. As fibras curtas, são fibras descontínuas, orientadas aleatoriamente em cada camada. Estes tipos de fibras podem ser aplicados secas em camada de reforço, sendo apenas na camada seguinte aplicado a matriz polimérica ou então as fibras serem pré-embebidas com matriz polimérica.

A orientação das fibras por camada e a orientação das fibras em relação as outras camadas é um fator que interfere altamente nas propriedades do compósito, sendo dependente da direcionalidade, ou seja, são anisotrópicos [13].

2.2. Soldadura de polímeros

Para a engenharia dos polímeros, ter um molde para realizar a peça na sua totalidade é o ideal, no entanto, limitações no design, nas dimensões ou nas condições de solicitação das peças tornam necessária a sua produção em partes e a posterior união das

partes. A união é uma etapa crítica na fabricação de componentes poliméricos e compósitos poliméricos [1].

A boa resistência à corrosão, alta resistência específica, excelente liberdade de design, leva que os polímeros e os compósitos de matriz polimérica proporcionem a capacidade de reduzir custos e de melhorar a eficiência de produção, com baixo impacto ambiental [14]. Como já referido, a união de peças poliméricas pode fazer-se por fixação mecânica, por colagem ou por soldadura [15].

Na fixação mecânica é utilizado um corpo estranho para conectar duas partes distintas, fazendo uso de fixadores externos para unir um conjunto de peças, tais como parafusos, rebites, grampos, suportes ou encaixes. As juntas de fixação podem ser permanentes ou não permanentes para fins de manutenção, fazendo com que o peso aumente [15],[16]. Na zona onde ocorre a união mecânica é desenvolvida usualmente uma grande concentração de tensões, devido os furos necessários para alojar os elementos de ligação, diminuindo a confiabilidade da junta, não sendo, por isso, recomendado este método para aplicações de alto desempenho.

A técnica de colagem é dividida em ligações com recurso a adesivos e ligações com solventes. A técnica da colagem foi desenvolvida para juntas de alta qualidade e alto desempenho de peças poliméricas, permitindo unir quase todos os polímeros [17]. A colagem tem também diversas limitações, quer ao nível da operação de colagem, pois os polímeros apresentam baixa tensão superficial, quer no que se refere ao comportamento das juntas coladas em serviço. De facto estas são sensíveis à temperatura, ao ambiente (humidade e UV) a diversos tipos de solicitações, por exemplo, sensíveis as tensões de tração segundo a espessura [18].

A ligação adesiva é repartida em dois tipos de adesivos, adesivos de um ou dois componentes. Os adesivos de um componente são aqueles em que a polimerização se inicia quando ficam sujeitos a condições especiais de forma a ativar o endurecedor, por exemplo adição de calor, ausência de oxigénio, não é necessário misturar o adesivo antes ser usado. Um exemplo deste tipo de adesivos é o cianoacrilatos. As peças são mantidas em contacto uma com a outra sujeitas a pressão até que o adesivo solidifique, podendo demorar de segundos a horas. Os adesivos de dois componentes são constituídos por uma resina e um catalisador, iniciando-se a reação de polimerização quando se juntam os dois. O adesivo

depois de secar ligeiramente, as peças são unidas e mantidas sob pressão, até que solidifique completamente [15].

No que refere à soldadura de polímeros as tecnologias correntes seguem três estágios comuns. No primeiro estágio dá-se origem ao amolecimento das superfícies a serem unidas, apenas para que as cadeias moleculares aumentem a sua mobilidade. No segundo estágio as superfícies são comprimidas uma contra a outra, garantindo a interpenetração das cadeias moleculares. No terceiro estágio ocorre o arrefecimento da parte amolecida, mantendo-se a pressão, de modo a evitar a formação de vazios dentro da soldadura [16].

No que se refere às tecnologias de soldadura, destacam-se a soldadura por placas aquecidas, a soldadura por gás quente, a soldadura por extrusão, a soldadura por resistência elétrica, a soldadura ultrassónica, a soldadura laser e a soldadura por fricção. As principais características dessas tecnologias são abordadas nas secções seguintes.

2.2.1. Soldadura por placas aquecidas

Na soldadura com placa aquecida, a ferramenta é feita em material metálico, geralmente ligas de cobre, é aquecida e colocada em contacto com as superfícies a unir. Quando uma fina atinge a temperatura adequada, a placa quente é retirada e as superfícies são comprimidas uma contra a outra [15]. Na Figura 1 encontra-se esquematizado a sequência do processo. Esta técnica de soldadura pode unir qualquer material termoplástico e adapta-se muito bem a sistemas automatizados ou portáteis. Materiais diferentes podem ser unidos, mas na condição de que ambos possam ser amolecidos simultaneamente sem nenhum se degradar [19].

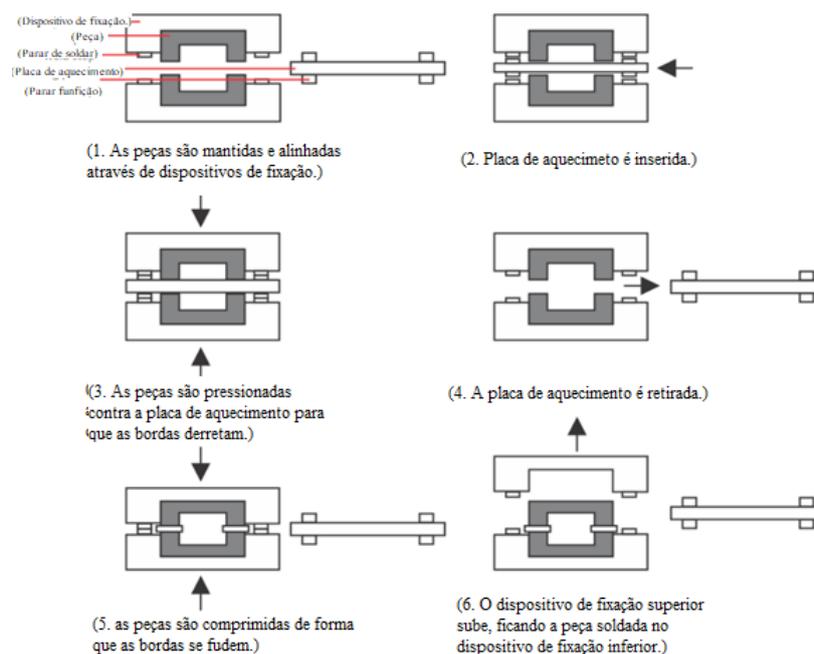


Figura 1. Sequencia de processos de soldura por placas quentes (adaptado de [20]).

Esta técnica apresenta algumas limitações. Os tempos de ciclo tendem ser normalmente longos, especialmente quando as peças têm um tamanho grande. À medida que o material é amolecido, este tende a aderir à ferramenta, podendo ser evitado, revestindo a ferramenta com Politetrafluoretileno (PTFE), mas isso limita a faixa da temperatura de trabalho da ferramenta.

Nesta técnica é possível extrair eficiências de juntas muito altas, certa de 85% do material base, significa que a resistência da junta é 85% da resistência do material base. Pouca preparação de superfície é requerida, embora as superfícies devam estar planas e paralelas, e a repetibilidade da técnica é alta. Em contrapartida, os custos de máquina e de ferramenta são elevados, em comparação com algumas das técnicas que vão ser apresentadas [17].

2.2.2. Soldadura por gás quente

Nesta técnica de soldadura de polímeros é direcionado para a junta um jato de gás quente (ar, dióxido de carbono, nitrogénio, ...), que vai amolecer os bordos das peças a unir [1]. Quando o material começa a fundir, é adicionada uma vareta de material de adição, misturando-se com o material original, sendo ambos comprimidos por uma ferramenta, dando origem à junta soldada. Na Figura 2 encontra-se esquematizado o processo. Para

tornar a técnica mais eficaz e eficiente é necessário ser uma junta de canto ou realizar uma preparação de junta com forma de V [21].

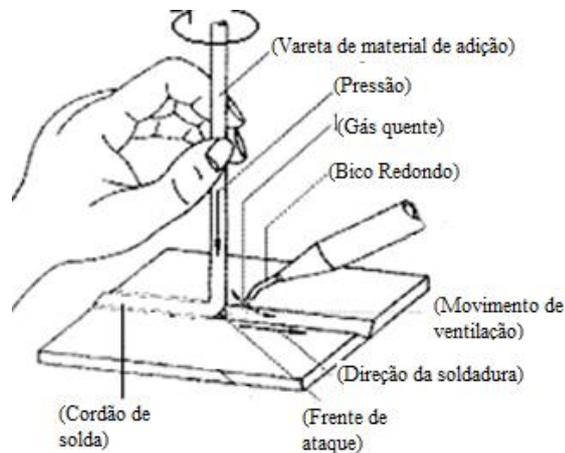


Figura 2. Esquema do processo de gás quente (adaptado de [22]).

A principal vantagem é a sua flexibilidade, podendo ser feitos facilmente dispositivos portáteis com o intuito de trabalhos de reparação e de fabricação de peças. Os custos do equipamento para esta técnica são relativamente baixos [19]. A soldadura a gás quente é um processo simples, mas não é adequado para a fabricação a grande escala, ou quando se necessita de bom desempenho de junta. Além disso, esta técnica é muito lenta e difícil de controlar [17].

2.2.3. Soldadura por extrusão

A soldadura por extrusão está relacionada com a soldadura por gás quente. Nesta técnica o material de adição é amolecido e extrudido diretamente na junta, uma pistola extrusora. Um gás é usado para pré-aquecimento do material original, dando origem ao amolecimento da junta [19]. A velocidade de soldadura está relacionada com taxa de fluxo extrudido, pela espessura do material, da área da seção transversal e do design da sapata de PTFE. As pistolas de extrusão são projetadas de modo que parâmetros como: temperatura de material extrudido; taxa de fluxo de material; temperatura do gás de quente de aquecimento; e quantidade de gás; sejam precisos, de modo a maximizar a qualidade da junta. Esta técnica é mais indicada para soldar grandes conjuntos de seção espessa em relação a técnica de gás quente, pois é mais fácil de ser controlada e mais consistente

Os polímeros que são soldados com esta técnica são principalmente os polipropileno(PP) e polietileno de alta densidade(HDPE), sendo também possível soldar, utilizando extrusoras modernas policloreto de vinila(PVC) e fluoreto de polivinilideno(PVDF) [23].

2.2.4. Soldadura por ultrassons

A técnica de soldadura por ultrassons é dos processos mais usados para soldar polímeros. Esta técnica usa alta frequência (20-50 kHz) e baixa amplitude de vibração mecânica (0,01- 0,06 mm) [15]. Estas soldaduras podem ser realizadas em juntas de topo. As juntas de topo requerem um mecanismo (diretor) para focar toda a energia com precisão. O mecanismo é composto por saliências em forma de cone, num lado da junta, e quando expostos as vibrações ultrassónicas amolecem a junta, que comprimida produz a soldadura[24]. As juntas sobrepostas são unidas e apertadas de modo a criar energia de atrito. Como a maior parte das vibrações são paralelas à junta, não é necessário utilizar o mecanismo referido anteriormente, pois à medida que as peças oscilam devido as vibrações ultrassónicas, ocorre a ligação da junta [19]. Na Figura 3 estão representados dois tipos de junta a serem soldados.

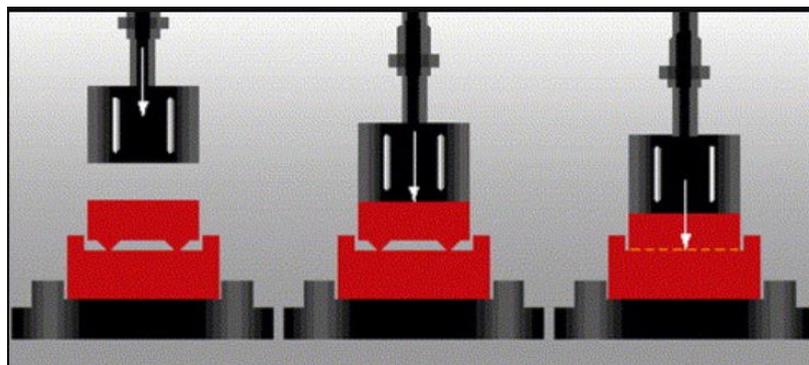


Figura 3. Tipos de junta padrão de soldadura ultrassônica(adaptado de [24]).

A soldadura ultrassónica apresenta algumas vantagens, tais como velocidade de soldadura, sendo os tempos de ciclo de operação entre um e dois segundos, eficiência de junta acima de 75%, processo altamente automatizado e compactidade do equipamento. Neste tipo de soldadura temos de ter alguma atenção à geometria das peças e das juntas. Se a energia não for devidamente dirigida, os tempos de ciclo aumentam e as propriedades de junta são alteradas negativamente. Também se deve ter em atenção o tipo de material a

soldar pois, materiais com baixo módulo de elasticidade tendem a amortecer as vibrações, prejudicando a qualidade das soldaduras. Por fim, a preparação das juntas das peças são demoradas e as máquinas e ferramentas são caras [17].

2.2.5. Soldadura por resistência

Na soldadura por resistência um material condutor eletricamente é colocado na interface da junta, designado de adesivo resistivo, sendo aquecido por intermédio de uma resistência [25]. A resistência quente faz com que o material que está nas proximidades amoleça e crie uma zona soldada, quando arrefecer sob pressão. A resistência deve ser colocada ao longo de toda a linha central da junta a soldar. Na Figura 4 encontra-se esquematizado o processo. A técnica é bastante simples, mas requer tempos de preparação de soldadura muito elevados. Os tempos de ciclo são bastante curtos, no intervalo aproximado de 15 a 25 segundos, mesmo para peças grandes [19].

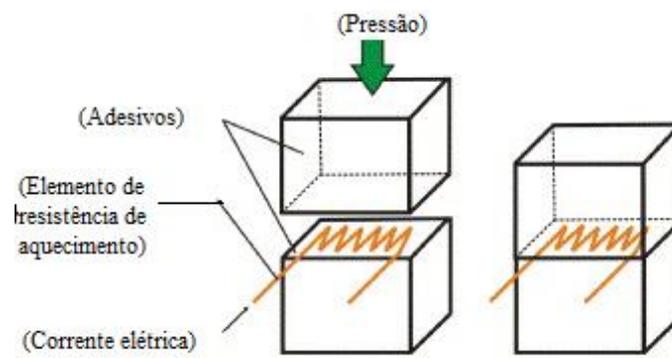


Figura 4. Princípio de soldadura por resistência (adaptado de [25]).

Devido ao fato de a resistência permanecer na junta soldada, as propriedades mecânicas da junta podem ficar comprometidas. Este processo é mais usado em juntas complexas em peças especiais, porque as resistências são caras e de utilização única [17].

2.2.6. Soldadura LASER

A soldadura por laser é uma técnica utilizada para unir folhas, filmes e termoplásticos moldados. Os termoplásticos, que podem ser divididos em dois grupos semicristalinos e amorfos, influenciam muito a soldadura a laser. Os cristalitos, constituinte

dos polímeros semicristalinos, difundem a luz dando origem à sua aparência externa, limitando a difusão da radiação laser, restringindo a espessura máxima que pode ser soldada [26].

O método mais comum da soldadura a laser é o método de transmissão. Este método consiste na emissão de um feixe laser com determinado comprimento de onda, o qual é emitido na placa superior a soldar com a placa inferior, sendo que na placa inferior é colocado um adesivo ou revestimentos absorventes capazes de absorver parte da energia do laser. Na ligação entre as duas placas ocorre a interpenetração das cadeias moleculares [27].

A absorção de energia depende muito da presença de aditivos nos polímeros, aumentando a absorção especialmente com a presença de pigmento negro, ou se os polímeros forem semicristalinos ou amorfos. Se não existir nenhum pigmento nos polímeros o laser pode penetrar apenas alguns milímetros, podendo a absorção ser aumentada com a adição de pigmento, especialmente pigmento preto (carbon-black)[28].

Em 1998 foi criado um adesivo chamado de Cleaweld, que tinha um corante com a capacidade de absorver as radiações infravermelhas, permitindo que a junta não apresentasse cor. Na Figura 5 encontra-se apresentada esquematicamente uma soldura laser usando um revestimento que absorve radiações infravermelhas[26]

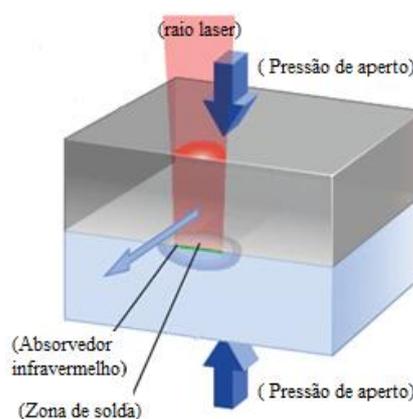


Figura 5. Esquema de soldadura laser, com um adesivo de absorção de infravermelho (adaptado de [28]).

2.2.7. Soldadura por fricção

Ao longo dos anos foram desenvolvidas diversas variações de soldadura por fricção. Todas variações deste processo convertem a energia de atrito em energia térmica, amolecendo a junta, que necessita de uma interface plana. Para que o amolecimento

ocorra as superfícies são friccionadas uma contra a outra com pequenos deslocamentos lineares, cerca de 0,254 a 0,50mm, a uma pressão controlada. Quando é atingido o ponto ideal de amolecimento, as peças são mantidas sob pressão até que a junta arrefeça [15]. Geometrias complexas e materiais de baixo módulo de elasticidade, como elastómeros, não podem ser unidos com esta técnica. Esta tecnologia precisa de uma face plana, e os custos do equipamento são relativamente altos [17].

Uma variante do processo é a soldadura por fricção por rotação (Spin), em que o princípio é o mesmo, mas onde uma peça está fixa e a outra roda a alta velocidade, gerando calor e produzindo a soldadura quando as peças entram em contacto [29]. Esta técnica só é, contudo, aplicável a peças de geometria cilíndrica e que sejam coaxiais, sem desvios angulares.

Outro processo que usa em parte o mesmo princípio é a soldadura Friction Stir Welding (FSW). Esse processo é objeto deste trabalho, pelo que será analisado em mais detalhe nas secções seguintes.

Stand [15] comparou alguns dos processos anteriores e conclui que o processo FSW é o processo que se obtém maior eficiência de soldadura, devido ao baixo custo, porque tem baixo consumo de energia, não requer material de adição e pode ser totalmente automatizado [6], [30]. Na Tabela 1 apresenta uma comparação de alguns processos, tendo em conta o tipo de preparação necessária, o tempo do processo, se existe consumíveis ou não e o custo da máquina/ferramenta. Estas conclusões devem ser olhadas com algum cuidado, porque estes processos não podem ser todos aplicados nas mesmas soldaduras, e não fornecem eficiências de junta similares.

Tabela 1. Comparação de diferentes processos de soldadura para união de polímeros em PP de 0,25 pol de espessura (adaptado de [15]).

| Processo | Preparação | Tempo de processo | Tempo total | Consumíveis | Custo* |
|------------------|---------------------|-------------------|-------------|---------------------------|---------|
| Ultrassónico | Direções de energia | 1-3s | 5-10min | ---- | 30000\$ |
| Placas aquecidas | ---- | 30-40s | 60-90s | ---- | 47000\$ |
| Gás quente | Junta em V | 8-10min | 15min | Gás, vareta de enchimento | 3500\$ |

| | | | | | |
|----------|------------|---------|--------|---------------------------|---------|
| Extrusão | Junta em V | 8-10min | 15min | Gás, vareta de enchimento | 5500\$ |
| Fricção | limpeza | 10-15s | 6-8min | --- | 89900\$ |
| FSW | --- | 2min | 3min | ---- | 11000\$ |

*Custo da máquina/ ferramenta e consumíveis;

2.3. Friction Stir Welding (FSW)

O FSW foi inventado e patenteado em 1991 pelo TWI (The Welding Institute) no Reino Unido. É uma tecnologia muito atrativa porque permite a união dos materiais no estado sólido e à sua grande capacidade de automatização. Inicialmente foi desenvolvido para soldar metais macios, como ligas de alumínio. Devido as suas vantagens, pode ser alcançado boas propriedades mecânicas das soldaduras, baixas distorções e tensões residuais e uma baixa quantidade de calor adicionado [31][32], o método está a ser estudado para soldar outros metais, polímeros, compósitos e até materiais dissimilares.

O processo FSW convencional consiste numa ferramenta rotativa, não consumível, constituída por uma base e um pino, representada na Figura 6. A ferramenta penetra na zona de união das duas placas de material a soldar, percorrendo toda a junta, tendo a função de aquecimento e de transporte do material base [33]. O pino é responsável pela agitação do material sob a força axial da base, fluindo do lado do avanço para o lado do recuo, como se ilustra na Figura 6. Este processo é baseado na geração de calor por atrito entre a ferramenta e o material a soldar e pela deformação plástica do material [34].

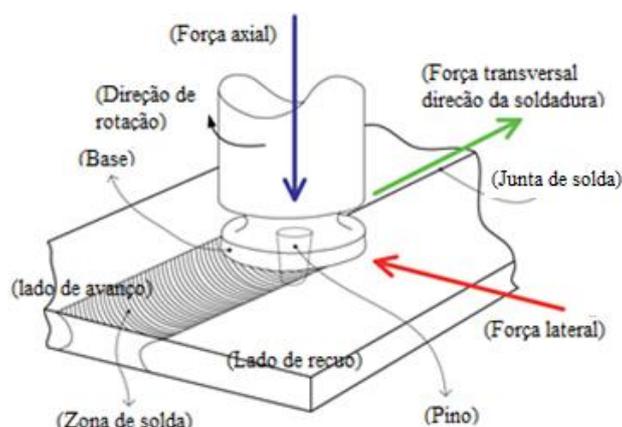


Figura 6. Representação esquemática do processo de FSW(adaptado de[30]).

A tecnologia FSW de polímeros foi aplicada pela primeira vez em 1997, mas muito poucos trabalhos foram publicados. Clarke *et al.*[35] até 1999, desenvolveu vários tipos e ferramentas para unir termoplásticos. O estudo de forma sistemática começa apenas em 2005 [16]. Até aos dias de hoje já se realizaram diversos estudos utilizando esta técnica, tendo-se obtido resultados satisfatórios para vários polímeros termoplásticos e compósitos de matriz polimérica, tais como PE, PP, PC, ABS, PMMA, PA e compósitos de matriz polimérica [4]. Esta técnica de FSW pode ser realizada de diversas formas, como utilizando robôs adaptados, máquinas CNC adaptadas, máquinas desenvolvidas apenas para realizar FSW e fresadoras adaptadas.

2.3.1. Parâmetros de soldadura

Os principais fatores que influenciam a morfologia e qualidade da junta, durante o processo FSW de polímeros e de compósitos de matriz polimérica são três: parâmetros da máquina, parâmetros da ferramenta e propriedades do material [36]. Dependendo das propriedades físicas e reológicas, os parâmetros de soldadura adequados diferem de polímero para polímero.

2.3.1.1. Parâmetros de máquina

Parâmetros como a velocidade de rotação e a velocidade de avanço da ferramenta, influenciam a quantidade de calor gerado e adicionado durante o processo, afetando a estrutura e as propriedades da soldadura. Quanto maior a velocidade de rotação, maior é a quantidade de calor gerado, maior a cristalinidade, e quanto menor for a velocidade de avanço da ferramenta maior é o tempo que a peça fica sujeita a alta temperatura.[16].

Para além destes dois parâmetros, também é preciso ter em atenção a força axial, profundidade da ferramenta e a sua inclinação, que estão relacionados com a área de contacto e o material que transborda entre a base da ferramenta e as peças a soldar, afetando a qualidade da junta [16].

2.3.1.2. Parâmetros da ferramenta

A ferramenta desempenha um papel muito importante neste processo, sendo necessárias uma série de modificações para se obter uma ferramenta adequada, pois os polímeros comportam-se de maneira diferente dos metais [37].

As características importantes da ferramenta são a sua geometria e dimensões [36]. Devido à baixa condutibilidade térmica dos polímeros, o calor produzido pela base concentra-se principalmente na superfície da junta, sendo assim difícil de aquecer o material na direção da espessura e na frente da ferramenta [16].

Depois vários pesquisadores realizarem estudos utilizando a ferramenta convencional de FSW, outros tentaram utilizar um sistema de aquecimento auxiliar de modo a tentar compensar a baixa condutividade térmica dos polímeros e o baixo coeficiente de atrito, de modo a melhorar os resultados [33]. O sistema de aquecimento da ferramenta convencional divide-se em dois tipos; no primeiro, o pino é aquecido antes de ser introduzido na junta a soldar, mas arrefece rapidamente, não sendo um método eficaz. O segundo utiliza uma base estacionária com aquecimento para aquecer as placas de material a soldar, onde se obteve soldaduras fortes, mas um problema encontrado foi a falta de repetibilidade [33].

Dependendo do tipo de material polimérico a soldar a geometria do pino afeta positivamente ou negativamente das propriedades finais da soldadura. Por exemplo, o pino cónico é adequado para soldar ABS e HDPE, enquanto o pino cilíndrico roscado é mais adequado para soldar PP [37].

Na Figura 7, encontram-se várias geometrias de pinos, sendo estas responsáveis por o fluxo de material e pelo calor de atrito.

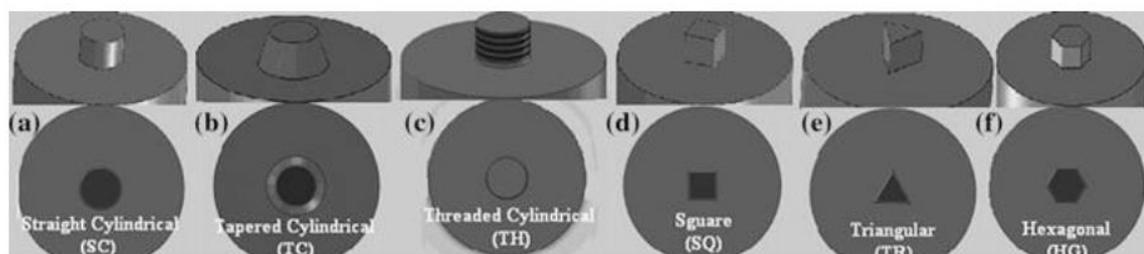


Figura 7. Vários tipos de geometria de pino; a) cilíndrico liso; b) cilíndrico cónico; c) cilíndrico roscado; d) quadrado; e) triangular; f) hexagonal; [37].

Nelson [38] afirma que as ferramentas convencionais de FSW não proporcionam bons resultados de resistência à tração e morfologia das juntas soldadas, quando soldam materiais poliméricos. Foram criadas várias ferramentas de FSW com diferentes geometrias para conseguir ultrapassar essas dificuldades. Strand [15] criou uma ferramenta com base estacionária, composta por um pino rotativo e uma base estacionária aquecida por

resistências. Tendo sido esta ferramenta patenteada por Nelson [38], dando origem a bons resultados [30].

Devido à baixa condutividade térmica dos polímeros, um aquecimento externo e capacidade de controlar a temperatura de soldadura são aspectos importantes para se obter soldaduras com boas propriedades mecânicas [33].

2.3.2. Influência do tipo de polímero

Cada tipo de polímero requer diferentes parâmetros de soldadura. Polímeros com alto ponto de fusão e viscosidade necessitam de uma maior velocidade de rotação da ferramenta e baixa velocidade de avanço, para se conseguir obter calor suficiente para ocorrer a soldadura.

O perfil de pino mais adequado para soldar varia de tipo de polímero a polímero, pois diferentes perfis de pinos dão origem a fluxos de material diferentes [4].

Para que as juntas sólidas tenham uma alta qualidade é necessário regular e controlar os parâmetros do processo ou alterar os modos de pré-aquecimento, pois variam com o tipo de polímero. A baixa condutividade e cristalinidade são os fatores principais que provocam a diminuição das propriedades mecânicas da soldadura. Para conseguir melhorar as propriedades mecânicas pode ser necessário aplicar novos métodos de FSW, tais como a utilização de ferramenta com base estacionária, com ou sem sistema de aquecimento e FSW submerso, fazendo com que melhor o fluxo do material, baixe as taxas de arrefecimento, melhorando a cristalinidade da soldadura [16].

Bozkurt [39] analisou a soldadura de Polietileno de alta densidade com uma resistência a tração base de 22,5MPa, na espessura de 4mm. Utilizando uma ferramenta com base de 18mm de diâmetro, e pino de 6mm de diâmetro e comprimento de 3,8mm. Para a realização deste estudo foram analisados diferentes parâmetros, onde a velocidade de rotação que variava de 1500 a 3000rpm, a velocidade de avanço variava de 45-115mm/min e ângulo de inclinação variava de 1 a 3°. Concluiu que os parâmetros ideais eram de 3000rpm de velocidade de rotação, 115mm/min de velocidade de avanço e um ângulo de 3°, obtendo uma eficiência de junta de 86,2%. A eficiência de junta é definida pelo rácio entre a resistência da soldadura e a resistência do polímero base. Além disso também foi concluído que a rotação da ferramenta desempenha um papel importante contribuindo com 73,85% para a

resistência de soldadura e o ângulo de inclinação da ferramenta era o parâmetro com menor influência. Nesta investigação em vez de se utilizar o método convencional, ou seja, o investigador varia um parâmetro de cada vez, mantendo os outros parâmetros constantes, foi utilizando o método Taguchi para reduzir o número de experiências.

Mostafapour e Azarsa [40] estudaram a soldadura de placas de PEHD com 10mm de espessura com uma resistência à tração de 18MPa. Utilizaram uma ferramenta de base estacionária aquecida, tendo 28mm de largura e um comprimento de 250mm, revestida de PTFE e contendo um pino roscado de diâmetro de 10mm e um comprimento de 10mm. Foram investigados diferentes parâmetros como: a velocidade de rotação com valores de 1000, 1250 e 1600rpm; a temperatura da base estacionária, com valores de 80,100 e 140⁰C; a velocidade de avanço com valores de 10, 25 e 40mm/min. Concluíram que a eficiência da junta pode ser superior a 95% ou mesmo equivalente à resistência do material base, sendo os parâmetros ideais os seguintes: 140⁰C de base estacionária, 25mm/min de velocidade de avanço e 1600rpm de velocidade de rotação. Para velocidade de avanço elevada, o material na linha da junta não tem tempo suficiente para arrefecer, no entanto se a velocidade de avanço for muito reduzida levará à degradação do material da junta.

Para temperaturas de base baixas a eficiência da junta é relativamente baixa. Com o aumento da temperatura para 100⁰C, ocorreu uma diminuição da quantidade de material degradado na linha da junta. Quando a temperatura foi de 140⁰C, o problema da degradação de material foi eliminado, melhorando a eficiência de junta, para valores muito próximos da resistência à tração do material base.

Mostafapour e Asad [41] analisaram a soldaduras de placas de Poliamida (PA),mas propriamente PA 6 com um a espessura de 6mm. A ferramenta utilizada para realizar a soldadura, era composta por uma base estacionária aquecida e revestida com PTFE, com 28mm de largura e 250mm de comprimento e por um pino roscado M10 com passo padrão. Os parâmetros foram investigados nas seguintes faixas: velocidade de rotação de 500, 630 e 800rpm; velocidade de avanço de 20, 25 e 30mm/min; e temperatura da base de 100, 125 e 150⁰C. Concluíram que os parâmetros ideais seriam uma velocidade de rotação de 630rpm, uma velocidade de avanço de 20mm/min e uma temperatura na base estacionária de 150⁰C. Obtiveram uma eficiência de junta de cerca de 98%, apresentando propriedades mecânicas quase iguais às do material base e uma excelente qualidade superficial. A alta velocidade rotação da ferramenta e baixa temperatura da base de aquecimento resulta na

degradação do material, por isso, ao aumentar a temperatura da base aumenta a resistência à tração da junta. Para velocidades de avanço superiores a 30mm/min não existe tempo suficiente para o pino misture uniformemente o material das duas placas, ocorrendo a formação de cavidades. Para velocidades de avanço inferiores a 20mm/min ocorre a degradação do material da junta, devido a excessiva agitação do pino no mesmo local.

Para velocidades de rotação da ferramenta superiores a 800rpm ocorre a degradação das cadeias poliméricas, devido ao excesso de calor gerado. Para temperaturas de base de aquecimento superiores a 150°C também ocorre a degradação e derramamento do material, devido à menor viscosidade do material. Para além disso, ocorre a degradação do PTFE, dando origem a uma perda de qualidade da soldadura na junta.

Sadeghian [42] analisou a soldadura de duas placas de ABS com uma espessura de 8mm, utilizando ferramentas com diâmetros de pino, diâmetro de base e formato do pino diferentes. A relação de diâmetro dos pinos cilíndricos e cónicos eram 2, 2,5 e 20/6mm; o diâmetro da base encontrava-se na faixa de 10, 15 e 20mm. Para além dos parâmetros geométricos da ferramenta, foram também investigados outros parâmetros: velocidade de rotação de 900, 1400 e 1800rpm; velocidade de avanço de 6, 16 e 25mm/min; e por fim o ângulo de inclinação da ferramenta de 1 e 2°. Os principais fatores analisados foram a relação de diâmetros, a velocidade de rotação, a velocidade de avanço e o ângulo de inclinação. Concluiu-se que para uma relação de diâmetros 20/6, uma velocidade de 900rpm, um a velocidade de avanço de 25mm/min, um ângulo de inclinação de 2° e uma geometria de pino cónico, obteve uma eficiência de junta de 100 %. Para uma geometria de pino cilíndrica, com uma relação de diâmetros de 20/6, uma velocidade de rotação de 1400rpm, uma velocidade de avanço de 16 mm/min e um ângulo de inclinação de 1°, obteve uma eficiência de junta de 99,1%.

Bagheri *et al* [43] estudou a soldadura de duas placas de ABS, tendo o ABS uma resistência à tração de 40,5MPa, com uma espessura de 5mm. A ferramenta era constituída por o pino giratório roscado M10 com passo 0,7mm e uma base aquecida. Os parâmetros do processo foram: velocidade de rotação de 800, 1250 e 1600rpm; velocidade de deslocamento de 20, 40 e 80mm/min; e temperatura da base de 50, 60 e 100°C. Concluíram que os parâmetros ideais, onde se obteve uma eficiência de soldadura de 88,8%, apresentavam uma velocidade de rotação de 1600 rpm, uma velocidade de deslocamento de 20mm/min e uma temperatura de 100°C. Soldaduras com velocidades de rotação altas, temperaturas da base

alta e velocidades de avanço baixas, dão origem a um aumento da qualidade da soldadura e da resistência à tração da junta soldada. Observaram que devido ao fluxo de material ser diferente no lado de recuo e no lado de avanço, ocorre uma falta de material no lado do recuo que leva a uma falha frágil nessa área. Para altas velocidades de avanço, superiores a 80mm/min, obtém-se uma baixa qualidade de soldadura, cheia de vazios e deformações. Sendo a velocidade mínima aceitável neste processo de 20mm/mim.

O calor gerado devido à rotação do pino aumenta com o aumento da velocidade de rotação. Altas velocidades de rotação originam uma melhor mistura do material das duas placas a soldar e um aumento da resistência à tração. Mas se a velocidade for superior a 1600 rpm, pode ocorrer degradação do material.

Para além da investigação de soldaduras onde se soldam dois polímeros iguais, também já foram estudadas algumas soldaduras com materiais dissimilares, ou seja, uma soldadura entre dois polímeros diferentes. Mas o número de estudos realizados com materiais dissimilares utilizando o processo de soldadura de FSW é muito reduzido.

Rezaee *et al.* [44] investigaram a soldadura de dois polímeros dissimilares, PE e PP, e conseguiram obter uma eficiência de junta de 98% da resistência à tração do PE. Foi utilizada uma base estacionária para conseguir melhorar e controlar o fluxo do material e várias geometrias de pinos, sendo o pino cilíndrico roscado o que apresentou o melhor desempenho. Os parâmetros ideais neste estudo foram a velocidade de rotação de 1860rpm e a velocidade de avanço de 12,5mm.

Gao *et al* [45] estudaram a soldadura de duas placas de polímeros diferentes, ABS e PEHD com um processo de FSW submerso. Utilizaram uma ferramenta cônica roscada de 8-10mm e comprimento de 6mm. Entre as duas placas foi deixado um espaço de 4mm, de modo a esse espaço vazio ser preenchido por nano tubos de carbono de paredes múltiplas. Os investigadores concluíram que os defeitos, como poros e fissuras, podem ser reduzidos com a adição de nano tubos de carbono de paredes múltiplas. A adicionar nano tubos de carbono de paredes múltiplas na junta aumenta a resistência à tração, mas diminui a dureza da junta.

2.3.3. Conclusões da pesquisa bibliográfica

A pesquisa bibliográfica mostrou que o processo FSW tem grande potencial para unir polímeros termoplásticos e compósitos de matriz polimérica, podendo substituir com vantagem outras técnicas de soldadura. Mostrou ainda que as ferramentas FSW tradicionais não são as mais adequadas para soldar polímeros, pois a base cria defeitos negativos no material. A soldadura com baixa velocidade de avanço, dá origem a soldaduras fortes, pois ocorre uma adequada agitação e homogeneização dos polímeros. No processo FSW, a maioria dos vazios que ocorrem na soldadura é devida à falta de calor no processo de arrefecimento. Por isso, foram desenvolvidas ferramentas de base estacionária aquecidas externamente para evitar o problema.

A soldadura heterogênea de polímeros, ou seja, polímeros dissimilares, ainda não foi muito estudada existindo ainda poucos artigos sobre o tema. Além disso existem muitos processos para unir polímeros, sendo os de soldadura que apresentam melhores resultados e várias vantagens. Entre os processos de soldadura o FSW é capaz de produzir soldaduras com eficiência de junta muito alta, utilizando máquinas e ferramentas relativamente baratas.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Este capítulo tem como objetivo descrever todo o procedimento experimental e metodologias utilizadas ao longo do trabalho experimental. Em primeiro lugar, é feita uma descrição dos materiais base, ferramenta, preparação das placas e sistema de fixação. Em seguida é relatado o modo de realização das soldaduras, em particular, os parâmetros usados e o modo de execução. Por fim, são descritos os procedimentos dos ensaios realizados, sendo estes o ensaio de dureza e o ensaio de tração, bem como a análise morfológica.

3.1. Materiais base e ferramenta

Os materiais poliméricos utilizados para a realização deste estudo foram chapas de Polietileno (PE) e Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS), com espessura de 6 mm, de cor branca e preta, respetivamente. Na realização do estudo foi utilizada apenas uma geometria de ferramenta, sendo esta de base estacionária.

3.1.1. Polietileno (PE)

O PE é um polímero termoplástico praticamente cristalino, obtido a partir a polimerização do etileno e é designado pela abreviatura PE. Sendo a sua cadeia molecular constituída basicamente por carbono e hidrogénio, tem a seguinte fórmula - $(C_2H_4)_n$. Pode ser produzido com diferentes densidades e na forma linear ou reticulada, sendo um polímero muito versátil a nível de aplicabilidade. Este polímero é flexível, pois possui uma temperatura de transição vítrea mais baixa que a temperatura ambiente, é leve, barato, atóxico e quimicamente resistente. Pode ser utilizado em embalagens para alimentos, produtos farmacêuticos, reservatórios de água, entre outros. É um dos polímeros mais utilizados no mundo, em diversas indústrias e aplicações. Na Tabela 2 estão apresentadas algumas propriedades deste polímero. Os valores obtidos experimentalmente encontram-se dentro do intervalo de valores, consultados na Matweb [46].

Tabela 2. Principais propriedades do PE [Matweb].

| Densidade (g/cm ³) | 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 Acrilonitrila Butadieno Estireno, designado por ABS, é um polímero termoplásticos amorfo, muito utilizado na indústria. É formado pelo copolimerização de 3 monómeros, a acrilonitrila que lhe oferece uma resistência química e térmica, a butadieno que lhe confere resistência ao impacto e alongamento e por último estireno que fornece brilho, moldabilidade e rigidez. A sua fórmula química é $(C_8H_8 \cdot C_4H_6 \cdot C_3H_3N)_n$. Algumas das propriedades estão apresentadas na Tabela 3. O ABS é caracterizado por uma boa tenacidade e resistência ao impacto mesmo a baixas temperaturas, tendo uma gama de utilização de 20 °C a 80 °C, uma boa rigidez e é um material leve, apresentado uma grande panóplia de aplicações no setor automóvel e químico, entre outros. Os valores obtidos experimentalmente encontram-se dentro do intervalo de valores, consultados na Matweb [46].

Tabela 3. Principais propriedades do material ABS [Matweb].

| Densidade (g/cm ³) | 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 |

3.1.3. Ferramenta

Para a realização das soldaduras foi utilizada uma ferramenta já existente no laboratório, concretizada por N. Mendes [47]. A ferramenta é constituída por uma base estacionária e por um veio com um pino cónico numa das suas extremidades, apresentando um movimento de rotação em relação à base. A extremidade oposta ao pino é roscada, na qual é aparafusado o encabadouro que vai ser apertado na cabeça da fresadora. Na Figura 8 e Figura 9, encontra-se representada a ferramenta utilizada no procedimento experimental.

A base estacionária é feita de alumínio AA5083 e apresenta um formato retangular com um orifício na zona central, correspondente ao orifício do pino, sendo a dimensão da base estacionaria de 180mm x 25mm. Nas extremidades da base encontram-se

quatro aberturas, cujo diâmetro é de 12,5mm e um comprimento de 65mm, duas em cada lado, onde podem ser inseridas resistências elétricas, permitindo o aquecimento do polímero na frente e atrás do pino.

O veio e o respetivo pino são realizados em aço H13 temperado e revenido, que apresenta uma dureza de 50 HRC. O pino tem uma geometria cônica roscada, com rosca esquerda, responsável pela agitação do material do lado do avanço para o lado do recuo. Tem 5,5 mm de comprimento, 10 mm de diâmetro da base e 6 mm de diâmetro da extremidade, com um passo de 2mm.

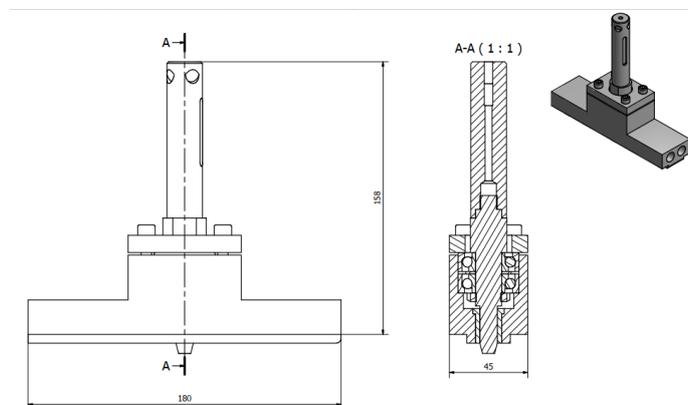


Figura 8. Ferramenta FSW.

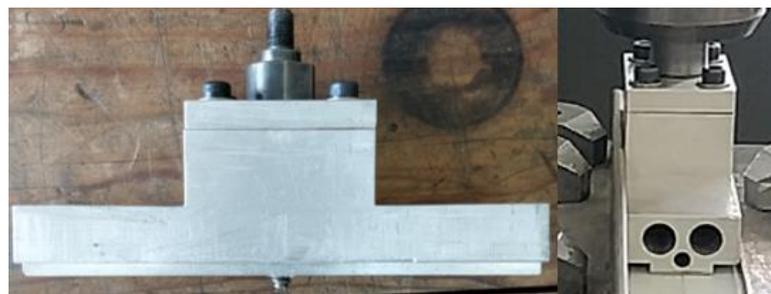


Figura 9. Ferramenta FSW, imagens reais.

3.2. Preparação das placas e sistema de fixação

Antes de começar a soldar as placas de polímero foi preciso cortar e fresar as placas e depois, assegurar que estas estão fixas durante o processo. As placas de PE e ABS foram inicialmente cortadas com as dimensões de 220mm x 81,5mm e 310,5mm x 81,5mm, respetivamente. Depois, com o objetivo de alojar a fixação de dois termopares do tipo k, de modo a ser possível registar as temperaturas nas proximidades da junta, foram criadas duas

fendas por placa perpendiculares à junta a ser soldada, com o auxílio de uma fresadora com um disco de corte de 2mm de espessura, realizando um corte de 2mm, com uma profundidade de 2mm e a uma distância de 55mm da extremidade inicial e final da soldadura. De seguida, com um engenho de furar de coluna, com uma broca acoplada de 1mm de diâmetro, realizou-se a abertura dos orifícios, onde vão ser introduzidos os terminais dos termopares, responsáveis pela leitura da temperatura. Os furos estão localizados a 2mm da face a ser soldada e dentro da fenda realizada anteriormente, com uma profundidade de 5mm em relação ao topo da placa. De modo a impedir que os fios dos termopares não saíssem das fendas criadas, bem como dos orifícios, foi colocado um pouco de fita-adesiva na superfície da placa. Na Figura 10 estão representadas as placas de polímero já preparadas, prontas para serem soldadas.



Figura 10. Placas preparadas, com os termopares inseridos.

De modo a fixar as duas placas de polímero a serem soldadas foi desenvolvido um sistema de fixação robusto, permitindo o correto posicionamento dos componentes, garantindo que o pino ficasse perfeitamente alinhado com a junta formada pelas duas placas. O sistema de fixação é constituído por uma base, fixa à mesa de trabalho horizontal da fresadora, na qual se podem fixar grampos e calços. Na Figura 11 e Figura 12 está representado o sistema de fixação e a identificação dos seus componentes. De forma a garantir que a ferramenta (base estacionária) realize sempre um movimento linear, quando a mesa de trabalho se deslocava, foi fixo à base uma cantoneira de perfil L, por intermédio de grampos, tendo também o objetivo de evitar que a placa direita se movimentasse verticalmente. Para evitar o deslocamento vertical da placa esquerda foi colocada uma chapa

de aço por cima da placa e fixa à base por grampos. Por fim, foram adicionados calços na face esquerda da placa direita, de modo a evitar o escorregamento da placa direita em relação à placa da esquerda, quando a ferramenta estava a soldar. Depois da realização de alguns ensaios, verificou-se que placa direita se estava a movimentar em relação à outra, ou seja, a força exercida na superfície da placa direita não era suficiente para impedir o escorregamento, tendo-se adicionado calços na face da placa direita.

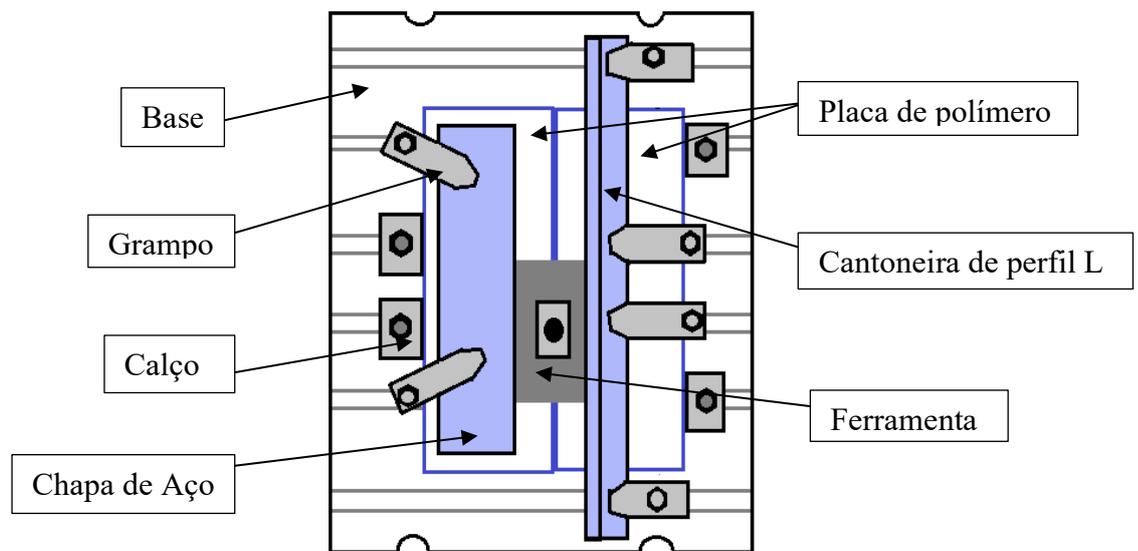


Figura 11. Configuração do sistema de fixação.



Figura 12. Sistema de fixação para realizar as soldaduras.

3.3. Realização das soldaduras e extração de provetes

Para realizar as soldaduras utilizou-se uma fresadora *Cincinnati Milacron 207MK*, existente no laboratório de ensaios mecânicos do DEM, da Universidade de Coimbra. A fresadora apresenta uma elevada rigidez, operando sob condições de controlo de posição. Com esta fresadora é possível regular a velocidade de rotação e de avanço da ferramenta, ângulo de inclinação e profundidade de penetração, sendo os parâmetros velocidade de avanço e profundidade de penetração não muito exatos.

Os parâmetros utilizados nas soldaduras realizadas variam de 870, 1140 e 1500(rpm) para a velocidade de rotação 60 e 120(mm/min) para a velocidade de avanço e 5,5 a 5,9(mm) para a profundidade de penetração. Ao aumentarmos a penetração, acima de 5,5mm significa que a força axial também aumenta. Para além dos parâmetros utilizados na fresadora, a ferramenta também permite a adição ou não de calor externo. No caso atual não foi utilizado aquecimento externo.

Após a preparação das placas, estas foram fixas na base da mesa de trabalho da fresadora, por intermédio do sistema de fixação referido anteriormente e foi iniciado o processo de soldadura. Os parâmetros de soldadura utilizados estão indicados na Tabela 4. Nesta tabela é ainda indicado o rácio w/v, porque este representa indiretamente o calor adicionado na soldadura. Nas soldaduras designadas de PE01 a PE05, após o término do avanço, a rotação era desligada e procedia-se à remoção da ferramenta da peça. Na soldadura número ABS01, após ser desligada a velocidade de avanço, a velocidade de rotação também foi desligada, retendo-se a ferramenta apenas no momento quando o sistema de fixação era removido. Nas soldaduras PE06, ABS02 a ABS06 procedeu-se à paragem da velocidade de avanço, depois à remoção da ferramenta ainda em rotação, que só depois era desligada. O sistema de fixação apenas era retirado quando a temperatura lida pelos termopares, inseridos nas placas agora soldadas, era aproximadamente de 25 °C, retirando-se depois a placa soldada para ser inspecionada visualmente e identificada, como se ilustra na Tabela 4.

Para facilitar a leitura ao longo da dissertação, a nomenclatura das soldaduras foi alterada para a designadas da Tabela 4, em vez da nomenclatura escrita nas placas de soldadura.

Tabela 4. Parâmetros usados para a soldadura dos polímeros, sem aquecimento externo.

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

**Figura 13.** Realização de uma soldadura.

Depois de serem realizadas e identificadas as soldaduras, foram traçadas linhas transversais à soldadura, obtendo-se provetes retangulares de material, apresentado todas elas a linha de soldadura na zona intermédia, como se pode observar a Figura 14. Os provetes cuja designação é por exemplo PE06-P1, tem dimensões de 24mm x 183mm, foram utilizadas para os ensaios à tração. A secção de material que é designada por exemplo de PE06-M tem dimensões de 15mm x 70mm, é utilizada para ensaios de microestrutura e de

microdureza. Os cortes foram feitos numa serra mecânica de fita vertical, obtendo-se assim as amostras para se realizar a análise microestrutural, microdureza e os ensaios mecânicos. Os provetes para o ensaio de tração foram maquinados em CNC, de acordo com a norma ASTM638, encontrando-se as características geométricas no ANEXO A.

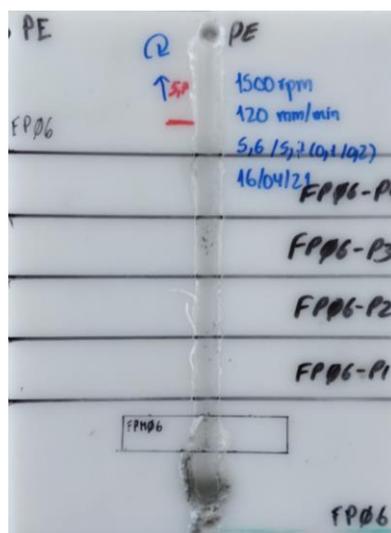


Figura 14. Marcação das amostras para os diferentes ensaios.

3.4. Análise morfológica

Este ensaio foi realizado 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. A superfície foi sujeita a operações de polimento sucessivas, usando lixas de água com granulometria fina, sempre sob meio húmido, tendo sido utilizada primeiro a lixa P1000 e a seguir a P2500. Para se obter um acabamento superficial com quase a ausência de riscos, foi passado um pano de polimento e adicionado ao mesmo um lubrificante e uma suspensão de diamante de granulometria 1µm. Tanto o pano de polimento e as lixas foram acopladas ao disco rotativo da máquina de polir. A seguir os provetes foram observados e fotografados numa lupa Zeiss, de modo a evidenciar a área da soldadura e a eventual presença de defeitos.

Uma análise mais detalhada da presença de defeitos foi realizada num tonógrafo, Burker-SkyScan1275 de 50 kV e com o tempo de exposição de 46ms, do Instituto Pedro

Nunes. O microtomógrafo é constituído por um aparelho de RX e um conjunto de sensores que permitem ver a peça à transparência e digitalizar toda a informação. Foi feita uma vista geral e secções, longitudinal, transversal e horizontal de algumas soldaduras.

3.5. Análise de microdureza

A dureza é um critério que permite estimar o comportamento do material em relação à deformação plástica do mesmo, podendo também ser utilizado para avaliar de uma forma indireta outras propriedades mecânicas, para além da dureza [48]. Este ensaio foi realizado em provetes retangulares de dimensão 15mm x 70mm, referidos anteriormente. Para a realização dos testes foi utilizado um microdúmetro HMV_G da SHIMADZU, no qual foi mediada a dureza dos provetes em Vickers, aplicando uma carga de 1,962 N(200g) durante 15s.

A medição iniciou-se ao meio da zona soldadura e a partir da primeira indentação foram criados mais 15 indentações para o lado do recuo e mais 15 indentações para o lado do avanço. Foram realizadas mais duas linhas de indentações, a 1mm e 5mm da superfície superior.

3.6. Ensaios à tração

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

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 100kN, e a velocidade média de deslocação usada foi de 10mm/min.

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 posteriormente as imagens processadas e analisadas, de modo a avaliar os deslocamentos e deformações locais dos provetes.

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Nos capítulos seguintes são apresentados os resultados obtidos de cada ensaio realizado, sendo também interpretados esses mesmos resultados. Primeiro são apresentados os ciclos térmicos medidos nas soldaduras e é feita uma caracterização morfológica das soldaduras, por meio de observação de macrografias de superfícies superior e transversal dos provetes. De seguida é realizada uma análise da microestrutura por meio de tomografia. No seguimento é efetuada a análise de dureza, usando a escala de dureza de Vickers (HV). Por fim é analisado o comportamento à tração das soldaduras.

4.1. Ciclos térmicos

A Figura 15 a) ilustra os ciclos térmicos medidos na soldadura PE02, que apresenta o maior rácio w/v , sendo de 25rot/mm, do lado do avanço. O termopar_1 é o primeiro em que a ferramenta passa ao realizar a soldadura, tendo um valor de 69,4 °C, e segundo termopar apresenta um valor de 94,8 °C. Na Figura 15 b), está ilustrado o ciclo térmico da soldadura PE04, a qual tem uma $w/v = 7,25\text{rot/mm}$ 4 °C e do termopar_2 é de 60,3 °C.

Comparado os extremos do rácio w/v , é visível que se aumenta o w/v ocorre o aumento das temperaturas registadas em ambos os termopares.

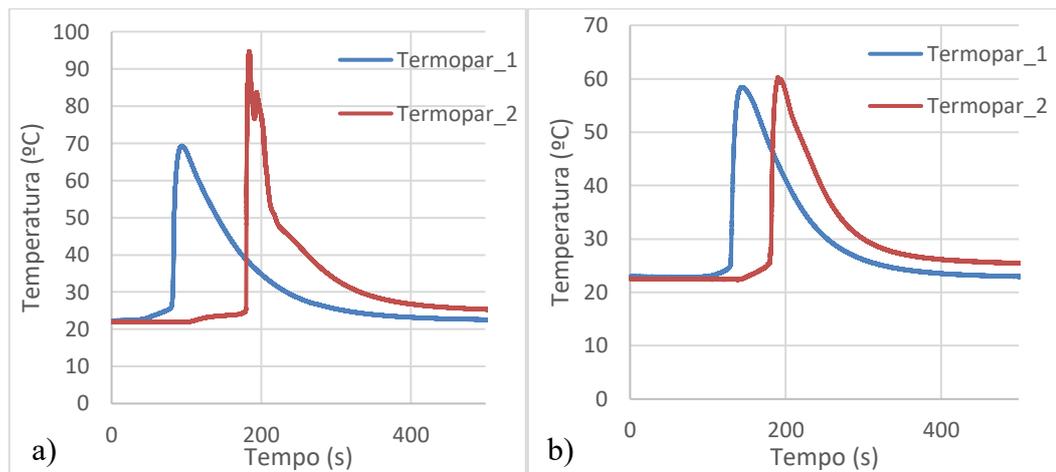


Figura 15. Ciclo térmico da soldadura PE: a) PE02; b) PE04.

A Figura 16 a) e b) estão representados os ciclos térmicos de soldadura, de uma soldadura com maior energia adicionada e outra com menor energia adicionada, respetivamente. A soldadura com maior energia adicionada, em que o $w/v = 25 \text{rot/mm}$, o valor da temperatura lida pelo termopar_1 é de $185,2 \text{ }^\circ\text{C}$ e pelo termopar_2 é de $181,2 \text{ }^\circ\text{C}$. Na soldadura em que o rácio w/v é o mais baixo, correspondente a $7,25$, o termopar_1 regista uma temperatura de $112,1$ e o segundo termopar uma temperatura de $59,3 \text{ }^\circ\text{C}$. Na Figura 16 b) é possível observar que a temperatura registada pelo termopar_2 é muito inferior a temperatura do termopar_1, isto pode ser devido a um erro de má colocação do termopar.

Comparando os dois externos do rácio, w/v , é visível que à medida que o valor do rácio, w/v , aumenta a energia adicionada é maior provocando um aumento da temperatura na junta da soldadura.

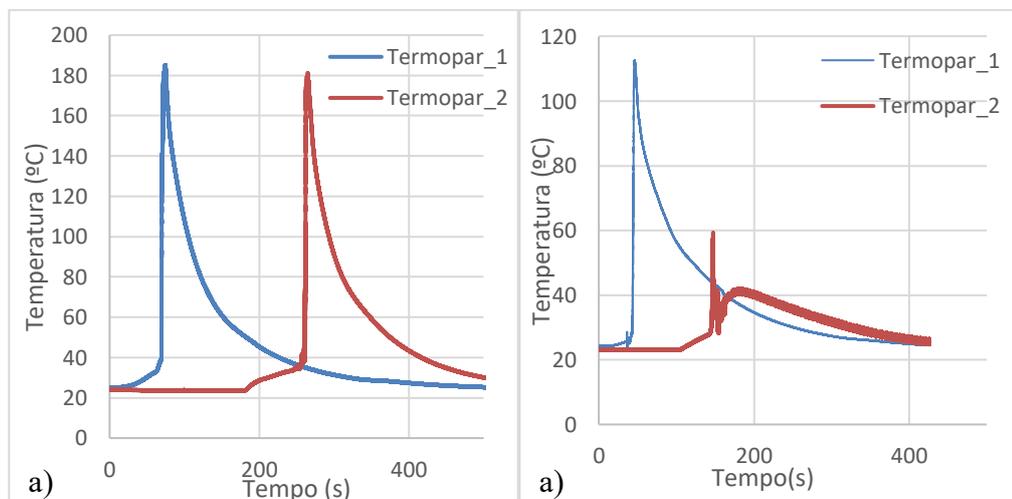


Figura 16. Ciclo térmico da soldadura: a) ABS06; b) ABS03.

A Tabela 5 resume as temperaturas de pico registadas para as diversas soldaduras. Comparando as temperaturas registadas pelos termopares em ambos os materiais, é observado que nas soldaduras com placas de ABS a temperatura atingida na junta de soldadura é superior à temperatura lida pelos termopares nas mesmas condições, mas só variando o material para PE.

Tabela 5. Temperaturas de pico dos termopares.

| Designação | Material | w/v (rot/mm) | Termopar_1 (°C) | Termopar_2 (°C) |
|------------|----------|-----------------|--------------------|--------------------|
| PE04 | PE | 7,25 | 58,4 | 60,3 |
| PE05 | PE | 9,5 | 67,4 | 70,8 |
| PE06 | PE | 12,5 | 57,4 | 83,7 |
| PE03 | PE | 14,5 | 50,4 | 69,8 |
| PE01 | PE | 19 | 84,4 | 62,7 |
| PE02 | PE | 25 | 69,4 | 94,8 |
| ABS03 | ABS | 7,25 | 112,1 | 59,3 |
| ABS02 | ABS | 9,5 | 82,1 | 113,5 |
| ABS01 | ABS | 12,5 | 148,5 | 114,2 |
| ABS04 | ABS | 14,5 | 133,7 | 130,8 |
| ABS05 | ABS | 19 | 95,4 | 176,3 |
| ABS06 | ABS | 25 | 185,2 | 181,2 |

4.2. Análise morfológica

Em todas as macrografias, superiores e laterais, o lado direito da zona soldada é o lado de avanço (LA) e o lado esquerdo da soldadura o lado de recuo (LR).

4.2.1. Polietileno

Nas Figura 17 à Figura 20 estão representadas as macrografias das soldaduras de polietileno. O efeito da velocidade de rotação da ferramenta na morfologia das soldaduras, para uma velocidade de avanço constante, de 60mm/min, está representado nas Figura 17 e Figura 18.

Na Figura 17 é possível observar que a superfície da soldadura não é lisa, apresentado falta de material na zona central. Essa perda de material, da Figura 17 a) pode

ser devido à insuficiente penetração da ferramenta, não exercendo qualquer tipo de força axial, existindo uma perda de material para os lados do cordão de soldadura, sob a forma de rebarba. Na Figura 17 b) e c) a falta de material é devida ao afastamento das duas placas, devido ao aumento da penetração da ferramenta, para 5,7mm, por consequente o aumento da força axial. Isto aconteceu pois a placa do lado do avanço não tinha nenhum calço, como foi referenciado no capítulo 3.2, ocupando o polímero o espaço vazio entre as duas placas, como pode ser observado na Figura 18 b) e c), dando origem à falta de polímero na superfície da soldadura.

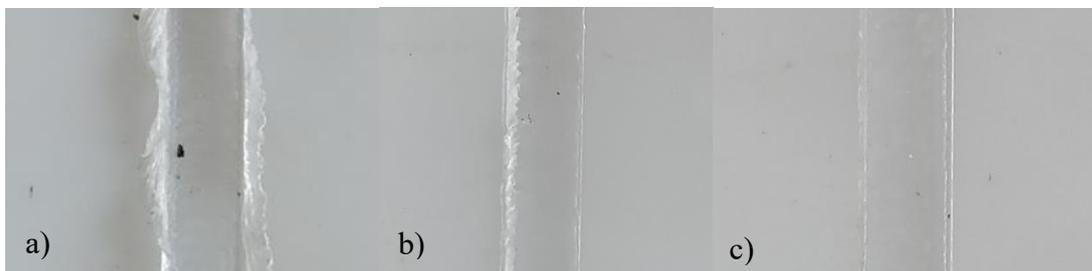


Figura 17. Macrografia superior dos provetes: a) PE01(w1140v60p5,5); b) PE02(w1500v60p5,7); c) PE03(w870v60p5,7).

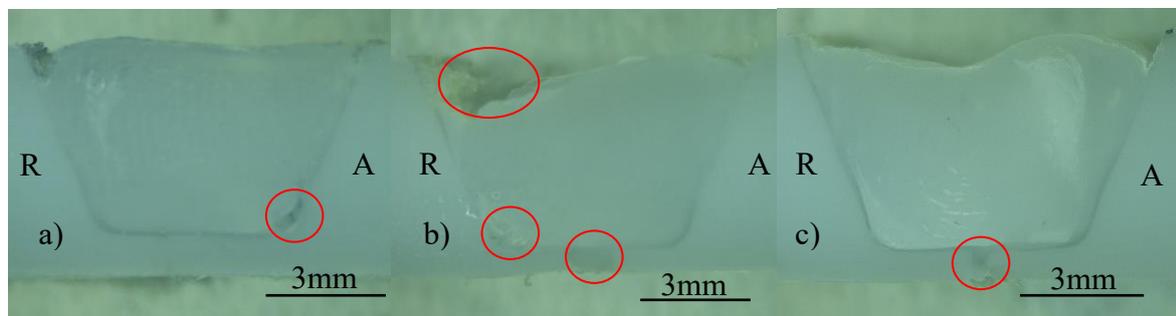


Figura 18. Macrografia de corte longitudinal dos provetes: a) PE01(w1140v60p5,5); b) PE02(w1500v60p5,7); c) PE03(w870v60p5,7).

A soldadura da Figura 18 b), na qual a velocidade de rotação da ferramenta é maior, 1500rpm, apresenta uma falta de material no lado do recuo, e alguma porosidade e cavidades também no lado do recuo, junto à raiz, estando essas zonas marcadas com um círculo vermelho. A soldadura onde a velocidade da ferramenta é de 1140rpm, apresenta uma zona de cavidades no lado do avanço, na interface da zona da soldadura com a do material base, como se pode ver na Figura 18 a). Estas zonas de porosidade e cavidades podem acontecer devido a uma má mistura de material por insuficiência de calor produzido pelo pino ferramenta, pois a maior parte dos defeitos encontram-se junto à raiz. Em todos as

3 soldaduras apresentadas na Figura 18 é visível a interface da zona de material misturado e a do material base.

A velocidade de avanço da ferramenta das soldaduras das Figura 19 e Figura 20 é de 120mm/min, sendo a velocidade de rotação de 870, 1140 e 1500rpm.

A Figura 19 ilustra a superfície da soldadura, que neste caso não apresenta falta de material na zona central. O cordão de soldadura da Figura 19 a) é praticamente liso, tendo a ferramenta sido penetrada 5,7mm, existindo assim uma força axial baixa durante o processo de soldadura, a uma velocidade de 870rpm. A soldadura da Figura 19 b) foi iniciada com uma penetração de 5,7mm e logo de seguida passada a 5,8mm, tendo provocado as partes negras ilustradas na figura, o que significa que o polímero começou a queimar devido à penetração elevada. Esta soldadura não tem qualquer tipo de falta de material na superfície, mas sim material em excesso, em forma de rebarba. Na Figura 19 c) apresenta uma penetração de 5,6mm na zona onde foi retirada a amostra, e uma velocidade de rotação da ferramenta de 1500rpm, exibindo um cordão sem nenhuma falta de material superficial, e com umas pequenas rebarbas.

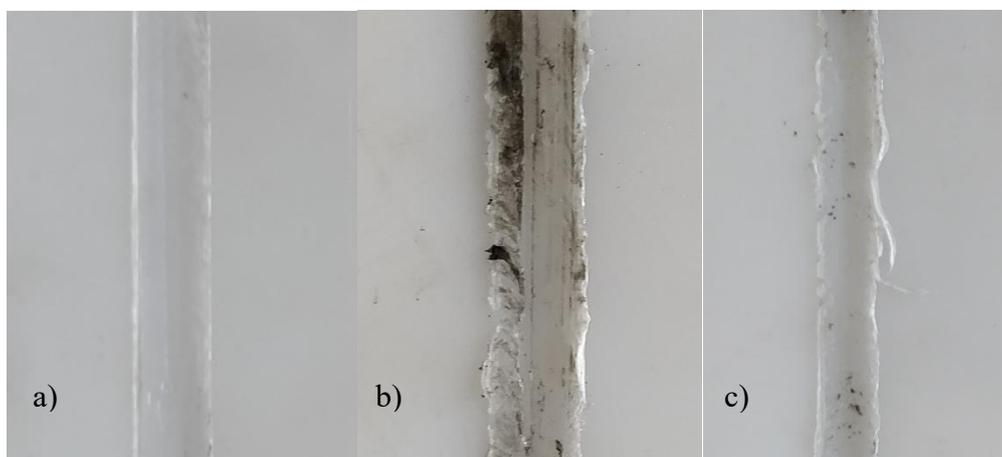


Figura 19. Macrografia superior dos provetes: a) PE04(w870v120p5,7); b) PE05(w1140v120p5,7-5,8); c) PE06(w1500v120p5,6-5,7).

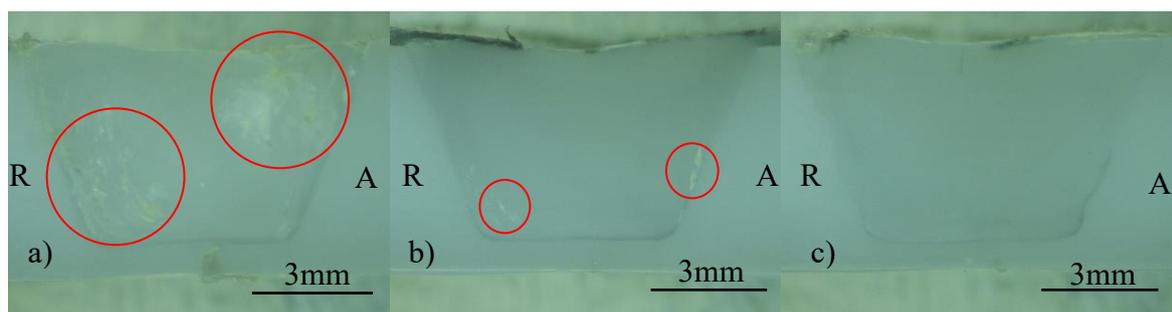


Figura 20. Macrografia de corte longitudinal dos provetes: a) PE04(w870v120p5,7); b) PE05(w1140v120p5,7-5,8); c) PE06(w1500v120p5,6-5,7).

A Figura 20 representa a macrografia de corte dos provetes em análise. O provete ilustrado na Figura 20 a), que foi realizado com uma velocidade de rotação da ferramenta mais baixa, 870rpm, apresenta duas regiões com bastante porosidade ou cavidades no lado do recuo e no lado do avanço. Estes defeitos podem ter sido devidos à falta de calor, provocada pela baixa velocidade de rotação e alta velocidade de avanço da ferramenta, não sendo suficiente para promover a ligação do material deformado com o material base. Na Figura 20 b), na qual a velocidade de rotação é de 1140rpm, existe uma pequena zona porosa no lado do recuo e no lado do avanço, e na interface da zona soldada com o material base, também existe uma zona com porosidade. Para a velocidade de 1500 rpm, na macrografia da Figura 20 c), não é visível má mistura de material ou porosidade, e a linha da interface de separação da zona misturada com a zona de material base é muito perceptível.

Conforme referido no procedimento experimental, este estudo foi complementado com análise das soldaduras em tomógrafo. Na Figura 18 b), através de uma análise macrográfica, foi constatado que esta soldadura apresenta uma grande quantidade de poros e cavidades, mesmo sendo a soldadura realizada com maior adição de calor, tendo um w/v de 25. A Figura 21 a) mostra uma análise tomográfica em vista 3D do provete PE02-M, com um corte longitudinal e na Figura 21 b) é visível essa mesma soldadura em cortes transversal, longitudinal e de topo. Esta figura mostra que existe uma grande falta de material polimérico junto à raiz do lado do recuo, e falta de material também no lado do recuo, junto à superfície.

Como foi observado na macrografia da Figura 20 c), a soldadura PE06 não apresentava defeitos visíveis. Resultados da análise tomográfica do provete da soldadura estão representados na Figura 22. Na Figura 22 a) é ilustrado um corte transversal e na Figura 22 b) é visível o corte transversal, longitudinal e de topo desta soldadura.

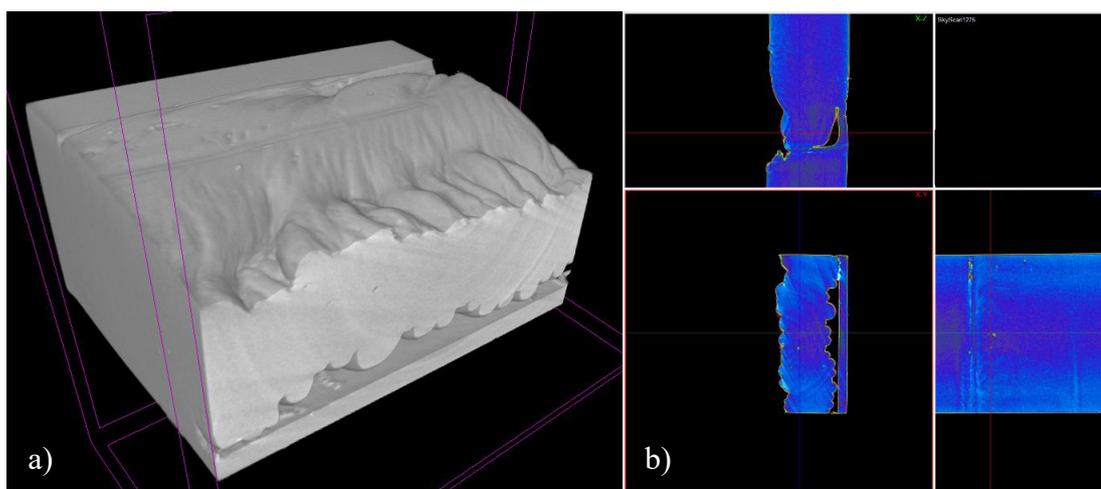


Figura 21. Tomografia realizada ao provete PE02-M (w1500v60): a) Vista geral, com corte transversal; b) Cortes da peça.

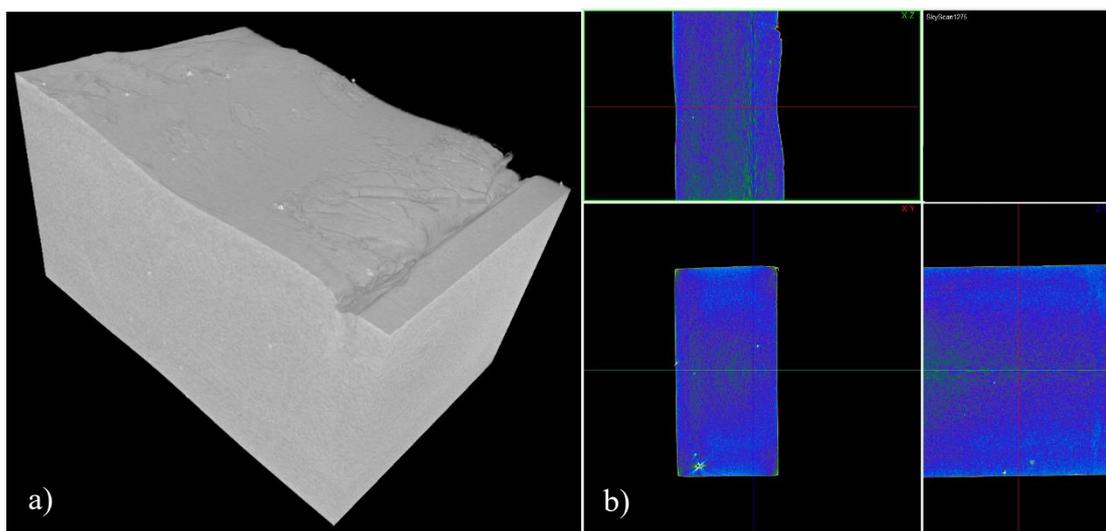


Figura 22. Tomografia realizada ao provete PE06-M (w1500v120): a) Vista geral, com corte longitudinal ; b) Cortes da peça.

Normalmente, quanto maior o calor adicionado, menor é o número de porosidade e de cavidades, isto devido à existência de uma melhor mistura do polímero, não sendo observado neste caso. De facto, a soldadura PE02-M foi realizada com um rácio w/v de 25rot/mm e a PE06-M com um rácio de 12,5rot/mm, apresentando um aumento da temperatura registada pelos termopares, na zona da soldadura, com o aumento do rácio w/v. A falta de material no lado do recuo na soldadura PE02-M, em comparação com a soldadura PE06-M, pode ser devido ao afastamento das placas como já foi referido anteriormente.

No Apêndice A, encontram-se mais figuras relativas as tomografias dos provetes de PE.

4.2.2. Acrilonitrila butadieno estireno

Nas Figura 23 a Figura 26 estão representadas as macrografias superiores e laterais dos provetes soldados de ABS.

As macrografias apresentadas a baixo, na Figura 23 e Figura 24, têm todas elas a mesma velocidade de avanço da ferramenta, de 120mm/min, e velocidades de 870rpm, 1140rpm e 150rpm.

Nas soldaduras da Figura 23, é possível visualizar uma superfície lisa. A solda da Figura 23 c), na qual a ferramenta roda uma velocidade de rotação menor, de 870rpm, apresenta muitas cavidades no lado do recuo, isto pode acontecer devido ao calor insuficiente para promover a ligação do material deformado com o material base. Comparando as três soldaduras da Figura 23 podemos observar que à medida que a velocidade de rotação da ferramenta aumenta, ocorre a diminuição do número de cavidades no lado do recuo.

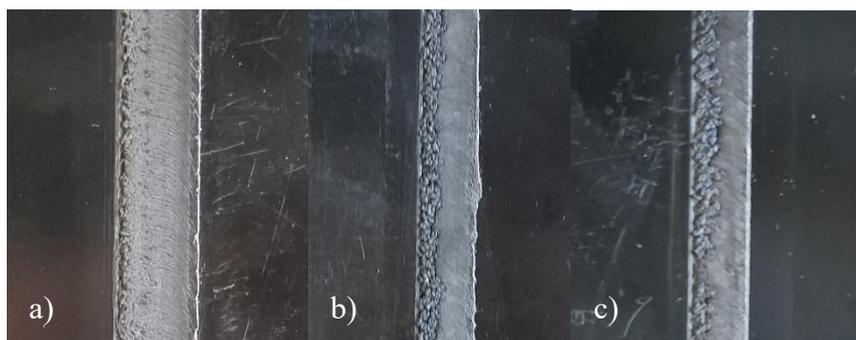


Figura 23. Macrografia superior dos provetes: a) ABS01(w1500v120p5,6); b) ABS02(w1140v120p5,6); c) ABS03(w870v120p5,7).

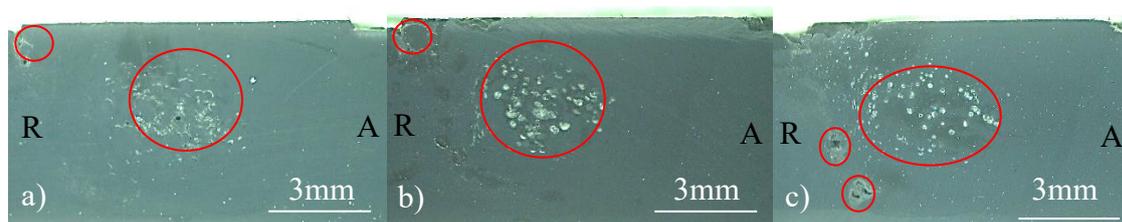


Figura 24. Macrografia de corte longitudinal dos provetes: a) ABS01(w1500v120p5,6); b) ABS02(w1140v120p5,6); c) ABS03(w870v120p5,7).

Na soldadura que pode ser vista na Figura 24 a), a qual foi realizada com uma velocidade de rotação de 1500rpm, a maior, apresenta uma região com poros, na zona central da soldadura e umas pequenas cavidades no lado do recuo da soldadura, na linha de interface

da zona soldadura com a do material base. Na Figura 24 b), soldadura foi feita a uma velocidade de 1140rpm, sendo visível na linha de interface no lado do recuo uma zona com uns pequenos poros e no centro da soldadura mais do lado do recuo uma grande região com vazios, resultado de uma má mistura. Por fim, na Figura 24 c), a soldadura apresenta três regiões, onde são visíveis uma má mistura de material, duas delas na linha de interface do lado recuo e outra grande zona central do lado do recuo.

O aumento da velocidade de rotação facilita o fluxo e mistura do material, reduzindo assim os defeitos na soldadura, não sendo suficiente neste caso para impedir a má mistura de material no lado do recuo.

As Figura 25 e Figura 26 apresentam uma velocidade de avanço constante, de 60mm/mim, e uma velocidade de rotação que varia de 870, 1140 e 1500rpm.

Com o aumento da velocidade de rotação, verifica-se que na Figura 25 c), esta apresenta uma superfície com excelente qualidade, sendo lisa e uniforme, apresentando no lado do recuo uma reduzida porosidade ou mesmo ausência de poros. Comparando a Figura 23 a) e b) com a Figura 25 b) e c) observa-se que a diminuição da velocidade de avanço de 120mm/min para 60 mm/min apresenta excelentes acabamentos superficiais, podendo ser devido ao maior calor gerado pela velocidade de avanço ser menor e pela maior penetração da ferramenta passando de 5,6mm para 5,9mm aumentando assim a força axial.

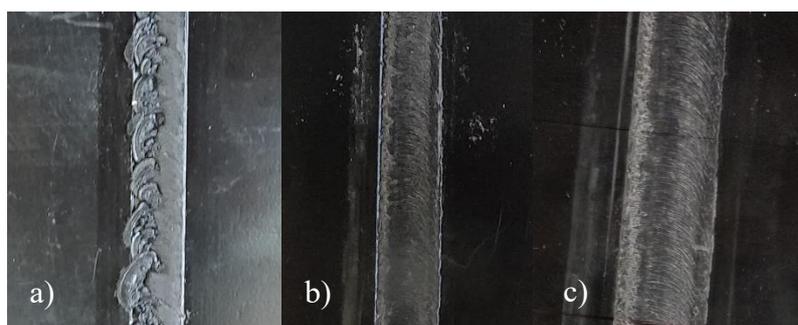


Figura 25. Macrografia superior dos provetes: a) ABS04(w870v60p5,7-5,8); b) ABS05(w1140v60p5,9); c) ABS06(w1500v60p5,9).

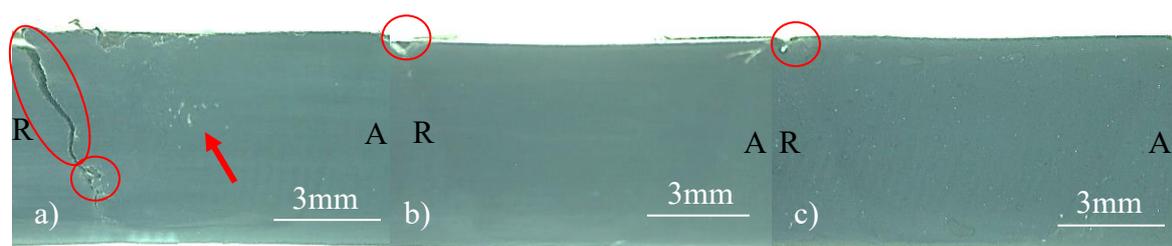


Figura 26. Macrografia de corte longitudinal dos provetes: a) ABS04(w870v60p5,7-5,8); b) ABS05(w1140v60p5,9); c) ABS06(w1500v60p5,9).

Nas soldaduras da Figura 26 estão representadas três macrografias. Na Figura 26 a) está ilustrada uma soldadura com uma velocidade de rotação mais baixa, de 870rpm, apresentando umas pequenas cavidades na zona do recuo, junto à zona de interface, tendo originado uma fenda até à superfície da provete, propagando-se pela zona de interface. Nas Figura 26 b) e c) pode ser observado um pequeno defeito, de má mistura de material na zona do recuo junto à superfície, não apresentando mais nenhuma zona com defeitos. Apenas a zona da soldadura apresenta uma tonalidade ligeiramente mais escura do que a do material base. Quanto maior a velocidade rotação da ferramenta, neste caso 1500rpm, e menor a velocidade de avanço da ferramenta, neste caso 60mm/min, melhor o acabamento superficial, menor é a porosidade devido a uma boa mistura do material e a entrada de calor suficiente.

Comparando as figuras anteriores, no caso do ABS, pode-se afirmar que quanto maior relação da velocidade de rotação com a velocidade de avanço, (rpm/mm/min). Neste caso rácios de 19rot/mm e 25rot/mm, apresentam ausência de poros na zona de mistura e uma superfície lisa, tendo a soldadura uma boa aparência.

Conforme referido no procedimento experimental, este estudo foi complementado com análise das soldaduras em tomógrafo. As tomografias das Figura 27 e Figura 28 vêm reforçar a tese que no caso do ABS, que à medida que existe uma maior quantidade de calor adicionado, pela ferramenta, menor é a quantidade de poros existentes na soldadura. Na Figura 27, a qual corresponde à menor energia adicionada, ou seja, o w/v é igual a 7,25rot/mm, apresenta uma grande quantidade de poros no centro da soldadura e no lado do recuo junto à raiz, podendo ser visto na Figura 27 a) e b), em ambos os cortes.

A macrografia da Figura 26 c) é visível que não existem poros na vista de corte do provete, da informação recolhida pela tomografia e ilustrada na Figura 28 a) e b), é visível que não existe poros em nenhum dos cortes transversal, longitudinal e de topo. Sendo o provete ABS06 o que apresenta uma maior quantidade de energia adicionada.

No Apêndice B, encontram-se mais figuras relativas as tomografias dos provetes de ABS.

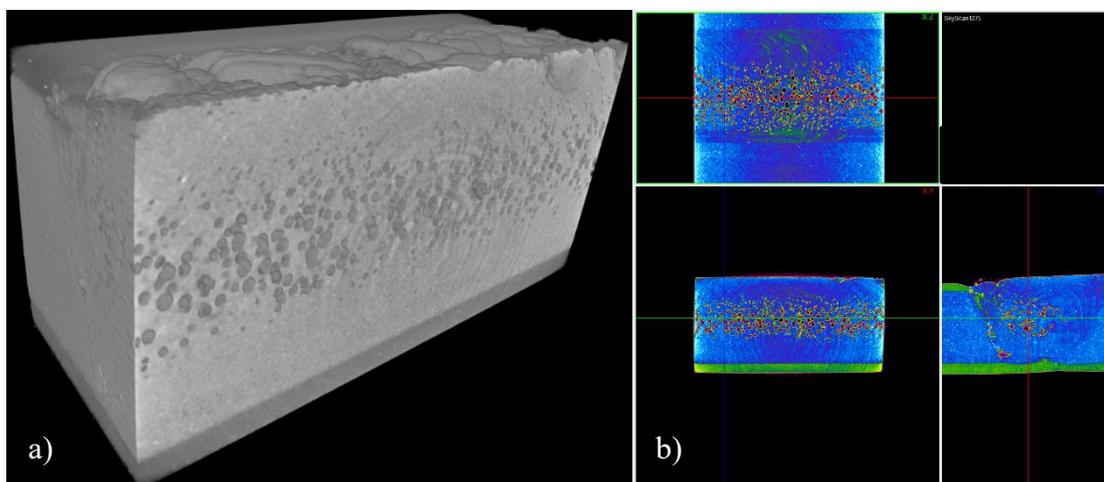


Figura 27. Tomografia realizada ao provete ABS03-M (w870v120): a) Vista geral, com corte transversal; b) Cortes da peça.

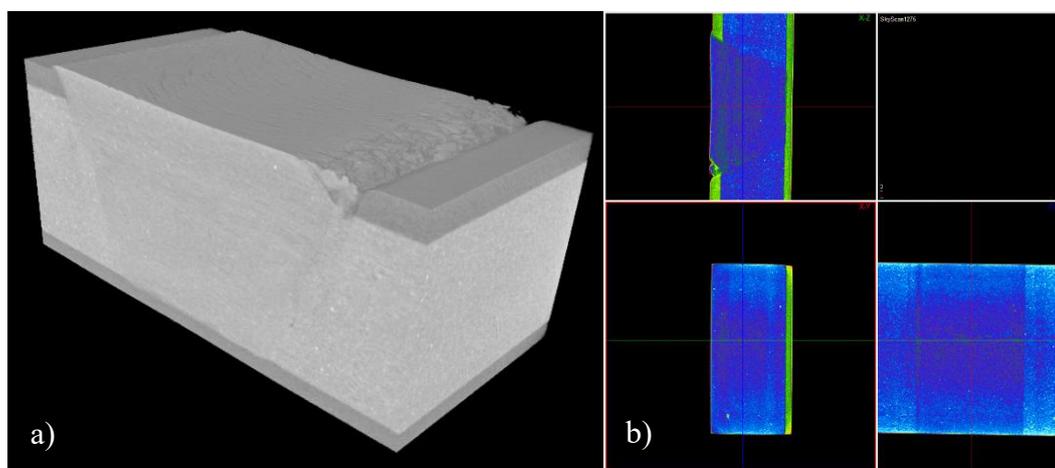


Figura 28. Tomografia realizada ao provete ABS06-M (w1500v60): a) Vista geral, com corte longitudinal; b) Cortes da peça.

Quanto maior o calor adicionado, menor é o número de porosidade e de cavidades, isto devido a existência de uma melhor mistura do polímero. De facto, a soldadura ABS3-M foi realizada com um rácio w/v de 7,25rot/mm e a ABS06-M com um rácio de 25rot/mm, apresentando um aumento da temperatura registada pelos termopares, na zona da soldadura, com o aumento do rácio w/v.

4.3. Análise de dureza

Neste subcapítulo são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de dureza realizados nas soldaduras. Cada provete foi analisado em 90 pontos, distribuídos em 3 linhas. Os gráficos representados nos subcapítulos 4.3.1 e 4.3.2 apresentam no eixo das ordenadas a dureza em Vickers (HV) e o eixo das abscissas a distância ao centro da soldadura em milímetros. Nos gráficos estão representadas três linhas, sendo que cada linha é constituída por 30 pontos, representando em que zona do provete essas indentações foram realizadas. A zona de mistura (ZM) também está indicada nos gráficos por duas linhas verticais tracejadas pretas. Em todas os gráficos de dureza, o lado esquerdo da zona soldada é designado por lado de avanço (LA) e o lado direito da soldadura é denominado de lado de recuo (LR).

4.3.1. Polietileno

Inicialmente foi realizado um ensaio de dureza a um provete de material base, para se obter os valores de dureza de forma a se poder comparar com os provetes que sofreram o processo de soldadura. No provete de material base foram efetuadas as mesmas linhas de indentações que no provete soldado, bem como as mesmas distâncias, apenas foi reduzido o número de indentações por linha, passando para apenas 20 indentações por linha.

Na Figura 29 é apresentado o gráfico de dureza do material base, no qual é possível visualizar que a dureza varia na espessura do provete e ao longo do comprimento, concluindo que a dureza não é uniforme ao longo do provete. Sendo a linha “cima” onde se apresenta maior dureza e na linha “baixo” onde se apresenta a menor dureza, variando essa dureza entre mais ou menos 6 HV e 7 HV.

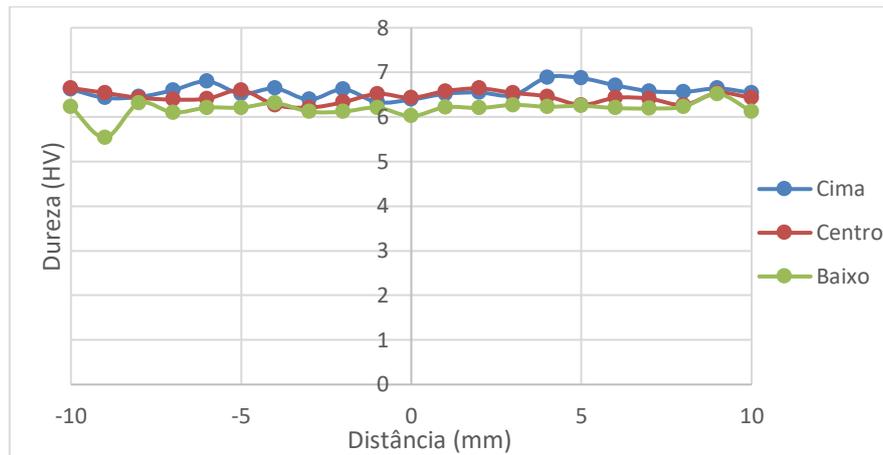


Figura 29. Resultados obtidos no ensaio de dureza num provete de material base.

As Figura 30 e Figura 31 representam os gráficos com os resultados de dureza obtidos nos provetes de polietileno, para as condições de soldadura de menor e maior w/v. Os gráficos e respetiva análise encontram-se em Aparência C.

O gráfico seguinte, da Figura 30, tem uma velocidade de avanço de soldadura de 120mm/min, sendo este gráfico aquele que apresenta um menor rácio de velocidade de rotação pela velocidade de avanço (w/v), com valor de 7,25rot/mm. Nas zonas fora da soldadura, as durezas apresentadas encontram-se no mesmo intervalo do material base, podendo se concluir que ferramenta não produz calor suficiente para que a dureza aumente nestas zonas, externas à zona soldada. Na região da soldadura existe um aumento da dureza em relação ao resto do provete, mas existem zonas onde a dureza é inferior, pois as indentações podem ter sido realizadas em regiões onde a porosidade era maior.

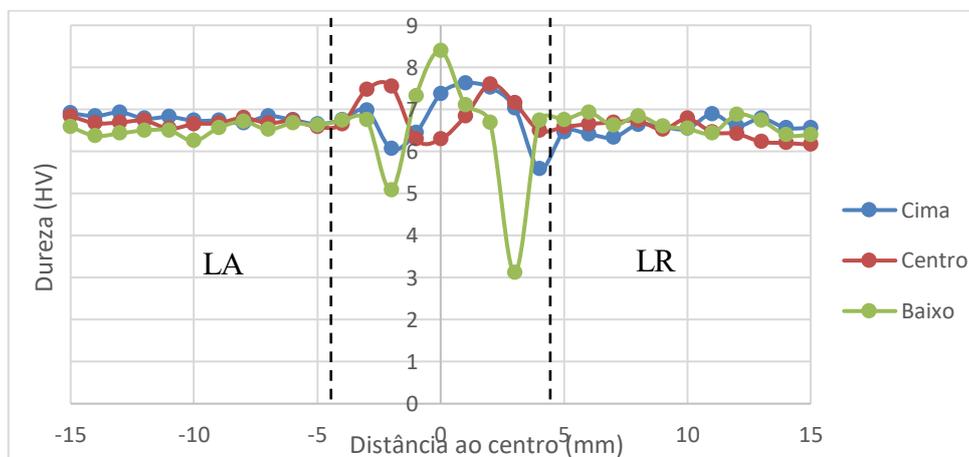


Figura 30. Resultados dos ensaios da dureza do provete PE04-M(w870v120p5,7).

No gráfico seguinte, da Figura 31, apresenta um $w/v = 25\text{rot/mm}$, sendo o maior rácio, aquele que origina a maior adição de calor. É visível que na zona da soldadura a dureza não aumentou em relação ao material base, como foi observado na Figura. Na linha “cima” existe um ponto a 3mm do centro da soldadura que tem uma dureza muito baixa; isto pode ter acontecido devido a poros existentes naquele local. Fora da zona da soldadura o material apresenta uma dureza semelhante à do material base, tendo uma diminuição da dureza ao longo da espessura como foi evidenciado na Figura 29. No lado do avanço a dureza da linha “baixo” é relativamente mais baixa em comparação à do material base e também em comparação com mesma linha do lado do recuo.

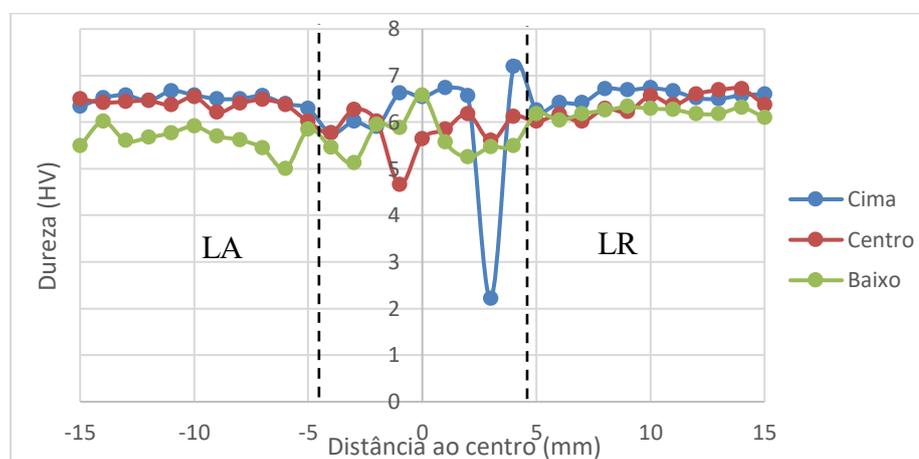


Figura 31. Resultados dos ensaios da dureza do provete PE02-M(w1500v60p5,7).

No gráfico da Figura 32, é exibida a dureza média em cada uma das linhas da zona da soldadura em função da razão w/v . Os pontos de dureza do gráfico abaixo, foram determinados pela média de cada um dos gráficos anteriores, tendo sido anulados os pontos onde a dureza era muito baixa, pois, estas indentações foram realizadas numa cavidade resultante de uma má mistura de material. Na teoria à medida que a razão w/v aumenta, o calor adicionado também aumenta, fazendo com que exista um aumento de cristalinidade em relação ao material base, dando origem a um aumento da dureza. Isto não é verificado no gráfico abaixo, apenas existe um aumento de dureza média quando ocorre a diminuição da velocidade de avanço da ferramenta de 120mm/min para 60mm/min, que corresponde a razão, w/v , de 12,4rot/mm para 14,5rot/mm. Nas razões 7,25, 9,5 e 12,5rot/mm, o parâmetro velocidade de rotação aumenta, mantendo-se constante o parâmetro velocidade de avanço, sendo ilustrado no gráfico uma diminuição da dureza média. Para as razões de 14,5, 19,5 e 25rot/mm, o parâmetro velocidade de rotação aumenta, e o outro parâmetro é constante,

tendo um valor de 60mm/min, sendo visualizada uma diminuição da dureza média. A dureza média máxima na zona da soldadura corresponde a uma razão de 14,5rot/mm, sendo a da série PE06. Comparando a dureza da zona da soldadura com a dureza média do material base é visível que existem condições de soldadura que a dureza é superior à do material base. Pelos valores obtidos de dureza em função do rácio w/v, não existe nenhuma relação com as temperaturas adquiridas pelos termopares.

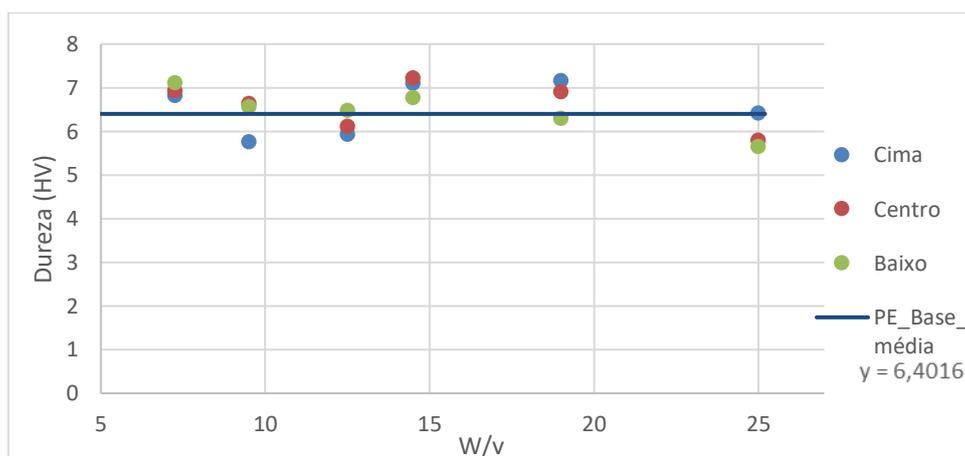


Figura 32. Comparação resultados, dureza média na zona da soldadura em função da razão da velocidade de rotação por a velocidade de avanço.

4.3.2. Acrilonitrila butadieno estireno

Tal como no Polietileno, inicialmente um provete de ABS base foi submetido a ensaios de dureza de forma a ser possível comparar a dureza do material base com a do provete que foi soldado. No provete de material base foram apenas realizadas 20 indentações por linha, estando os pontos e as linhas à mesma distância que as dos provetes soldados.

No gráfico da Figura 33 é possível visualizar que a dureza varia ao longo da espessura e do comprimento do provete, não sendo a dureza uniforme ao longo do provete. A linha “centro” é que apresenta uma menor dureza, seguida da linha “cima” e por fim neste caso a que apresenta uma maior dureza é linha “baixo”, variando a dureza das 3 linhas de indentações entre 10 HV e 11 HV. Note-se que as linhas de cima e de baixo podem não coincidir com as do PE.

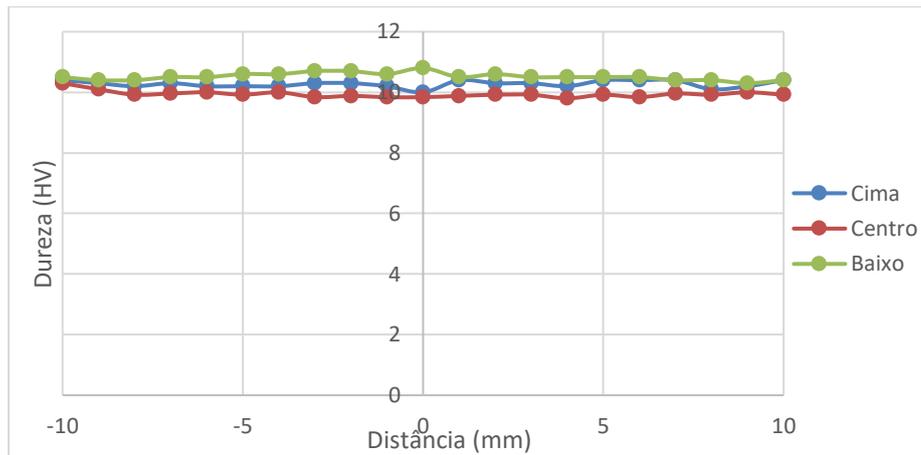


Figura 33. Resultados obtidos num ensaio de dureza de um provete de material base.

Os gráficos de dureza das soldaduras em ABS são apresentados nas Figura 34 e Figura 35, correspondendo as condições de soldadura com menor e maior w/v , respetivamente. Os restantes gráficos e sua análise encontram em Apêndice D.

Na Figura 34, podem ser observados os valores do ensaio de dureza na soldadura ABS03-M, a que corresponde a um w/v igual a 7,25rot/mm, o de menor energia adicionada. Na zona da soldadura, existem pontos no lado do recuo, que apresentam valores de dureza relativamente baixos, devido a porosidade existente na zona da soldadura. Com isto pode ser dito que os valores da dureza deste provete se encontram dentro do intervalo de durezas do material base, expeto no lado externo da zona da soldura do lado do recuo que ambas as linhas têm uma ligeira diminuição.

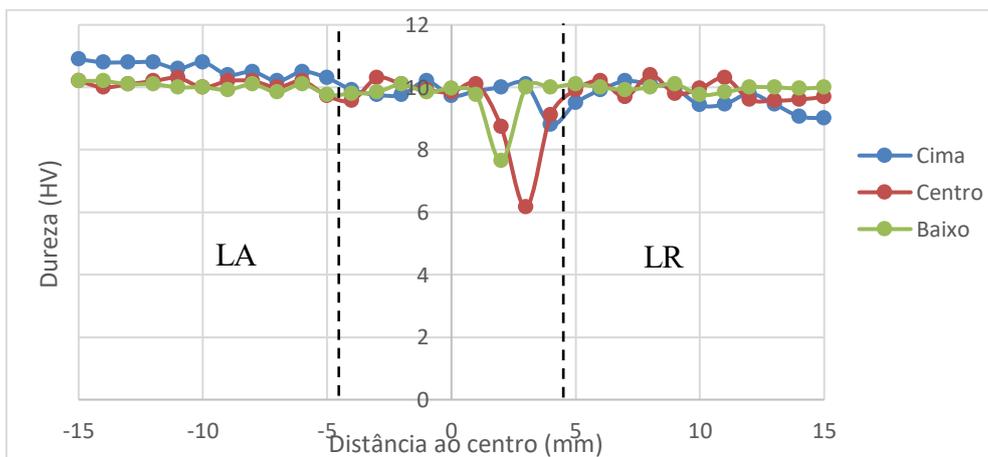


Figura 34. Resultados dos ensaios da dureza do provete ABS03-M($w870v120p5,7$).

Na Figura 35, são apresentados os resultados de dureza do provete da série ABS06-M, na qual a velocidade de avanço é de 1500 rpm e a velocidade de avanço é de 60mm/mim, sendo a soldadura onde existe a maior adição de calor por parte da ferramenta, correspondo a um $w/v=25\text{rot/mm}$. Como é observado na Figura 33, os pontos da linha "baixo" tem uma dureza superior aos restantes pontos das outras linhas. A dureza ao longo de todo o provete é semelhante mesmo na zona da soldadura, existindo apenas uma maior dispersão nos pontos dureza das 3 linhas do lado de avanço em comparação com o lado de recuo. Na região da interface no lado do recuo, ocorre uma diminuição da dureza da linha cima, num pequeno espaço, cerca de 3mm.

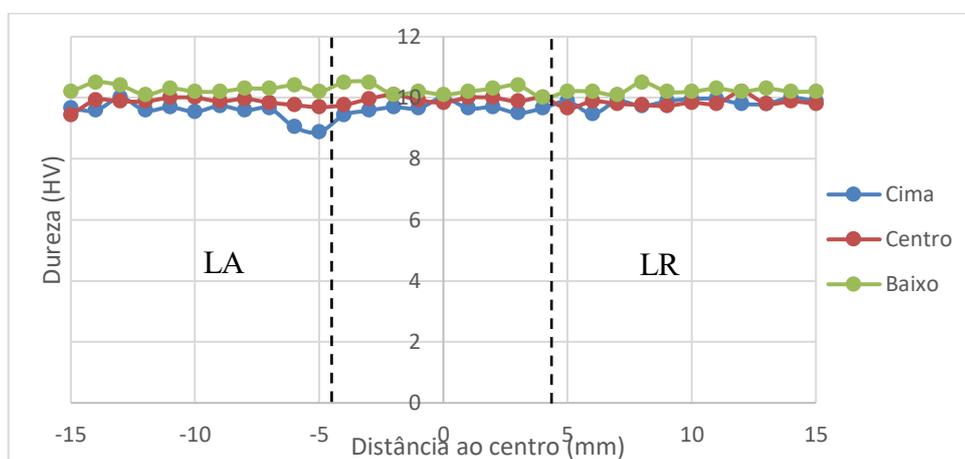


Figura 35. Resultados dos ensaios da dureza do provete ABS06-M($w1500v60p5,9$).

O gráfico seguinte, da Figura 36, representa a dureza média da zona da soldadura em função da razão, velocidade de rotação por velocidade de avanço. Os pontos de cada linha apresentados a baixo, representam a dureza média na zona da soldadura, mas com a exclusão dos pontos de dureza muito baixa, tendo essas indentações sendo realizadas as zonas de muita porosidade.

Nas três primeiras razões (w/v), que correspondem a uma velocidade de avanço constante de 120mm/min, apresentam razões de 7,25, 9,5 e 12,5rot/mm, dando origem a um aumento de energia adicionada, respetivamente. É observado a partir do gráfico abaixo, que a dureza média dos 3 pontos de cada razão, diminui à medida que a razão aumenta, também sendo visível que o conjunto de pontos de razão 9,5rot/mm e 12,5rot/mm apresentam durezas médias em cada linha muitas dispersas em comparação com os pontos das outras razões. Para razões de 14,5, 19,5 e 25rot/mm, o valor da dureza média é muito próximo uns dos outros, não variando muito à medida que o calor adicionado é maior. Sendo a dureza média

máxima da zona da soldadura, verificada onde a adição de calor é maior, razão 25, corresponde a uma velocidade de rotação de 1500rpm e uma velocidade de avanço de 60mm/min, ou seja, a série de soldadura ABS06.

Na teoria à mediada que a razão w/v aumenta, o calor adicionado também aumenta, fazendo com que exista um aumento de cristalinidade em relação ao material base, dando origem a um aumento da dureza, não sendo isto verificado ao longo do gráfico.

Comparando a dureza da zona de mistura com a dureza média do material base, é verificado que não existe nenhum aumento de dureza, podendo ser concluído que no ABS, o aumento da razão w/v não provoca o aumento da dureza. A dureza da zona soldada é muito semelhante à dureza do material base, não tendo a temperatura neste caso qualquer influência com a dureza da zona soldada.

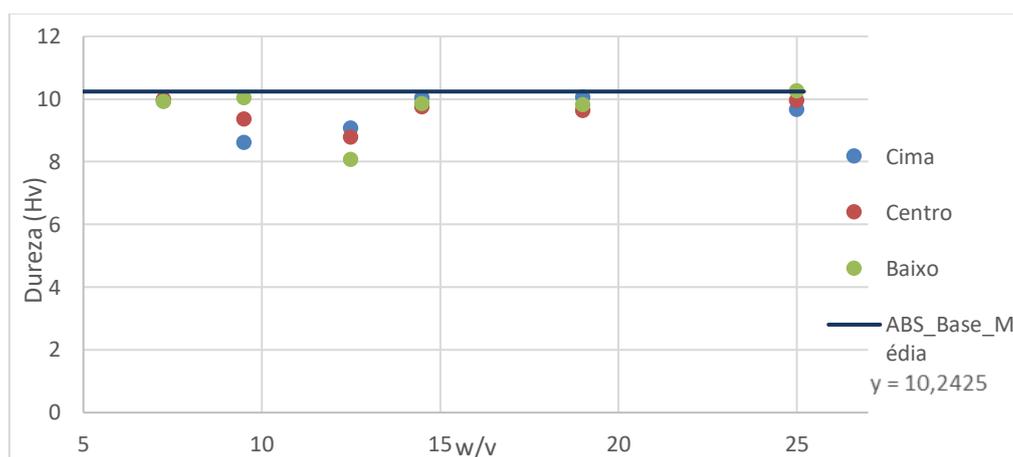


Figura 36. Comparação resultados, dureza média na zona da soldadura em função da razão da velocidade de rotação por a velocidade de avanço.

4.4. Comportamento à tração

Neste subcapítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos em ensaios de tração de todas as séries de soldaduras realizadas, tendo sido ensaiado dois provetes de cada série, bem como provetes de material base, para se ter uma base de comparação.

Os gráficos dos ensaios de tração apresentam a resistência à tração (MPa) em função do alongamento (mm). A máquina de ensaios à tração aplica uma força de tração ao provete, por isso para obtermos a resistência à tração em cada deslocamento do travessão, é necessário dividir essa mesma força pela área útil da secção do provete. Os gráficos são

apresentados em alongamento(mm) em vez de deformação (%), pois as soldaduras são heterogêneas, levando à concentração de deslocamentos na zona da soldadura. Neste caso obtém-se uma deformação muito inferior ao do material base, pois a zona útil do provete base é muito superior à dos provetes soldados, sendo nestes apenas a zona da soldadura.

4.4.1. Polietileno

Inicialmente foram realizados ensaios a tração ao material base, PE, cujo gráfico se encontra na Figura 37, de forma a servir de comparação com os provetes soldados. O material base, PE, apresenta uma resistência à tração de 23,97 MPa e um alongamento de pelo menos 500mm, sem que ocorra rotura, correspondendo a um alongamento de mais de 714%, pois o comprimento de referência era de aproximadamente 70mm. Isto mostra a elevada ductilidade deste polímero.

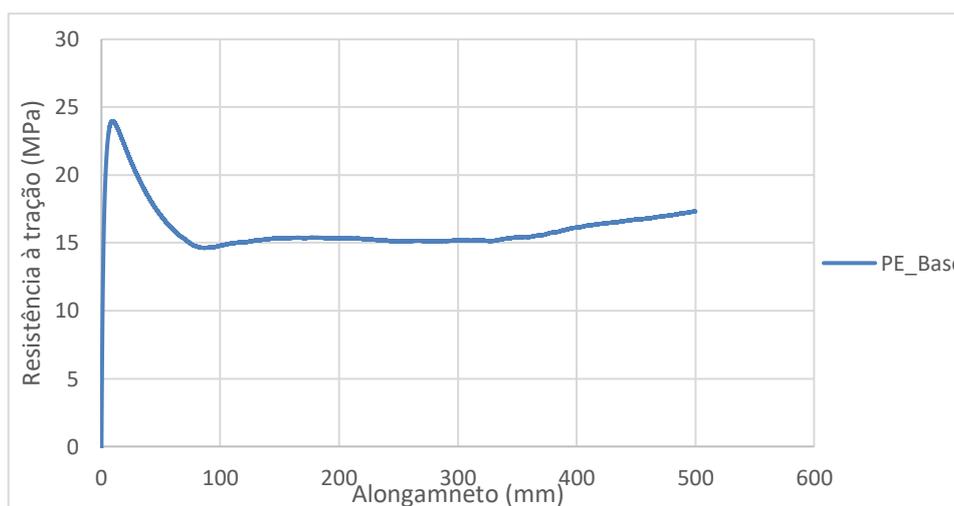


Figura 37. Curva tensão – alongamento do material base.

Na Tabela 6, encontram-se resumidas todas as séries de soldaduras realizadas, bem como os valores de tensão de rotura, o alongamento até rutura, a eficiência de soldadura e também a região do provete onde ocorre a rotura. A eficiência de soldadura é definida como a razão entre a resistência da soldadura e a resistência do material base. A partir dos dados da tabela, que foram retirados das curvas de tração, constata-se que a região de rotura é sempre no lado do recuo, como pode ser visualizado no Apêndice E, pois, é o lado onde se encontra a maior concentração de defeitos, devido a má mistura de material. A resistência à tração das séries das soldaduras é inferior à resistência à tração do material base, sendo a série PE02-P4, com uma velocidade rotação de 1500rpm e uma velocidade de avanço de

60mm/min ($w/v=25\text{rot/mm}$), a que apresenta a maior resistência a tração de 22,06MPa e um alongamento de 3,99mm. Esta série tem uma eficiência de soldadura de 92,0%, sendo também a série de soldadura com maior alongamento. A série PE04, realizada com $w/v = 7,25\text{rot/mm}$, inferior que o rácio anterior, apresentou uma eficiência de junta e um alongamento muito inferior. Isto remete que calor adicionado tem uma grande influência no comportamento mecânico das soldaduras.

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

| Série da soldadura | w/v (rot/mm) | Tensão máxima (MPa) | Alongamento (mm) | Eficiência (%) | Região de rotura |
|--------------------|--------------|---------------------|------------------|----------------|------------------|
| PE Base | --- | 23,97 | 500 | ---- | --- |
| PE01-P1 | 19 | 6,27 | 0,01 | 26,2% | LR |
| PE01-P4 | 19 | 5,82 | 0,049 | 24,2% | LR |
| PE02-P3 | 25 | 16,17 | 1,84 | 67,5% | LR |
| PE02-P4 | 25 | 22,06 | 3,99 | 92,0% | LR |
| PE03-P3 | 14,5 | 4,08 | 0,35 | 17,0% | LR |
| PE03-P4 | 14,5 | 14,12 | 1,42 | 58,9% | LR |
| PE04-P1 | 7,25 | 5,10 | 1,13 | 21,3% | LR |
| PE04-P2 | 7,25 | 4,86 | 1,04 | 20,3% | LR |
| PE05-P2 | 9,5 | 7,24 | 0,62 | 30,2% | LR |
| PE05-P3 | 9,5 | 10,52 | 0,88 | 43,9% | LR |
| PE06-P1 | 12,5 | 18,10 | 2,28 | 75,5% | LR |
| PE06-P3 | 12,5 | 15,16 | 1,61 | 63,2% | LR |

Os provetes ensaiados tiveram diferentes comportamentos de falha, tendo sido caracterizados pelo seu alongamento após atingir a tensão máxima. O primeiro tipo de falha é caracterizado por uma quebra repentina da força, quando o provete atinge a tensão máxima, observado por exemplo na série de soldadura PE02-P3. O segundo tipo de falha é referente aos provetes que apresentam um menor valor de alongamento antes de atingir a tensão máxima e uma maior ductilidade do que o primeiro, e após a perda repentina de resistência, estes continuam-se a deformar plasticamente. Este modo, pode ser observado na série de soldadura PE05-P2. O terceiro tipo de falha é fratura dúctil, apresentado os provetes na zona da solda uma certa capacidade de deformação plástica, observando-se por exemplo na serie de soldadura PE04-P1.

O grafico, da Figura 38, é um exemplo de uma curva de tração, de um provete, da série de soldadura PE06-P1. Neste caso em concreto, é possível observar que a curva de resistência à tração é não linear, apresentando o segundo comportamento de falha referido acima. Um valor tensão máxima de 18,1MPa e um alongamento de 2,28mm foram obtidos

neste caso. Os restantes gráficos de tração com a respetiva foto da rotura estão no Apêndice F.

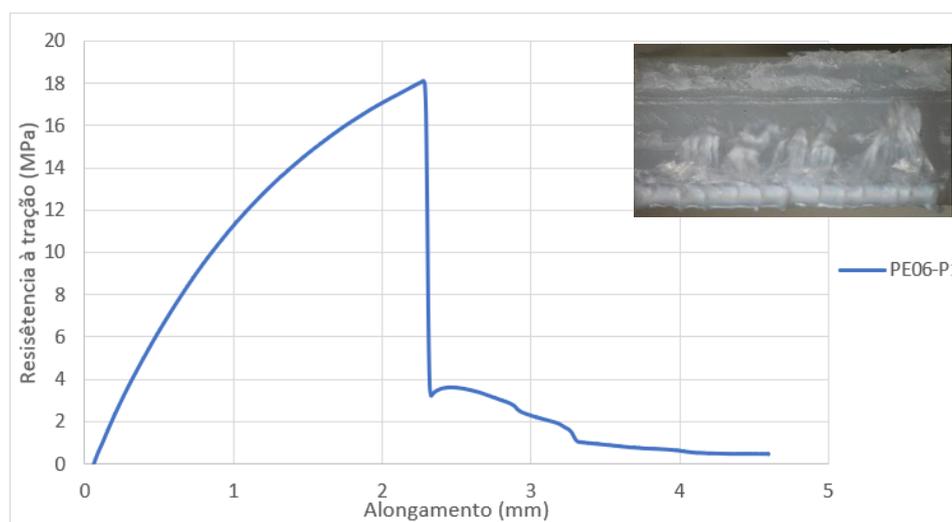


Figura 38. Curva tensão - alongamento da série de soldura PE06-P1.

A Figura 39 ilustra a variação da resistência à tração com a velocidade de rotação da ferramenta. Neste caso foi considerado o valor médio da tensão máxima das curvas de resistência à tração de cada série. Como está representado na Figura 39, quando a velocidade de avanço é de 120mm/min a tensão de rotura aumenta à medida que a velocidade de rotação também aumenta, sendo visível um aumento acentuado quando é aplicado a velocidade de rotação de 1500rpm. Quando a velocidade de avanço é de 60mm/min, existe uma pequena diminuição da tensão de rotura quando a velocidade de rotação é aumentada de 870rpm para 1140rpm, mas quando é aumentada para 1500rpm ocorre um aumento acentuado da tensão de rotura. Tendo a curva a azul do gráfico, que representa 60mm/min, uma maior tensão de rotura em relação à curva dos 120mm/min, apenas no ponto de 1140rpm, é que existe uma pequena perda de resistência à tração máxima. Sendo isto espectável pois o calor adicionado pela ferramenta é maior para velocidade de avanço menores.

Assim, pode concluir-se que o aumento de rotação gerou uma maior quantidade de calor, dando origem a um fluxo de polímero suficiente na zona de agitação, evitando assim o número de defeitos, aumentando a resistência das soldaduras. De facto, tendo em consideração as tomografias apresentadas acima, as soldaduras realizadas com maior calor adicionado têm tendência a ter menos defeitos de falta de fusão.

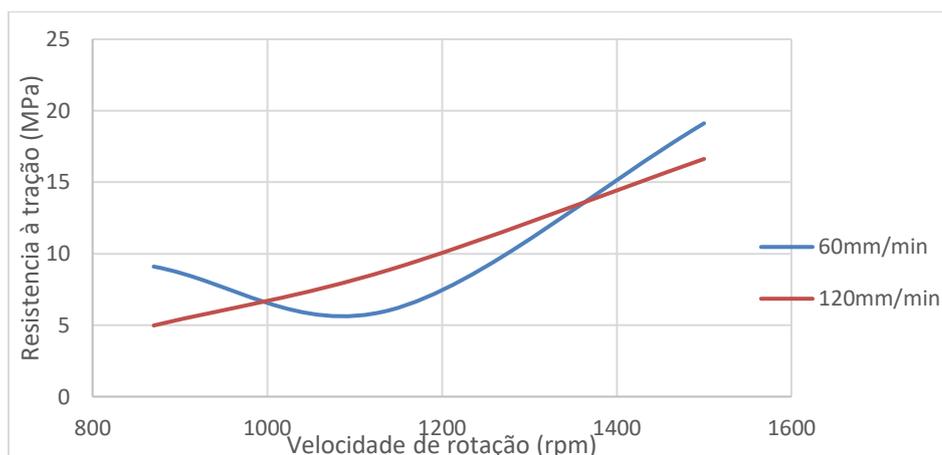


Figura 39. Efeito da velocidade de rotação na resistência à tração máxima.

Eslami *et al.* [49] realizaram também soldaduras em polietileno sem adição de calor externo e obtiveram uma eficiência de junta de 96,9%, com uma velocidade de avanço de 70mm/min e uma velocidade de rotação de 2500rpm. É preciso ter em atenção que nesta ferramenta existe uma chumaceira em latão contra a qual roda o pino, e que gera calor, não é só o atrito entre o pino e o polímero.

Bozkurt [39] concluiu que os parâmetros ideais para a soldadura de polietileno era 3000rpm de velocidade de rotação, 115mm/min de velocidade de avanço e um ângulo de 3° , obtendo uma eficiência de junta de 86,2%. Os resultados obtidos neste trabalho não foram muito diferentes os existentes na literatura, tendo obtido uma eficiência de junta máxima de 92,0% para uma velocidade de avanço de 60mm/min e uma velocidade de rotação de 1500rpm, embora seja apenas um resultado.

Na Figura 40, esta representada a distribuição do campo de deformações locais e a zona de fratura de um provete, mas propriamente da série PE06-P1, ensaiado à tração. O mapa de cores, foi obtido através de extensometria ótica com sistema 3D ARAMIS.

Os resultados ilustrados na Figura 40, mostram que existe uma zona do mapa de deformações locais, que apresenta maior magnitude e concentração de deformações, estando essa zona circundada a vermelho. A fratura do provete ocorreu na zona de interface da zona soldadura com a zona exterior, no lado do recuo. Os restantes mapas de deformações locais encontram-se no Apêndice G.

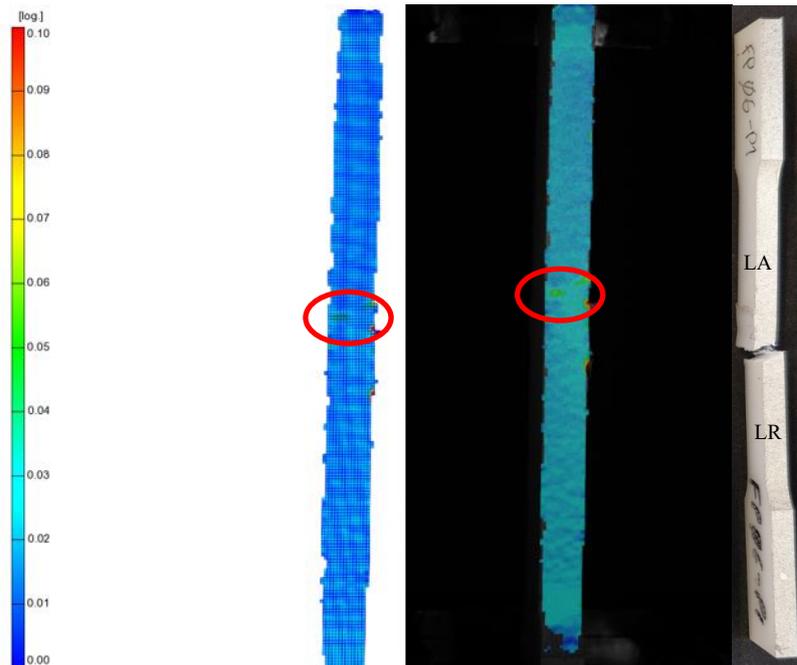


Figura 40. Mapeamento das deformações locais, no instante próximo da rotura, na série PE06-P1.

4.4.2. Acrilonitrila butadieno estireno

A curva de tração de um provete de material base ABS, está representada na Figura 41. A partir da figura verifica-se que o material base apresenta uma resistência à tração de 28,29MPa, tendo um alongamento de 2,06mm nesse ponto. A partir desse ponto de tensão máxima, o valor da resistência a tração diminui até por volta de 24MPa, estabilizando até ocorrer rotura, com um alongamento de 32,05mm, apresentando o material boa ductilidade.

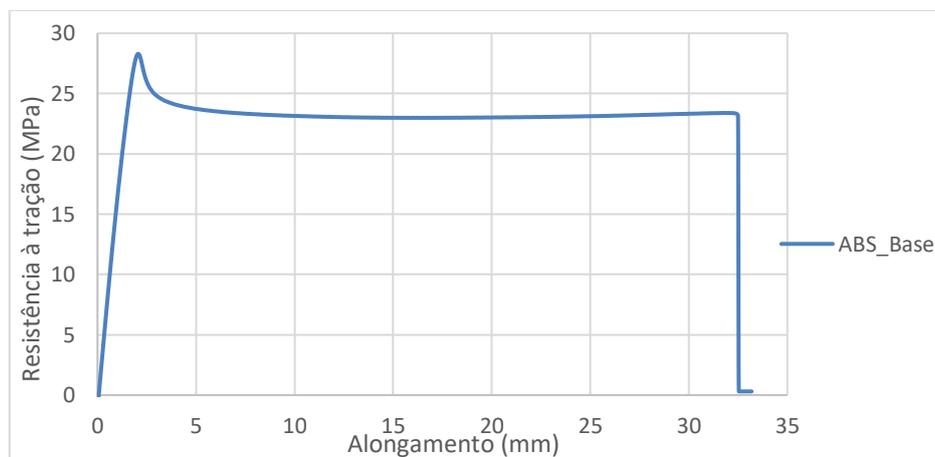


Figura 41. Curva tensão – alongamento do material base.

Na Tabela 7 estão representadas as principais propriedades mecânicas, retiradas dos ensaios de tração a que os provetes soldados foram sujeitos, tais como a tensão máxima,

o alongamento, a eficiência da junta e região de rotura. Observando a tabela, é possível constatar que a resistência a tração máxima de qualquer uma das séries é inferior à tensão máxima do material base, ou seja, a eficiência de junta é inferior a 100%. Deste conjunto de séries de soldadura, aquela que apresenta uma maior eficiência é a série ABS05, que corresponde a uma velocidade de rotação de 1140rpm e uma velocidade de avanço de 60mm/mim ($w/v = 19\text{rot/mm}$), tendo o provete P4 uma eficiência de 59,53% e um alongamento de 1mm. A série ABS06, realizada com $w/v = 25\text{rot/mm}$, ainda mais elevada que a anterior, apresentou eficiência de junta e alongamento semelhantes. Isto sugere que o calor adicionado na soldadura tem grande influência no comportamento mecânico das soldaduras. De facto, na secção 4.2.2 mostrou-se que o aumento da razão w/v , ou seja, do calor adicionado reduz o nível de porosidade na soldadura, o que afeta o comportamento mecânico das soldaduras.

Tabela 7. Propriedades mecânicas resultantes dos ensaios de tração das séries de soldadura de ABS.

| Série da soldadura | w/v (rot/mm) | Tensão máxima (MPa) | Alongamento (mm) | Eficiência (%) | Região de rotura |
|--------------------|--------------|---------------------|------------------|----------------|------------------|
| ABS Base | --- | 28,29 | 32,05 | --- | --- |
| ABS01-P2 | 12,5 | 8,61 | 0,51 | 30,43 | LR |
| ABS01-P3 | 12,5 | 5,40 | 0,36 | 19,09 | LR |
| ABS02-P2 | 9,5 | 6,11 | 0,37 | 21,60 | LR |
| ABS02-P3 | 9,5 | 7,08 | 0,46 | 25,03 | LR |
| ABS03-P1 | 7,25 | 3,38 | 0,53 | 11,95 | LR |
| ABS03-P2 | 7,25 | 7,93 | 0,51 | 28,03 | LR |
| ABS04-P2 | 14,5 | 3,92 | 0,70 | 13,86 | LR |
| ABS04-P4 | 14,5 | 5,42 | 0,36 | 19,16 | LR |
| ABS05-P3 | 19 | 15,98 | 0,96 | 56,49 | LR |
| ABS05-P4 | 19 | 16,84 | 1,02 | 59,53 | LR |
| ABS06-P2 | 25 | 14,08 | 0,89 | 49,77 | LR |
| ABS06-P4 | 25 | 16,13 | 1,00 | 57,02 | LR |

Como pode ser visualizado no Apêndice H, em todas as séries de soldadura, a região onde ocorreu a rotura é sempre no lado do recuo, pois é lado onde se encontra uma maior concentração de defeitos, resultado de mau fluxo de mistura do polímero, devido à temperatura ser insuficiente nesta região. Os provetes ensaiados tiveram diferentes comportamentos de falha, tendo sido caracterizados pelo seu alongamento após atingir a tensão máxima, devido a quantidade de calor gerado e a velocidade de soldadura. O primeiro tipo de falha é caracterizado por uma quebra repentina da força, quando o provete atinge a tensão máxima, observado por exemplo na soldadura ABS06-P4. O segundo tipo de falha é

referente aos provetes que apresentam um menor valor de alongamento antes de atingir a tensão máxima e uma maior ductilidade do que o primeiro, após a quebra súbita estes continuam a deformar-se plasticamente, podendo ser observado na soldadura ABS03-P2.

A Figura 42 apresenta um exemplo de uma curva de tração, mais concretamente a curva de tração da soldadura ABS05_P4. Neste gráfico é visível que a curva de tensão aumenta de forma linear, até atingir o ponto de resistência à tração máxima, ocorrendo de seguida rotura, tendo esta soldadura um comportamento frágil, que corresponde ao primeiro tipo de falha. A resistência à tração máxima neste caso é de 16,84MPa e o alongamento máximo de 1,02mm. As restantes curvas das series de ABS estão apresentadas no Apêndice I.

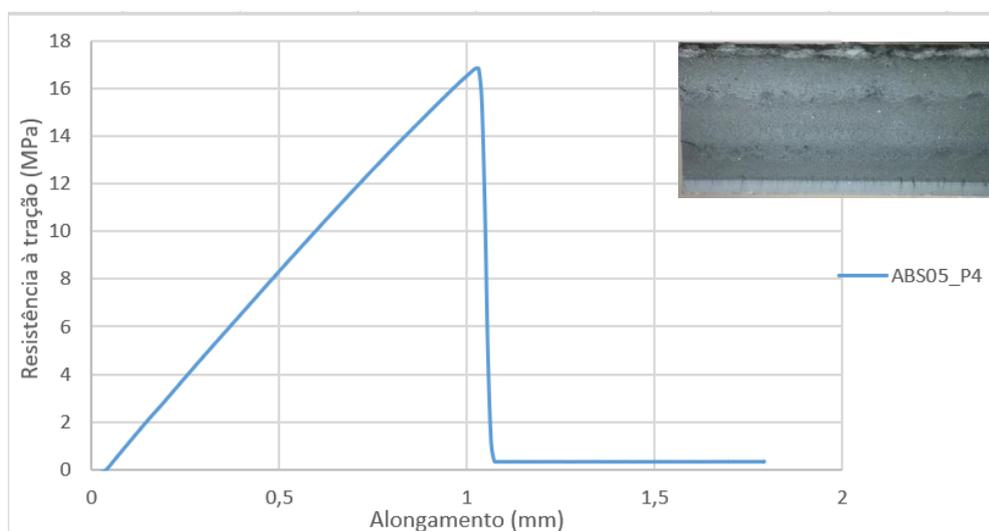


Figura 42. Curva tensão - alongamento da soldura ABS06-P4.

A Figura 43 ilustra a variação da resistência da soldadura em função da velocidade de rotação da ferramenta para cada velocidade de soldadura. Para o traçado destas curvas foram considerados os valores médios das curvas de tração para cada série de soldadura. Na figura é possível visualizar que, para uma velocidade de avanço de 60mm/min, o valor da tensão máxima aumenta de 870rpm para 1140rpm de uma forma acentuada, sendo este o ponto de tensão máxima desta série de soldaduras, correspondente à soldadura ABS05. De seguida quando é adicionado mais calor, ou seja, a ferramenta tem uma velocidade de rotação de 1500rpm, existe uma ligeira perda de resistência à tração. Para uma velocidade de avanço de 120mm/min, à medida que a velocidade de rotação aumenta, a resistência a tração máxima também aumenta, mas de uma forma suave. A curva

vermelha como o calor adicionado é inferior a curva azul esta apresenta valores de tensão máxima muito inferiores à curva que tem velocidade de avanço de 60mm/mim, expecto quando a velocidade é de 870rpm, que a curva vermelha exibe um valor resistência à tração máxima ligeiramente superior.

Assim pode-se concluir quanto menor a velocidade de avanço, maior o valor da tensão máxima, pois ocorre uma adição de calor maior. E que o aumento da rotação gerou uma maior quantidade de calor, originando uma maior quantidade de fluxo de polímero, que evitando o número de defeitos na zona de mistura, ocorrendo o aumento da resistência à tração.

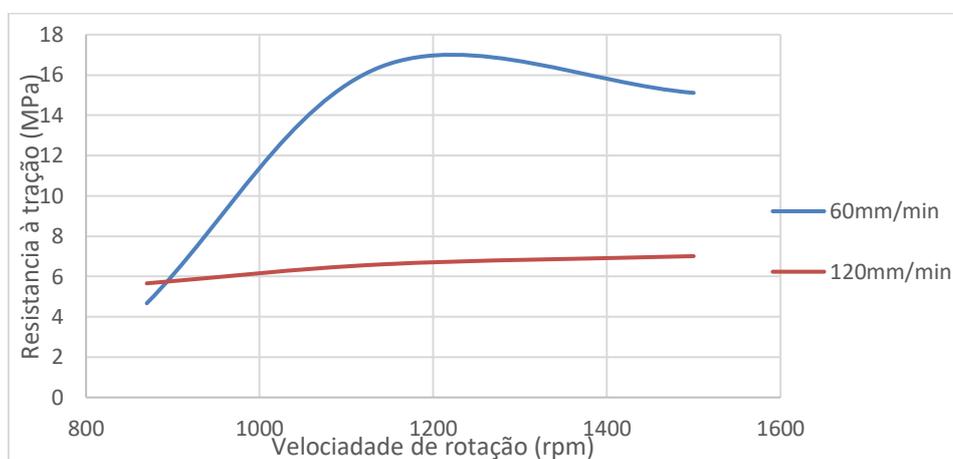


Figura 43. Efeito da velocidade de rotação e da velocidade de soldadura na resistência à tração máxima.

Baheri *et al.* [43] que realizam soldaduras de placas de ABS com adição de calor externo, concluíram que a eficiência das soldaduras é superior a obtida em soldaduras sem adição externa de calor. Além disso verificaram que os parâmetros ideais para se obter uma eficiência de soldadura de 88,8%, eram uma velocidade de rotação de 1600rpm, uma velocidade de deslocamento de 20mm/min e uma temperatura de aquecimento externo de 100°C.

Mendes *et al.* [30] soldaram placas a topo de ABS com 6mm de espessura, utilizando uma ferramenta idêntica à utilizada nesta dissertação, sem a adição de calor exterior, tendo obtido uma eficiência de junta de 68%. Os parâmetros utilizados para obter esta eficiente foram uma velocidade e rotação de 1500rpm e um a velocidade de avanço de 100mm/mim.

Os resultados obtidos nesta dissertação não foram muito diferentes os existentes na literatura, para soldaduras sem adição de calor externo, tendo obtido uma eficiência de junta máxima de 59,53%, quando a velocidade de rotação é de 1140rpm, e a velocidade e avanço é de 60mm/min.

Na Figura 44, está representado um exemplo da distribuição do campo de deformações locais, do provete ABS06-P4, ensaiado à tração. Como já referido, os mapas de cores foram obtidos através da extensometria ótica com o sistema 3D ARAMIS. Os restantes mapas de deformações locais encontram-se no Apêndice J.

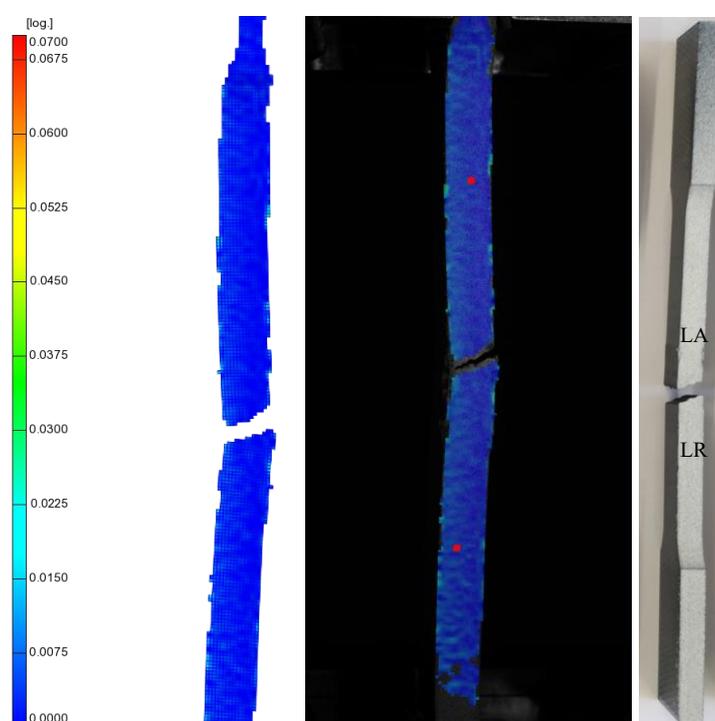


Figura 44. Mapeamento das deformações locais, no instante em que ocorre a rotura, no provete ABS05-P4.

Na figura acima é visível que todo o mapa de deformações para a escala representada exhibe a quase a mesma tonalidade em todo o provete. O mapa de deformações no instante da rutura, apresenta já o provete fraturado, e no instante imediatamente antes o provete não apresenta qualquer deformação, o que indica uma rotura frágil.

A Figura 45 representa quatro curvas tensão-deformação, uma de cada polímero analisado, e duas curvas de soldadura, uma para cada tipo de material. A deformação foi obtida, a partir de um extensómetro virtual produzido pelo software do ARAMIS, obtendo a deformação de toda zona útil do provete em percentagem.

De notar que curva do PE base tem um comportamento extremamente dúctil, tendo uma grande percentagem de alongamento. Apenas está representado no gráfico, um alongamento até 10%, pois, a partir desse valor, a resistência à tração estabiliza, até ocorrer a rotura. Por seu lado a ABS apresenta maior resistência mecânica, mas menor capacidade de alongamento que o PE.

A figura mostra também que o provete PE02_P4, extraído de uma soldadura ao PE, apresenta maior percentagem de deformação até ocorrer rotura em comparação com a soldadura ABS05_P4, realizada em ABS, embora a soldadura em ABS até apresente resistência mecânica mais elevada.

Comparando a curva do material base de ABS, com o provete ABS05_P4 em ABS, é visível que o provete ABS05_P4 apresenta menor resistência mecânica e alongamento na rotura que o ABS.

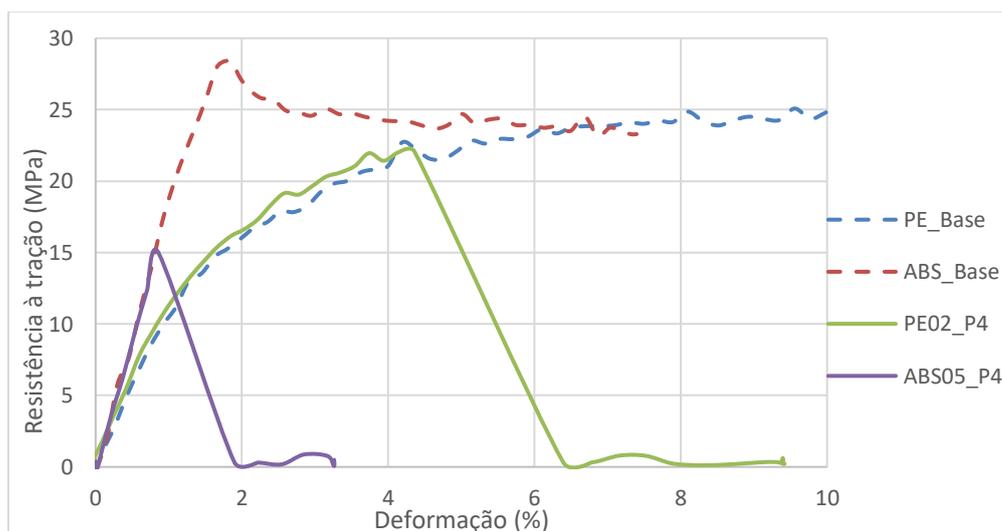


Figura 45. Curvas tensão-deformação de um exemplo de cada material soldado.

5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1. Conclusões

O trabalho realizado sobre a influência dos parâmetros de processo na qualidade de soldaduras FSW em Polietileno (PE) e Acrilonitrila butadieno estireno (ABS) permitiu extrair as seguintes conclusões:

- O aumento do rácio velocidade de rotação sobre velocidade de avanço da ferramenta (w/v) aumentou a temperatura nas soldaduras, sendo este aumento mais significativo nas soldaduras em ABS;
- Quanto maior o rácio (w/v), maior a adição de calor, o que vai reduzir as cavidades e falta de fusão nas soldaduras em PE e reduzir a porosidade nas soldaduras em ABS;
- O aumento do rácio w/v produz uma ligeira redução da dureza nas soldaduras em PE ao contrário das soldaduras em ABS, onde não ocorre alteração substancial;
- A eficiência de junta máxima é mais elevada nas soldaduras em PE do que nas soldaduras ABS, e aumenta à medida que o calor adicionado aumenta pois reduz-se o volume de defeitos na soldadura;
- Ocorre perda de ductilidade em todas as soldaduras, sendo essa perda para valores de deformação menores no caso das soldaduras em ABS.

5.2. Trabalhos futuros

O trabalho realizado evidenciou alguns aspetos que não estão convenientemente estudados, requerendo investigação futura:

- A análise da influência do calor adicionado, quer interna quer externamente, e das condições de arrefecimento, na microestrutura formada na soldadura;
- A análise detalhada dos mesmos fatores na tipologia, dimensão e localização dos defeitos na soldadura, em função do tipo de polímero;

- A influência desses defeitos no comportamento mecânico e modo de fratura das soldaduras.
- A análise da influência da força axial da ferramenta na morfologia e comportamento mecânico das soldaduras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. Sercer and P. Raos, ‘Joining of plastics and composites’, *Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)*. .
- [2] N. Amanat, N. L. James, and D. R. McKenzie, ‘Welding methods for joining thermoplastic polymers for the hermetic enclosure of medical devices’, *Medical Engineering and Physics*, vol. 32, no. 7. Elsevier, pp. 690–699, Sep. 01, 2010, doi: 10.1016/j.medengphy.2010.04.011.
- [3] D. Mishra, S. K. Sahu, R. P. Mahto, S. K. Pal, and K. Pal, ‘Friction Stir Welding for Joining of Polymers’, Springer, Singapore, 2019, pp. 123–162.
- [4] A. Zafar, M. Awang, and S. R. Khan, ‘Friction stir welding of polymers: An overview’, *Lect. Notes Mech. Eng.*, pp. 19–36, 2017, doi: 10.1007/978-981-10-4232-4_2.
- [5] ‘Introdução aos polímeros: 1.2.2 Termoplásticos e termofixos - OpenLearn - Open University - T838_1’. <https://www.open.edu/openlearn/science-maths-technology/science/chemistry/introduction-polymers/content-section-1.2.2> (accessed Jul. 15, 2021).
- [6] S. Regina *et al.*, ‘Avaliação de polímeros termoplásticos recicláveis como materiais componentes de telhas e tijolos 1’, *Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer*. 2010.
- [7] K. Van De Velde and P. Kiekens, ‘Thermoplastic polymers: overview of several properties and their consequences in flax fibre reinforced composites’, *Polymer Test.*, vol. 20, no. 8, pp. 885–893, Jan. 2001, doi: 10.1016/S0142-9418(01)00017-4.
- [8] J. Rotheiser, *Joining of Plastics Handbook for Designers and Engineers*, 3rd ed. Publishers, Hanser, 2004.
- [9] S. V Canevarolo, ‘Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros 3ª edição-3ª reimpressão revisada e ampliada’, 2002.
- [10] A. Bîrca, O. Gherasim, V. Grumezescu, and A. M. Grumezescu, ‘Introduction in thermoplastic and thermosetting polymers’, *Materials Biomedical Engineering Thermoset Thermoplastic Polymers*, pp. 1–28, Jan. 2019, doi: 10.1016/B978-0-12-

- 816874-5.00001-3.
- [11] A. Dotan, 'Handbook of Thermoset Plastics: Biobased Thermosets', *Handbook Thermoset Plastics (Third Ed., pp. 577–622, 2014.*
- [12] Peter Fratzl, Ingo Burgert, and H. S. Gupta, 'On the role of interface polymers for the mechanics of natural polymeric composites', *Physical Chemistry Chemical Physics*, vol. 6, no. 24, pp. 5575–5579, Dec. 2004, doi: 10.1039/B411986J.
- [13] M. R. Kessler, 'Polymer matrix composites: A perspective for a special issue of polymer reviews', *Polymer Reviews*, vol. 52, no. 3–4. Taylor & Francis Group , pp. 229–233, Jul. 01, 2012, doi: 10.1080/15583724.2012.708004.
- [14] M. Barmouz, P. Shahi, and P. Asadi, 'Friction stir welding/processing of polymeric materials', in *Advances in Friction-Stir Welding and Processing*, Elsevier Ltd, 2014, pp. 601–670.
- [15] S. Strand, 'Effects of Friction Stir Welding on Polymer Microstructure', *Theses Dissertations*, Feb. 2004.
- [16] Y. Huang *et al.*, 'Friction stir welding/processing of polymers and polymer matrix composites', *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 105. Elsevier Ltd, pp. 235–257, Feb. 01, 2018, doi: 10.1016/j.compositesa.2017.12.005.
- [17] S. Strand, 'Joining plastics - Can Friction Stir Welding compete?', in *Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing and Coil Winding Conference and Exhibition*, 2003, pp. 321–326, doi: 10.1109/eicemc.2003.1247904.
- [18] J. Soares, 'Comportamento mecânico de juntas coladas em concreto polimérico', *Theses Dissertations*, 2015.
- [19] V. K. Stokes, 'Joining methods for plastics and plastic composites: An overview', *Polymer Engineering and Science*, vol. 29, no. 19, pp. 1310–1324, Oct. 1989, doi: 10.1002/pen.760291903.
- [20] 'Hot Plate Welding'. <https://www.vimalgroup.co.in/index.php/hotplate-welding> (accessed Mar. 15, 2021).
- [21] O. Balkan, H. Demirer, and H. Yildirim, 'Morphological and mechanical properties of hot gas welded PE, PP and PVC sheets Manufacturing and processing', *Journal Achievements Materials Manufacturing Engineering*, vol. 31, no. 1, 2008.
- [22] S. Haque and M. A. Siddiqui, 'Plastic Welding: Important Facts and Developments', *American Journal Mechanical Industrial Engineering*, vol. 1, no. 2, pp. 15–19, Sep.

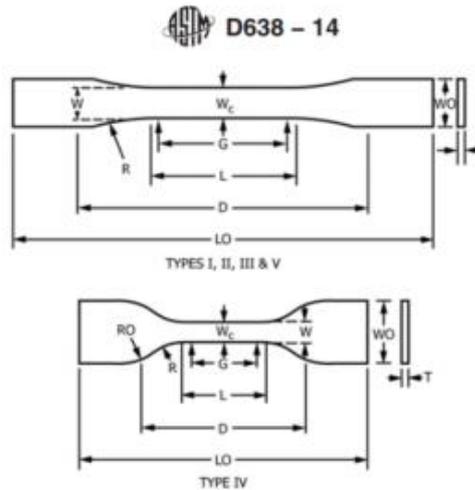
- 2016, doi: 10.11648/j.ajmie.20160102.12.
- [23] ‘Soldagem por Extrusão de Termoplásticos - TWI’. <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/extrusion-welding-of-thermoplastics-057> (accessed Mar. 16, 2021).
- [24] R. Truckenmüller, R. Ahrens, Y. Cheng, G. Fischer, and V. Saile, ‘An ultrasonic welding based process for building up a new class of inert fluidic microsensors and -actuators from polymers’, *Sensors and Actuators A Physical*, vol. 132, no. 1, pp. 385–392, Nov. 2006, doi: 10.1016/J.SNA.2006.04.040.
- [25] D. Stavrov and H. E. N. Bersee, ‘Resistance welding of thermoplastic composites-an overview’, *Composites Part A Applied Science Manufacturing*, vol. 36, no. 1, pp. 39–54, Jan. 2005, doi: 10.1016/j.compositesa.2004.06.030.
- [26] The Association of Laser Users, ‘Laser welding plastics: A short guide’, *The Laser User, Issue 87*, 2018.
- [27] M. Speka, S. Mattei, M. Pilloz, and M. Ilie, ‘The infrared thermography control of the laser welding of amorphous polymers’, *NDT E Int.*, vol. 41, no. 3, pp. 178–183, Apr. 2008, doi: 10.1016/j.ndteint.2007.10.005.
- [28] B. Acherjee, ‘Laser transmission welding of polymers – A review on process fundamentals, material attributes, weldability, and welding techniques’, *J. Manuf. Process.*, vol. 60, pp. 227–246, Dec. 2020, doi: 10.1016/J.JMAPRO.2020.10.017.
- [29] R. Rodrigues, ‘Soldagem de placas de policarbonato pelo processo Friction Stir Welding (FSW): fabricação do dispositivo de fixação, ferramentas e testes preliminares’, *Theses and Dissertations*, 2017.
- [30] 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’, *Materials Design*, vol. 58, pp. 457–464, Jun. 2014, doi: 10.1016/j.matdes.2014.02.036.
- [31] S. Eslami, T. Ramos, P. J. Tavares, and P. M. G. P. Moreira, ‘Effect of Friction Stir Welding Parameters with Newly Developed Tool for Lap Joint of Dissimilar Polymers’, in *Procedia Engineering*, Jan. 2015, vol. 114, pp. 199–207, doi: 10.1016/j.proeng.2015.08.059.
- [32] V. Jaiganesh, B. Maruthu, and E. Gopinath, ‘Optimization of process parameters on friction stir welding of high density polypropylene plate’, in *Procedia Engineering*,

- Jan. 2014, vol. 97, pp. 1957–1965, doi: 10.1016/j.proeng.2014.12.350.
- [33] 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.
- [34] Z. Y. Ma, A. H. Feng, D. L. Chen, and J. Shen, ‘Recent Advances in Friction Stir Welding/Processing of Aluminum Alloys: Microstructural Evolution and Mechanical Properties’, *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, vol. 43, no. 4. Taylor and Francis Inc., pp. 269–333, Jul. 04, 2018, doi: 10.1080/10408436.2017.1358145.
- [35] J. Gao, X. Cui, C. Liu, and Y. Shen, ‘Application and exploration of friction stir welding/processing in plastics industry’, *Materials. Science Technology*, vol. 33, no. 10, pp. 1145–1158, Jul. 2017, doi: 10.1080/02670836.2016.1276251.
- [36] V. Sharma, U. Prakash, and B. V. M. Kumar, ‘Surface composites by friction stir processing: A review’, *Journal Materials Processing Technology*, vol. 224, pp. 117–134, May 2015, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2015.04.019.
- [37] P. Sas, S. Kadam, Y. Chavhan, M. Parate, O. Kotulkar, and V. S. Jatti, ‘Friction Stir Welding of Polymer: A Review’, *International Journal Advanced Research Science Engineering*, vol. 6, 2017.
- [38] J. C. Nelson TW, Sorenson CD, ‘Friction stir welding of polymeric materials.US Patent US6811632B2’, May 2004.
- [39] Y. Bozkurt, ‘The optimization of friction stir welding process parameters to achieve maximum tensile strength in polyethylene sheets’, *Materials and Design*, vol. 35, pp. 440–445, Mar. 2012, doi: 10.1016/j.matdes.2011.09.008.
- [40] A. Mostafapour and E. Azarsa, ‘A study on the role of processing parameters in joining polyethylene sheets via heat assisted friction stir welding: Investigating microstructure, tensile and ... Friction Stir Welding of Polymer Pipes View project’, 2012, doi: 10.5897/IJPS11.1653.
- [41] A. Mostafapour and F. Taghizad Asad, ‘Investigations on joining of Nylon 6 plates via novel method of heat assisted friction stir welding to find the optimum process parameters’, *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 21, no. 8, pp. 660–669, Nov. 2016, doi: 10.1080/13621718.2016.1169669.

-
- [42] N. Sadeghian and M. K. Besharati Givi, ‘Experimental optimization of the mechanical properties of friction stir welded Acrylonitrile Butadiene Styrene sheets’, *Materials and Design*, vol. 67, pp. 145–153, Feb. 2015, doi: 10.1016/j.matdes.2014.11.032.
- [43] A. Bagheri, T. Azdast, and A. Doniavi, ‘An experimental study on mechanical properties of friction stir welded ABS sheets’, *Materials Design*, vol. 43, pp. 402–409, Jan. 2013, doi: 10.1016/j.matdes.2012.06.059.
- [44] M. Rezaee Hajideh, M. Farahani, S. A. D. Alavi, and N. Molla Ramezani, ‘Investigation on the effects of tool geometry on the microstructure and the mechanical properties of dissimilar friction stir welded polyethylene and polypropylene sheets’, *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 26, pp. 269–279, Apr. 2017, doi: 10.1016/j.jmapro.2017.02.018.
- [45] 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’, *Materials and Design*, vol. 86, pp. 289–296, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.matdes.2015.07.095.
- [46] ‘Recurso de Informação de Materiais Online - MatWeb’. <http://www.matweb.com/> (accessed Aug. 02, 2021).
- [47] N. A. M. MENDES, ‘Robotic friction stir welding of polymers’, *Theses Diss.*, 2014.
- [48] M. Rezaee Hajideh, O. Shapurgan, N. M. Ramzani, and E. H. Nejad, ‘Friction Stir Welding of Dissimilar Poly Methyl Methacrylate and Polycarbonate Sheets’, 2017.
- [49] S. Eslami, J. F. Miranda, L. Mourão, P. J. Tavares, and P. M. G. P. Moreira, ‘Polyethylene friction stir welding parameter optimization and temperature characterization’, doi: 10.1007/s00170-018-2504-x.

ANEXO A

a) Dimensões dos provetes



Specimen Dimensions for Thickness, T , mm (in.)^A

| 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 ^B | Type V ^{C,D} | | |
| W —Width of narrow section ^{E,F} | 13 (0.50) | 6 (0.25) | 19 (0.75) | 6 (0.25) | 3.18 (0.125) | ± 0.5 (± 0.02) ^{R,C} | |
| 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) ^C | |
| W_O —Width overall, min ^G | 19 (0.75) | 19 (0.75) | 29 (1.13) | 19 (0.75) | ... | + 6.4 (+ 0.25) | |
| W_O —Width overall, min ^G | ... | ... | ... | ... | 9.53 (0.375) | + 3.18 (+ 0.125) | |
| L_O —Length overall, min ^H | 165 (6.5) | 183 (7.2) | 246 (9.7) | 115 (4.5) | 63.5 (2.5) | no max (no max) | |
| G —Gage length ^I | 50 (2.00) | 50 (2.00) | 50 (2.00) | ... | 7.62 (0.300) | ± 0.25 (± 0.010) ^C | |
| G —Gage length ^I | ... | ... | ... | 25 (1.00) | ... | ± 0.13 (± 0.005) | |
| D —Distance between grips | 115 (4.5) | 135 (5.3) | 115 (4.5) | 65 (2.5) ^J | 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) ^C | |
| R_O —Outer radius (Type IV) | ... | ... | ... | 25 (1.00) | ... | ± 1 (± 0.04) | |

^AThickness, T , shall be 3.2 ± 0.4 mm (0.13 ± 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 ± 0.4 mm (0.55 ± 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.

^BFor the Type IV specimen, the internal width of the narrow section of the die shall be 6.00 ± 0.05 mm (0.250 ± 0.002 in.). The dimensions are essentially those of Die C in Test Methods D412.

^CThe 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 ± 0.001 in.),

$L = 9.53 \pm 0.08$ mm (0.375 ± 0.003 in.),

$G = 7.62 \pm 0.02$ mm (0.300 ± 0.001 in.), and

$R = 12.7 \pm 0.08$ mm (0.500 ± 0.003 in.).

The other tolerances are those in the table.

^DSupporting 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.

^EThe 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.

^FFor 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:

^GOverall widths greater than the minimum indicated are used for some materials in order to avoid breaking in the grips.

^HOverall lengths greater than the minimum indicated are used for some materials to avoid breaking in the grips or to satisfy special test requirements.

^ITest marks or initial extensometer span.

^JWhen 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

Tomografias da zona soldada, no material PE.

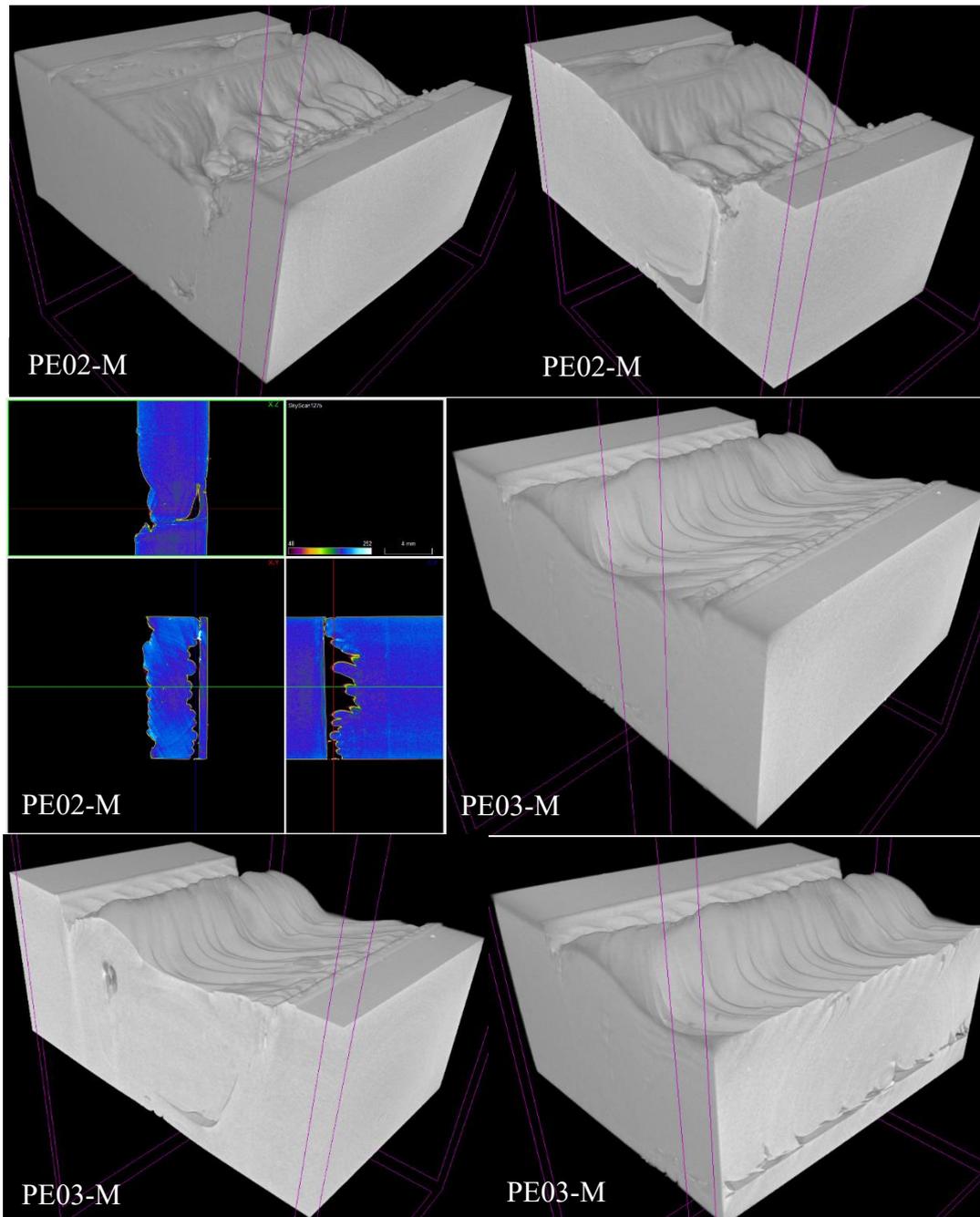


Figura A.1. Tomografias realizadas nas soldaduras PE02-M e PE03-M em PE, em corte transversal, longitudinal e de topo.

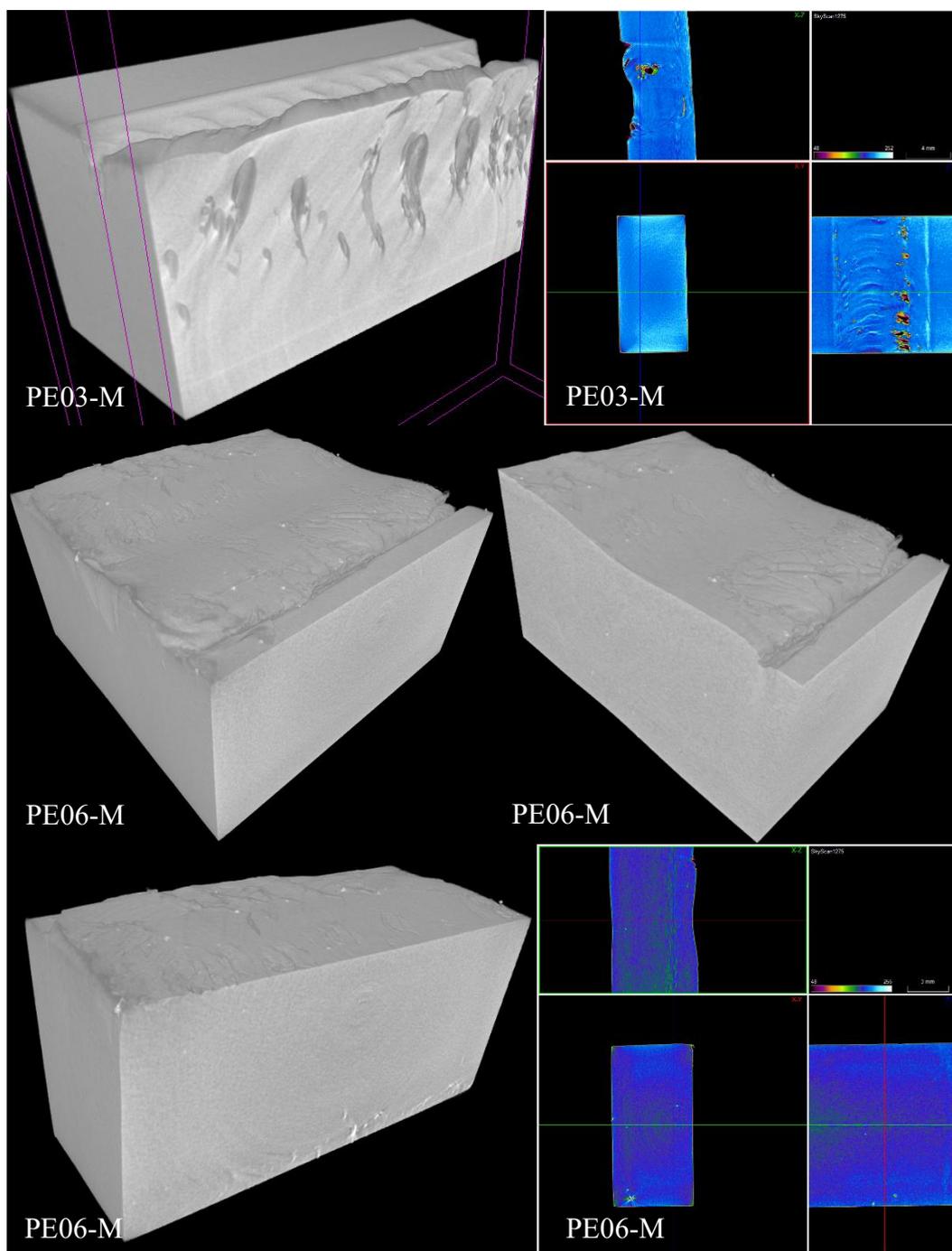


Figura A.2. Tomografias realizadas nas soldaduras PE03-M 3 e PE06-M em PE, em corte transversal, longitudinal e de topo.

APÊNDICE B

Tomografias da zona soldada, no material PE.

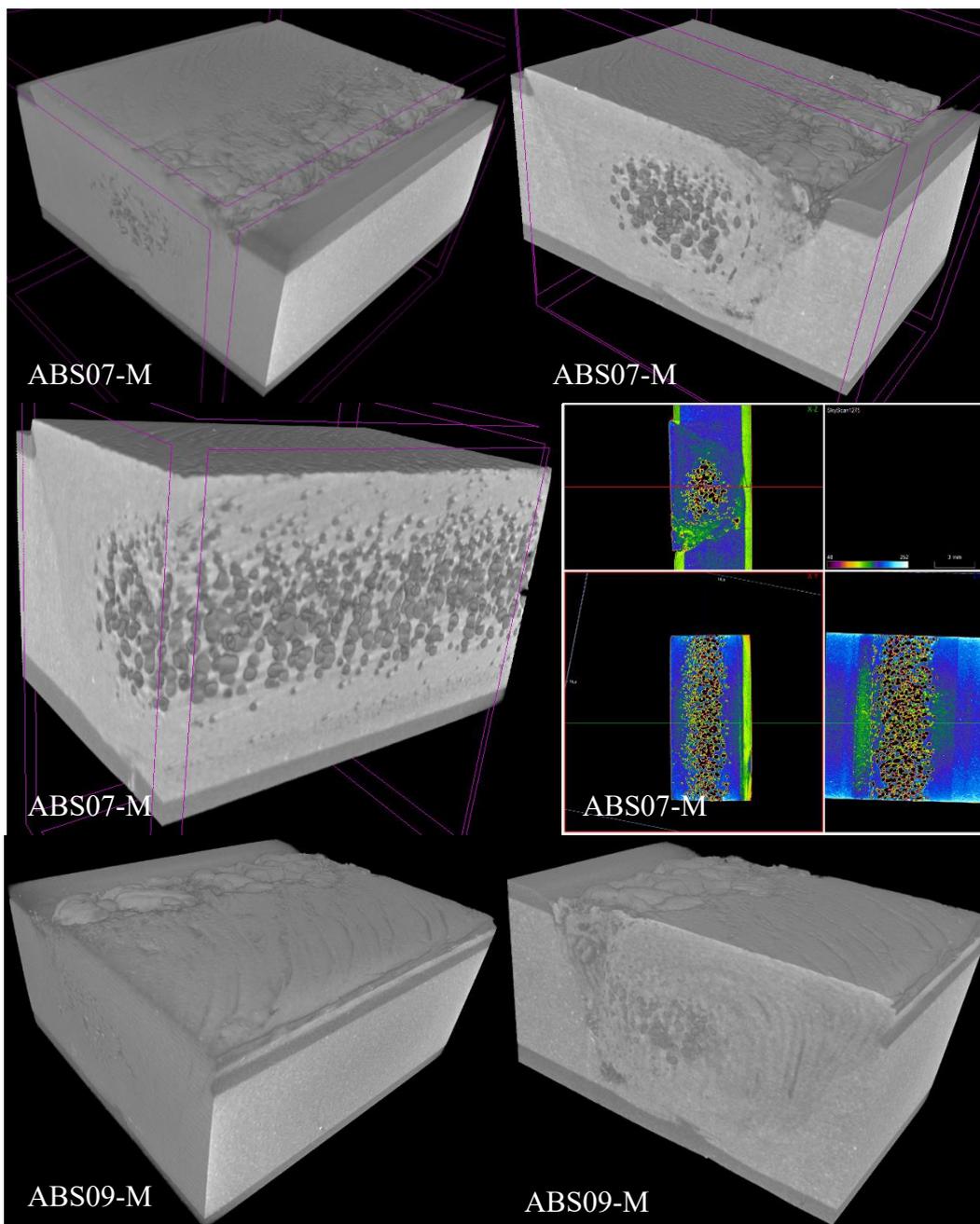


Figura B.1. Tomografias realizadas nas soldaduras ABS07-M e ABS09-M em ABS, em corte transversal, longitudinal e de topo.

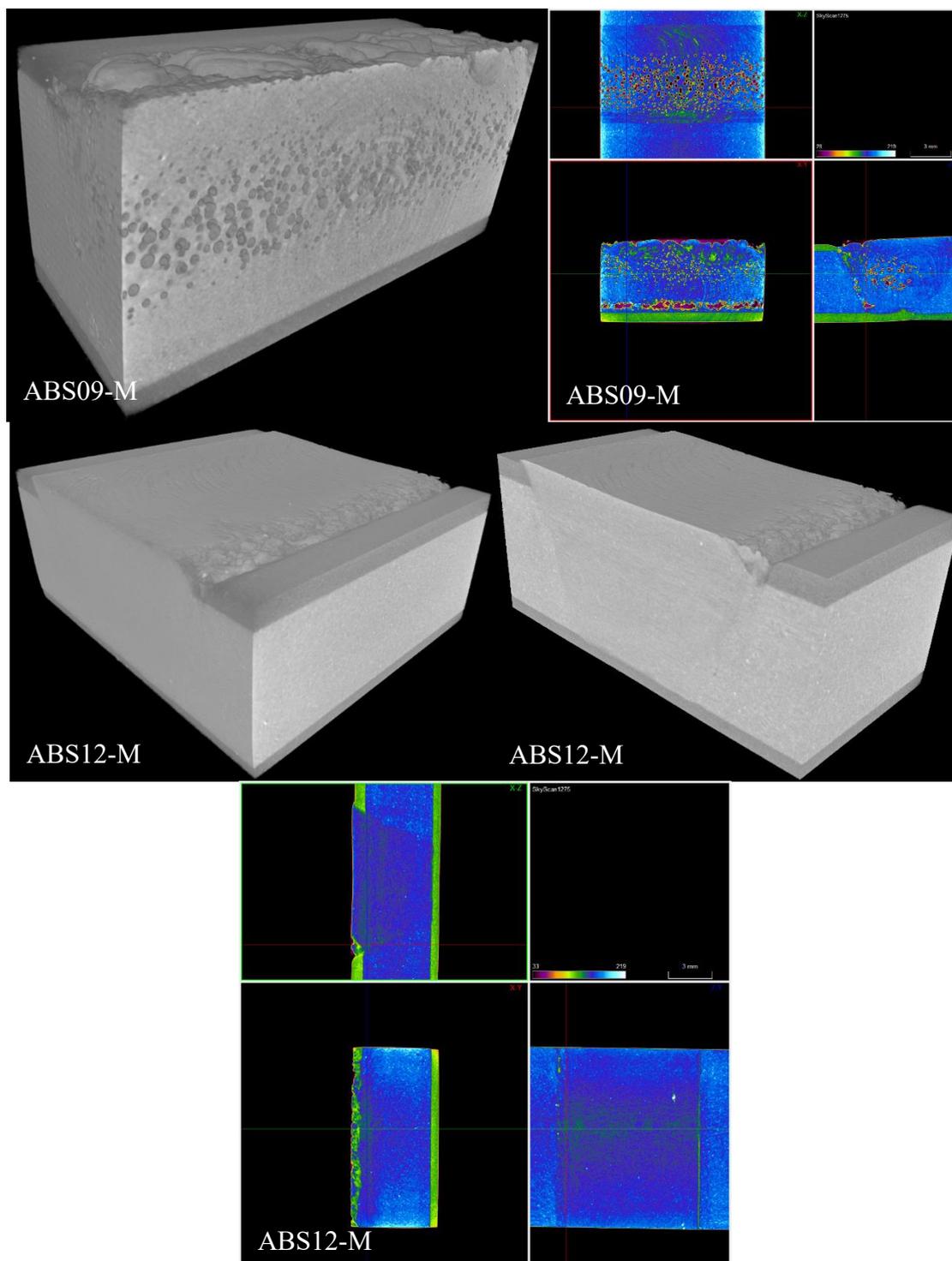


Figura B.2. Tomografias realizadas nas soldaduras ABS09-M e ABS12-M em ABS, em corte transversal, longitudinal e de topo.

APÊNDICE C

Na Figura C.1 pode ser observado que os pontos de dureza que estão fora da zona de soldadura, a qual esta delimitada por as duas retas verticais pretas, apresentam valores de dureza aproximados aos do material base, não tendo ocorrido alteração de dureza, pois a condutividade dos polímeros é reduzida. Na zona da soldadura é visível que a dureza na linha “cima” e na linha “centro” aumentou, certa de 25% em relação ao material base, obtendo-se os valores de dureza mais elevados no lado do avanço. O aumento da dureza esta relacionado com a cristalinidade, ao aumentarmos a temperatura polimerização provoca o aumento do peso molecular e o diâmetro das esferólitos, ocorrendo a mudança de um polímero frágil, para um polímero dúctil e resistente [49]. A linha de baixo a dureza na zona da soldadura é inferior ao do resto das linhas pois, a zona da raiz da soldadura normalmente é a qual que o calor adicionado é menor. Existe um ponto na linha verde que apresenta uma queda abrupta de dureza, isto pode ser justificado devido à existência zona de porosa tendo a indentação sido realizada numa cavidade. Nas zonas fora a soldadura estas apresentam um valor de dureza dentro do intervalo do material base.

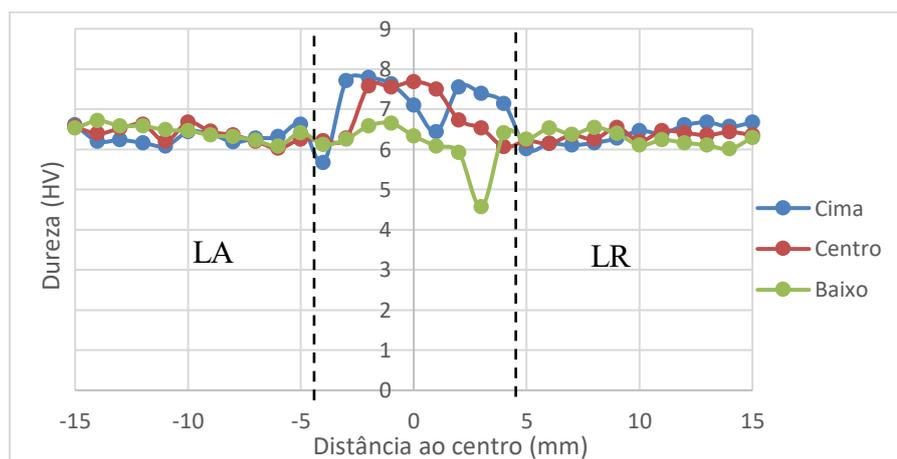


Figura C.1. Resultados dos ensaios da dureza do provete PE01-M(w1140v60p5,5).

O próximo gráfico, ilustrado na Figura C.2, a zona à esquerda da soldadura, LA, os valores de dureza encontram-se no mesmo intervalo do material base, como os valores do lado direito, LR, existe um ligeiro aumento dos valores da dureza em relação ao obtidos do

material base, isto pode ser devido as durezas das placas não serem homogêneas, ou então devido ao calor da base gerado por atrito. Na zona do “nugget” a dureza aumentou de ambas as linhas, existindo pontos, por exemplo na linha “baixo”, a 3mm do centro da soldadura, que apresenta um valor de dureza baixo, que pode estar relacionado com a porosidade na junta. Neste caso não foi verificado que quando se diminui a razão velocidade de rotação, velocidade de avanço (w/v), por sua vez o calor adicionado é menor, diminuindo o grau de cristalinidade e por sua vez a dureza diminui. Pois em comparação com a Figura 31, isso não aconteceu.

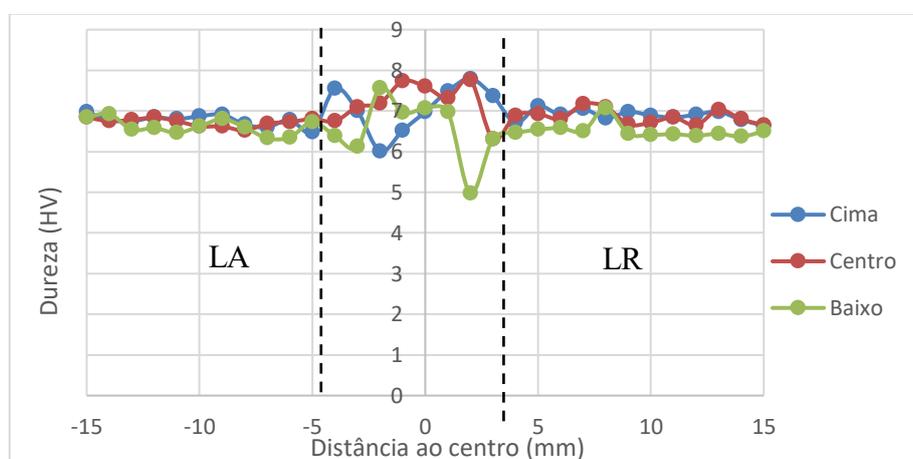


Figura C.2 Resultados dos ensaios da dureza do provete PE03-M(w870v60p5,7).

Os resultados obtidos na Figura C.3, na zona de mistura, os valores da dureza da linha “cima”, na extremidade oposta a da raiz, apresentam uma diminuição da em toda a região da soldadura, em relação as outras duas linhas, estas apresentam uma dureza superior em certas indentações às do material base.

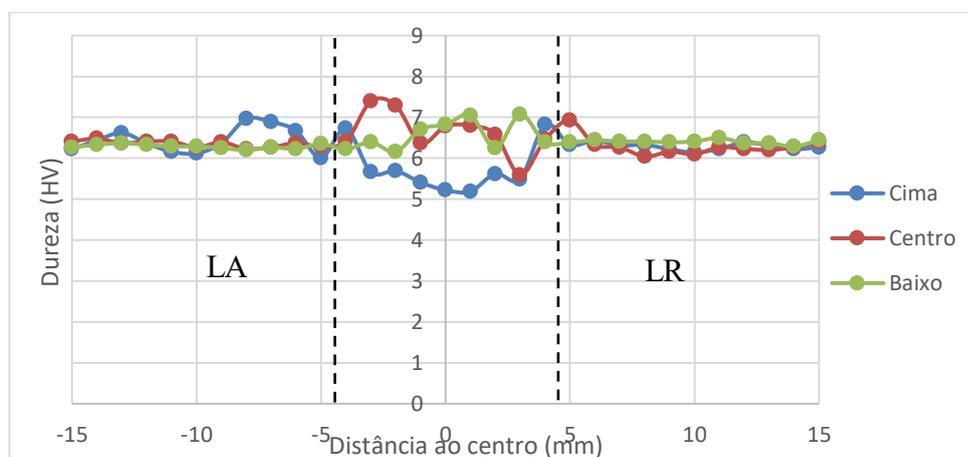


Figura C.3. Resultados dos ensaios da dureza do provete PE05-M(w1140v120p5,7-5,8).

Na Figura C.4, está representado um gráfico onde são apresentados valores de dureza, é observado que na zona da soldadura a linha “cima” apresenta a maior parte dos valores de dureza a baixo do intervalo de valores do material base, bem como a linha “centro” que tem os valores a baixo dos valores de dureza da zona externa a soldadura, no caso da linha “baixo”, estes valores são a cima dos valores da zona externa a soldados, tendo uma tendência crescente do lado do avanço para o lado do recuo. A linha de indentação “baixo”, fora da zona da soldadura apresenta um valor de dureza inferior em relação as outras duas linhas, comparando com os gráficos anteriores, tendo a maior diferença no lado do recuo.

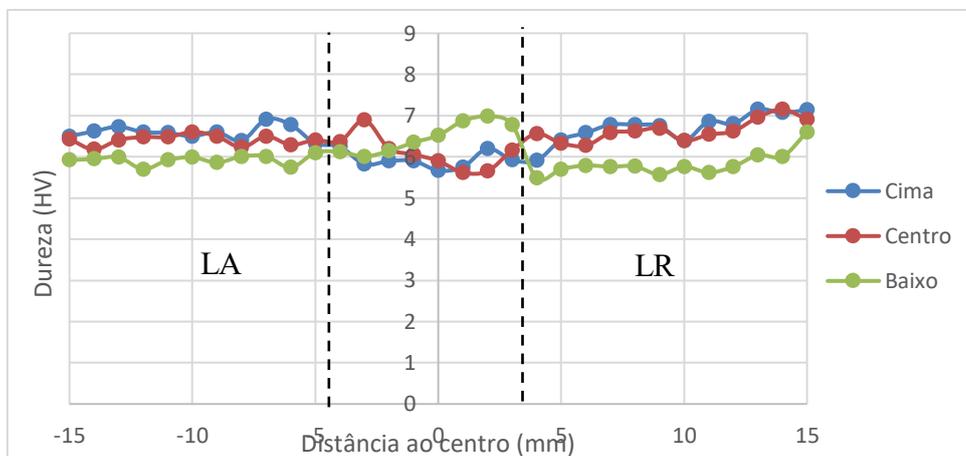


Figura C.4. Resultados dos ensaios da dureza do provete PE06-M(w1500v120p5,6-5,7).

APÊNDICE D

Na Figura D.1 é possível observar que os valores obtidos fora das linhas da tracejado, ou seja, a zona externa da zona da soldadura, do lado do avanço apresentam uma dureza inferior ao material base em todas as linhas, sendo a linha “baixo” a que apresenta uma menor dureza, não correspondendo ao que acontece no material base. No lado do recuo, na zona externa à zona da soldadura os valores da dureza de cada linha são muito dispersos uns dos outros. A dureza da linha “baixo” e a dureza da linha “cima”, são muito diferentes dos valores de dureza do lado de avanço, apenas o valor da dureza da linha “meio” se manteve constante em comparação da placa do lado de avanço, não tendo eu justificação para tal acontecimento. Na zona da soldadura na linha “centro” é observado que existem pontos que a dureza é muito baixa em comparação com a dureza dessa mesma linha, correspondendo a vazios na zona da soldadura devido a um mau fluxo de mistura do polímero, resultante da pouca adição de calor produzido pela ferramenta. Também é visível que na zona do recuo a dureza é menor que a do lado do avanço em ambas as linhas. Dada a variabilidade de resultados deve considerar-se que a soldadura não introduziu alteração significativa na dureza.

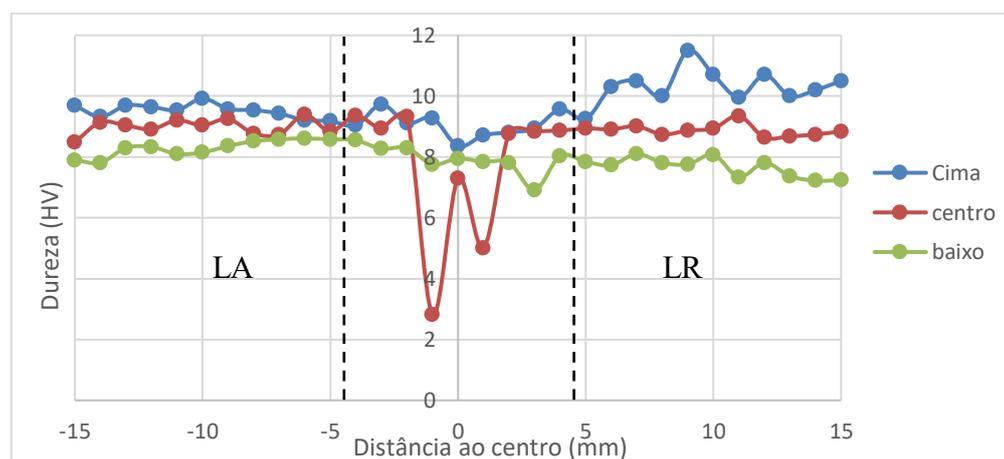


Figura D.1. Resultados dos ensaios da dureza do provete ABS01-M(w1500v120p5,6).

Na Figura D.2 observa-se que na zona da soldadura ABS02-M, como na figura anterior, existe grande variação da dureza, devida à porosidade. De facto, principalmente na zona do recuo existem pontos em ambas as linhas com um valor de dureza muito baixo, resultado de um mau fluxo de material, devido a razão w/v ser um dos mais baixos destes ensaios. É de notar que na zona da soldadura a linha “baixo” é que apresenta maior dureza,

semelhante as das zonas externas à soldadura, tendo as outras duas linhas pontos de dureza, com valores inferiores às das zonas externas à soldadura, diminuindo do lado do avanço para o lado do recuo.

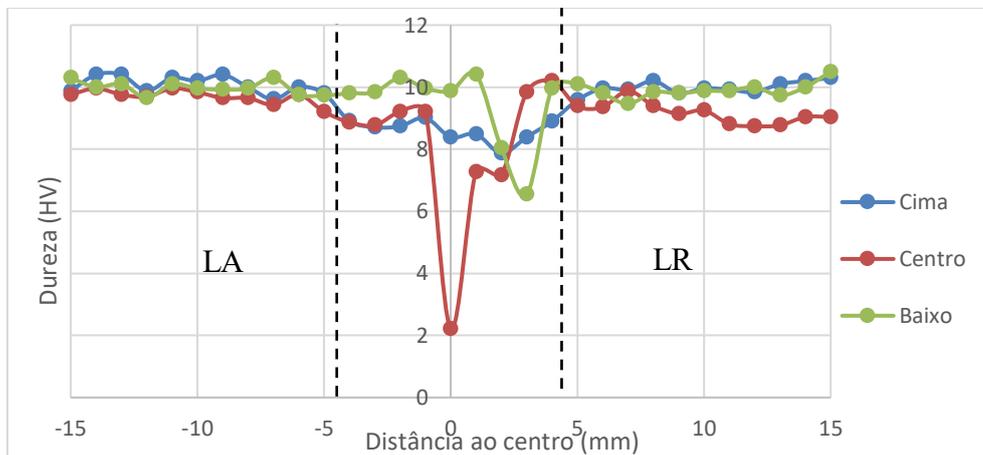


Figura D.2. Resultados dos ensaios da dureza do provete ABS02-M(w1140v120p5,6)

O gráfico seguinte, da Figura D.3, é o primeiro em velocidade de avanço é 60mm/min, que corresponde à menor velocidade de avanço, em relação aos gráficos anteriores, originando uma maior quantidade calor. É observado que na zona a soldadura no lado do recuo, existem umas pequenas cavidas, que provocaram uma diminuição da dureza, em ambas as linhas. Ao longo do provete as durezas dos pontos que constituem as linhas encontram-se dentro dos valores do material base, até mesmo na zona da soldadura, pois os pontos de menor dureza nessa região são provocados pelo um mau fluxo de mistura do material.

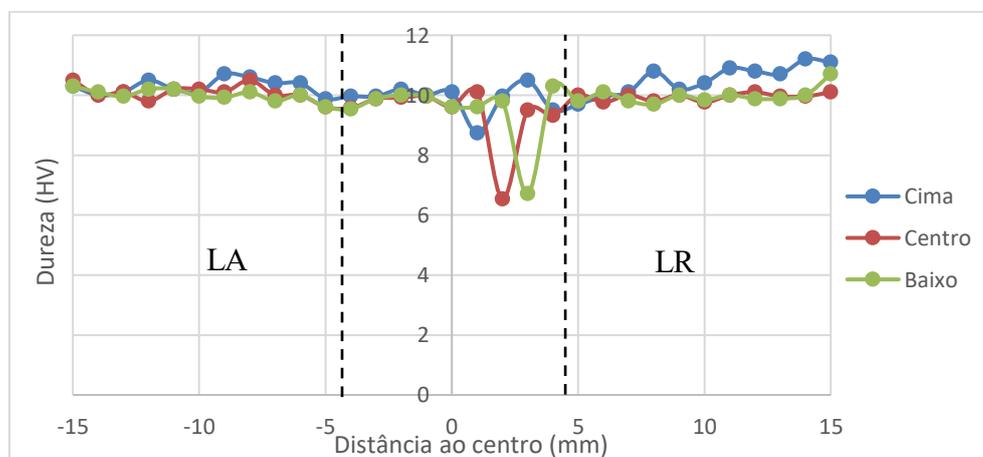


Figura D.3. Resultados dos ensaios da dureza do provete ABS04-M(w870v60p5,7-5,8).

Os resultados obtidos na Figura D.4, mostram que a série ABS05-M é a primeira soldadura que não existem pontos de baixa dureza na zona da soldadura, ou seja, a porosidade nesta zona é muito menor comprando com as das séries de soldaduras anterior. Isto é possível devido à adição de calor ser maior, promovendo uma melhor fluidez do polímero. A zona da soldadura exibe uma ligeira diminuição da dureza na interface do lado do avanço entre a zona da soldadura e zona externa à soldadura, apresentado depois um aumento da dureza até valores semelhantes à da zona externa do lado do avanço mantendo-se constante até ocorrer uma diminuição da dureza na interface, no lado do recuo. Na zona externa soldadura do lado o recuo os valores da dureza dos pontos em ambas as linhas são inferiores aos valores da zona opostas, cerca de uma unidade.

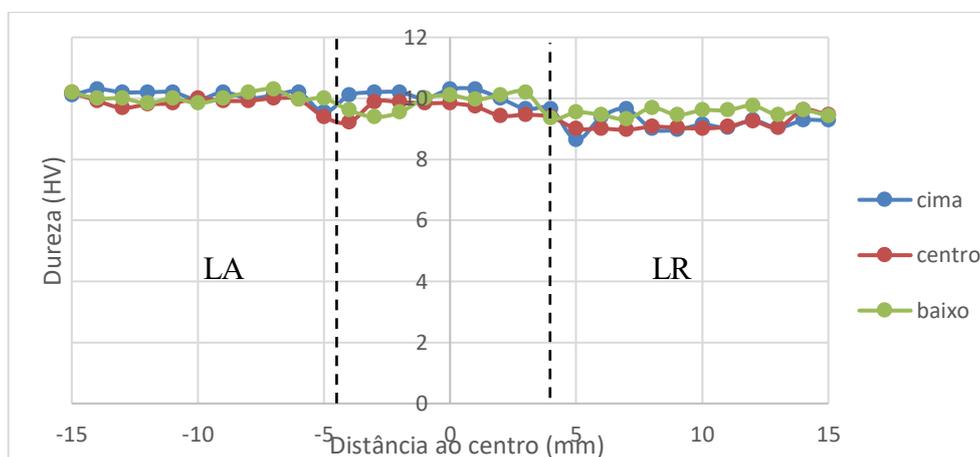


Figura D.4 Resultados dos ensaios da dureza do provete ABS05-M(w1140v60p5,9).

APÊNDICE E

Zona de rotura dos provetes de PE.

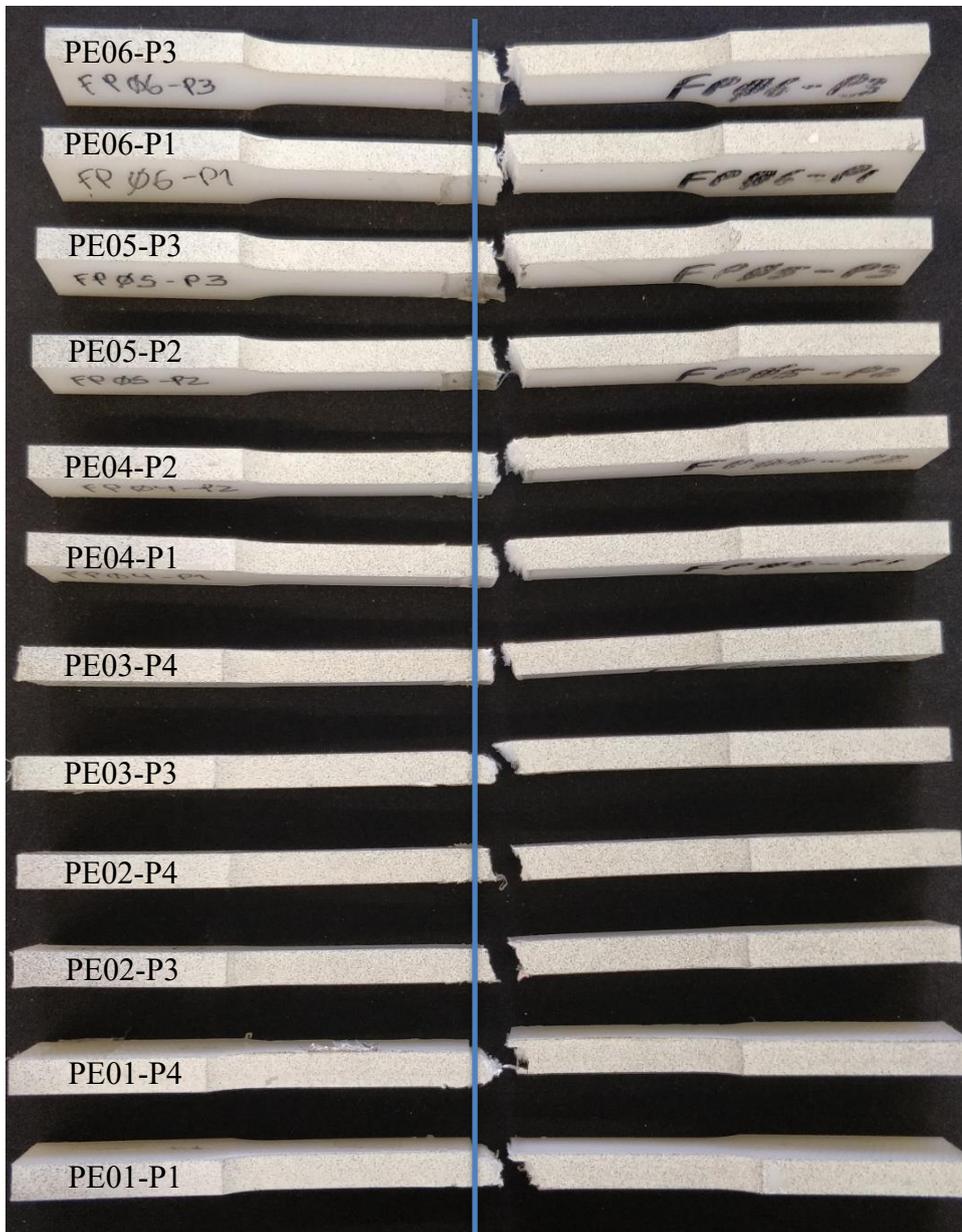


Figura 46. Ilustração da zona de rotura de todos os provetes de PE.

APÊNDICE F

Curvas dos ensaios de tração dos provetes de PE e respetiva imagem da zona onde ocorreu a rotura.

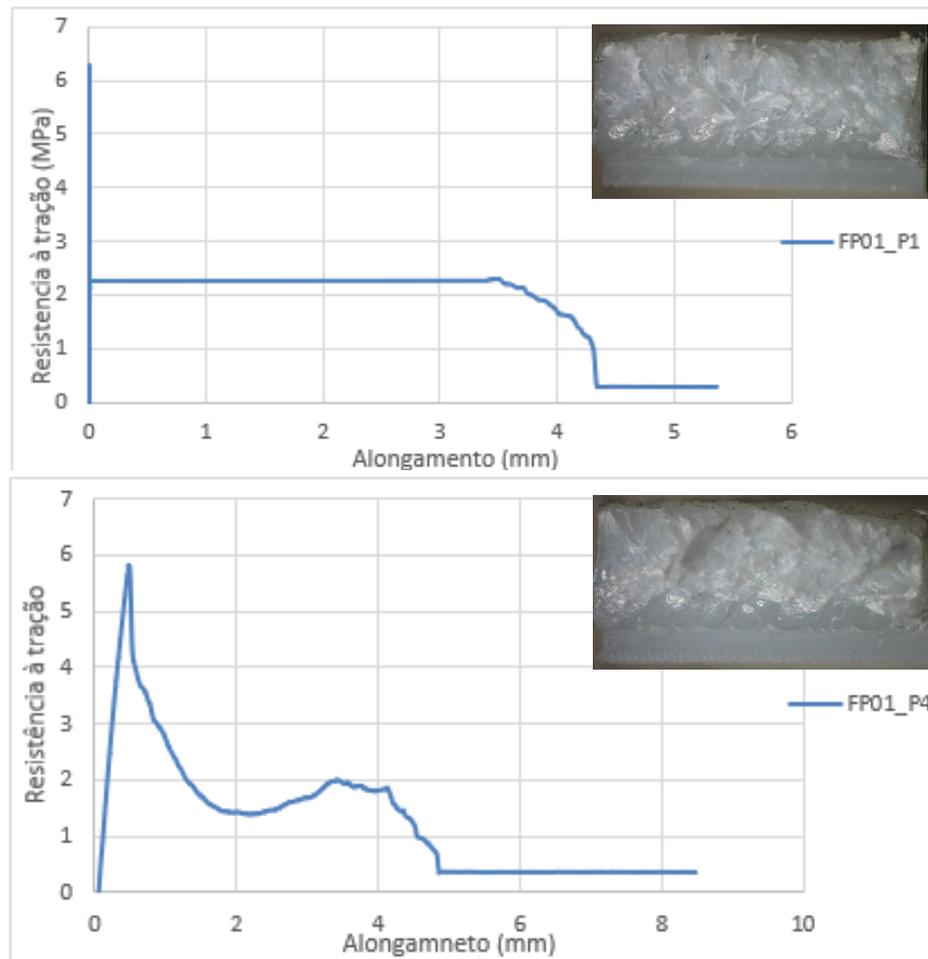


Figura F.1. Curva tensão - alongamento das séries de soldadura PE01_P1 e PE01_P4.

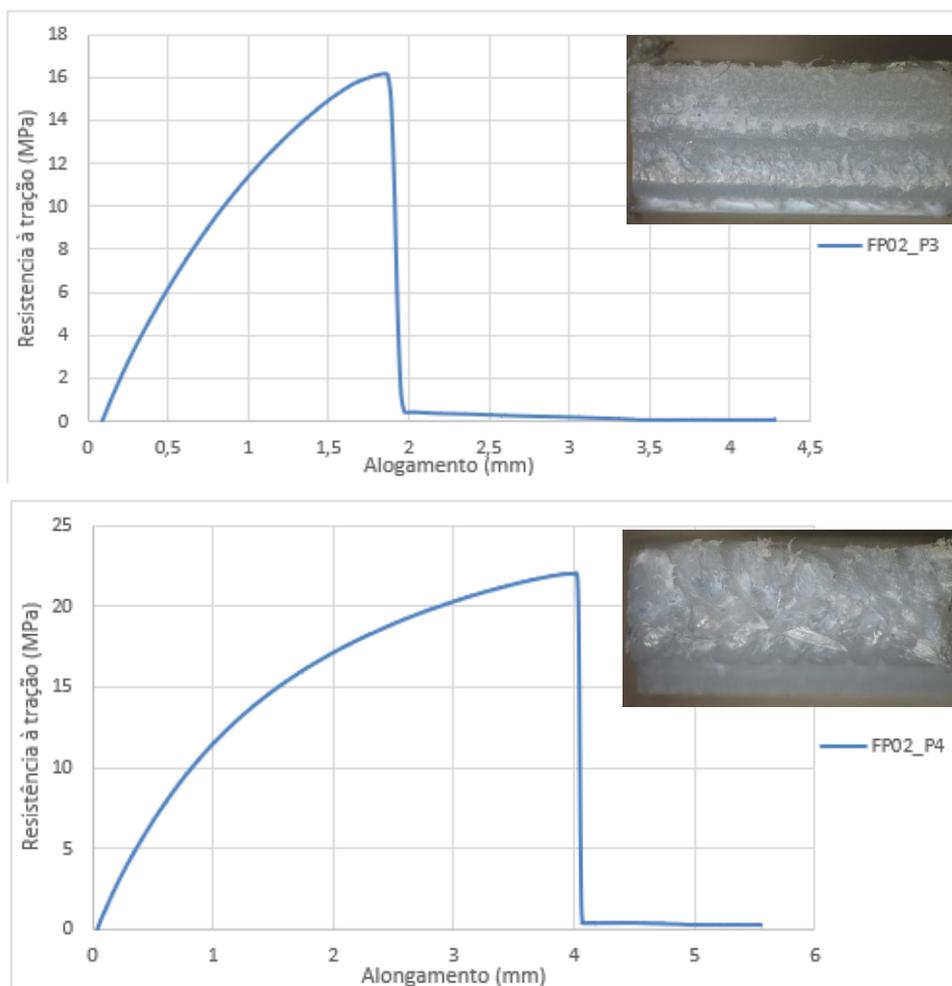


Figura F.2. Curva tensão - alongamento das séries de soldadura PE02_P3 e PE02_P4.

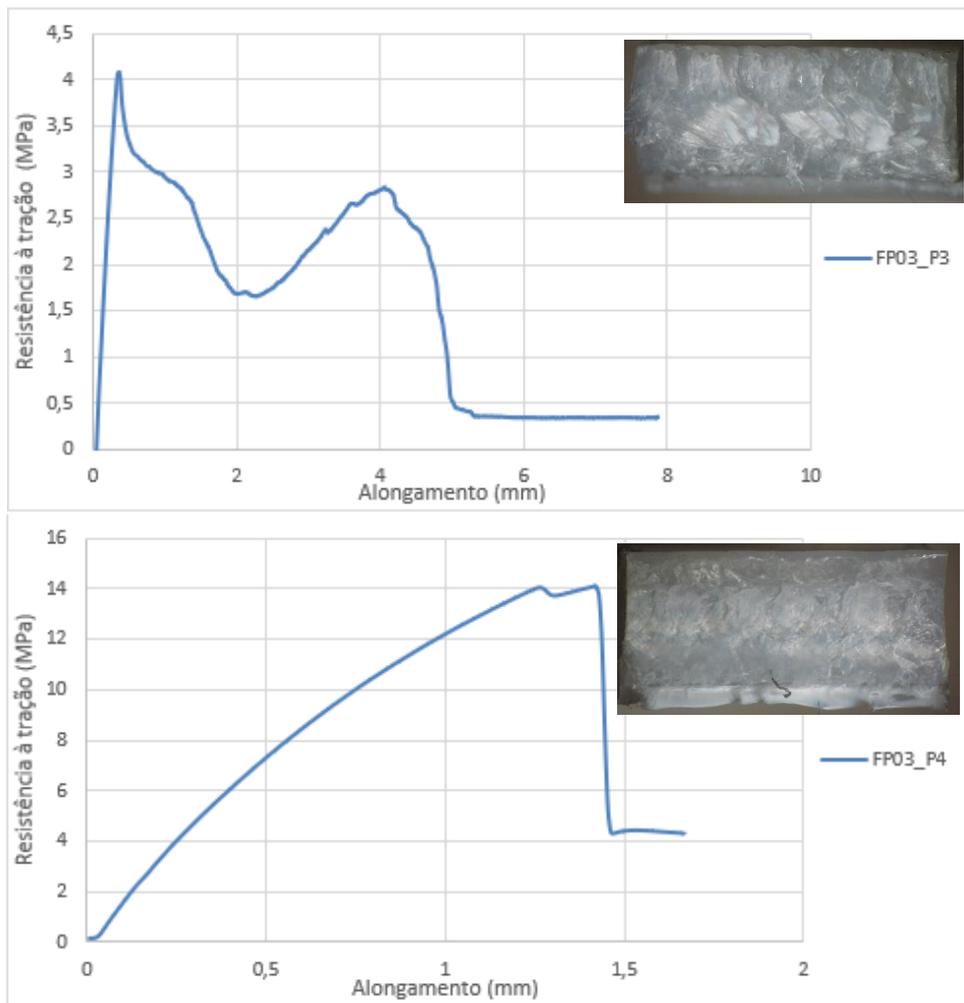


Figura F.3. Curva tensão - alongamento das séries de soldadura PE03_P3 e PE03_P4.

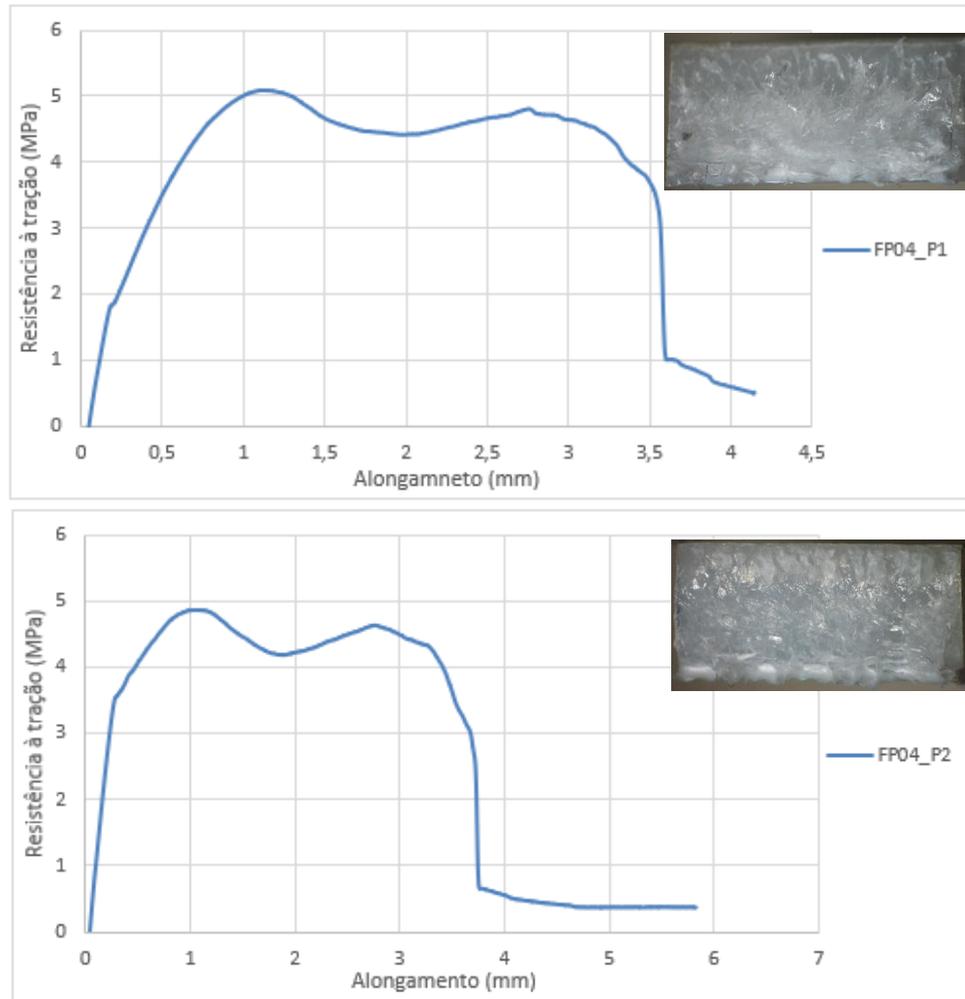


Figura F.4. Curva tensão - alongamento das séries de soldadura PE04_P1 e PE04_P2.

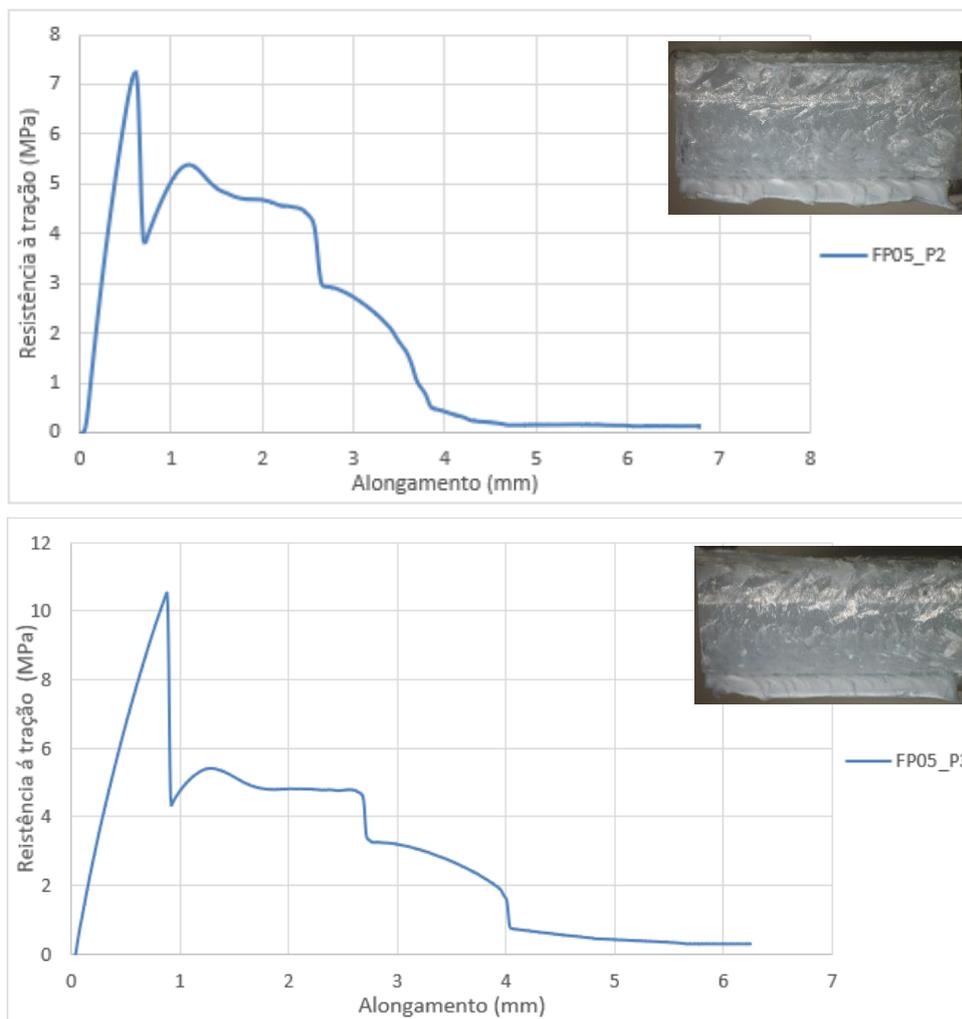


Figura F.5. Curva tensão - alongamento das séries de soldadura PE05_P2 e PE05_P3.

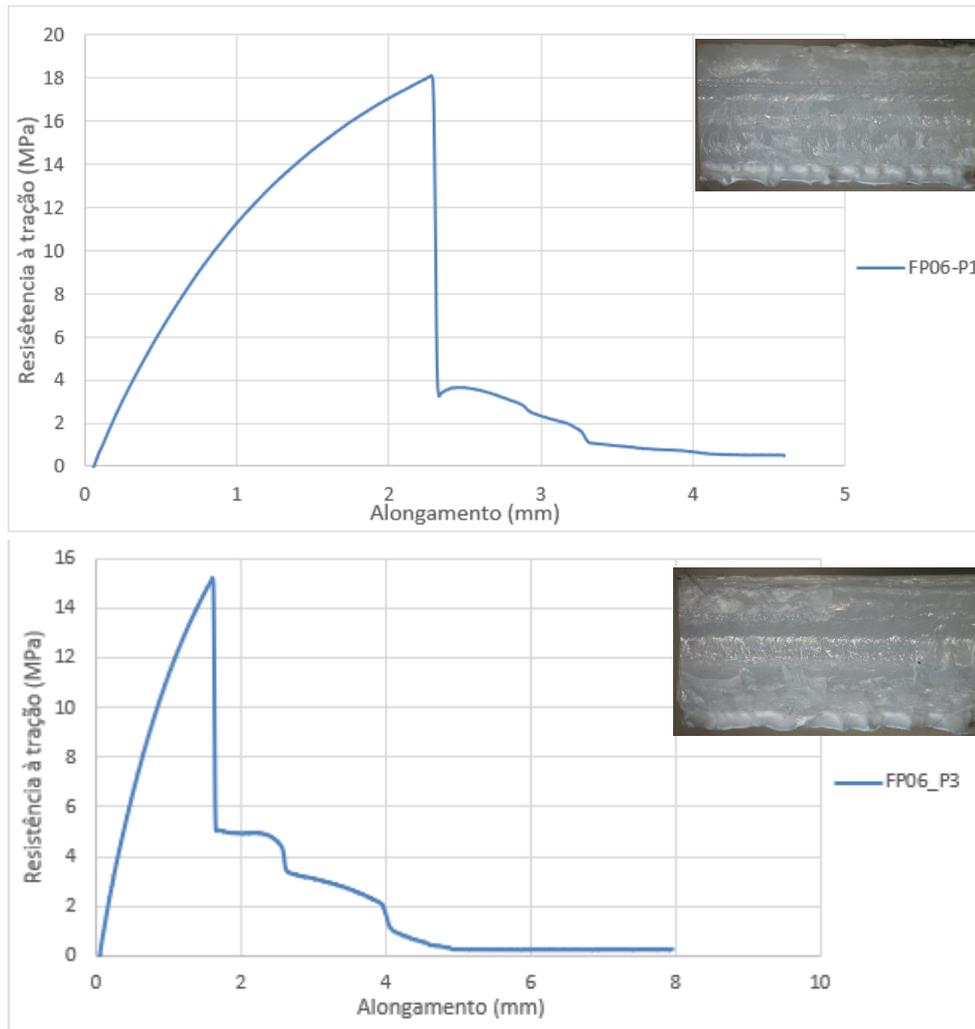


Figura F.6. Curva tensão - alongamento das séries de soldadura PE06_P1 e PE06_P3.

APÊNDICE G

Imagens obtidas pelo ARAMIS, nos provetes de PE.

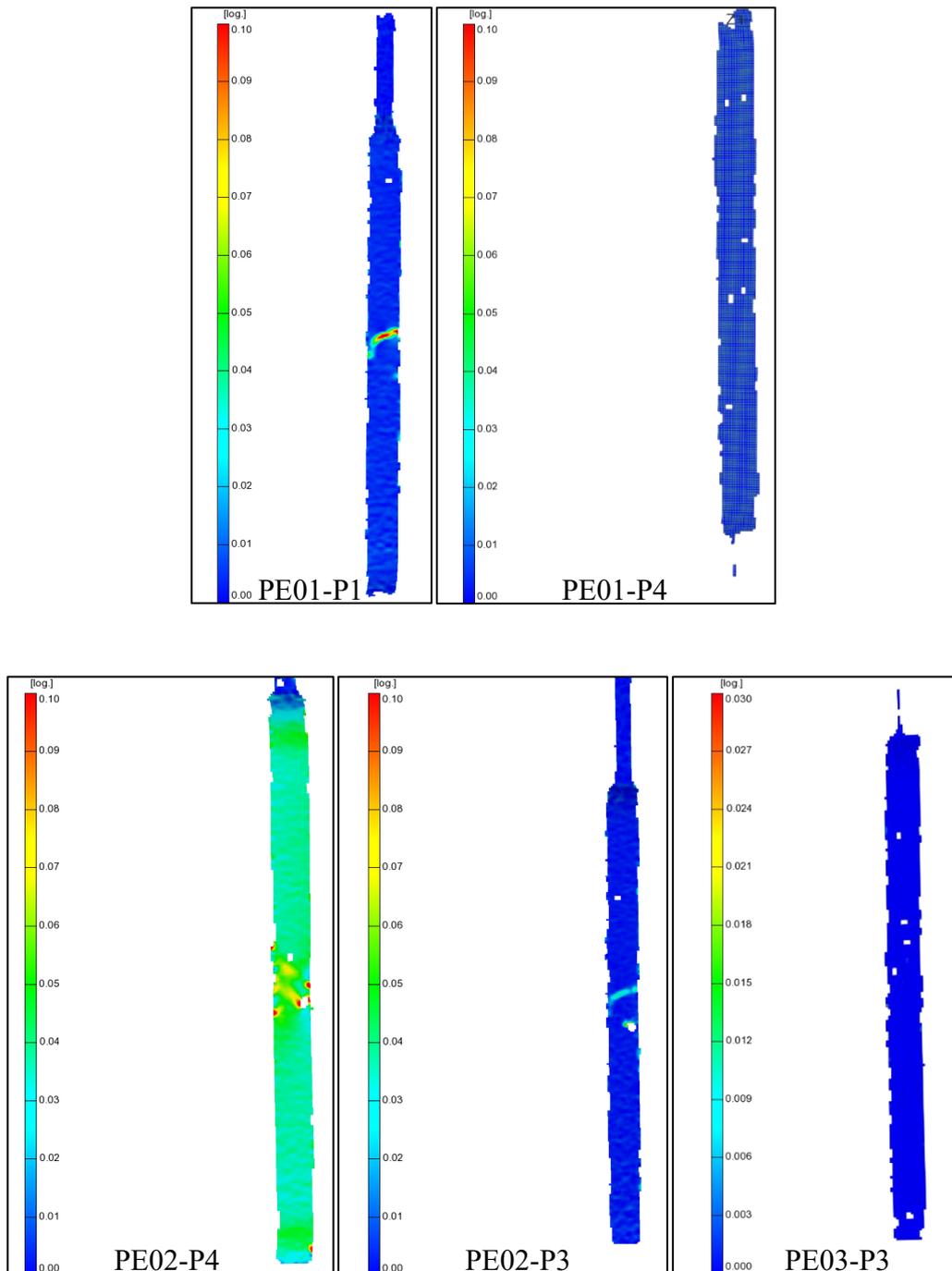


Figura G.1. Mapeamento das deformações locais, no instante próximo da rotura, em diversas solduras.

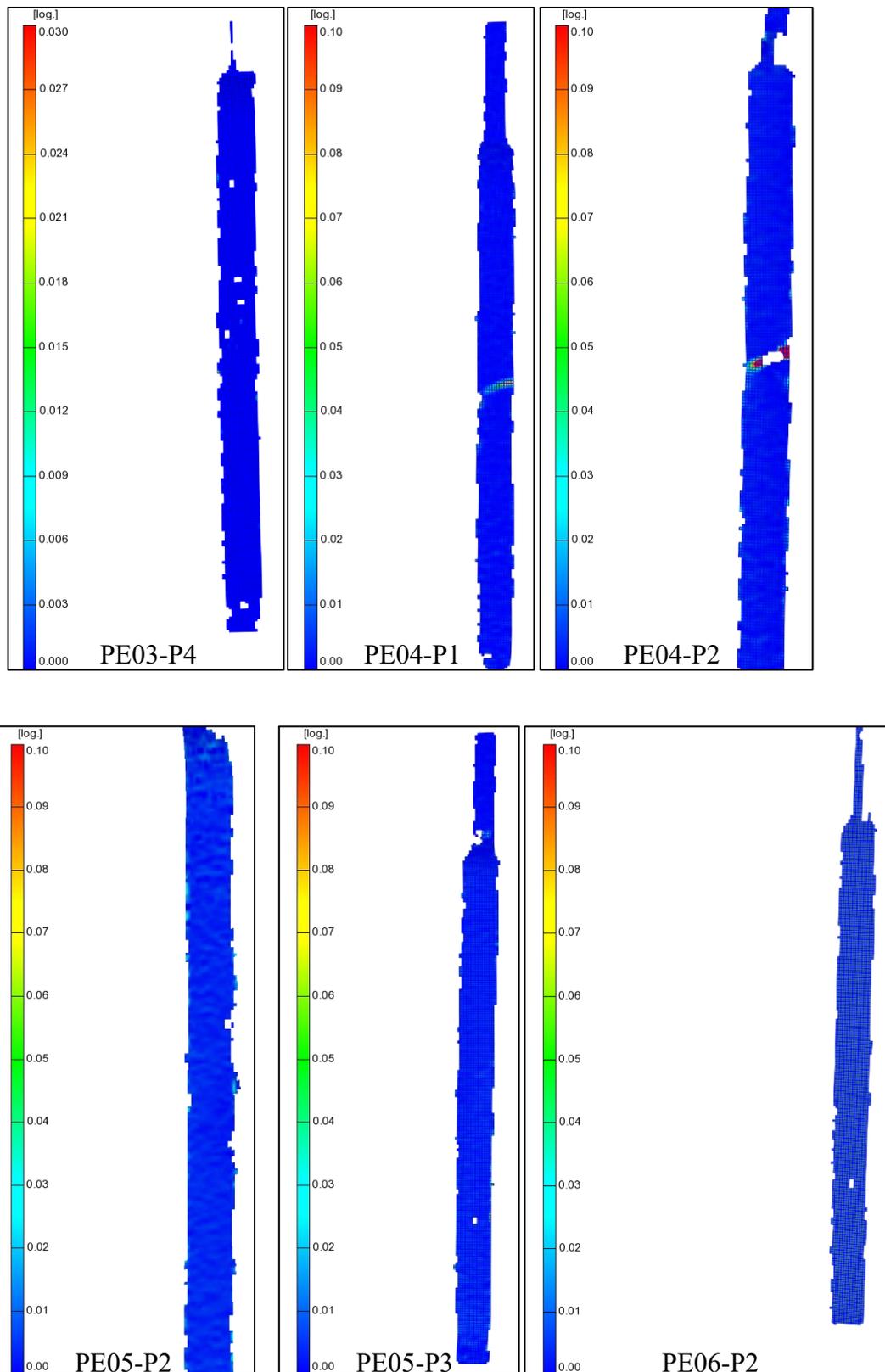


Figura G.2. Mapeamento das deformações locais, no instante próximo da rotura, em diversas solduras.

APÊNDICE H

Zona de rotura dos provetes de PE.

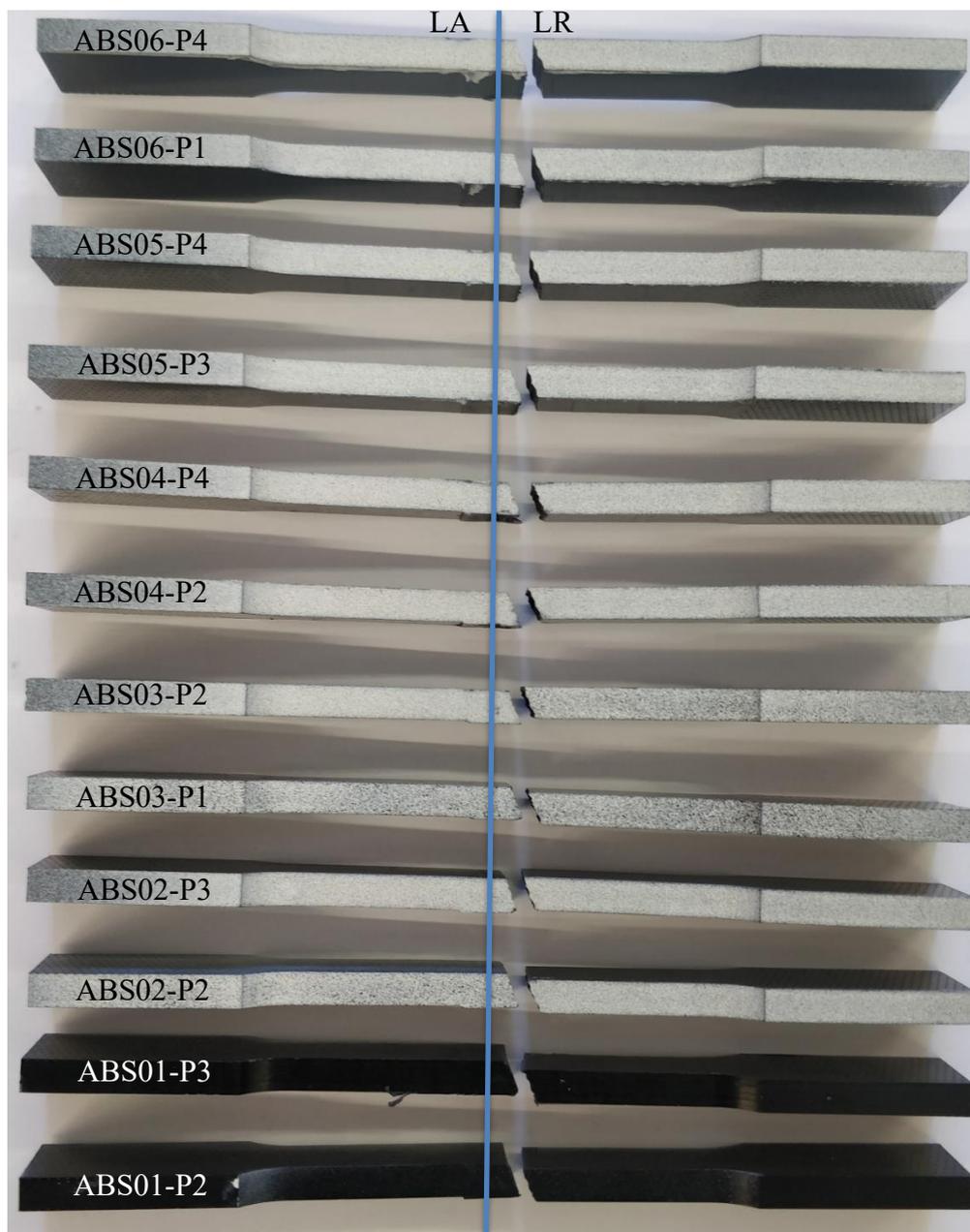


Figura H.1. Ilustração da zona de rotura de todos os provetes de ABS.

APÊNDICE I

Curvas dos ensaios de tração dos provetes de ABS e respetiva imagem da zona onde ocorreu a rotura.

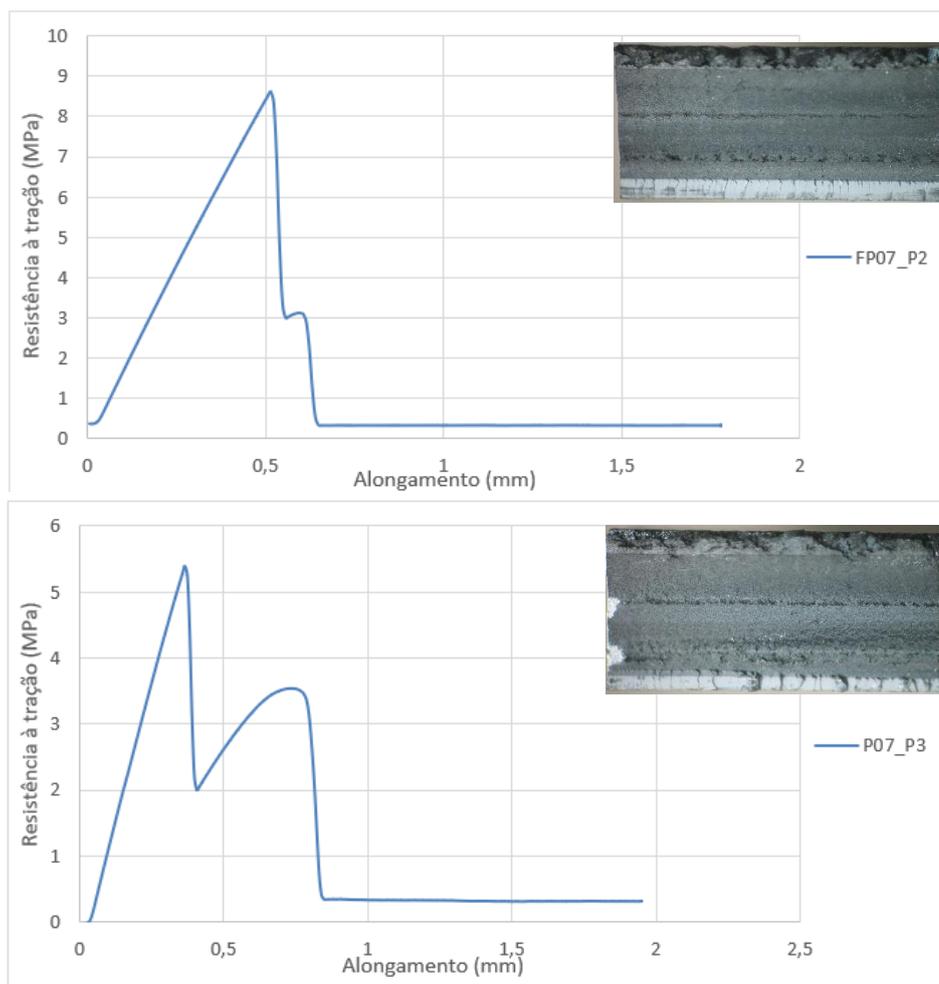


Figura I.1 Curva tensão - alongamento das séries de soldadura ABS01_P2 e ABS01_P3.

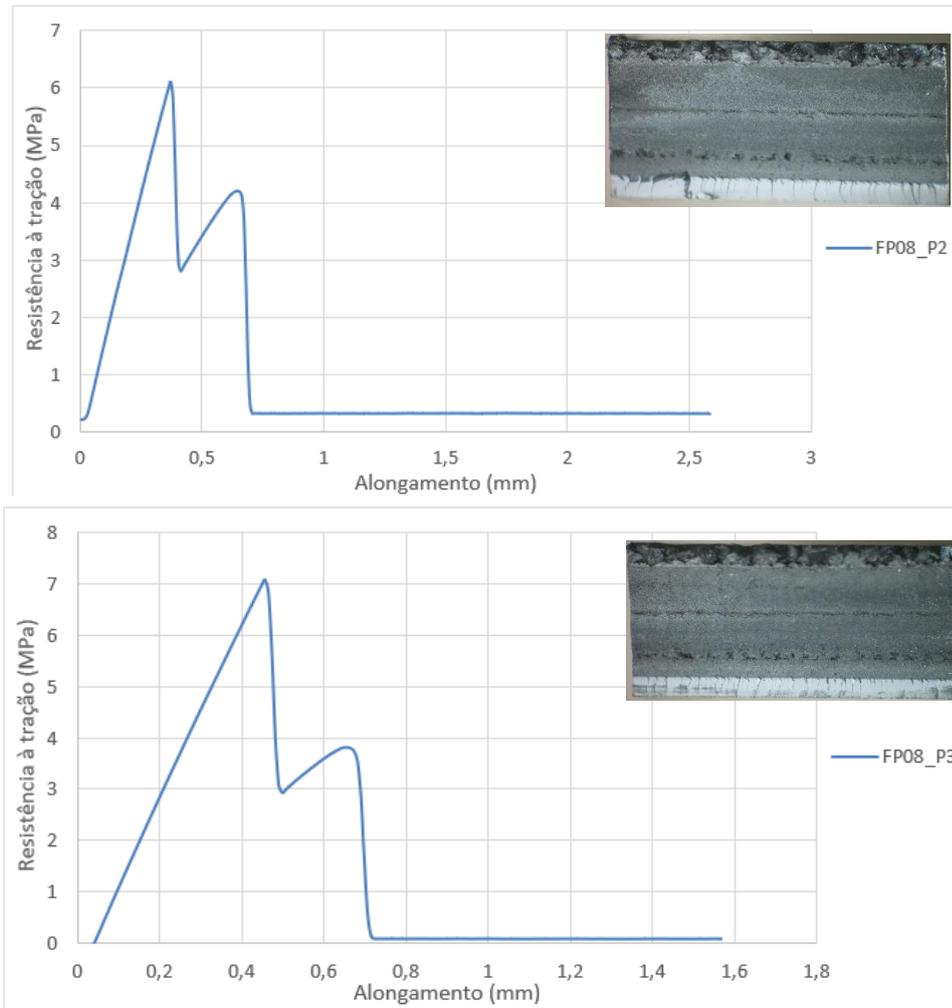


Figura I.2. Curva tensão - alongamento das séries de soldadura ABS02_P2 e ABS02_P3.

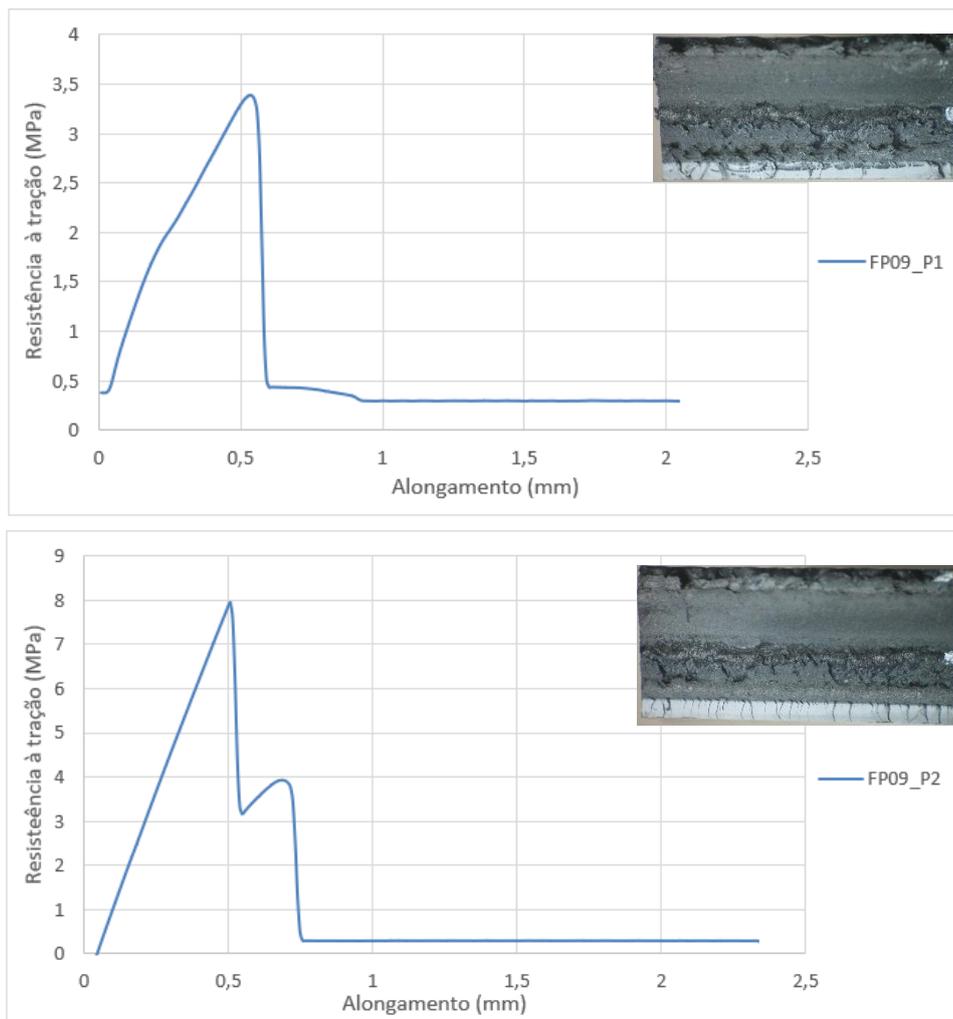


Figura I.3. Curva tensão - alongamento das séries de soldadura ABS03_P1 e ABS03_P2.

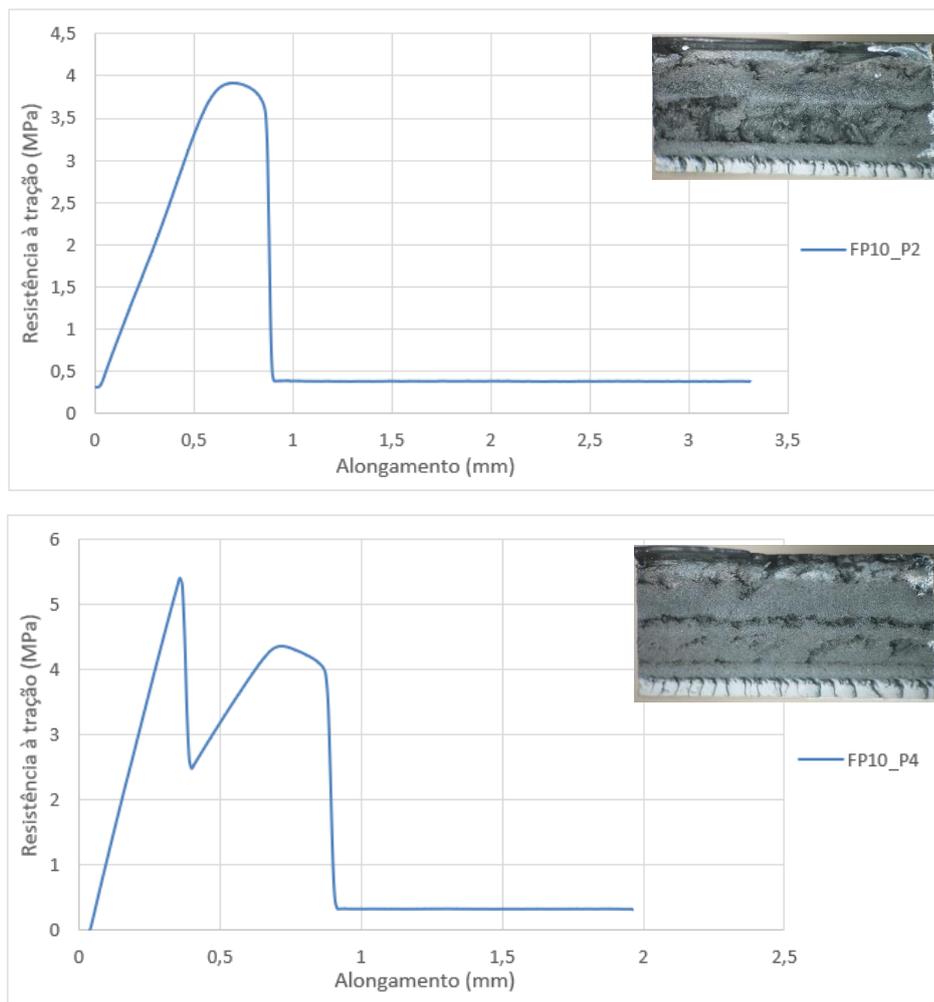


Figura I.4. Curva tensão - alongamento das séries de soldadura ABS04_P2 e ABS04_P4.

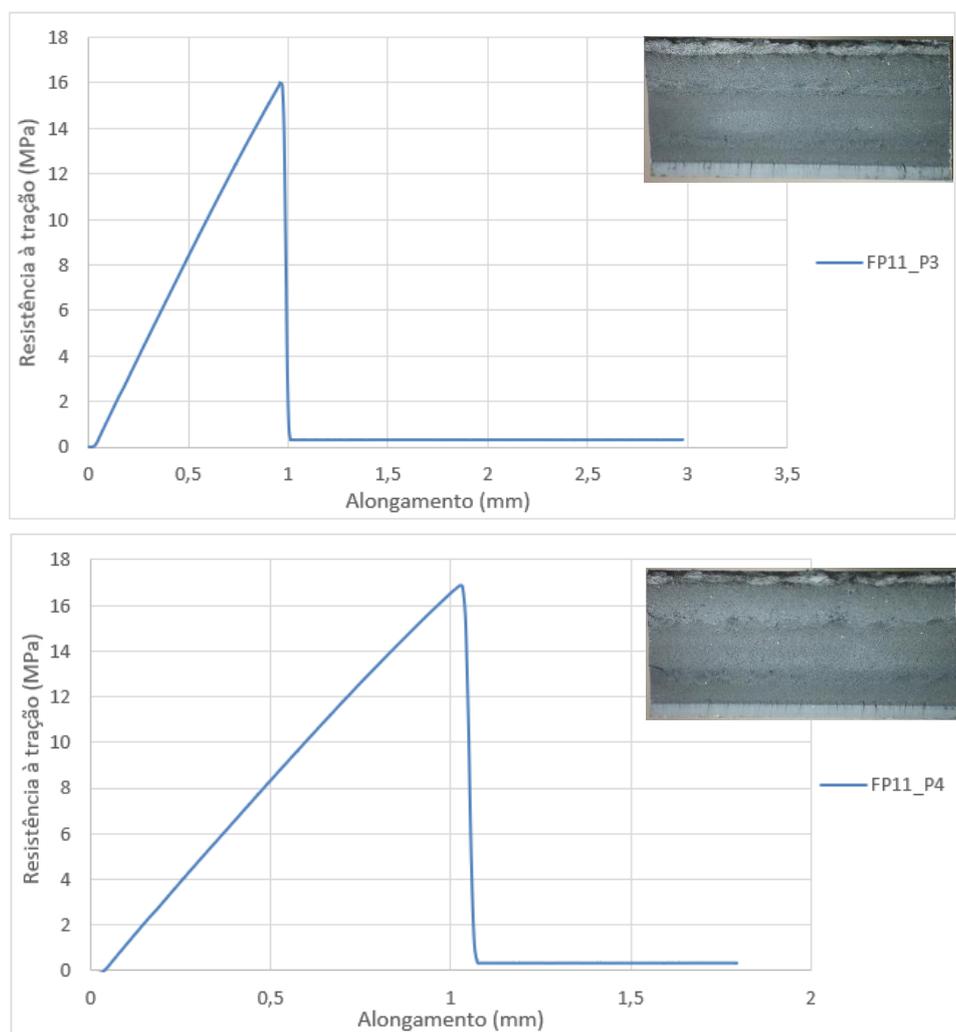


Figura I.5. Curva tensão - alongamento das séries de soldadura ABS05_P3 e ABS05_P4.

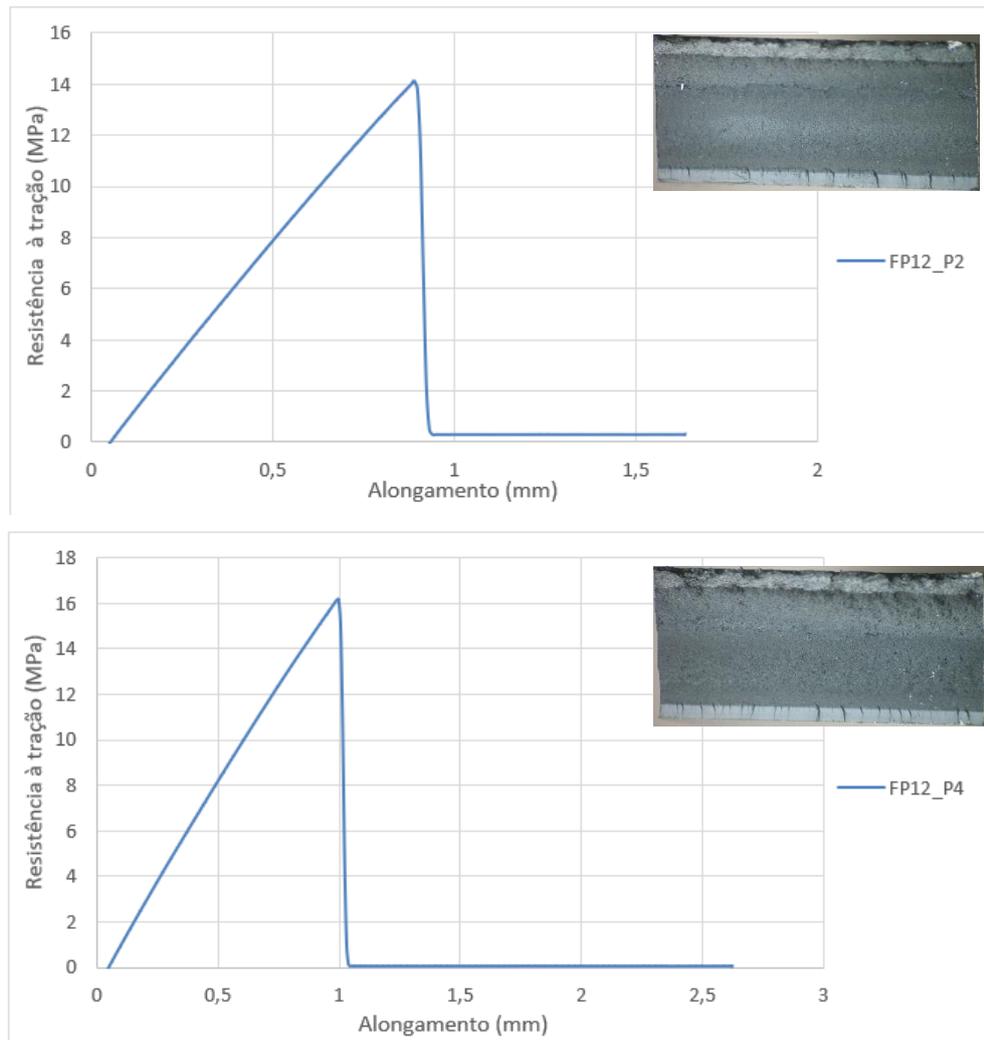


Figura I.6. Curva tensão - alongamento das séries de soldadura ABS06_P2 e ABS06_P4.

APÊNDICE J

Imagens obtidas pelo ARAMIS, nos provetes de ABS.

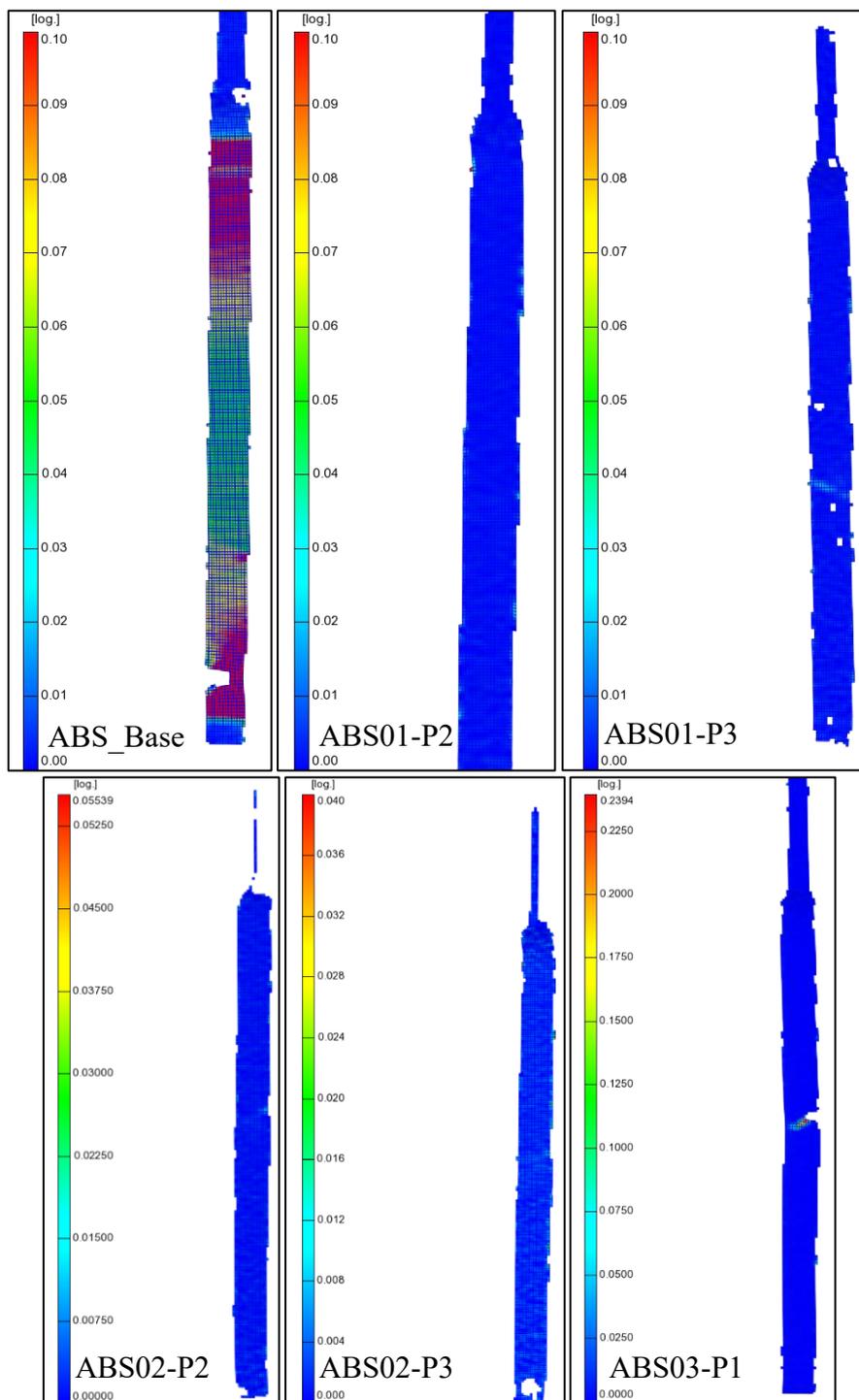


Figura J.1. Mapeamento das deformações locais, no instante próximo da rotura, em diversas solduras.

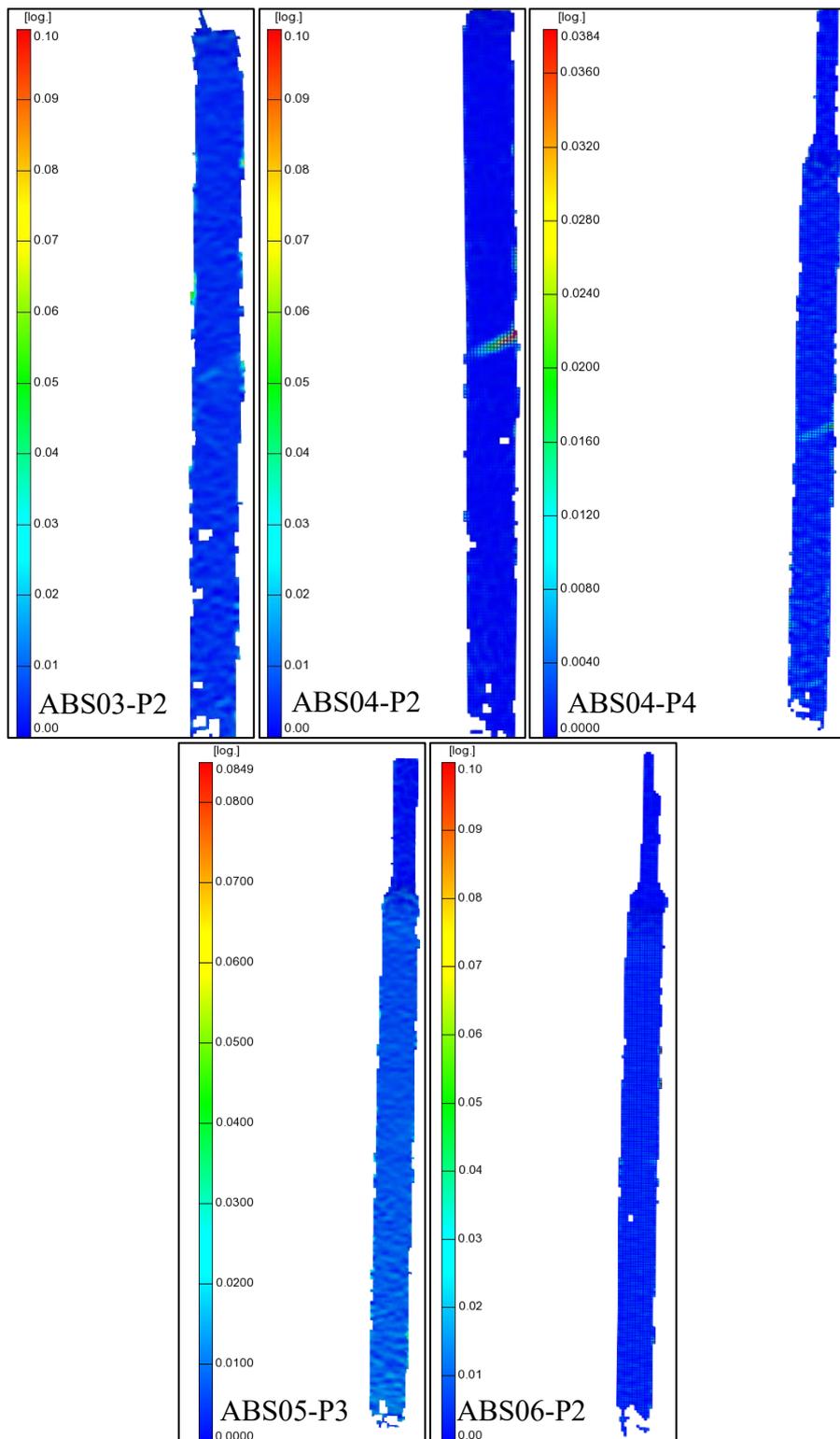


Figura J.2. Mapeamento das deformações locais, no instante próximo da rotura, em diversas solduras.