



**Cristiano Mendes  
Costa**

**Soldadura Laser Termoplástico-Metal**





**Cristiano Mendes  
Costa**

## **Soldadura Laser Termoplástico-Metal**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Doutor António Manuel de Bastos Pereira, Professor Associado Com Agregação do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

Apoio financeiro de: Projeto  
Investigação do Centro de Tecnologia e  
Automação (TEMA) com referencia  
UIDB/00481/2020 e UIDP/00481/2020;  
e Projeto Centro de Tecnologia  
Mecânica e Automação (TEMA)  
Infraestrutura de Investigação com a  
referencia CENTRO-01-0145-FEDER-  
022083.



## **o júri**

presidente

**Prof. Doutor João Paulo Davim Tavares da Silva**  
Professor Catedrático da Universidade de Aveiro

**Prof. Doutor João Pedro Sousa Oliveira**  
Professor Auxiliar Convidado da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

**Prof. Doutor António Manuel de Bastos Pereira**  
Professor Associado Com Agregação da Universidade de Aveiro



## **agradecimentos**

Ao meu orientador, Doutor António Manuel de Bastos Pereira pela orientação e apoio dado ao longo deste trabalho.

Ao Engenheiro António Festas pelo apoio técnico nos trabalhos de oficina.

Ao Engenheiro Ricardo Beja pelo apoio técnico para realização de ensaios.

Aos meus pais pelo apoio e suporte que sempre recebi deles.

Aos meus amigos e colegas que me ajudaram não só neste trabalho como também ao longo do curso.



**palavras-chave**

Laser, soldadura, liga de alumínio, poliamida 6, poliamida 66 reforçada

**resumo**

Com base nos avanços tecnológicos da soldadura laser, em conjunto com a procura por processos mais económicos e sustentáveis de realizar ligações entre diferentes materiais, têm sido desenvolvidos novos métodos de ligação. Estes procedimentos são alternativas a processos mais convencionais como por exemplo a criação de juntas com adesivos ou o recurso a componentes no processo de ligação, como parafusos e rebites.

Desta forma realizou-se este trabalho, onde se otimizou os parâmetros de soldadura laser Nd:YAG entre uma liga de alumínio EN AW 6082-T6 e dois termoplásticos, uma poliamida 6 e uma poliamida 66 com reforço de 30% de fibra de vidro. Foram produzidos espécimes com juntas sobrepostas através da união de provetes de alumínio com 2 mm espessura e de termoplástico com 3 mm de espessura, com a radiação laser a incidir diretamente na superfície metálica de modo a executar a soldadura. Para permitir uma ligação forte foram produzidas estruturas específicas no alumínio que são preenchidas por poliamida fundida durante o processo de soldadura e resulta numa união sólida e permanente após a solidificação.

Após a definição dos parâmetros, as soldaduras foram testadas através de ensaios de corte, que resultaram na obtenção de resistências máximas ao corte acima de 50% da dos termoplásticos de base utilizados.



**keywords**

Laser, welding, aluminium alloy, polyamide 6, reinforced polyamide 66

**abstract**

Based on technological advances made in laser welding, along with the search for more economical and sustainable processes of joining different materials, new connection methods have been developed. These methods are alternatives to more conventional procedures such as creating joints with adhesives or using components in the bonding process, like screws or rivets.

In this work the Nd: YAG laser welding parameters between an aluminium alloy EN AW 6082-T6 and two thermoplastics, a polyamide 6 and a polyamide 66 with 30% glass fiber reinforcement, were optimized. This study was developed by joining 2 mm thick aluminium specimens and 3 mm thick thermoplastic specimens placed in overlap geometry, with the beam focus placed on the aluminium surface. To allow a strong bond, specific structures were produced in the aluminium that were filled with fused polyamide during the welding process and create a solid and permanent bond after solidification.

After defining the parameters, the specimens were tested using tensile shear tests, which resulted in shear strengths above 50% of the thermoplastics used.



# Conteúdo

Conteúdo-----	I
Lista de figuras-----	III
Lista de Tabelas-----	V
Lista de acrónimos -----	VII
Capítulo 1 - Introdução e Estado de Arte -----	1
1.1 Enquadramento-----	1
1.2 Métodos de junção entre plásticos e metais.-----	1
1.3 Laser -----	2
1.3.1 Luz e radiação eletromagnética -----	2
1.3.2 Introdução e história do laser-----	3
1.4 Soldadura Laser -----	3
1.4.1 Processo e características gerais -----	3
1.4.2 Laser Nd: YAG -----	5
1.5 Soldadura laser entre termoplástico e metal -----	6
Capítulo 2 - Procedimento Experimental -----	13
2.1 Introdução-----	13
2.2 Materiais de base-----	13
2.2.1 Alumínio EN AW-6082-T6 -----	14
2.2.2 Poliamida 6 e poliamida 66-----	15
2.2.3 ERTALON 6 SA e ERTALON 66 GF30-----	16
2.3 Estação de trabalho -----	17
2.4 Dispositivo de fixação -----	19
2.5 Provetes -----	21
2.5.1 Provetes com ranhuras -----	22
2.5.2 Provetes marcados -----	25
2.5.3 Provetes de poliamida para soldadura-----	26
2.5.4 Provetes de alumínio para caracterização do material -----	27
2.5.5 Provetes de poliamida para caracterização do material -----	27
2.6 Preparação dos provetes -----	28
2.6.1 Preparação dos provetes de alumínio-----	28
2.6.2 Preparação dos provetes de poliamida -----	31
2.7 Parâmetros de soldadura-----	33
2.8 Ensaio de tração-----	37
2.9 Polimento de provetes-----	40

Capítulo 3 - Análise e discussão dos resultados -----	41
3.1 Ensaios de tração do material de base -----	41
3.1.1 Ensaios do alumínio EN AW-6082-T6 -----	41
3.1.2 Ensaios da poliamida ERTALON 6 SA -----	42
3.1.3 Ensaios da poliamida ERTALON 66 GF30-----	43
3.2 Ensaios de tração dos provetes soldados -----	44
3.2.1 Provetes de ERTALON 6 SA com ranhuras -----	47
3.2.2 Provetes de ERTALON 66 GF30 com ranhuras-----	53
3.2.3 Provetes Marcados -----	57
3.3 Análise global dos resultados obtidos -----	59
Capítulo 4 - Conclusões e trabalhos futuros -----	61
Referências -----	63
Anexos -----	65
Anexo A. Ficha técnica do ERTALON 6 SA [27] -----	66
Anexo B. Ficha técnica do ERTALON 66 GF30 [28] -----	68

# Lista de figuras

Figura 1.1 - Espectro de radiação eletromagnética. Adapt. [6].	2
Figura 1.2 - Componentes de sistema de geração de laser. Adapt. [10].	4
Figura 1.3 - Representação das etapas de criação do feixe laser [12].	5
Figura 1.4 - Esquema de um sistema laser Nd: YAG. Adapt. [9].	6
Figura 1.5 - Esquema dos métodos de soldadura laser entre termoplástico e metal. Adapt. [2].	6
Figura 1.6 - Montagem do procedimento experimental de Katayama e Kawahito [17].	7
Figura 1.7 - Provetes soldados com PET e aço inoxidável por Katayama e Kawahito. Adapt. [17].	7
Figura 1.8 - Micro-ranhuras criadas com uso de laser por Roesner <i>et al.</i> [18].	8
Figura 1.9 - Esquema da montagem de Roesner <i>et al.</i> Adapt. [18].	8
Figura 1.10 - Resultados com variação de ranhuras de Roesner <i>et al.</i> Adapt. [18].	9
Figura 1.11 - Estruturas estampadas por Bergmann e Stambke [2].	9
Figura 1.12 - Vista transversal de provetes decapados e soldados por Bergmann e Stambke [2].	10
Figura 1.13 - Resultados obtidos por Bergmann e Stambke. Adapt. [2].	10
Figura 2.1 - Chapa de EN AW-6082-T6.	13
Figura 2.2 - Varão de ERTALON 6 SA de diâmetro de 30 mm.	14
Figura 2.3 - Varão de ERTALON 66 GF30 de diâmetro 30 mm.	14
Figura 2.4 - SISMA SWA 300 [28].	17
Figura 2.5 - Ecrã tátil da SISMA SWA 300.	18
Figura 2.6 - Joystick de controlo.	19
Figura 2.7 - Componentes do dispositivo de fixação.	19
Figura 2.8 - Dispositivo de fixação posicionado.	20
Figura 2.9 - Espaçador de 20 mm x 10 mm x 2,5 mm.	20
Figura 2.10 - <i>Set-up</i> da soldadura.	21
Figura 2.11 - Um provete com ranhuras e um provete marcado com pequenos pontos de forma aproximadamente piramidal tetraédrica, em baixo relevo.	21
Figura 2.12 - Centro de maquinagem Mikron VCE-500.	22
Figura 2.13 - Provette tipo 1 com 2 ranhuras.	22
Figura 2.14 - Provette tipo 2 com 2 ranhuras.	23
Figura 2.15 - Provette com ranhuras verticais.	23
Figura 2.16 - Provette com rutura.	23
Figura 2.17 - Novo Provette tipo 1 com 2 ranhuras.	24
Figura 2.18 - Novo Provette tipo 2 com 2 ranhuras.	24
Figura 2.19 - Provette tipo 1 com 1 ranhura.	24
Figura 2.20 - Provette tipo 1 com 3 ranhuras.	25
Figura 2.21 - Provette tipo 2 com 1 ranhura.	25
Figura 2.22 - Provette tipo 2 com 3 ranhuras.	25
Figura 2.23 - Marcas após ensaio de tração.	26
Figura 2.24 - Provette marcado.	26
Figura 2.25 - Discos de poliamida para soldadura.	27
Figura 2.26 - Provette de alumínio para ensaios de caracterização de material.	27
Figura 2.27 - Provette de PA para ensaios de caracterização de material.	28
Figura 2.28 - Guilhotina.	28
Figura 2.29 - Gabarito para maquinagem das ranhuras.	29
Figura 2.30 - Alguns provetes com ranhuras maquinados de 30 mm x 15 mm x 2 mm.	29
Figura 2.31 - Amarra em cunha montada na máquina de ensaios.	30
Figura 2.32 - Provette bem e mal marcado	30
Figura 2.33 - Provette de alumínio maquinado para caracterização do material.	31
Figura 2.34 - Torno Pinacho S90/200.	31

Figura 2.35 - Provetes sangrados de ERTALON 6 SA. -----	31
Figura 2.36 - Provetes sangrados de ERTALON 66GF30.-----	32
Figura 2.37 - Provete de ERTALON 66 GF30 e Provete de ERTALON 6 SA maquinados.-----	32
Figura 2.38 - ERTALON 6 SA natural em cima de dois provetes de ERTALON 6 SA preto.-----	33
Figura 2.39 - PC com partes da superfície queimada.-----	33
Figura 2.40 - PA 6 com partes da superfície queimada.-----	34
Figura 2.41 - Provete soldado.-----	34
Figura 2.42 - Direção dos cordões criados.-----	35
Figura 2.43 - Cordão de soldadura.-----	35
Figura 2.44 - Máquina de ensaios Shimadzu AGS-X10 kN.-----	37
Figura 2.45 - Exemplo de curva de tensão-deformação de um metal dúctil. Adapt. [21]. -----	38
Figura 2.46 - Esquema da amostra montada na máquina de ensaios sem calços. -----	39
Figura 2.47 - Esquema da amostra montada na máquina de ensaios com calços. -----	39
Figura 2.48 - Provete soldado com 3 ranhuras.-----	40
Figura 2.49 - Polidora Struers Rotopol-21.-----	40
Figura 3.1 - Provete testado e não testado de alumínio EN AW-6082-T6.-----	41
Figura 3.2 - Provete antes e após ensaio de ERTALON 6 SA. -----	42
Figura 3.3 - Provete antes e após ensaio de ERTALON 66 GF30 -----	43
Figura 3.4 - Área da soldadura nos provetes com ranhuras.-----	44
Figura 3.5 - Linha de guia para a área das marcações.-----	45
Figura 3.6 - Provete marcado e alinhado com uma régua.-----	45
Figura 3.7 - Marcas incompletas.-----	46
Figura 3.8 - Provete ensaiado de poliamida com marcas visíveis. -----	46
Figura 3.9 - Esquema das forças do ensaio-----	47
Figura 3.10 - Esquema das deformações nos provetes do tipo 1.-----	50
Figura 3.11 - Esquema das deformações nos provetes do tipo 2.-----	50
Figura 3.12 - Ranhuras de provetes de PA 6 do tipo 2 antes e após os ensaios.-----	51
Figura 3.13 - Provetes de PA 6 com 1 ranhura após os ensaios.-----	51
Figura 3.14 - Provete de PA 6 do tipo 1 com 3 ranhuras após ensaio.-----	51
Figura 3.15 - Provete do tipo 2 com 3 ranhuras ensaiado.-----	52
Figura 3.16 - Vista de fundo de provete do tipo 2 com 3 ranhuras de alumínio ensaiado.-----	52
Figura 3.17 - Vista lateral de provete do tipo 2 com 3 ranhuras de alumínio ensaiado.-----	52
Figura 3.18 - Provete de PA 66 reforçado do tipo 1 com 2 ranhuras após ensaio.-----	55
Figura 3.19 - Provete de PA 66 reforçado do tipo 1 com 3 ranhuras após ensaio.-----	55
Figura 3.20 - Vista do topo de provete de PA 66 reforçado do tipo 2 com 2 ranhuras.-----	55
Figura 3.21 - Vista do fundo de provete de PA 66 reforçado do tipo 2 com 2 ranhuras.-----	56
Figura 3.22 - Vista de fundo de provete de PA 66 reforçado do tipo 2 de 3 ranhuras.-----	56
Figura 3.23 - Vistas laterais de provetes polidos antes e após ensaios do tipo 2 com 3 ranhuras.-----	56
Figura 3.24 - Provete de alumínio do tipo 2 com 3 ranhuras após ensaio.-----	57
Figura 3.25 - Provete marcado e soldado a ERTALON 6 SA de alumínio após o ensaio.-----	58

## Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Características do ERTALON 6 SA [26]. -----	16
Tabela 2.2 - Características do ERTALON 66 GF30 [27].-----	17
Tabela 2.3 - Características técnicas da SISMA SWA 300 [28].-----	18
Tabela 2.4 - Parâmetros de soldadura para o ERTALON 6 SA, com a % da potência em relação aos 300 W de potência média da SISMA SWA 300. -----	36
Tabela 2.5 - Parâmetros de soldadura para o ERTALON 66 GF30, com a % da potência em relação aos 300 W de potência média da SISMA SWA 300. -----	36
Tabela 2.6 - Dimensões dos cordões de soldadura do ERTALON 6 SA. -----	36
Tabela 2.7 - Dimensões dos cordões de soldadura do ERTALON 66 GF30.-----	37



# Lista de acrónimos

## Lista de abreviaturas

DEM-UA	Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro
EN AW	Norma europeia para alumínio
Laser	Light amplification by stimulated emission of radiation

## Lista de unidades

°C	Temperatura em graus Celsius
MPa	Megapascal
kg	Quilograma
mm	Milímetro
mm <sup>2</sup>	Milímetro ao quadrado
mm/s	Milímetro por segundo
mm/min	Milímetro por minuto
µm	Micrómetro
nm	Nanometro
W	Watt
kW	Quilowatt
V	Volt
J	Joule
g/cm <sup>3</sup>	Gramma por centímetro cúbico
W/ (K.m)	Watt por Kelvin por metro
Hz	Hertz
N	Newton
kN	Quilonewton
%	Porcentagem
ms	Milissegundo

## Lista de símbolos

Nd: YAG	Neodymium-doped yttrium aluminium garnet
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
PA	Poliamida
PET	Politereftalato de etileno
N <sub>2</sub>	Azoto
PC	Policarbonato
Al	Alumínio
N	Número de impulsos
E <sub>impulso</sub>	Energia fornecida por impulso
E <sub>fornecida</sub>	Energia total fornecida para realizar a soldadura
σ	Tensão
P	Carga aplicada
P <sub>junção</sub>	Carga aplicada pelas molas para fixar os provetes
A <sub>i</sub>	Área inicial da secção transversal do provete

$\varepsilon$	Deformação
$L_i$	Comprimento inicial do provete
$\Delta L$	Varição do comprimento do provete
$\sigma_u$	Resistência máxima
$P_{max}$	Carga máxima aplicada
$\eta$	Eficiência da junta
$\sigma_{u,junta}$	Resistência máxima da junta soldada
$\sigma_{u,base}$	Resistência máxima do termoplástico base
$\varepsilon_{max}$	Deformação no ponto de carga máxima

# Capítulo 1 - Introdução e Estado de Arte

## 1.1 Enquadramento

O principal objetivo desta dissertação consistiu no desenvolvimento de um método de soldadura adequado e da otimização dos parâmetros para a ligação entre termoplásticos avançados e metal, com uso de laser pulsado do tipo Nd: YAG (Neodymium-doped yttrium aluminium garnet). O trabalho experimental foi realizado com recurso a uma máquina de soldadura laser SISMA SWA 300 existente no Laboratório de Soldadura do DEM-UA (Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro).

No âmbito de outras dissertações anteriormente realizadas, neste trabalho pretende-se encontrar os parâmetros mais adequados para realizar a soldadura entre materiais específicos com recurso ao equipamento laser SISMA SWA 300. Desta forma o foco é em realizar a ligação entre um metal e um termoplástico com recurso à soldadura laser.

Tanto os metais como os termoplásticos são largamente utilizados em muitas indústrias. O uso cada vez mais comum de materiais poliméricos em aplicações estruturais e que requeiram mobilidade, como por exemplo o caso dos automóveis, por combinarem baixo peso específico, grande deformabilidade e baixo custo, são fatores críticos que tornam a ligação entre metais e termoplásticos cada vez mais recorrente e necessária [1]. Existem várias técnicas disponíveis para criar estas ligações, sendo que este trabalho se foca em utilizar uma destas, o laser, apresentando-se este como um método de ligação permanente que consiste no uso de um feixe de radiação para promover a ligação entre o metal e o plástico.

É conhecida a capacidade de através do uso de equipamentos laser capazes de gerar feixes de comprimento de onda adequado aos materiais em uso, se conseguir realizar a soldadura de metais com outros metais e polímeros com outros polímeros, sendo incomum a soldadura entre um componente metálico e um polimérico. No entanto nos últimos anos tem-se conseguido evoluir bastante o processo de soldadura laser entre metais e termoplásticos, com o desenvolvimento de métodos capazes de gerar juntas com boa resistência mecânica, tornando esta técnica muito interessante e que pode vir a tornar-se num rival competitivo dos processos mais convencionais utilizados atualmente.

Esta técnica apresenta algumas vantagens, sendo a principal a menor necessidade de materiais de adição e também evitar o uso de componentes no processo de ligação, como rebites ou parafusos. Nos tempos atuais, onde se valoriza imenso a eficiência e uso inteligente de recursos, as soluções capazes de diminuir o consumo destes possuem enorme interesse, não só económico como também social. Este procedimento permite fazer ligações de forma rápida e cómoda e tem a vantagem de a tecnologia de soldadura laser se tornar cada vez mais comum e acessível a nível industrial, diminuindo os entraves na aquisição de equipamento necessário à execução deste processo.

Tendo tudo isto em conta, ao longo deste trabalho será apresentado o método utilizado, sendo que foram testados dois termoplásticos, um PA 6 e um PA 66 com reforço de 30 % de fibra de vidro, sendo estes ligados a uma liga de alumínio.

Nesta dissertação procedeu-se não só ao desenvolvimento de um método adequado à soldadura, como também à avaliação da qualidade das ligações e análise dos problemas detetados e dos defeitos verificados nas juntas.

## 1.2 Métodos de junção entre plásticos e metais.

A junção de metais e plásticos é recorrente a nível industrial e como tal existem vários métodos de ligação dos mesmos.

Entre os processos de junção de metais e termoplásticos, estes podem ser distinguidos entre operações de pré e pós-moldação [2].

Os processos de pré-moldação recorrem a técnicas de montagem de componentes no molde de injeção. Isto consiste, neste caso em particular, em colocar peças metálicas diretamente no interior do molde antes do processo de injeção, que é depois efetuado. Este método permite que no final os componentes metálicos estejam ligados ao polímero injetado [3].

Desta forma conseguem-se desenvolver peças com maior consistência e sem problemas de alinhamento ou posicionamento de componentes, reduzindo operações posteriores de fabrico e montagem e necessidades de mão de obra [3]. No entanto existem maiores problemas no preço. Devido a custos adicionais associados

às ferramentas necessárias, é preciso um investimento inicial bastante elevado, com benefícios económicos apenas para séries mais elevadas de peças, quando comparado a moldes tradicionais com as mesmas cavidades [4].

Quanto aos processos de pós-moldação, estes consistem na junção de componentes metálicos e plásticos prontos ou já próximos da forma final. Os métodos mais comuns recorrem a ligações mecânicas ou ao uso de adesivos [1].

Nos processos de junção mecânica, as peças são ligadas através do uso de parafusos ou rebites, permitindo criar juntas sem necessidade de fusão de componentes. Embora isto produza uma união rápida e simples de executar, há necessidade de realizar operações preparatórias como abertura de furos e criação de roscas, o peso final do componente será superior e vão ser desenvolvidas zonas de concentração de tensões na área dos furos [1].

O recurso a adesivos utiliza materiais poliméricos, que após uma reação química ou física criam uma junta de ligação. Esta técnica permite produzir uniões fortes devido ao desenvolvimento de adesivos resistentes com capacidade de suportar diferentes tipos de cargas. Simultaneamente é possível obter componentes mais leves e com cargas distribuídas de forma mais homogénea, quando comparados ao uso de ligações mecânicas. O uso deste método tem algumas adversidades, nomeadamente a criação de juntas problemáticas, que além de serem muito difíceis de separar sem provocar danos, podem libertar emissões ambientalmente perigosas, são propícias a degradar devido ao efeito de humidade e temperatura e possuem baixa resistência em ambientes quimicamente reativos. Também é necessária uma pré-preparação extensiva das superfícies, como limpeza com solventes ou alterações da rugosidade da superfície, para melhorar a resistência e durabilidade das juntas criadas. [1].

## 1.3 Laser

### 1.3.1 Luz e radiação eletromagnética

Na base do desenvolvimento do laser está a luz visível, que é uma parte do espectro de radiação eletromagnética [5], conforme é observado na Figura 1.1.

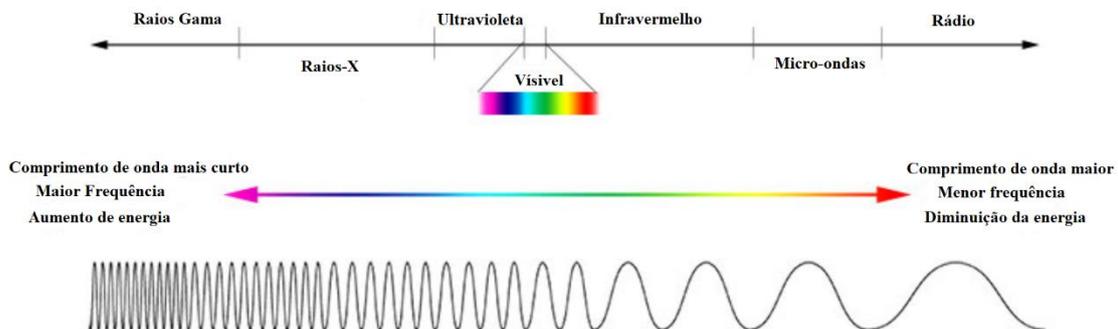


Figura 1.1 - Espectro de radiação eletromagnética. Adapt. [6].

A capacidade de diferentes comprimentos de onda se transformarem em calor ao serem absorvidos por diferentes materiais, em conjunto com o facto de a luz conseguir ser transmitida a longas distâncias e posteriormente ser focada num pequeno ponto com um grande incremento na densidade de potência, levou ao desenvolvimento do laser [7].

### 1.3.2 Introdução e história do laser

O desenvolvimento inicial do laser foi consequência de uma sugestão feita em 1916 por Albert Einstein, que afirmou que sobre condições adequadas a energia podia ser libertada sobre a forma de luz, quer de forma espontânea, quer estimulada. Após isto, em 1928, Rudolf Walther Ladenburg observou emissões estimuladas, embora nesse período se tenha considerado que este processo não possuía usos práticos [8].

Em 1951, Charles H. Townes iniciou a criação de um equipamento capaz de gerar emissões estimuladas de frequências micro-ondas, trabalho que culminou, em 1953, no maser. Foram feitos estudos acerca de aplicações desta tecnologia, que eram muito limitadas. Perante isto, Townes teve discussões com outras pessoas para estender as ações do maser a outros comprimentos de onda, nomeadamente Arthur L. Schawlow e Gordon Gould. Em conjunto com Schawlow, Townes apresentou as suas ideias para um maser ótico em 1958, enquanto Gould desenvolveu o seu próprio conceito, que posteriormente levou a uma patente e à criação da designação laser. Os dois trabalhos serviriam no futuro como bases para o desenvolvimento de outros sistemas [8].

As primeiras emissões em comprimentos de onda óticos foram obtidas por Theodore Maiman, através de um laser que funcionava de forma pulsada através do uso de cristais de rubi. Após este desenvolvimento surgiram em 1961 o primeiro trabalho com emissões a utilizar gás de  $CO_2$  e em 1964 a emissão com uso de Nd: YAG. No ano de 1962 apareceram vários trabalhos com aplicações metalúrgicas, incluindo a soldadura, com vários estudos posteriores a analisar esta técnica [9].

O laser tem sofrido constantes evoluções ao longo do tempo e atualmente é usado em múltiplas áreas, como a leitura e processamento de informação, a medicina e o processamento de materiais [10].

## 1.4 Soldadura Laser

### 1.4.1 Processo e características gerais

A soldadura laser tem como objetivo criar um banho líquido com um tamanho desejado através da absorção da radiação incidente pelos materiais a soldar e depois provocar a propagação do mesmo, de modo a unir a junta pretendida [9].

O sucesso e qualidade do processo dependem da qualidade do metal fundido. Banhos demasiado grandes ou pequenos colocam em causa a qualidade da ligação, que pode também ser afetada por vaporização de componentes de liga, gradientes térmicos excessivos que levam à ocorrência de fissuras no arrefecimento, instabilidades no volume e geometria do banho e evaporação preferencial de elementos de ligas devido às elevadas temperaturas a que são sujeitos, que podem resultar em porosidades ou formação de vazios na soldadura [9].

Para melhorar a junta é fundamental controlar a quantidade e a forma como o calor é fornecido pela radiação incidente. Para facilitar o procedimento, as máquinas de soldadura possibilitam o ajuste da potência e o método de fornecimento da radiação, permitindo adaptar o processo a diferentes materiais e geometrias da junta. Outro aspeto importante é o controlo da área de incidência do feixe. Os equipamentos tendem a permitir controlar as dimensões do mesmo de modo a oferecer maior controlo da dimensão das juntas criadas.

Existem vários equipamentos laser capazes de realizar soldadura, distinguidos pelos métodos de estimulação e modo de funcionamento. Os sistemas laser mais comuns são os lasers de  $CO_2$  e os lasers Nd: YAG, que podem operar em três formas distintas, contínuo, pulsado e modo Q-switch [9]. Outros sistemas usados para este processo que estão a ganhar popularidade são os lasers de díodos e de fibras [11].

Os modos de funcionamento variam na saída do feixe de luz. Em contínuo a radiação sai de forma constante enquanto no pulsado a saída é efetuada de forma periódica. Um laser contínuo não consegue obter potências médias e máximas tão elevadas como um pulsado, sendo esta diferença importante, ao tornar cada um mais apropriado a situações específicas. Para maior controlo do processo, os sistemas pulsados permitem controlar os impulsos, desde o tipo de onda à frequência, características fundamentais para otimizar as operações [9].

No modo Q-switch, o processo é semelhante ao do laser pulsado, embora estes sejam pouco adequados à soldadura por terem curta duração dos impulsos, que tornam o procedimento mais difícil [9].

Todos os tipos de laser partilham uma série de componentes para gerar o feixe que são um meio ativo, uma fonte de energia e dois espelhos que irão formar uma cavidade ressonante, com um dos espelhos totalmente refletor, enquanto o outro é parcialmente refletor, de modo a criar uma saída [10], conforme apresentado na Figura 1.2.

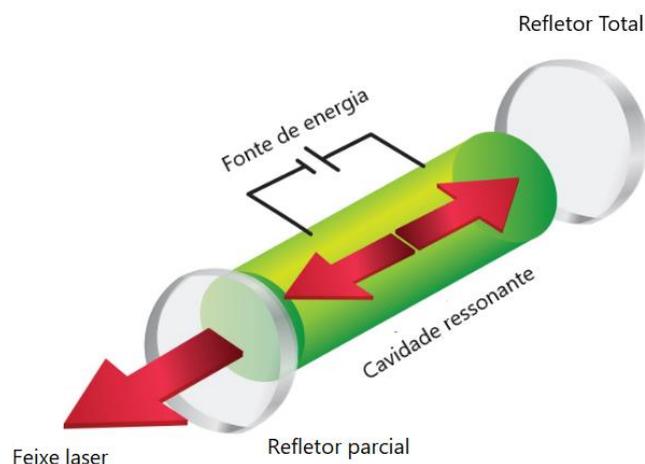


Figura 1.2 - Componentes de sistema de geração de laser. Adapt. [10].

O feixe é gerado através de três etapas principais quase instantâneas, esquematizadas na Figura 1.3, que são [12]:

- I. Primeiro, uma fonte de energia vai excitar os átomos presentes no meio ativo, o que vai fazer com que os elétrons sejam temporariamente elevados a um estado de energia superior. Como este estado é provisório, com a descida de nível, a energia acumulada vai ser perdida, emitindo um fóton, com este processo a ser designado emissão espontânea;
- II. A seguir os fótons emitidos podem colidir com elétrons que estejam em níveis superiores de energia, o que vai forçar o elétron a descer de nível e gerar mais um fóton. O fóton criado é coerente com o que o originou, o que faz com que tenham a mesma fase, comprimento de onda e direção e este fenômeno é chamado emissão estimulada;
- III. Na última parte do processo os fótons criados nas etapas anteriores deslocam-se em todas as direções do meio ativo até atingirem os espelhos da cavidade ressonante. Ao embaterem vão ser refletidos de volta ao meio ativo. Para a ampliação ocorrer é necessário que ocorra um processo de inversão de população, que consiste na existência de mais átomos no estado excitado do que em níveis mais baixos de energia. A inversão de população vai criar as condições necessárias para gerar o feixe.

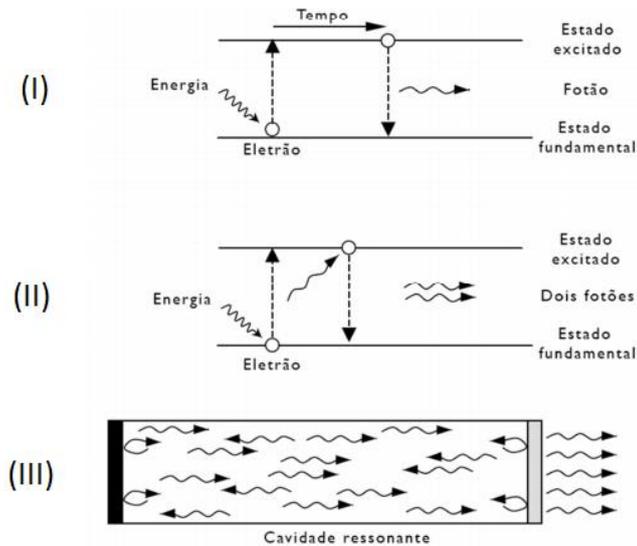


Figura 1.3 - Representação das etapas de criação do feixe laser [12].

Com base nos princípios de geração, os lasers distinguem-se pelo estado do meio ativo, que no laser de CO<sub>2</sub> é gasoso [9] e no Nd: YAG [9], de fibras e de díodos é sólido, embora os lasers de fibras [13] e de díodos [14] sejam tipicamente identificados e tratados de forma separada dos lasers de estado sólido.

Os sistemas Nd: YAG produzem soldaduras de maior qualidade em metais, nomeadamente refletivos, em comparação ao CO<sub>2</sub>. Isto deve-se ao comprimento de onda gerado, onde o Nd: YAG cria feixes com comprimento de 1,06 μm, enquanto os lasers de CO<sub>2</sub> possuem comprimentos 10 vezes maiores. Os metais absorvem de forma mais eficiente a radiação com comprimento de onda do Nd: YAG, em oposição à do CO<sub>2</sub>. Os lasers Nd: YAG também permitem um processamento mais eficiente quando o processo se realiza a potência constante e possibilitam o uso de fibra ótica, sendo esta uma enorme vantagem. Por outro lado, os lasers de CO<sub>2</sub> têm a vantagem de ter custos operativos menores e maior facilidade em gerar potências elevadas de feixe [9].

Os lasers de díodos tendem a ser mais compactos, baratos e são energeticamente mais eficientes. No entanto estes sistemas, nomeadamente os de alta potência utilizados para soldadura, geram feixes de menor qualidade que apresentam maior dificuldade em obter focos apertados e conseqüentemente provoca a criação de pontos focais relativamente grandes [15].

Os sistemas de fibras permitem obter feixes de elevada qualidade, mesmo a potências elevadas, apresentam elevada eficiência energética e necessitam de muito pouca manutenção. Por outro lado, são mais difíceis e caros de desenvolver e têm custos de fabrico superior em sistemas com mais requisitos como elevada potência e qualidade de feixe [16].

Como o trabalho foi realizado num laser do tipo Nd: YAG com modo de funcionamento pulsado, o foco nas partes seguintes será nesse sistema.

## 1.4.2 Laser Nd: YAG

Os lasers Nd: YAG são sistemas com meio ativo sólido, constituído por um ou mais cilindros de YAG (Yttrium Aluminium Garnet (Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>)). Estes encontram-se na cavidade ressonante, onde vão ser excitados por lâmpadas flash [12].

Para permitir maiores potências médias na saída, recorre-se à inserção de vários cilindros que são posteriormente estimulados pelas lâmpadas flash. Após a criação da luz, esta vai ser transmitida até à cabeça de trabalho através de uma fibra, que pode ser ótica [9].

A Figura 1.4 apresenta o esquema de um sistema Nd: YAG.

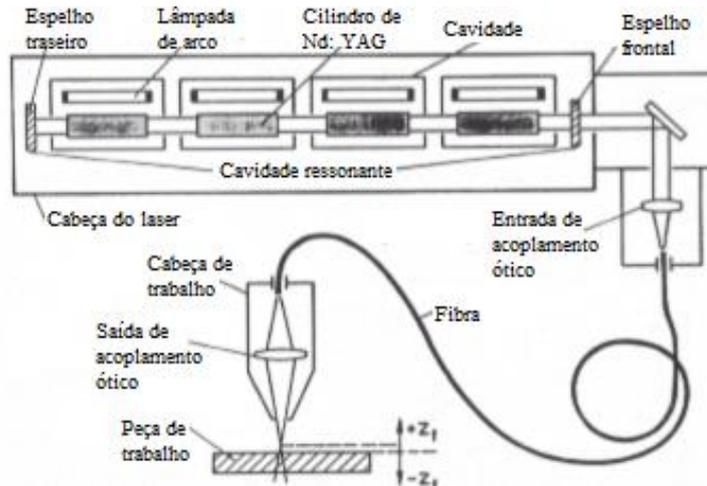


Figura 1.4 - Esquema de um sistema laser Nd: YAG. Adapt. [9].

O potencial uso de fibras óticas revela-se muito importante devido à elevada versatilidade que estas oferecem. O comprimento de onda da luz gerado, na ordem dos  $1,06 \mu\text{m}$ , está na gama de comprimentos na qual existe baixa atenuação nas fibras de vidro. Isto permite que o feixe seja distribuído pela fibra a largas distâncias, na ordem das centenas de metros, com perdas mínimas de energia, o que proporciona o desenvolvimento de sistemas muito flexíveis ao possibilitar que a cabeça de trabalho possa ser movida a distâncias significativas, facilitando procedimentos que exigem boa flexibilidade de movimentos, algo especialmente útil em situações de soldadura com múltiplos eixos ou a montagem das cabeças em robots para operações automatizadas, métodos com elevado interesse nas áreas da robótica e automação [9].

## 1.5 Soldadura laser entre termoplástico e metal

A técnica de soldadura direta de plástico e metal com recurso a laser não está muito divulgada, mas já existem alguns artigos científicos publicados ao longo dos anos que mostram a viabilidade do processo. Em geral os procedimentos são executados de duas formas distintas, onde numa situação o feixe é dirigido diretamente à superfície do metal ou alternativamente à superfície do termoplástico [2].

Num dos métodos, o de transmissão, o feixe atravessa o polímero com baixas perdas de energia e é absorvido pelo metal, que está posicionado imediatamente abaixo, o que vai promover um aumento de temperatura na fronteira dos dois materiais. O acréscimo vai levar à fusão do plástico confinante com a superfície metálica, processo que vai possibilitar a ligação dos dois e que resulta numa ligação após a solidificação [2].

No outro caso, o de condução, o laser vai ser focado na superfície metálica, com o termoplástico posicionado no lado oposto. Neste procedimento o componente metálico vai absorver a energia fornecida, e consequentemente subir de temperatura. Através do efeito da condução de calor, o polímero vai ser aquecido e fundido, promovendo a ligação após o arrefecimento [2].

A Figura 1.5 ilustra os dois métodos de soldadura.

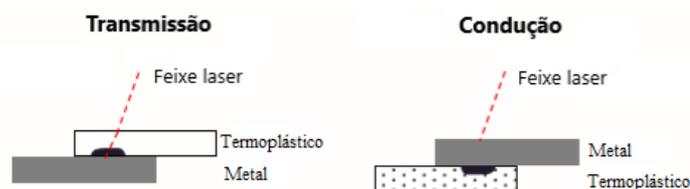


Figura 1.5 - Esquema dos métodos de soldadura laser entre termoplástico e metal. Adapt. [2].

A aplicabilidade de cada processo está dependente das características do termoplástico e do feixe. Para a soldadura por transmissão funcionar, é necessário que o polímero seja transparente à radiação e permita a passagem com pequenas perdas de energia. Esta exigência causa limitações na escolha dos materiais, que só funcionam com lasers específicos. Caso a transparência não seja suficiente, é necessário recorrer ao método da condução, visto que não vai ser possível fornecer energia suficiente à interface com o metal [2].

Um dos primeiros ensaios realizados com sucesso foi desenvolvido por Seiji Katayama e Yosuke Kawahito [17]. Tendo em consideração as técnicas de soldadura laser tanto de metais como de plásticos, desenvolveram um método que permitiu a união bem-sucedida dos dois.

Através de um laser de díodos com potência de 170 W, que produziu um feixe com comprimento de onda de 807 nm, foi realizada a soldadura entre uma placa de PET com 2 mm de espessura e uma chapa de aço inoxidável do tipo 304 de espessura 3 mm, com uso simultâneo de azoto como gás de proteção. O feixe tem um formato retangular com comprimento de 1,2 mm e uma largura de 9,4 mm e move-se a uma velocidade de 3 mm/s [17].

Para fixar os componentes foram usadas duas placas, fixadas à base de trabalho, de modo a garantir o posicionamento e segurar os materiais durante a soldadura, conforme está esquematizado na Figura 1.6.

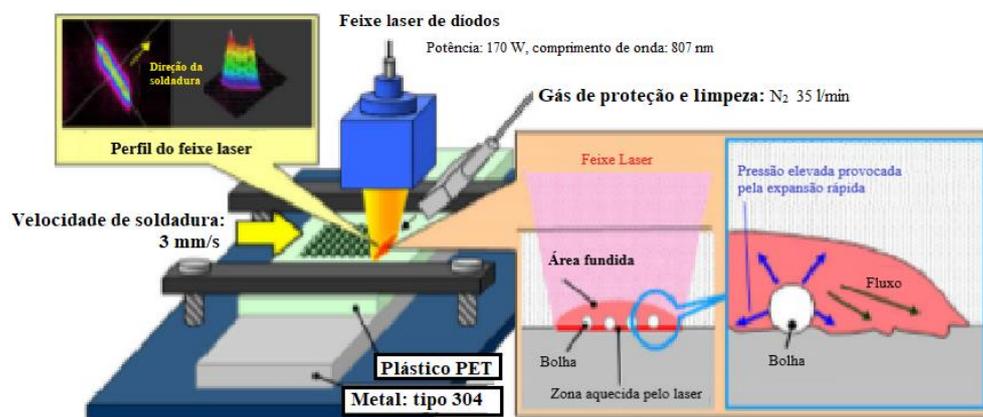


Figura 1.6 - Montagem do procedimento experimental de Katayama e Kawahito [17].

O procedimento teve como base o método de transmissão do feixe através do plástico, onde a placa de PET vai permitir a passagem de uma larga quantidade de energia, que vai ser absorvida pela superfície metálica. Isto provoca um aumento de temperatura e promove a fusão do termoplástico. Para assegurar a passagem da energia, foi selecionado um PET com transparência de 90% à radiação produzida pelo laser de díodos nesta experiência [17].

Foram realizados testes às juntas, nomeadamente ensaios de tração (junta em sobreposição ao corte) de onde se obtiveram forças de corte na ordem dos 3 kN, em conjunto com deformações significativas do PET antes de haver quebra da ligação, como está demonstrado na Figura 1.7 [17].

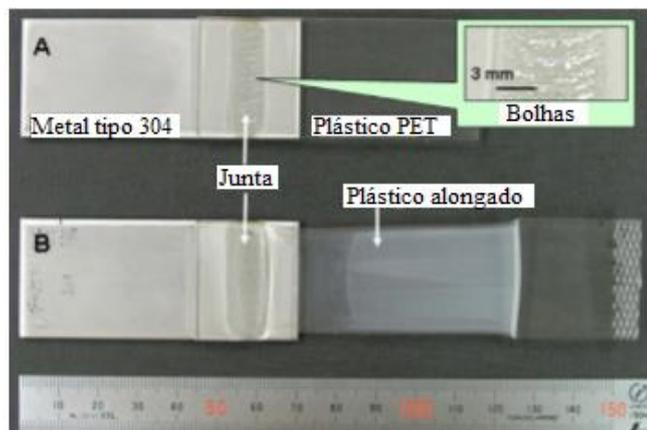


Figura 1.7 - Provetes soldados com PET e aço inoxidável por Katayama e Kawahito. Adapt. [17].

Embora se possa realizar juntas com boa resistência mecânica sem grandes preparações da superfície, tal revela-se muito difícil, sendo necessárias combinações muito específicas de materiais e de feixe. Perante isto, vários ensaios e experiências realizadas focam-se em preparar as superfícies metálicas de modo a criar juntas mecânicas fortes após o processo de soldadura, como é o caso dos trabalhos realizados por Bergmann e Stambke [2] e também de Roesner *et al.* [18].

Algumas preparações das superfícies metálicas consistem na criação de estruturas que promovem a formação de juntas mecânicas com interferência após a soldadura. Estas podem ser ranhuras ou entalhes mais ou menos definidos que vão ser preenchidos pelo termoplástico.

Uma das preparações, realizada por Roesner *et al.* [18], consistiu em usar um laser capaz de produzir micro-ranhuras numa chapa metálica. Este procedimento resultou na obtenção de uniões com PC, PA 66 e PA 66 reforçado com 30 % de fibra de vidro, termoplásticos que não tinham obtido resultados viáveis sem pré-preparação da superfície metálica.

Foram utilizadas chapas de aço inoxidável com 2 mm de espessura. Para além de se pretender abrir as ranhuras, outro objetivo era criar uma estrutura de corte inferior para tentar melhorar a força das juntas. Para elaborar isto, recorreu-se a três passagens de um feixe produzido por um laser com potência de 40 W, que permitiu gerar aberturas com uma largura de 40  $\mu\text{m}$  e uma profundidade de 50  $\mu\text{m}$ . Esta operação originou uma ligeira camada de metal fundido que se sobrepõe às passagens, permitindo obter as pequenas estruturas de corte inferior desejadas, conforme se mostra na Figura 1.8.

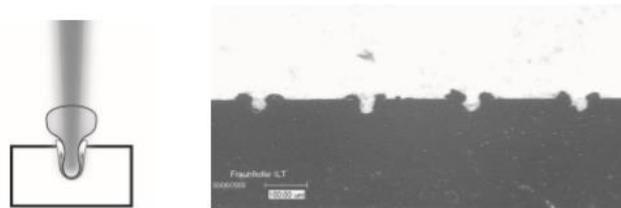


Figura 1.8 - Micro-ranhuras criadas com uso de laser por Roesner *et al.* [18].

As pequenas dimensões das aberturas e as limitações da força oferecida por cada uma induziram à produção de várias micro-ranhuras, com distâncias curtas entre elas, de modo a obter múltiplas juntas em cada provete. As passagens ficaram distanciadas por valores entre os 100  $\mu\text{m}$  e os 800  $\mu\text{m}$ , que permitiram obter resultados viáveis. A área preparada com as estruturas foi de 20 mm x 5 mm, sendo esta constante ao longo das várias experiências [18].

Após esta preparação inicial, os provetes foram colocados em junta de sobreposição, com um pequeno prisma triangular inserido entre o metal e o termoplástico para efeito de material de adição (Figura 1.9). Na prática, esta forma afiada funciona como um “focalizador de energia” e é habitualmente utilizado na soldadura ultrassónica de plásticos [19]. De seguida, foi emitido um feixe laser através de uma cabeça galvanométrica em modo quase-simultâneo [20] e efetuada a soldadura em 1,5 s e 5 s para o policarbonato e poliamida GF30, respetivamente. O laser era de diodo com 250 W de potência e atuou sobre uma linha de comprimento de 18 mm à velocidade de 800 mm/s, em vai e vem (Figura 1.9). O material de adição “focalizador de energia” foi projetado de modo a garantir que ao ser fundido vai preencher as ranhuras criadas, com a força aplicada nos provetes a ser obtida através do uso de um dispositivo de aperto pneumático, que vai aumentar o fluxo de material fundido para as aberturas [18].

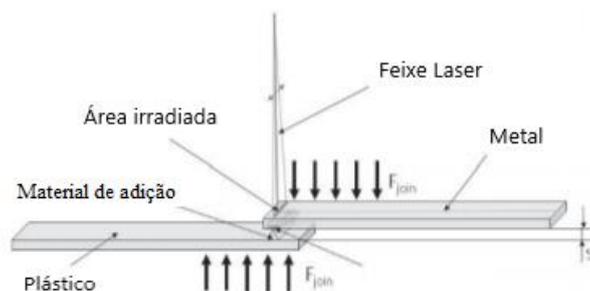


Figura 1.9 - Esquema da montagem de Roesner *et al.* Adapt. [18].

Os valores obtidos nos testes permitiram observar que uma maior densidade de ranhuras obtinha melhores resultados, conforme detalhado no gráfico da Figura 1.10. Para melhor compreender o gráfico, uma densidade de 0,09 representa uma distância de 800  $\mu\text{m}$  enquanto 0,7 é uma distância de 100  $\mu\text{m}$  entre ranhuras. Os ensaios da variação de densidade foram feitos apenas com aço inoxidável e PC.

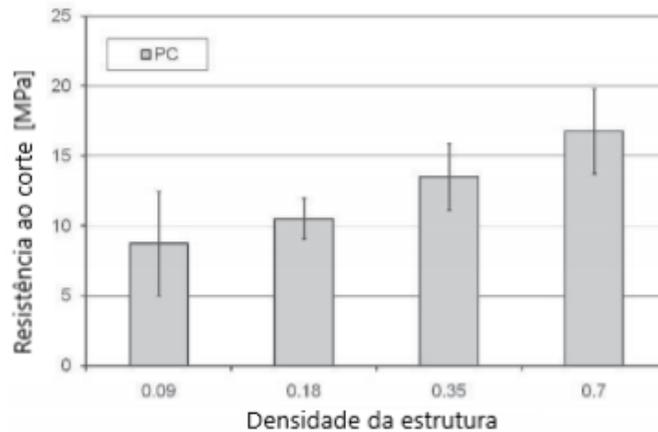


Figura 1.10 - Resultados com variação de ranhuras de Roesner *et al.* Adapt. [18].

Outra geometria, testada por Bergmann e Stambke [2], é constituída por microestruturas de perfil triangular estampadas numa chapa de aço DC01 com 1 mm de espessura. O processo foi executado com um punção metálico com saliências, na qual a chapa foi pressionada com uma força de 400 kN. O perfil obtido pode ser observado na Figura 1.11 onde se tem um PA 66 soldado ao aço.

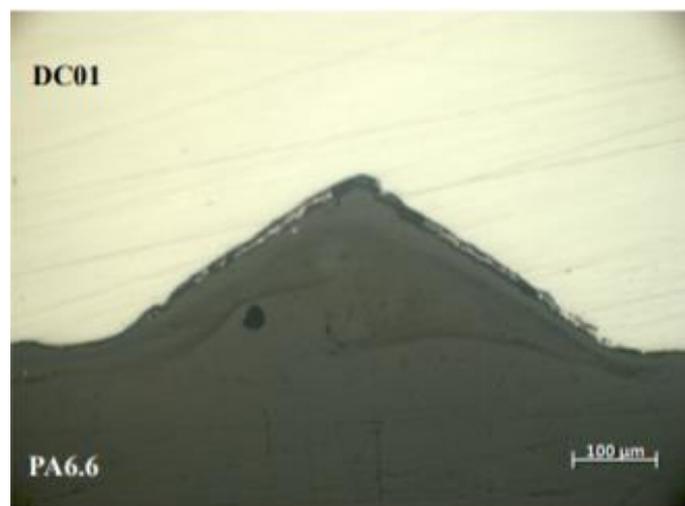


Figura 1.11 - Estruturas estampadas por Bergmann e Stambke [2].

Para além das estruturas estampadas, Bergmann e Stambke também analisaram a influência da rugosidade na superfície metálica. Para tal foram preparados provetes com 4 níveis de rugosidade média, obtidas através de um processo manual de decapagem com jato de areia, com pressão de trabalho de 6 bar, onde se usaram quatro tipos de corindo esférico de granulometrias F24, F54, F120 e F220. Na Figura 1.12 estão imagens dos provetes decapados e já soldados com PA 66:

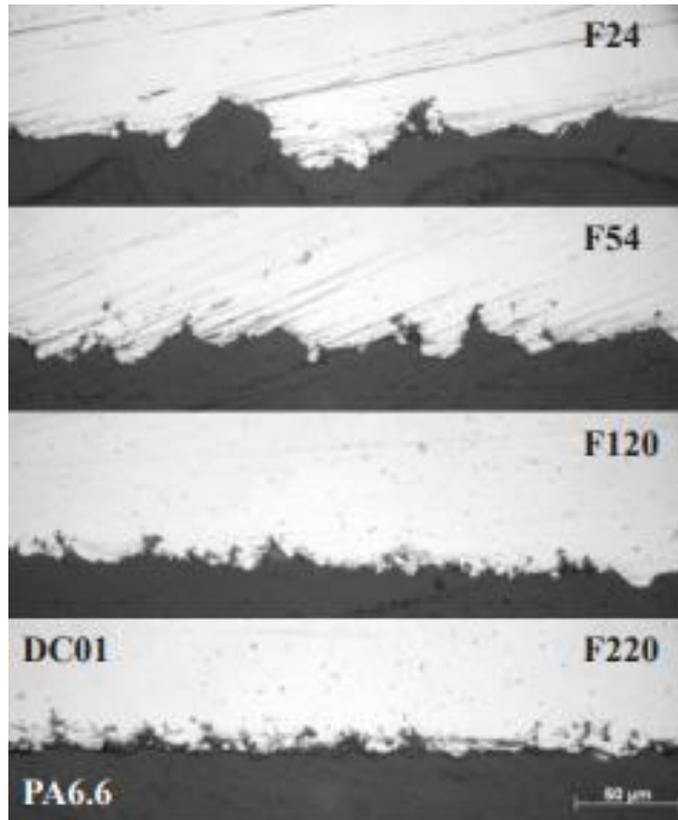


Figura 1.12 - Vista transversal de provetes decapados e soldados por Bergmann e Stambke [2].

Os testes consistiram em ensaios de tração (com junta ao corte, soldada numa área de 33 mm x 3 mm, em sobreposição), efetuados para provetes com rugosidades, com chapa estampada e também para metal sem qualquer tratamento. Todas as soldaduras recorreram ao método de condução, com o laser a ser emitido em direção à superfície metálica. Os resultados obtidos podem ser analisados na Figura 1.13.

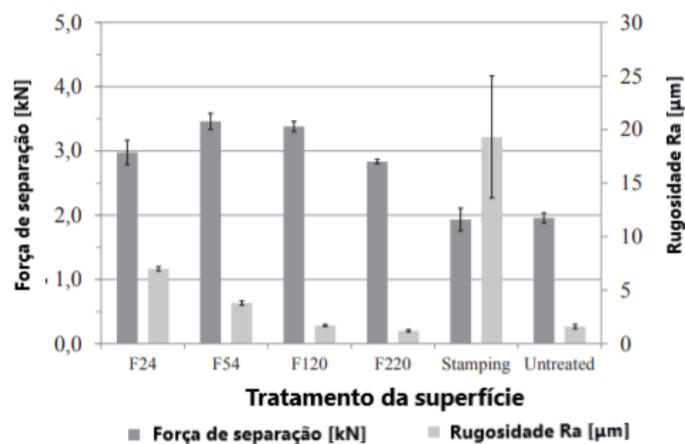


Figura 1.13 - Resultados obtidos por Bergmann e Stambke. Adapt. [2].

Bergmann e Stambke concluíram que as diferentes rugosidades permitiram obter resultados superiores aos dos provetes estampados e os sem qualquer tratamento. As variações surgiram devido às geometrias irregulares obtidas no processo de decapagem com jato de areia, que geraram juntas com interferência (plástico alojado nas reentrâncias da superfície metálica) após a solidificação do termoplástico. No entanto não foi possível distinguir de forma clara o efeito das diferentes rugosidades por não haver uma discrepância significativa entre os valores. A única conclusão foi que a existência da rugosidade melhora a ligação.

Outra análise de Bergmann e Stambke foram os maus resultados dos espécimes estampados, que foram provocados pelas superfícies suaves e lisas produzidas na estampagem, que impediram a produção de juntas mecânicas apropriadas.

Fazendo um balanço dos trabalhos analisados, foi possível concluir que é importante criar superfícies no metal que permitam produzir juntas nas quais o plástico se consiga alojar no interior do metal ou vice-versa. Isto criará um sistema de ancoragem e será fundamental para assegurar uma ligação forte e estável.

Também é necessário analisar a capacidade de realizar soldadura por transmissão ou por condução. Como o método de transmissão depende de o laser percorrer o termoplástico com perdas mínimas de energia, este procedimento necessita de combinações apropriadas do feixe e do polímero. Isto limita a aplicabilidade deste processo, enquanto o método de condução apenas depende de o metal ser capaz de conduzir calor de forma suficientemente rápida e eficaz sem provocar danos.

Com estas noções procedeu-se ao desenvolvimento do procedimento experimental para realizar as soldaduras.



# Capítulo 2 - Procedimento Experimental

## 2.1 Introdução

O procedimento experimental para realizar e testar as soldaduras foi dividido em sete partes, nomeadamente:

- 1) Seleção dos materiais base;
- 2) Elaboração do dispositivo de fixação;
- 3) Design dos provetes utilizados;
- 4) Projeto dos provetes;
- 5) Realização das soldaduras;
- 6) Realização dos ensaios de tração;
- 7) Polimento de provetes para análise posterior.

## 2.2 Materiais de base

Com base nos objetivos deste trabalho foi selecionado um metal e dois termoplásticos, um deles reforçado.

Na escolha foi fundamental optar por um metal capaz de absorver o feixe gerado e posteriormente fornecer de forma adequada calor ao termoplástico por condução. Também é necessário que permitisse criar estruturas (ressaltos ou reentrâncias) na superfície, o que levou à seleção de uma liga de alumínio, mais especificamente uma liga EN AW-6082-T6, na forma de chapa como se vê na Figura 2.1.

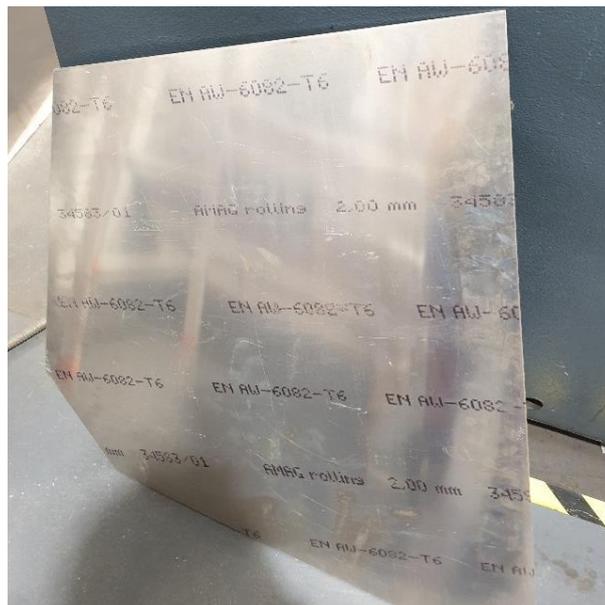


Figura 2.1 - Chapa de EN AW-6082-T6.

A escolha do alumínio foi feita devido à necessidade de selecionar um metal capaz de absorver adequadamente a radiação e posteriormente oferecer uma boa transmissão de calor por condução. Também é importante que fosse macio e fácil de maquinar, de modo a permitir realizar as formas projetadas, quer as ranhuras, quer as marcações, que seriam mais difíceis de obter com outros materiais metálicos.

A escolha da liga EN AW-6082-T6 foi feita por possuir as características pretendidas e pela disponibilidade da mesma com dimensões ideais para os provetes desenvolvidos.

Nos termoplásticos foi selecionado um PA 6 com nome comercial ERTALON 6 SA e um PA 66 reforçado com 30% de fibra de vidro, com nome comercial ERTALON 66 GF30, ambos da empresa

Mitsubishi Chemical Advanced Materials. Estes materiais foram adquiridos sobre a forma de varão e possuem cor preta, sendo parte deles visíveis na Figura 2.2 e na Figura 2.3.



Figura 2.2 - Varão de ERTALON 6 SA de diâmetro de 30 mm.



Figura 2.3 - Varão de ERTALON 66 GF30 de diâmetro 30 mm.

Estes termoplásticos foram selecionados por possuírem boa estabilidade a elevadas temperaturas, elevada resistência e baixa condutividade térmica, aspetos importantes para garantir que o calor gerado na soldadura fica maioritariamente localizado na zona de contacto entre os provetes, sem provocar deformações nem alterações significativas das propriedades, com as principais propriedades de interesse das poliamidas usadas para este trabalho a serem apresentadas mais à frente na Tabela 2.1 e Tabela 2.2.

### 2.2.1 Alumínio EN AW-6082-T6

O alumínio é um metal não ferroso, abundante e largamente usado em múltiplas áreas e com inúmeras aplicações, especialmente as que exigem baixo peso específico. É um material que existe maioritariamente na forma de liga, onde o Al é combinado com outros elementos de modo a alterar as suas características e permitir o uso em outras aplicações [21].

As principais características dos alumínios são [22]:

- Baixo peso específico, por terem baixas densidades que tendem a ser 1/3 da densidade do aço, boa ductilidade e boa resistência mecânica a temperaturas elevadas, se comparado com um plástico. Isto permite reduzir o peso de componentes, facilita o processamento e assegura boas capacidades mecânicas;
- Boa resistência à corrosão. Esta proteção ocorre pela produção de forma natural de uma camada de óxido protetor na superfície do alumínio;
- Boa condutibilidade térmica e elétrica, ideal para componentes transmissores;
- Boa capacidade de refletir luz e calor;

- Não é tóxico, não liberta odores e é fácil de limpar, o que faz com que seja uma opção para componentes que estejam em contacto com comida;
- É um ótimo material para reciclar. O alumínio reciclado tem propriedades equivalentes a alumínio virgem e requer quantidades muito inferiores de energia para ser produzido.

As ligas de alumínio produzidas em forma forjada, tanto por laminagem como extrusão, possuem um sistema de nomenclatura de quatro dígitos, onde o primeiro dígito identifica os principais elementos de liga e os restantes identificam a liga específica. Posteriormente podem ser adicionados códigos de processamento caso tenha havido tratamentos posteriores [21].

A liga EN AW-6082-T6 é uma liga estrutural da série 6000 do alumínio e possui resistência mecânica média com excelente resistência à corrosão [23]. Ligas desta série são ligadas maioritariamente a magnésio e silício [21], com esta liga a ser fácil de maquinar, com boa capacidade para realizar soldaduras [23]. Por ser um metal T6, também foi endurecido e posteriormente envelhecido para adquirir rapidamente a dureza máxima possível [21].

Na série 6000, a liga 6082 é a mais resistente, devido à adição de uma quantidade significativa de manganésio. Este acréscimo oferece maior controlo da estrutura dos grãos da liga e permite obter um metal mais forte [23].

As principais características que tornam esta liga adequada ao procedimento experimental são a resistência à corrosão, importante para garantir uma superfície mais limpa e sem contaminações, a boa maquinabilidade para facilitar a realização das estruturas finas e difíceis de maquinar que foram projetadas, e a necessidade de utilizar um metal mais suave e com elevada ductilidade de modo a produzir marcações com boa profundidade.

## 2.2.2 Poliamida 6 e poliamida 66

As poliamidas são termoplásticos de engenharia sintéticos. Existem vários tipos, mas os mais comuns são as poliamidas alifáticas, também identificadas por Nylon [24], que se destacam por serem polímeros muito fortes e com elevada resistência [25].

O foco são os dois tipos de poliamida utilizados nos ensaios, o PA 6 e o PA 66, também designados de forma comum por Nylon 6 e Nylon 66. Ambas são usadas em muitas indústrias, nomeadamente na indústria automóvel, sendo escolhas populares como alternativa a metais [24]. Os dois polímeros partilham várias características, mas existem algumas que impactam a seleção de cada um para certas aplicações.

Estes termoplásticos são constituídos por monómeros conectados de forma repetida. São estas estruturas que diferenciam o PA 6 e o PA 66. A poliamida 6 é constituída pela repetição de um monómero com 6 átomos de carbono, enquanto a poliamida 66 é constituída pela repetição de 2 monómeros, com 6 átomos de carbono para cada um [25].

As principais características tanto do PA 6 como do PA 66, são as seguintes [25]:

- Elevada resistência mecânica, rigidez, dureza e robustez;
- Boa resistência à fadiga;
- Alta capacidade de amortecimento mecânico;
- Boas propriedades de deslizamento;
- Boa resistência ao desgaste;
- Boas propriedades de isolamento elétrico;
- Boa resistência a radiação de alta energia (gamma e raios x);
- Boa maquinabilidade.

As principais diferenças estão relacionadas com a resistência à temperatura, qualidade de acabamento, impermeabilidade à água e resistência a químicos.

Os PA 6 possuem menor temperatura de fusão, têm um acabamento brilhante e apresentam menor contração quando produzidos num processo de injeção por molde. Estas características tornam-no mais fácil de utilizar em processos de injeção por molde e conseqüentemente esta poliamida é muito popular para produzir componentes que exigem elevada precisão dimensional e uma boa aparência final. Por outro lado, possuem temperaturas de deformação sob carga mais baixas que o PA 66 e são permeáveis à água. Estas características tornam este termoplástico pouco adequado a aplicações sujeitas a temperaturas elevadas, especialmente em contacto com água quente. Também apresentam fraca resistência a ácidos e resistem melhor a impactos fortes e a esforços elevados quando comparados a uma poliamida 66 [25].

O PA 66, por ter uma temperatura de deformação sob carga mais alta, torna-se mais apropriado para aplicações onde vai ser submetido a altas temperaturas. Também possui maior rigidez e módulo de elasticidades e de flexão mais elevados, que tornam este material mais eficaz que o PA 6 para aplicações que requeiram uma elevada performance durante longos períodos [25].

As poliamidas foram selecionadas para este trabalho devido à combinação de elevada resistência mecânica, boa resistência à temperatura e à baixa condutividade térmica que apresentam. No procedimento experimental os provetes terão de fundir na zona de contacto com o metal, mas é necessário que o resto suporte altas temperaturas. As zonas do termoplástico que não estão em contacto com o alumínio têm de se manter a uma temperatura que não os amoleça de forma excessiva, idealmente abaixo da temperatura de deformação sob carga, de modo a evitar deformações indesejadas. Alterações excessivas de forma iriam pôr em causa a utilidade deste processo, devido à necessidade de criar uma boa ligação com peças finais consistentes.

### 2.2.3 ERTALON 6 SA e ERTALON 66 GF30

O ERTALON 6 SA é um PA 6 com uma ótima combinação de resistência mecânica, resistência ao desgaste, rigidez e tenacidade [26]. Na Tabela 2.1 apresentam-se algumas características.

Tabela 2.1 - Características do ERTALON 6 SA [26].

Densidade	1,14 g/cm <sup>3</sup>
Temperatura de fusão	220 °C
Condutividade térmica a 23°C	0,28 W/(K.m)
Temperatura de deformação sob carga, método a 1,8 MPa	70 °C
Temperatura máxima de serviço ao ar para curtos períodos	160 °C
Temperatura máxima de serviço ao ar continuamente	85 °C
Temperatura mínima de serviço	-40 °C
Resistência à tração na rutura	80 MPa

O ERTALON 66 GF30 é um PA 66, reforçado com 30% de fibra de vidro e estabilizado ao calor. O reforço assegura uma maior resistência mecânica, rigidez, fluência, estabilidade dimensional e excelente resistência ao desgaste [27]. Na Tabela 2.2 apresentam-se alguns detalhes.

Tabela 2.2 - Características do ERTALON 66 GF30 [27].

Densidade	1,29 g/cm <sup>3</sup>
Temperatura de fusão	260 °C
Condutividade térmica a 23°C	0,3 W/(K.m)
Temperatura de deformação sob carga, método a 1,8 MPa	150 °C
Temperatura máxima de serviço ao ar para curtos períodos	200 °C
Temperatura máxima de serviço ao ar continuamente	120 °C
Temperatura mínima de serviço	-20 °C
Resistência à tração na rutura	85 MPa

## 2.3 Estação de trabalho

Para realizar o procedimento experimental, foi utilizada a máquina de soldadura SISMA SWA 300, sendo apresentado uma imagem na Figura 2.4.



Figura 2.4 - SISMA SWA 300 [28].

Este equipamento, desenvolvido para soldadura e reparação de moldes, caracteriza-se por ser móvel, com utilização aberta e bastante flexível [28]. Possui uma cabeça com posicionamento e rotação ajustável devido à capacidade de deslocar a mesma de acordo com três eixos, x, y e z, graças a um joystick incorporado, que em associação a eixos motorizados permite realizar os movimentos pretendidos. Também é possível programar cordões simples que podem ser posteriormente executados de forma automática.

O dispositivo vem equipado com um sistema de laser pulsado do tipo Nd: YAG, com potência média de 300 W e sistema de transporte do feixe em fibra de vidro [28].

Associado ao sistema está um ecrã tátil, que se mostra na Figura 2.5, que permite definir os vários parâmetros do laser, nomeadamente a potência, tempo entre impulsos, sobreposição e diâmetro do cordão, e tipo de onda do sinal. Também é indicado no ecrã a energia que será gerada em cada feixe.



Figura 2.5 - Ecrã tátil da SISMA SWA 300.

A cabeça do laser tem acoplado alguns equipamentos para auxiliar as operações que são duas luzes para facilitar a visualização, mangueiras para saída de gás de proteção e microscópio binocular, com as luzes e as mangueiras a permitirem o ajuste das posições para otimizar as operações. O microscópio binocular possui duas funções. Uma é proteger a visão do utilizador durante o procedimento. A outra é ampliar a vista para o local de trabalho, o que vai permitir observar com bastante nitidez o cordão de soldadura realizado e oferece ao utilizador a capacidade de perceber a qualidade do processo e movimentar corretamente a cabeça do laser.

O comando do joystick, visível na Figura 2.6, é constituído por dois componentes principais, o joystick, que possui um botão no topo para disparar o feixe, e o botão de paragem de emergência da máquina.

Na Tabela 2.3 apresentam-se os principais detalhes técnicos do equipamento:

Tabela 2.3 - Características técnicas da SISMA SWA 300 [28].

Sistema laser	ND: YAG
Potência média	300 W
Potência de pico	12 KW
Energia de impulso	150 J
Frequência de impulso	0 – 100 Hz
Duração de impulso	0,3 – 25 ms
Diâmetro do ponto focal	0,6 – 2 mm
Sistema de transporte do feixe	Fibra de vidro
Foco da ótica	120 mm
Sistema de visão	Leica binocular
Velocidade de movimento	0 – 20 mm/s
Curso do eixo x	300 mm
Curso do eixo y	150 mm
Curso do eixo z	500 mm
Tipo de arrefecimento	Ar
Fonte de energia	230 V 50/60 Hz 1 ph 1kW, 400 V 50/60 Hz 3 ph 8 kW
Dimensões	2100 mm x 1200 mm x 1610 mm
Peso	310 kg



Figura 2.6 - Joystick de controlo.

## 2.4 Dispositivo de fixação

O dispositivo de fixação é constituído por 3 elementos principais, uma base de alumínio de 90 mm x 40 mm e duas molas metálicas com comprimento de 40 mm. Os componentes podem ser observados na Figura 2.7.



Figura 2.7 - Componentes do dispositivo de fixação.

As molas metálicas vão ser fundamentais no procedimento. Para assegurar que a soldadura ocorre corretamente, é necessário exercer uma força adequada,  $P_{\text{junção}}$ , que pressione o alumínio contra a poliamida. Um desafio deste processo é assegurar que os materiais se mantenham comprimidos durante toda a operação. Como o termoplástico vai começar a fundir, vai ser necessário aplicar uma força contínua no metal de maneira a garantir que o mesmo permaneça em contacto, caso contrário as expansões do PA fundido em conjunto com as elevadas temperaturas podem provocar deformações, formas e posições de soldadura inesperadas, formação de bolhas e vazios e possível falha do preenchimento das formas existentes para gerar juntas.

As molas vão assegurar a força necessária durante todo o procedimento. A forma e características das mesmas vão fazer com que pressionem os materiais durante todo o procedimento. Os efeitos das molas vão também ser suficientes para manter todos os elementos posicionados durante a soldadura, sem necessidade de usar outro componente de fixação.

A base é lisa e devido à forma e variação dos posicionamentos dos provetes usados, em conjunto com a boa fixação obtida, tornaram desnecessário fazer acrescentos.

A montagem é feita com uma mola de cada lado, ficando um espaçamento entre ambas, para obter uma zona para incidência do laser. Vai haver contacto permanente entre o provete de alumínio e as molas durante todo o processo e o uso de duas delas vai assegurar uma distribuição mais homogênea das forças.

Após montar o dispositivo, este vai ser colocado entre dois perfis de alumínio com a mesma espessura para assegurar um bom alinhamento com a cabeça do laser. A disposição final é apresentada na Figura 2.8.



Figura 2.8 - Dispositivo de fixação posicionado.

Após o posicionamento, é adicionado um espaçador que se mostra na Figura 2.9, com espessura de 2,5 mm, por baixo do provete de alumínio. O espaçador não vai estar em contacto no início da soldadura, mas vai travar o metal durante o procedimento, que vai entrar na poliamida fundida por causa do efeito das molas. A paragem vai prevenir deformações e saídas excessivas do termoplástico no processo, de modo a obter formas finais consistentes.



Figura 2.9 – Espaçador de 20 mm x 10 mm x 2,5 mm.

A Figura 2.10 apresenta um desenho esquemático do *set-up* agora descrito.

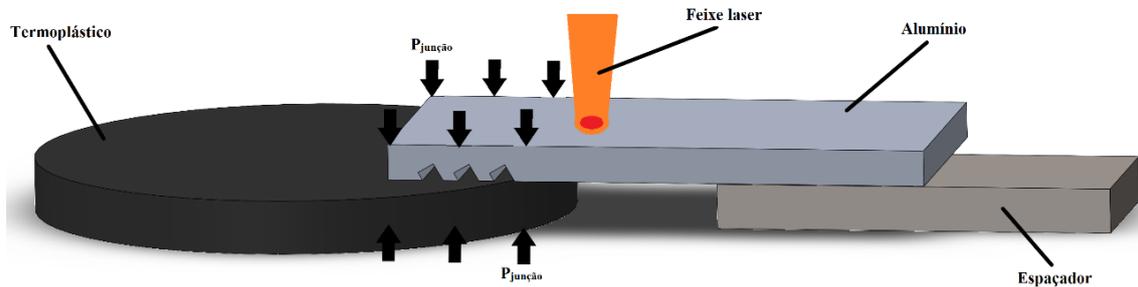


Figura 2.10 - *Set-up* da soldadura.

## 2.5 Provetes

Para realizar a soldadura foram preparados vários provetes, de modo a testar múltiplos parâmetros, como a geometria e número de estruturas existentes nos provetes de alumínio.

Por análise do estado de arte, foi possível concluir que seria necessário criar estruturas na chapa metálica de modo a obter ligações fortes e com qualidade, algo que também se observou com os ensaios iniciais a provetes limpos e sem qualquer alteração, que apresentaram performance muito fraca.

Com estas considerações, e de modo a diferenciar o trabalho dos revistos, foram desenvolvidos dois tipos diferentes de estruturas. Uma consistiu na maquinagem de ranhuras na chapa e a outra na marcação com recurso a uma amarra em cunha de uma máquina de ensaios de tração. Estes métodos permitiram obter provetes como os da Figura 2.11, com todos os provetes de alumínio utilizados na soldadura a terem 30 mm x 15 mm x 2 mm.



Figura 2.11 - Um provete com ranhuras e um provete marcado com pequenos pontos de forma aproximadamente piramidal tetraédrica, em baixo relevo.

### 2.5.1 Provetes com ranhuras

Para executar o procedimento foram projetados e criados dois tipos de ranhuras maquinadas com recurso a uma fresa, que vão ser identificadas ao longo do trabalho como ranhuras verticais ou inclinadas.

Estes estruturas foram maquinadas em provetes de alumínio retangulares de 30 mm x 15 mm, com o fabrico a ser realizado no centro de maquinagem Mikron VCE-500 presente no laboratório de Tecnologia Mecânica do DEM-UA e visível na Figura 2.12. Este centro de maquinagem é uma máquina-ferramenta que tem por base a constituição e funcionamento de uma fresadora convencional e é equipada com uma árvore vertical. Esta máquina é normalmente usada para operações de fresagem ligeira, furação, roscagem e mandrilagem e opera em 3 eixos.



Figura 2.12 - Centro de maquinagem Mikron VCE-500.

As ranhuras inclinadas foram desenvolvidas para melhorar o desempenho das juntas, que mostraram enorme falta de resistência a forças de corte e movimentos de torção, o que levou à criação de aberturas com uma disposição que vai suportar melhor estes efeitos.

De modo a avaliar a eficácia das ranhuras inclinadas, foram também projetadas aberturas verticais e feita uma variação da direção das inclinações, com a criação de estruturas iguais, mas em direções opostas, com o fabrico a ser realizado com uma fresa de 1 mm de diâmetro.

Para distinguir os provetes vão ser usadas ao longo do trabalho as designações provete tipo 1 e provete tipo 2. Também vai ser adicionado o número de ranhuras existentes, de acordo com a identificação presente na Figura 2.13 e Figura 2.14:

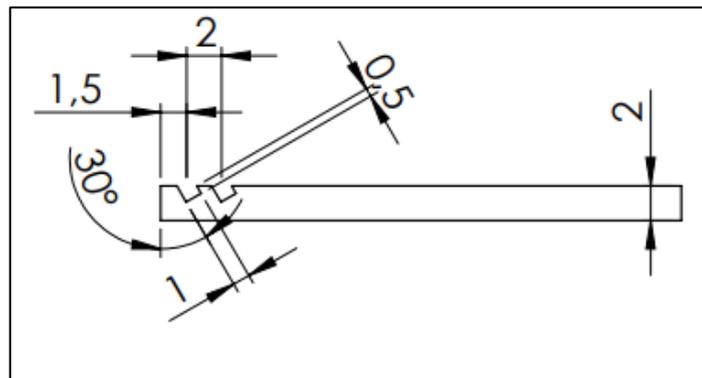


Figura 2.13 - Provetes tipo 1 com 2 ranhuras.

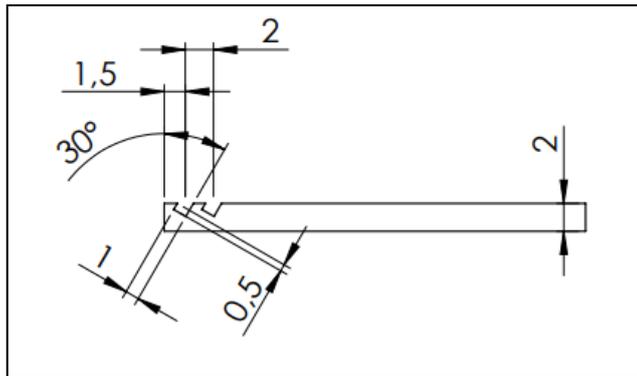


Figura 2.14 - Provete tipo 2 com 2 ranhuras.

Para avaliar o real impacto da inclinação nos resultados, foram feitos provetes com ranhuras de 1 mm, mas verticais, conforme se mostra na Figura 2.15. Foi tido o cuidado de assegurar que a área aberta é aproximadamente a mesma das estruturas inclinadas, de modo garantir uma comparação mais adequada e correta, sendo que estes espécimes foram testados apenas com PA 6.

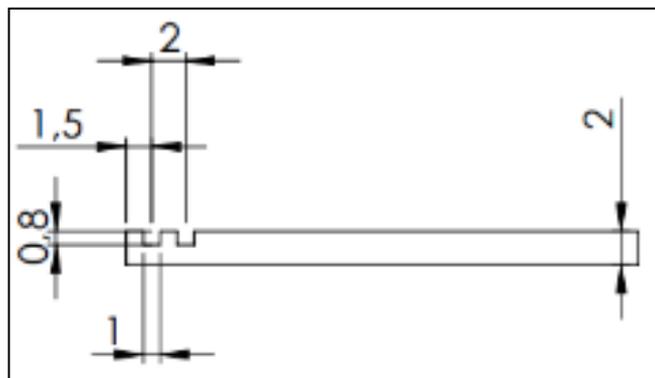


Figura 2.15 - Provete com ranhuras verticais.

Após ensaiar estes provetes, notou-se que ocorreram roturas na extremidade do provete do tipo 2, que se pode ver na Figura 2.16, marcado a vermelho, que surgiram devido à pequena espessura da parede. Para oferecer maior reforço, as ranhuras posteriores foram maquinadas numa posição mais interior, de modo a aumentar em 1 mm a espessura da parede que cedeu, conforme se pode verificar nos desenhos na Figura 2.17 e Figura 2.18.



Figura 2.16 - Provete com rutura.

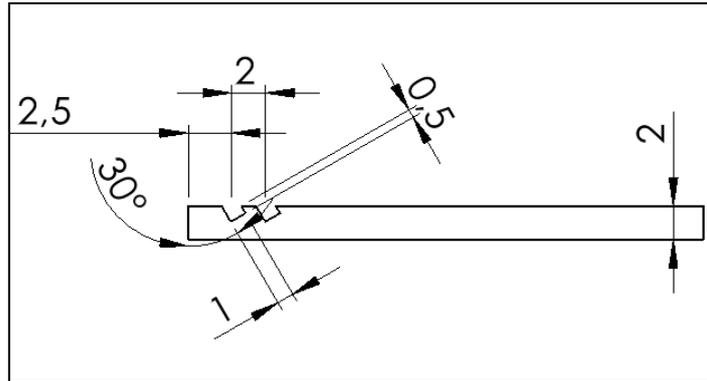


Figura 2.17 - Novo Provete tipo 1 com 2 ranhuras.

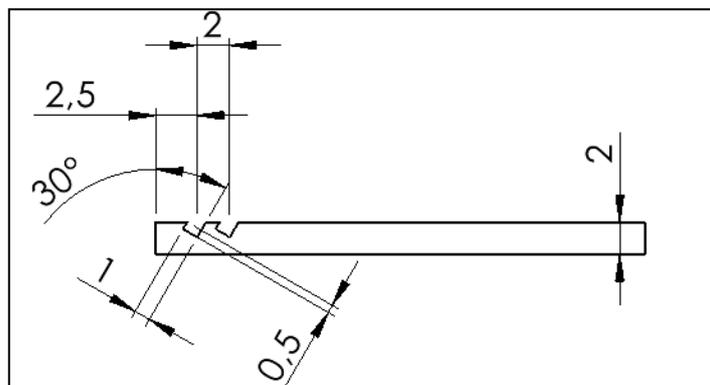


Figura 2.18 - Novo Provete tipo 2 com 2 ranhuras.

Também foi avaliado o efeito da adição ou diminuição do número de ranhuras. Para tal foram feitos novos provetes, mas com uma ou três aberturas. Como as estruturas inclinadas tiveram melhor performance que as verticais, optou-se por não repetir os ensaios com este tipo. Os desenhos com as variações criadas podem ser observados na Figura 2.19, Figura 2.20, Figura 2.21 e Figura 2.22.

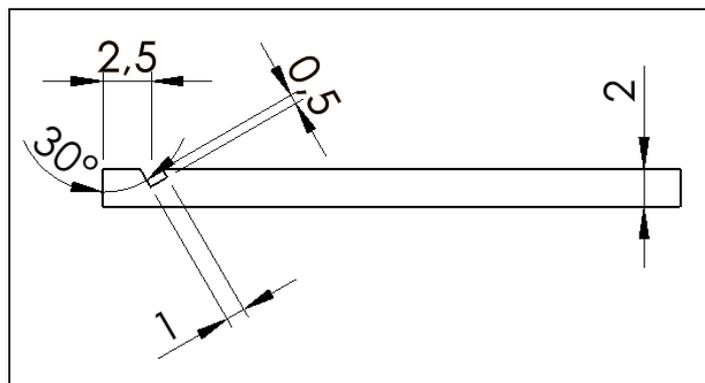


Figura 2.19 - Provete tipo 1 com 1 ranhura.

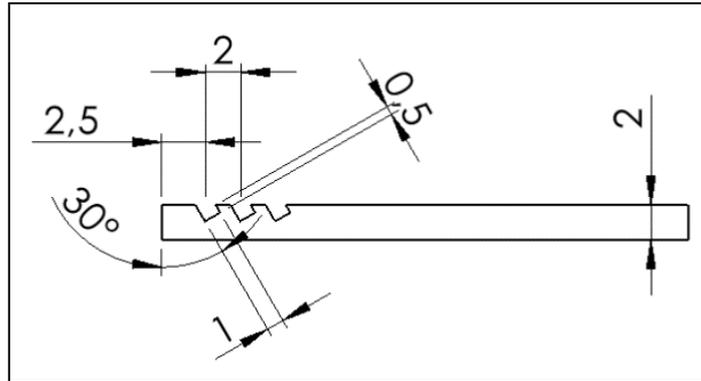


Figura 2.20 - Provete tipo 1 com 3 ranhuras.

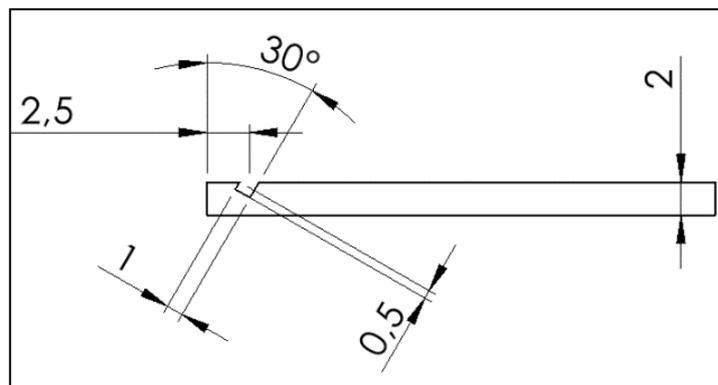


Figura 2.21 - Provete tipo 2 com 1 ranhura.

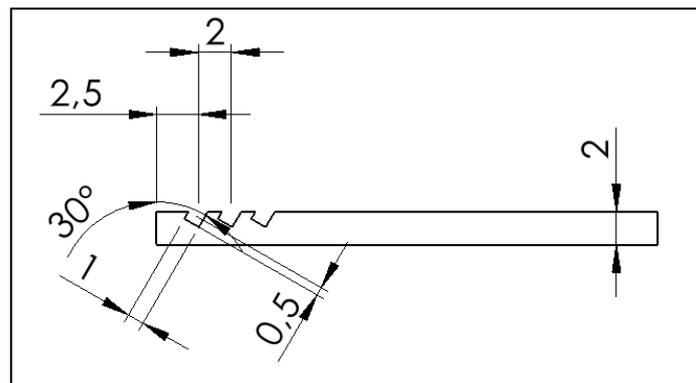


Figura 2.22 - Provete tipo 2 com 3 ranhuras.

## 2.5.2 Provetes marcados

Ao realizar os ensaios de tração dos provetes maquinados, verificou-se que as extremidades do alumínio testado tinham adquirido marcas claras e com alguma profundidade, conforme se pode conferir na Figura 2.23.



Figura 2.23 - Marcas após ensaio de tração.

As boas profundidades obtidas, em conjunto com a facilidade de produção, levaram à realização de ensaios em que as marcas iriam substituir as ranhuras.

Os provetes são de 30 mm x 15 mm, como no caso das ranhuras. As dimensões das zonas com marcações foram ligeiramente superiores a 15 mm x 15 mm. Isto assegura uma boa quantidade de aberturas para as operações de soldadura, sendo um dos espécimes preparados visível na Figura 2.24.



Figura 2.24 - Provette marcado.

### 2.5.3 Provetes de poliamida para soldadura

A poliamida selecionada para os ensaios foi adquirida sobre a forma de varões com 30 mm de diâmetro. Esta escolha foi feita por considerações de custo e disponibilidade. A necessidade de elevadas quantidades de material para fazer todos os testes de diferentes provetes e parâmetros, levou a que fosse mais apropriado adquirir o polímero nesta forma e produzir discos com a espessura adequada para os ensaios.

De modo a garantir a performance dos termoplásticos, foram usados provetes sangrados no torno, tendo estes 30 mm de diâmetro e 3 mm de espessura, como o desenho da Figura 2.25 mostra. A espessura de 3 mm foi selecionada após serem feitos testes com dimensões inferiores, com os espécimes mais pequenos a serem sujeitos a maiores deformações devido à combinação da transmissão de calor para o termoplástico e a entrada do alumínio, que os tornava inadequados ao processo. Acresce que esta espessura, sendo o dobro da usada no alumínio, também garante que ambas as partes a unir têm resistência mecânica mais semelhante, o que será benéfico nos ensaios de tração.

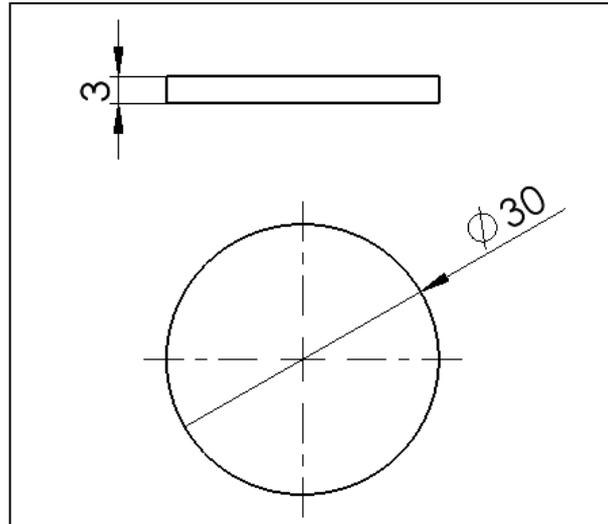


Figura 2.25 - Discos de poliamida para soldadura.

#### 2.5.4 Provetes de alumínio para caracterização do material

Para obter as propriedades do alumínio foram preparados provetes normalizados segunda a EN ISO 6892:2019 [29], com o respetivo desenho na Figura 2.26, para fazer ensaios de tração e obter valores para comparação com os espécimes soldados.

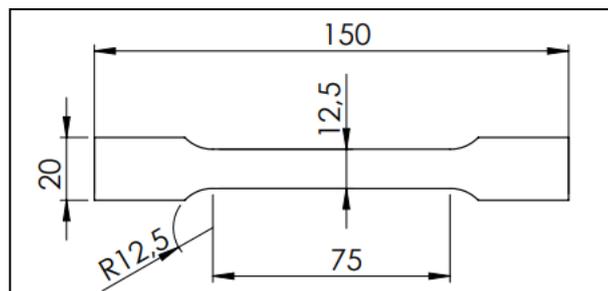


Figura 2.26 - Provede de alumínio para ensaios de caraterização de material.

#### 2.5.5 Provetes de poliamida para caracterização do material

Os provetes de poliamida para caraterização do material foram desenvolvidos com base nos discos de poliamida usados nos ensaios de tração, sendo a única variação a espessura, que passa a ser de 2 mm. Esta variação foi feita por causa da pequena dimensão final dos provetes maquinados, onde 3 mm é uma espessura exagerada e que pode afetar os resultados devido à forma final dos espécimes.

Por oposição aos provetes de alumínio, estes não são normalizados e foram desenhados, conforme está na Figura 2.27, para serem maquinados no centro de maquinagem Mikron VCE-500, com dimensões iguais para ambas as poliamidas.

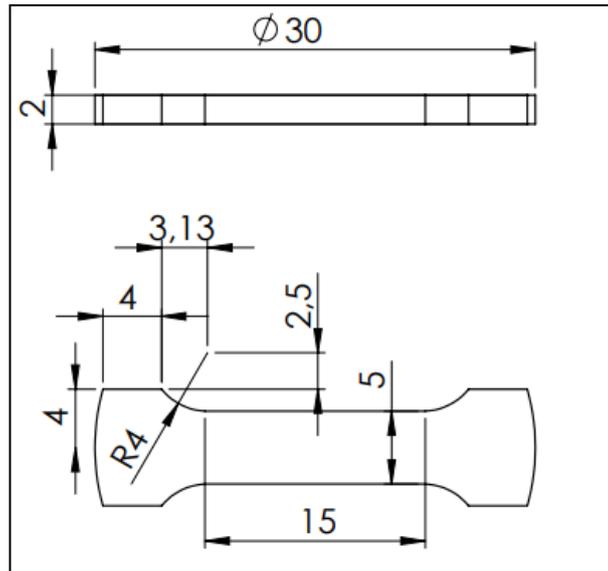


Figura 2.27 - Provete de PA para ensaios de caraterização de material.

## 2.6 Preparação dos provetes

### 2.6.1 Preparação dos provetes de alumínio

O alumínio, existente sobre a forma de chapa, começa a ser preparado na guilhotina, visível na Figura 2.28. Aqui é feito um corte inicial da chapa de modo a obter uma quantidade adequada para as operações seguintes.



Figura 2.28 - Guilhotina.

Inicialmente vão ser maquinados provetes com dimensão de 30 mm x 15 mm no centro de maquinagem Mikron VCE-500 para assegurar o posicionamento e esquadria, fundamental para garantir a qualidade das ranhuras que serão criadas.

A existência das ranhuras inclinadas em conjunto com as limitações do centro de maquinagem utilizado, que apenas possui três eixos, levaram a que fosse necessário inclinar os provetes durante o fabrico. Esta solução apresentou, no entanto, alguns desafios. Como a chapa utilizada possui apenas 2 mm de espessura e a fresa é de pequena dimensão, qualquer pequena vibração durante a operação irá causar problemas. De facto, a primeira dificuldade será a fixação (aperto) da pequena chapa de forma a que haja espaço para maquinizar os rasgos. Esta combinação de fatores faz com que exista enorme risco de falha na abertura, especificamente um elevado risco de a chapa desprender, da fresa partir, ou de haver movimentos inesperados que façam com que as ranhuras sejam produzidas de forma incorreta.

Para solucionar estes problemas, foi feito um gabarito, que se pode ver na Figura 2.29, para posicionar e oferecer apoio aos provetes durante o fabrico. Criado a partir de um pequeno bloco, foi maquinada uma parede com a inclinação de 30 graus necessária para as ranhuras. Ao fixar a chapa a este dispositivo, consegue-se não só prender melhor os provetes, como dar maior suporte durante a abertura das ranhuras, aspetos que vão facilitar todo o procedimento e garantir o posicionamento final. Na Figura 2.30 estão alguns provetes maquinados com 1, 2 e 3 ranhuras.



Figura 2.29 - Gabarito para maquinagem das ranhuras.

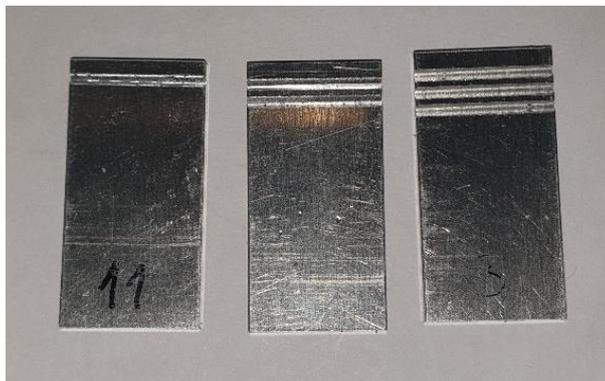


Figura 2.30 - Alguns provetes com ranhuras maquinados de 30 mm x 15 mm x 2 mm.

Para preparar os provetes marcados, o alumínio foi igualmente maquinado com dimensões de 30 mm x 15 mm. Após esta operação foram levados para a máquina de ensaios Shimadzu AG-100kN. Embora não tenha sido a máquina utilizada para os ensaios de tração, por motivos de conveniência recorreu-se a esta, que tem o mesmo tipo de amarra necessária, visível na Figura 2.31. Para o procedimento ser feito adequadamente, a amarra tem de estar fixa na máquina, de modo a maximizar a força que vai ser aplicada.



Figura 2.31 - Amarra em cunha montada na máquina de ensaios.

Estando tudo pronto, coloca-se um provete na amarra e aperta-se até onde for possível, ficando então colocado por cerca de 10 segundos. Para obter boas marcações vai ser preciso marcar duas vezes cada metade. Se o processo for executado de uma só vez, as marcas vão ficar com pouca profundidade, tal como se verifica na Figura 2.32, onde o provete com uma seta foi mal produzido.

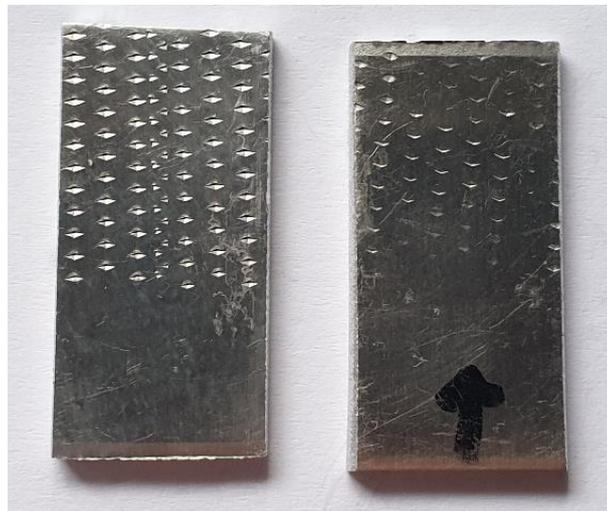


Figura 2.32 - Provete bem e mal marcado

Ao fazer o procedimento em uma metade de cada vez, é possível apertar mais a amarra e consequentemente obter marcações mais profundas e bem definidas.

Quanto aos provetes de alumínio para caracterização de material, estes vão ser produzidos no centro de maquinagem Mikron VCE-500 a partir da chapa de alumínio EN AW-6082-T6, sendo um deles apresentado na Figura 2.33.



Figura 2.33 - Provete de alumínio maquinado para caraterização do material.

## 2.6.2 Preparação dos provetes de poliamida

Partindo dos varões, os provetes de poliamida foram fabricados com uso de uma operação de sangramento realizada no torno convencional Pinacho S90/200 que se pode ver na Figura 2.34 e que está disponível no Laboratório de Tecnologia Mecânica do DEM-UA. Exemplos produzidos estão visíveis na Figura 2.35 e Figura 2.36.



Figura 2.34 - Torno Pinacho S90/200.



Figura 2.35 - Provetes sangrados de ERTALON 6 SA.



Figura 2.36 - Provete sangrados de ERTALON 66GF30.

Após o sangramento, vai existir uma pequena quantidade de material no centro do disco que é removido com uso de uma lima e de uma lixa, para permitir o posicionamento correto dos espécimes soldados nas amarras da máquina de tração.

Os provetes de poliamida para caracterização de material vão ser maquinados a partir dos discos usados na soldadura, com a forma final a ser produzida no centro de maquinagem Mikron VCE-500. O resultado destas operações pode ser visto na Figura 2.37.



Figura 2.37 - Provete de ERTALON 66 GF30 e Provete de ERTALON 6 SA maquinados.

## 2.7 Parâmetros de soldadura

Antes de se realizar as soldaduras foi necessário escolher o método a utilizar. Para isso fizeram-se ensaios iniciais com alguns materiais disponíveis.

Primeiro optou-se por testar o método de transmissão pelo termoplástico. Para assegurar que o termoplástico não ficava danificado, usaram-se parâmetros baixos no laser. Nestas soldaduras iniciais usou-se o ERTALON 6 SA, mas em cor natural. Havia um varão disponível e esta poliamida permite a passagem de alguma luz, conforme se verifica na Figura 2.38, onde um provete de ERTALON 6 SA natural está em cima de dois provetes de ERTALON 6 SA preto e é possível observar alguma passagem de luz. Naturalmente, sabe-se que a simples passagem de luz não garante que o material seja transparente ao laser, mas é um bom indicador.



Figura 2.38 - ERTALON 6 SA natural em cima de dois provetes de ERTALON 6 SA preto.

Outro ensaio feito foi em PC, que por ser um termoplástico amorfo não possui zonas cristalinas e permite a passagem de mais luz que as poliamidas. Os pequenos cristais formados em termoplásticos semi-cristalinos dispersão luz e por isso limitam a passagem de radiação laser [30].

O uso destes dois termoplásticos não resultou em soldaduras viáveis, devido à falta de adesão dos provetes, que resulta da dificuldade em transmitir energia suficiente até à zona de contacto com o metal. Desta forma os parâmetros foram aumentados, nomeadamente a potência e tempo entre pulsos do feixe, mas as superfícies começaram a queimar antes de haver uma ligação, conforme se vê na Figura 2.39 e Figura 2.40.



Figura 2.39 - PC com partes da superfície queimada.



Figura 2.40 – PA 6 com partes da superfície queimada.

A inviabilidade do método de transmissão levou ao uso da soldadura por condução que permitiu obter ligações de melhor qualidade.

Para criar uma junta é necessário fornecer energia suficiente ao metal para permitir que a zona de interesse do termoplástico entre em estado pastoso de pré-fusão. O fundido em conjunto com a entrada do provete de alumínio vai preencher as ranhuras ou as marcações. Também é necessário considerar a diferença das propriedades das poliamidas usadas, nomeadamente a maior temperatura de fusão do ERTALON 66 GF30, que conseqüentemente necessita de mais energia no processo. Isto vai levar a que existam parâmetros diferentes para os dois termoplásticos.

O posicionamento dos provetes de alumínio vai variar com o número de ranhuras existentes. Os provetes de alumínio são colocados o mais próximo possível da extremidade do termoplástico, para diminuir ao máximo a área de contacto. Para se conseguir preencher corretamente as ranhuras, as mesmas têm de estar posicionadas diretamente por cima da poliamida ao longo de toda a ranhura. A variação da quantidade de aberturas faz com que os provetes com maior quantidade ocupem áreas superiores e simultaneamente necessitem de mais energia durante o procedimento.

Para realizar corretamente a união, não só foi preciso selecionar os parâmetros da máquina, como também fazer variar o cordão. Este depende maioritariamente do posicionamento do provete de alumínio e da poliamida utilizada. No caso de haver mais área em contacto com a poliamida ou de se usar o PA 66, vai ser necessário aumentar o cordão para fornecer mais energia. Um exemplo do aspeto final da soldadura pode ser observado na Figura 2.41.

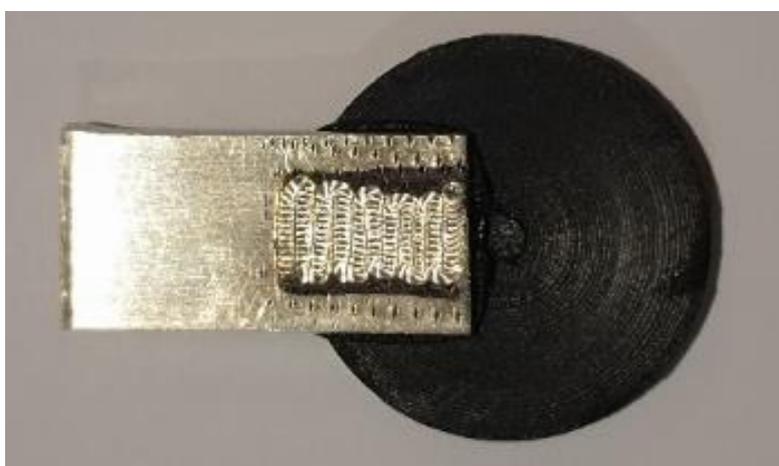


Figura 2.41 - Provette soldado.

A opção de fazer variar o cordão ao invés dos parâmetros prende-se em fatores de segurança e também em garantir maior controlo no processo. Ao aquecer gradualmente o alumínio, consegue-se uma entrada mais controlada da poliamida nas estruturas, o que reduz o risco de saídas excessivas e descontroladas de fundido e evita a formação de vazios. Caso os cordões sejam constantes, em alguns casos a energia emitida por impulso teria de ser aumentada de forma muito significativa. Este aumento provoca queimaduras indesejadas na superfície metálica que colocam em causa a qualidade final do mesmo. Outra consideração a ter é o alumínio refletir parte do laser incidente. Esta reflexão, se for excessiva, pode danificar a lente do equipamento e provocar danos. Para prevenir estes problemas, decidiu-se que a solução ideal é fazer variar o cordão em detrimento dos parâmetros.

Todos os cordões foram executados da mesma forma. Inicialmente foram marcadas linhas de guia com um marcador, sendo definido o comprimento e largura da zona de incidência do feixe, identificadas na Figura 2.42 e Figura 2.43, de modo a assegurar dimensões constantes. A soldadura é iniciada na zona mais afastada das ranhuras e termina na extremidade mais próxima. Isto permite fornecer energia de forma gradual, mas também reservar as últimas incidências do laser para a zona com superfícies preparadas, produzindo temperaturas mais elevadas na área de interesse. O laser vai varrer toda a superfície de forma controlada, sendo o cordão criado de acordo com as direções apresentadas na Figura 2.42 e um exemplo produzido visível na Figura 2.43, onde a marca verde apresenta o início e a marca vermelha o fim.

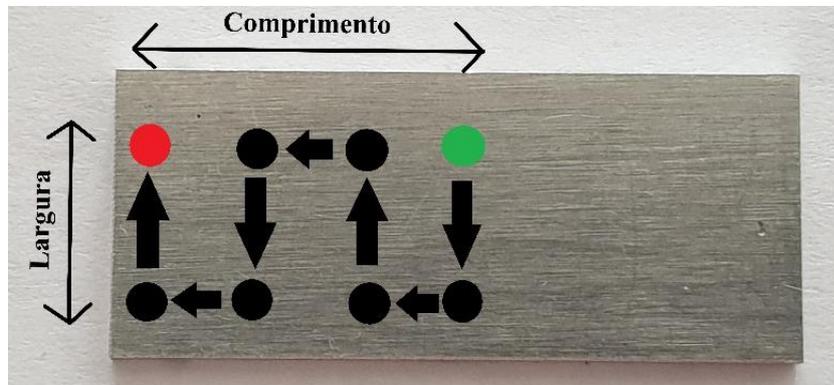


Figura 2.42 - Direção dos cordões criados.

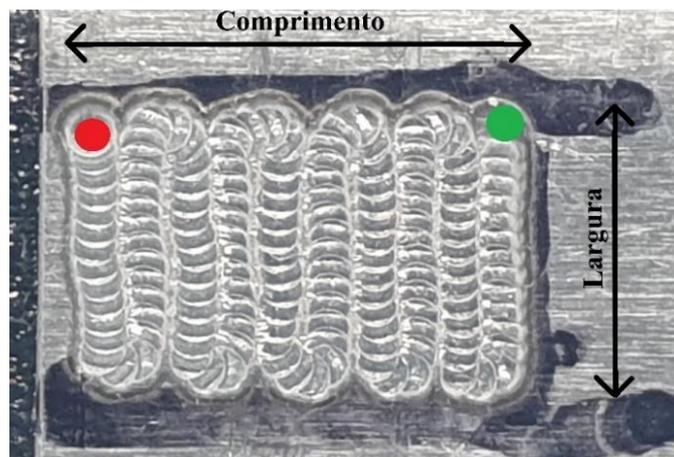


Figura 2.43 - Cordão de soldadura.

Os parâmetros utilizados para produzir as soldaduras foram os indicados nas Tabelas 2.4 a 2.7. Houve um mínimo de 3 provetes para cada tipo soldados. Para obter a energia total fornecida, recorreu-se à fórmula (2.1).

$$E_{fornecida} = N * E_{impulso} \quad (2.1)$$

onde  $E_{\text{fornecida}}$  é a energia total fornecida para realizar a soldadura,  $N$  é o número total de impulsos para realizar a operação e  $E_{\text{impulso}}$  é a energia fornecida por cada impulso.

Tabela 2.4 - Parâmetros de soldadura para o ERTALON 6 SA, com a % da potência em relação aos 300 W de potência média da SISMA SWA 300.

ERTALON 6 SA					
Potência (%)	Tempo de pulso (ms)	Sobreposição (%)	Diâmetro focal (mm)	Tipo de onda	$E_{\text{impulso}}$ (J)
73	6,5	75	2		46,2

Tabela 2.5 - Parâmetros de soldadura para o ERTALON 66 GF30, com a % da potência em relação aos 300 W de potência média da SISMA SWA 300.

ERTALON 66 GF30					
Potência (%)	Tempo de pulso (ms)	Sobreposição (%)	Diâmetro focal (mm)	Tipo de onda	$E_{\text{impulso}}$ (J)
84	7,4	75	2		61,2

Tabela 2.6 - Dimensões dos cordões de soldadura do ERTALON 6 SA.

Tipo de provete	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Número de impulsos (N)	$E_{\text{fornecida}}$ (J)
Provete 1 com 1 ranhura	10	8	112	5174
Provete 1 com 2 ranhuras	14	8	128	5914
Provete 1 com 3 ranhuras	18	8	150	6930
Provete 2 com 1 ranhura	10	8	112	5174
Provete 2 com 2 ranhuras	14	8	128	5914
Provete 2 com 3 ranhuras	14	8	150	6930
Provete Marcado	13	9	154	7115
Provete ranhuras verticais	10	9	120	5544

Tabela 2.7 - Dimensões dos cordões de soldadura do ERTALON 66 GF30.

Tipo de provete	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Número de impulsos (N)	E <sub>fornecida</sub> (J)
Provete 1 com 1 ranhura	17	8	195	11934
Provete 1 com 2 ranhuras	18	8	210	12852
Provete 1 com 3 ranhuras	21	8	238	14566
Provete 2 com 1 ranhura	17	8	195	11934
Provete 2 com 2 ranhuras	18	8	210	12852
Provete 2 com 3 ranhuras	21	8	238	14566
Provete Marcado	18	8	170	10404

## 2.8 Ensaios de tração

Após a realização das soldaduras, foram realizados ensaios de tração. Estes são ensaios mecânicos largamente utilizados para caracterização de materiais e processos e consistem em lentamente puxar uma amostra até a mesma partir [21].

Os ensaios foram efetuados na máquina Shimadzu AGS-X10 kN, apresentada na Figura 2.44.



Figura 2.44 - Máquina de ensaios Shimadzu AGS-X10 kN.

Durante o ensaio são recolhidos os valores de força e deslocamento exercidos. Recorrendo a estes resultados, em conjunto com a área e comprimento inicial das amostras, é possível calcular a tensão e a deformação recorrendo às equações (2.2) e (2.3) [21].

$$\sigma = \frac{P}{A_i} \quad (2.2)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_i} \quad (2.3)$$

onde  $\sigma$  é a tensão,  $P$  a carga aplicada,  $A_i$  a área inicial da secção transversal do provete,  $\varepsilon$  a deformação,  $\Delta L$  a variação de comprimento do provete e  $L_i$  é o comprimento inicial do provete.

Os valores da tensão e deformação calculados vão permitir criar curvas de tensão-deformação, sendo que estas permitem obter vários valores de interesse, que no caso deste trabalho é a Resistência máxima suportada pelos provetes soldados. Uma curva de tensão-deformação de um metal dúctil é apresentada na Figura 2.45, onde é possível observar a Resistência máxima.

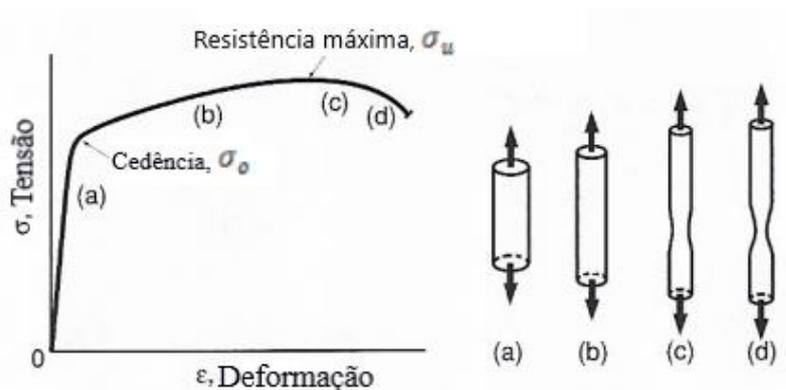


Figura 2.45 - Exemplo de curva de tensão-deformação de um metal dúctil. Adapt. [21].

Para efeitos da análise da qualidade, vai-se calcular a Resistência máxima,  $\sigma_u$ , obtida com recurso à fórmula (2.4) [21] e também a eficiência da junta através da fórmula (2.5).

$$\sigma_u = \frac{P_{max}}{A_i} \quad (2.4)$$

$$\eta = \frac{\sigma_{u,junta}}{\sigma_{u,base}} \quad (2.5)$$

onde  $\sigma_u$  é a resistência máxima,  $P_{max}$  é a carga máxima aplicada,  $\eta$  é a eficiência da junta,  $\sigma_{u,junta}$  é a resistência máxima da junta soldada e  $\sigma_{u,base}$  é a resistência máxima do termoplástico base utilizado. Nos materiais de base também foi verificada a deformação no ponto de carga máxima,  $\varepsilon_{max}$ , para ter noção da capacidade de deformação dos materiais utilizados.

Na verdade, os ensaios efetuados colocam a área soldada da amostra ao corte, pelo que a formulação aqui descrita não é verdadeira e claramente será conservadora. Ou seja, dado que a amostra tenderá a criar momentos fletores na zona da soldadura, esse facto introduz tensões normais que, não sendo consideradas nestas fórmulas, vão conduzir a valores mais baixos de resistência ao corte que aqueles que serão os verdadeiros. Ainda assim, com o intuito de minorar o momento fletor, durante a amarração na máquina de ensaios, foram colocados calços com a mesma espessura da amostra para que a mesma tivesse o plano de soldadura alinhado com o eixo de corte (Figuras 2.46 e 2.47).

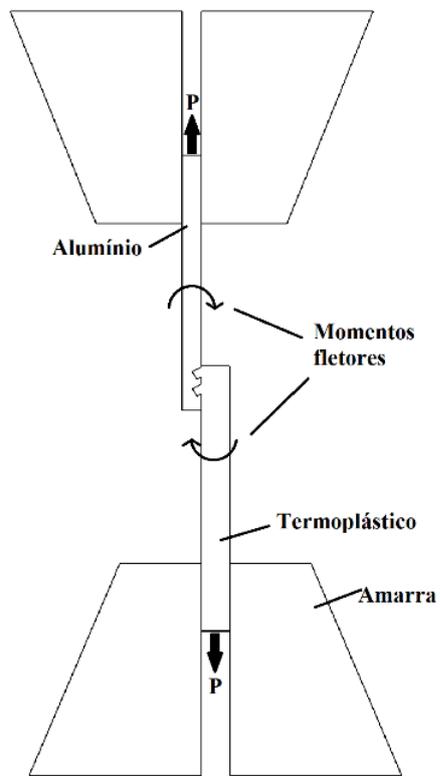


Figura 2.46 - Esquema da amostra montada na máquina de ensaios sem calços.

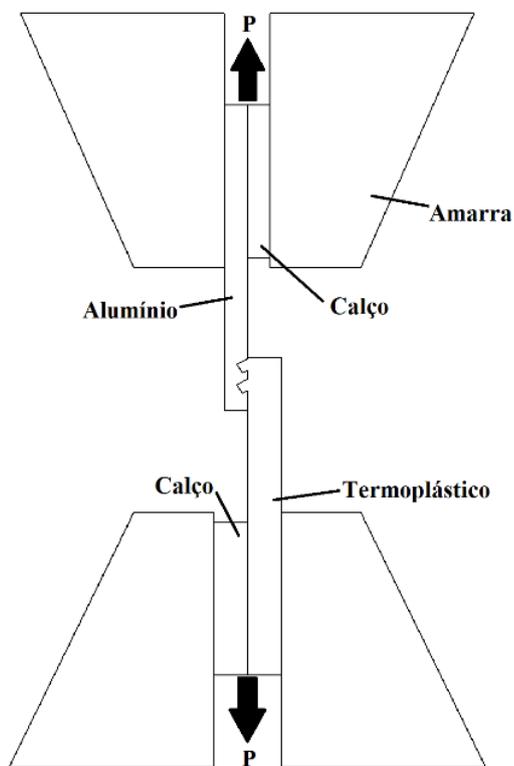


Figura 2.47 - Esquema da amostra montada na máquina de ensaios com calços.

Os ensaios dos provetes soldados foram realizados à velocidade constante de 1 mm/min, adequada às pequenas dimensões que possuem. Nos ensaios de caracterização de material, os provetes de alumínio e de PA 6 foram testados à velocidade de 5 mm/min e o PA 66 reforçado a uma velocidade de 2 mm/min, sendo efetuados 3 ensaios para cada material de base. A poliamida 6 foi experimentada a 5 mm/min devido à elevada capacidade de deformação que a mesma apresentou, o que implicava ensaios excessivamente longos com valores mais baixos, enquanto a poliamida 66 reforçada foi ensaiada a 2 mm/min devido ao comportamento muito rígido que teve e que fizeram com que velocidades superiores tornassem os ensaios demasiado curtos para obter dados com qualidade.

## 2.9 Polimento de provetes

Após os ensaios de tração, foram verificadas alterações na forma expectável das ranhuras dos termoplásticos geradas na soldadura. Por causa das limitações em observar estes detalhes devido à forma dos provetes, optou-se por remover uma parte de modo a observar melhor as variações. Para limitar possíveis problemas que possam surgir num corte, método que poderia danificar os espécimes, optou-se por polir a superfície lateral até atingir as ranhuras. Para ter um bom ponto de comparação, soldou-se um provete que também foi polido, de modo a observar o aspeto sem deformações, como se vê na Figura 2.48.



Figura 2.48 – Provette soldado com 3 ranhuras.

Para realizar o polimento, recorreu-se a uma polidora Struers Rotopol-21, visível na Figura 2.49.



Figura 2.49 - Polidora Struers Rotopol-21.

O polimento consistiu em utilizar inicialmente uma lixa de grão 180, que por ser mais grossa permite remover rapidamente material. Ao atingir a zona das ranhuras, usa-se uma lixa de grão 600, que vai remover o termoplástico de forma mais suave para evitar alterações e assegurar uma boa qualidade final do polimento.

# Capítulo 3 - Análise e discussão dos resultados

## 3.1 Ensaios de tração do material de base

### 3.1.1 Ensaios do alumínio EN AW-6082-T6

O Gráfico 3.1 apresenta o resultado de um dos três provetes de Alumínio EN AW-6082-T6 testado.

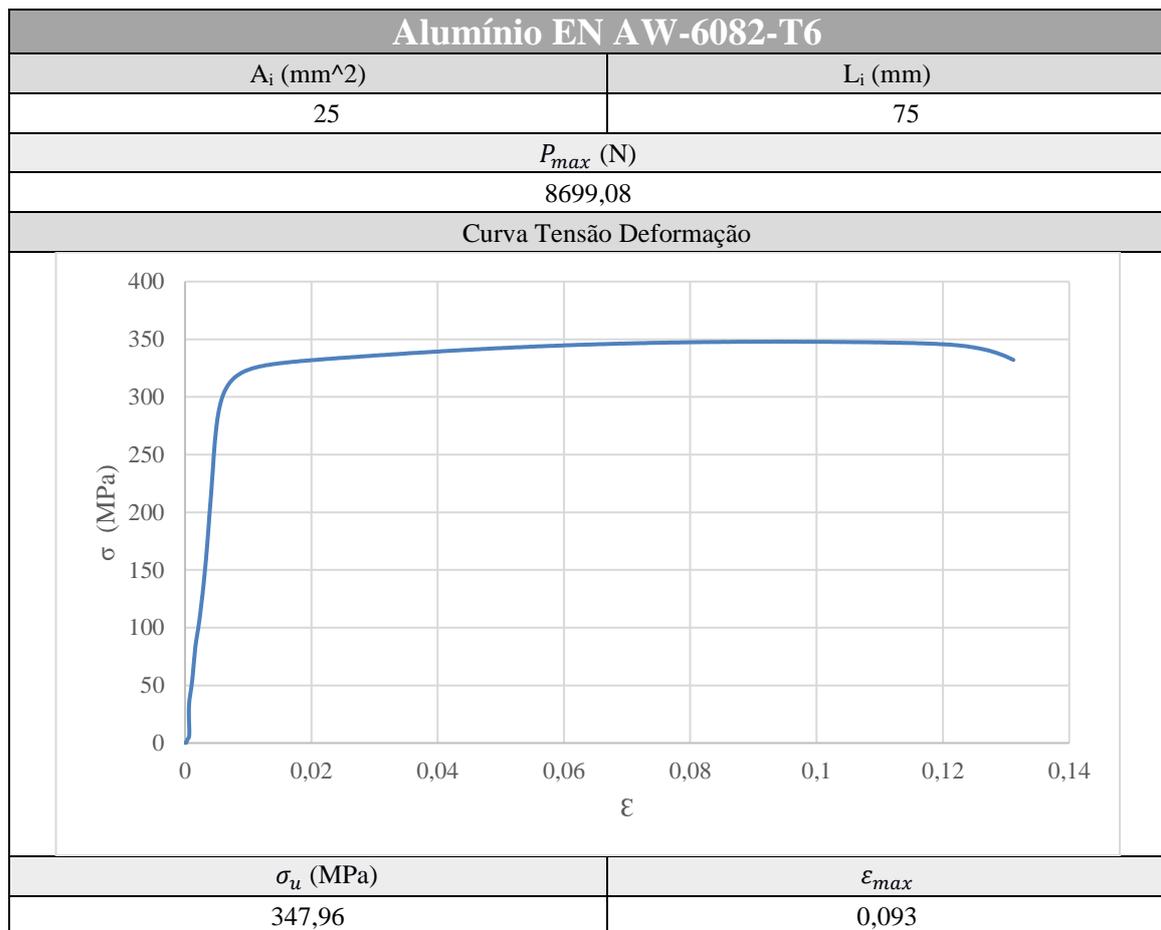


Gráfico 3.1 - Resultados experimentais de caracterização do alumínio EN AW-6082-T6.

Os resultados obtidos para a resistência máxima do alumínio EN AW-6082-T6 tem valores esperados para este material. Verificando exemplos observados no website da Azom [23], os valores obtidos foram superiores aos 310 MPa deste fabricante. Tendo em conta este não ser o fabricante e por comparação a outros valores de resistência para esta liga, o valor obtido não é considerado fora de linha com o expectável. Em conjunto com a correta rotura no centro dos provetes nos ensaios, conforme se pode observar na Figura 3.1, a resistência máxima obtida foi considerada certa e vai ser utilizada para as análises posteriores.



Figura 3.1 - Provette testado e não testado de alumínio EN AW-6082-T6.

### 3.1.2 Ensaio da poliamida ERTALON 6 SA

O Gráfico 3.2 apresenta o resultado de um dos três provetes de ERTALON 6 SA testado.

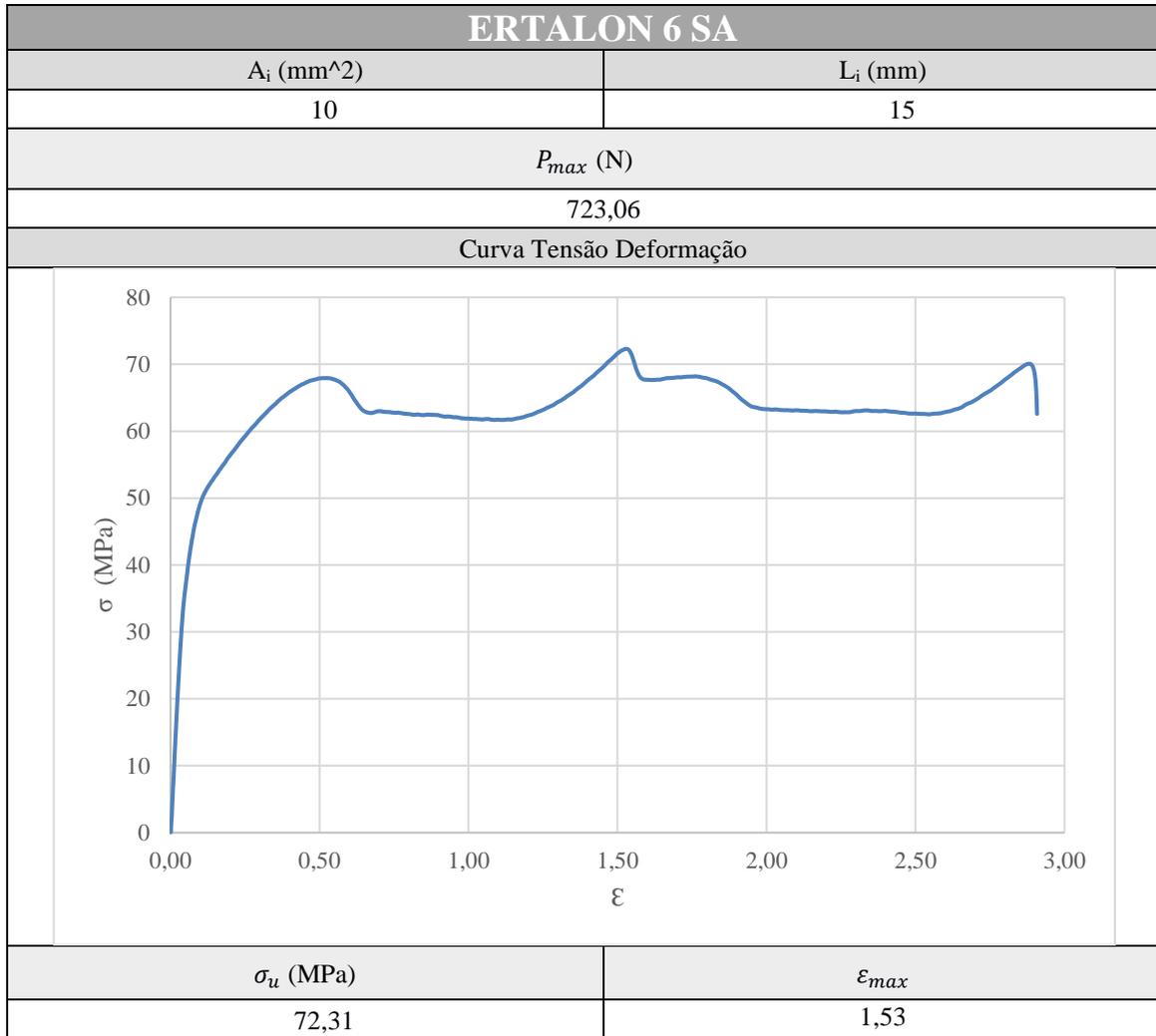


Gráfico 3.2 - Resultados experimentais da caracterização do ERTALON 6 SA.

Uma análise aos provetes após o ensaio mostram que a ruptura ocorre no centro, que é o pretendido nos ensaios e é visível na Figura 3.2, que apresenta um dos provetes testados. Isto em conjunto com as tensões de resistência semelhantes ao das tabeladas pelo fabricante, que para o ERTALON 6 SA é de 80 MPa [26], permitem concluir que os resultados são corretos e serão utilizados para as análises posteriores.



Figura 3.2 - Provede antes e após ensaio de ERTALON 6 SA.

### 3.1.3 Ensaio da poliamida ERTALON 66 GF30

O Gráfico 3.3 apresenta o resultado de um dos três provetes de ERTALON 66 GF30 testado.

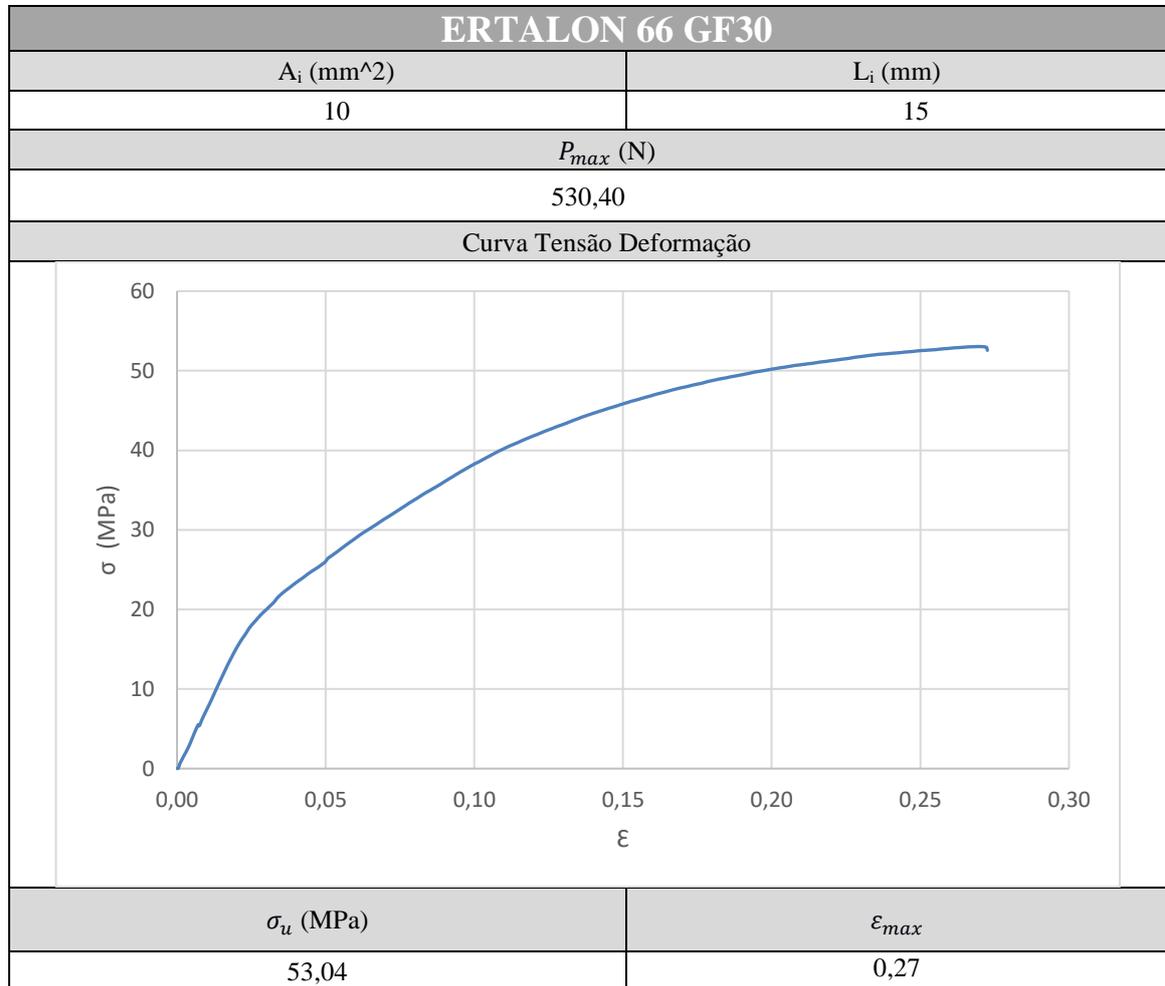


Gráfico 3.3 - Resultados experimentais da caracterização do ERTALON 66 GF 30.

Os valores de resistência máxima da poliamida 66 reforçada ficaram muito abaixo dos resultados apresentados na ficha técnica do material, que indicam uma tensão de resistência de 85 MPa [27]. Também foi observado um comportamento muito rígido e com pouca deformação deste termoplástico nos ensaios, que é fácil de verificar na Figura 3.3, onde é possível ver um provete ensaiado e não ensaiado.



Figura 3.3 - Provette antes e após ensaio de ERTALON 66 GF30

A diferença significativa entre a tensão tabelada e a obtida pode ter sido provocada pela orientação de corte dos provetes a partir do varão. A produção por extrusão da poliamida abre a possibilidade de as fibras de vidro possuírem uma orientação preferencial que poderá afetar os resultados dos ensaios e fazer com que apenas se atinja os valores tabelados com outra orientação de corte. Outra possibilidade é a existência de algum defeito no varão utilizado que terá contribuído para alterar as propriedades, nomeadamente possíveis problemas no reforço adicionado.

Desta forma o valor da tensão de resistência máxima a considerar para as análises seguintes foi o medido experimentalmente, sendo que estes resultados de caracterização vão ser importantes para justificar alguns dos resultados obtidos.

## 3.2 Ensaio de tração dos provetes soldados

Foram realizadas várias soldaduras, mas antes de apresentar os resultados é fundamental detalhar um aspeto importante, que é a obtenção da área utilizada para o cálculo das tensões. Isto deve-se à incapacidade de ligar adequadamente o termoplástico ao alumínio sem haver qualquer preparação específica.

As soldaduras iniciais feitas, sem qualquer estrutura criada na área de contacto, ou seja, superfície lisa, eram inadequadas. Pequenas forças aplicadas à mão provocavam quebras e separações que ocorrem por não haver uma união permanente. Com a soldadura laser, para criar juntas fortes, é importante que ambos os materiais entrem em fusão, de modo a permitir uma mistura entre eles, ou então que haja um material de adição que promova a adesão, como acontece na brasagem a laser. No entanto as propriedades térmicas dos termoplásticos e do metal utilizados são muito díspares. No caso do ERTALON 6 SA o mesmo possui uma temperatura de fusão anunciada de 220 °C [26], muito abaixo do alumínio na ordem dos 555 °C [23]. Para obter uma ligação forte vai ser preciso um fundido considerável de ambos, o que exige elevar de tal maneira a temperatura que o procedimento vai provocar danos extensos na poliamida e consequentemente tornar a junção fraca e insegura.

Para solucionar esta situação foram desenvolvidas as juntas mecânicas explicadas anteriormente, que vão criar ligações sem necessitar de fundir o metal. Como as tensões vão ser suportadas pelas marcas ou ranhuras, não é adequado considerar que a área para os cálculos é toda a zona de contacto entre o termoplástico e o alumínio. Por isso foi apenas considerada a área das estruturas que foram posteriormente preenchidas pelas poliamidas.

Para os provetes com ranhuras, foi usada a área das aberturas, que no caso de um provete de 3 ranhuras está marcada a verde na Figura 3.4.

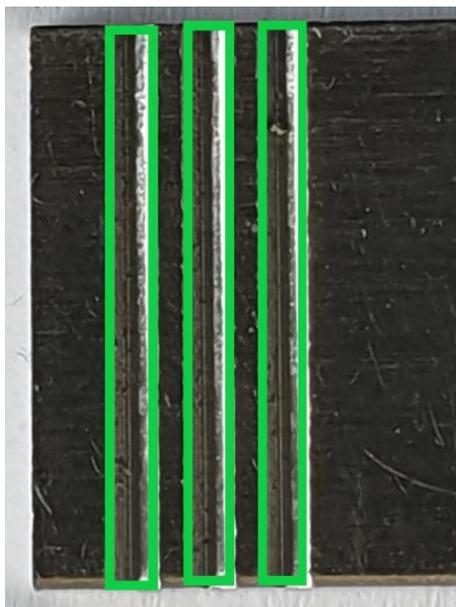


Figura 3.4 - Área da soldadura nos provetes com ranhuras.

A área corresponde às 3 ranhuras maquinadas. Como cada abertura tem um comprimento de 15 mm e uma largura de 1 mm, estas vão ter uma área de 15 mm<sup>2</sup>, que no caso apresentado dá um total de 45 mm<sup>2</sup>.

Nos provetes marcados, é considerado a soma das áreas de todas as marcações soldadas. Como alguns espécimes possuem marcas não preenchidas, foram feitas linhas de contorno, conforme exemplificado na Figura 3.5, para obter a quantidade certa.

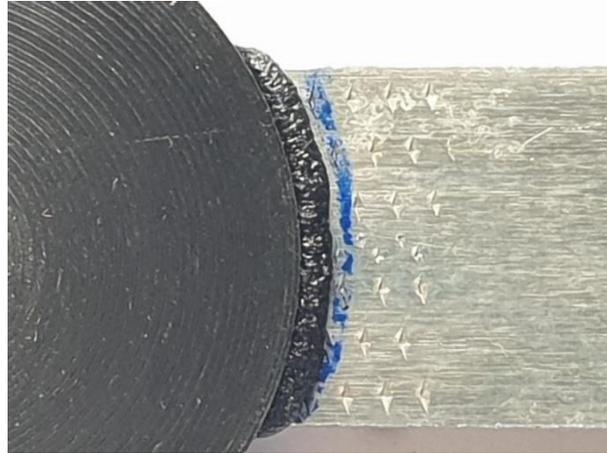


Figura 3.5 - Linha de guia para a área das marcações.

Usando esta referência, pode-se então medir a área para os cálculos da tensão. Devido à pequena dimensão de cada marca, os provetes foram alinhados a uma régua e posteriormente fotografados, como se pode observar na Figura 3.6, de modo a obter medidas.

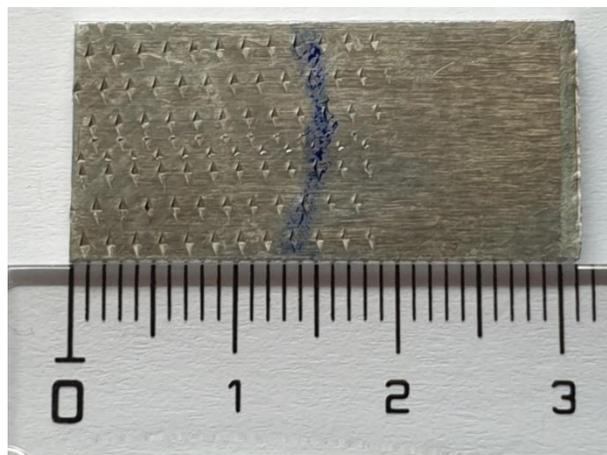


Figura 3.6 - Provette marcado e alinhado com uma régua.

As estruturas criadas possuem forma aproximada de losangos. Com esta consideração basta obter as medidas das duas diagonais de cada marca, que são aproximadamente 1,5 e 1 mm. Assim é possível calcular a área, que é 0,75 mm<sup>2</sup>. Ao fazer a soma do total obtém-se o valor necessário, mas antes é preciso considerar as pequenas zonas incompletas criadas pelas duas passagens da marcação, sinalizadas a verde na Figura 3.7.

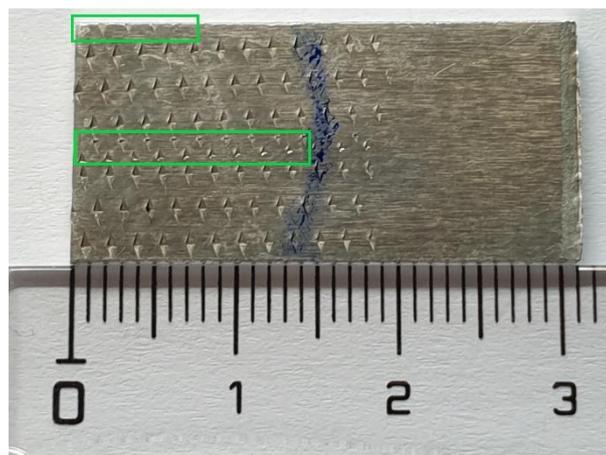


Figura 3.7 - Marcas incompletas.

Por observação das imagens, existem no centro do provete marcas maiores e mais pequenas e no topo as estruturas são equivalentes a um par de uma diminuta e uma grande, onde cada um deste conjunto tem uma área de  $0,125 \text{ mm}^2$ . Antes de se contabilizar tudo, é possível confirmar onde houve preenchimento após a soldadura ao observar o provete de poliamida ensaiado, visível na Figura 3.8. Como não houve rotura das zonas preenchidas, o provete de poliamida ensaiado tem picos bem definidos das zonas preenchidas e por observação destes é possível observar quais as marcas com profundidade suficiente para serem preenchidas.

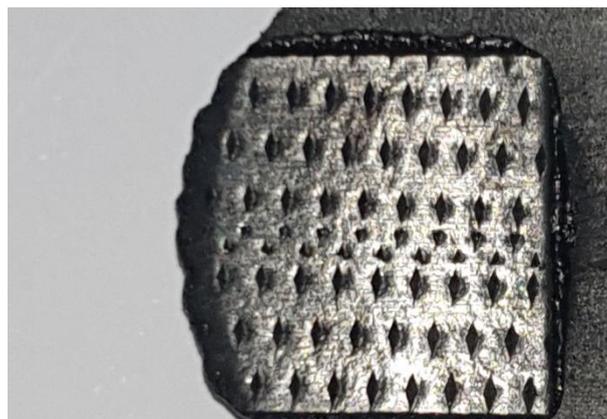


Figura 3.8 - Provete ensaiado de poliamida com marcas visíveis.

Ao apurar tudo, existem 51 marcas completas e 13 conjuntos incompletos. Somando tudo, obtém-se uma área de  $39,875 \text{ mm}^2$ .

Como as marcações não são completamente iguais de provete para provete, este método de obtenção da área foi efetuado para todos os provetes testados.

### 3.2.1 Provetes de ERTALON 6 SA com ranhuras

O Gráfico 3.4 apresenta em forma de barras os valores médios da resistência máxima dos provetes com duas ranhuras soldados a ERTALON 6 SA. As linhas verticais são os desvios, valor máximo e mínimo obtidos para cada situação.

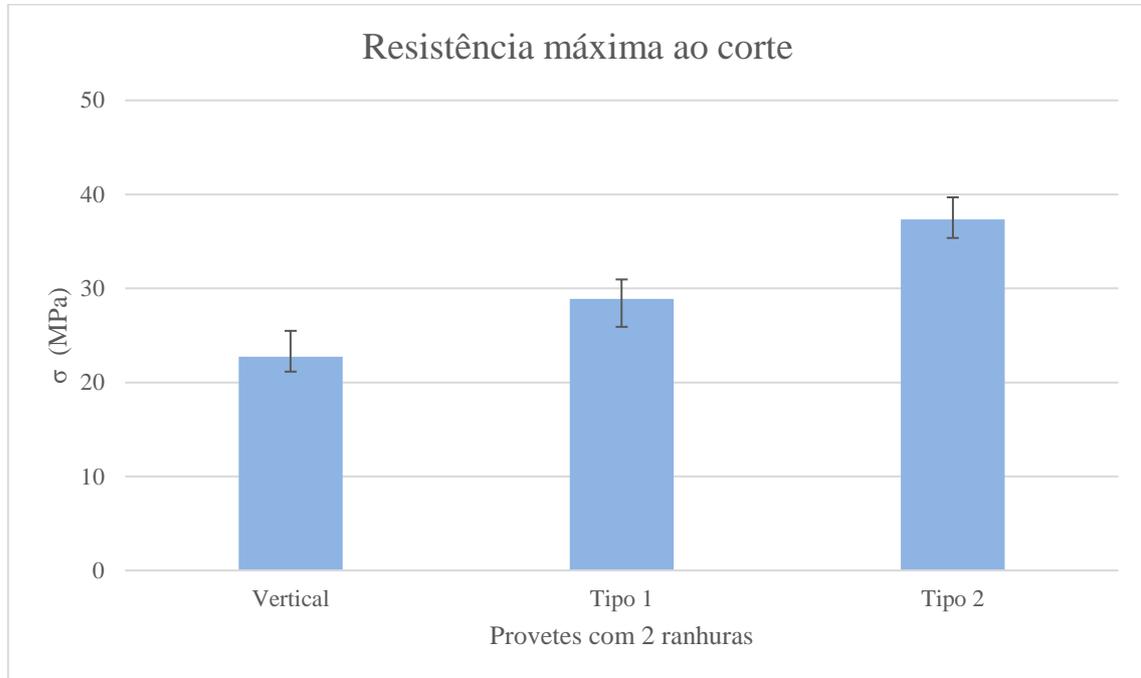


Gráfico 3.4 - Resultados dos ensaios de ERTALON 6 SA soldado ao alumínio.

É possível conferir pelos resultados do Gráfico 3.4 que as ranhuras inclinadas têm melhor performance que as verticais, sendo isto mais claro nos provetes do tipo 2 do que no tipo 1 que têm diferenças devido ao sentido das aberturas.

Durante o ensaio, além das forças de corte, também vão ser geradas forças de tração, devidas ao momento fletor gerado, conforme esquematizado na Figura 3.9. Estas vão provocar impactos diferentes nos provetes dependendo das ranhuras criadas.

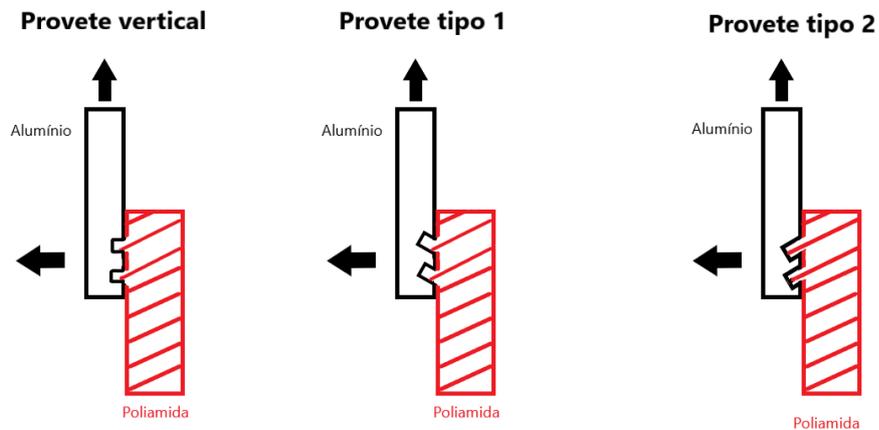


Figura 3.9 - Esquema das forças do ensaio

Conforme o ensaio ocorre, o alumínio, por ação das forças de corte, vai tentar separar-se da poliamida pelas ranhuras. É aí que as ranhuras inclinadas fazem a diferença devido à forma delas que vai oferecer maior resistência e travar a saída do termoplástico alojado no seu interior.

Os Gráficos 3.5 e 3.6 mostram os valores médios e desvios da resistência máxima ao corte de provetes com uma, duas e três ranhuras e a sua comparação com a resistência máxima à tração da poliamida sem soldadura (material base), enquanto os Gráficos 3.7 e 3.8 apresentam os valores médios da eficiência da junta, com os desvios a representar o valor máximo e mínimo de cada situação.

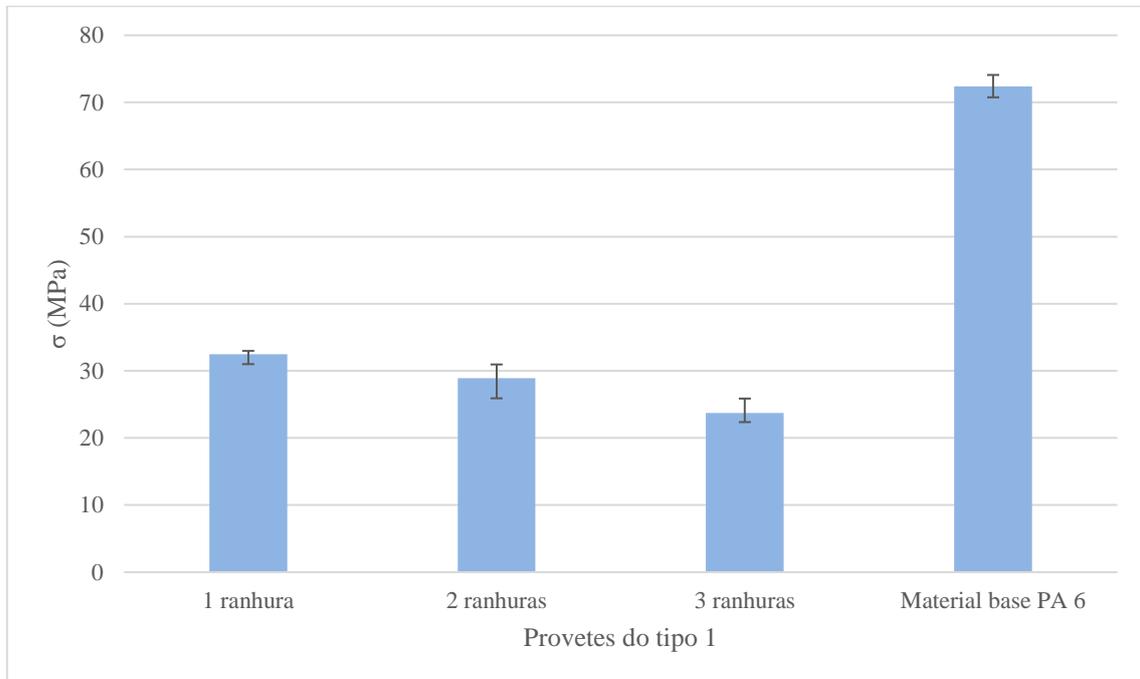


Gráfico 3.5 - Resultados da variação de ranhuras provetes do tipo 1 soldados a ERTALON 6 SA.

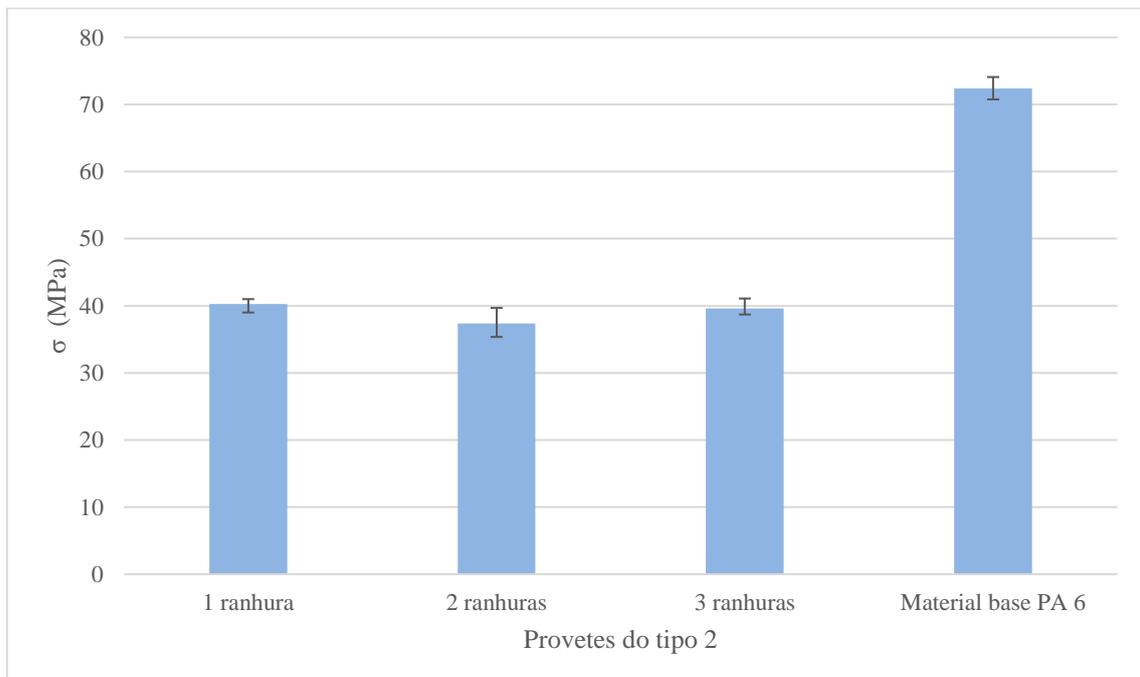


Gráfico 3.6 - Resultados da variação de ranhuras provetes do tipo 2 soldados a ERTALON 6 SA.

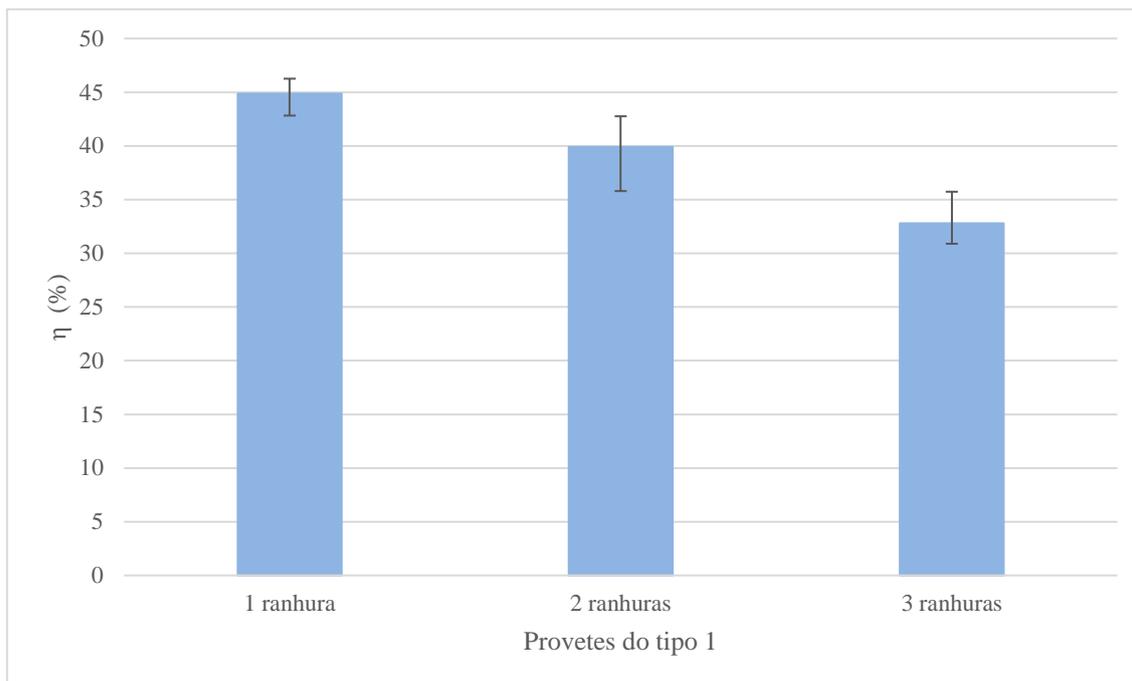


Gráfico 3.7 - Eficiência das juntas dos provetes do tipo 1 soldadas com ERTALON 6 SA.

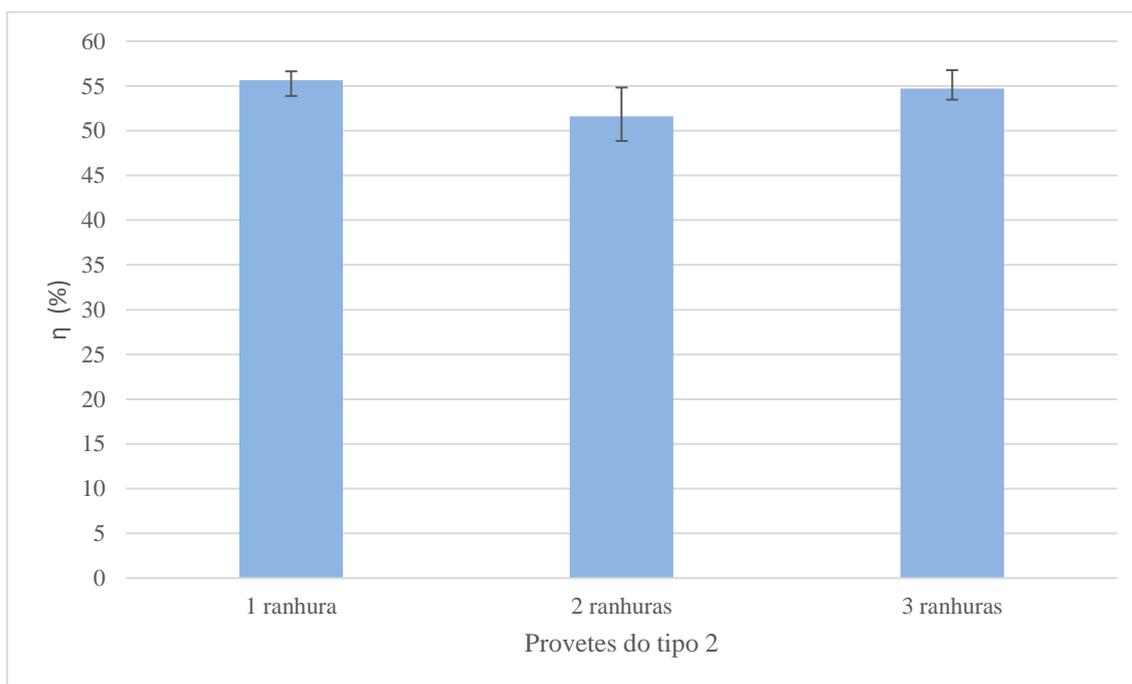


Gráfico 3.8 - Eficiência das juntas dos provetes do tipo 2 soldadas com ERTALON 6 SA.

A quantidade de ranhuras tem pouca influência na resistência mecânica ao corte. Os resultados do Gráfico 3.6 mostram que a carga suportada é aproximadamente proporcional ao número de ranhuras, o que é bom, porque tal significa que o dobro das ranhuras vão suportar o dobro da carga. Esta proporcionalidade é consequência da falta de adesão do alumínio à poliamida, o que faz com que a ligação seja suportada pela interferência produzida pelas ranhuras.

Quanto à eficiência da junta em relação ao material base ERTALON 6 SA, foram obtidos valores de cerca de 40% e 55% para os provetes dos tipos 1 e 2, respectivamente.

Os valores do Gráfico 3.5 e Gráfico 3.6 permitem observar novamente que os provetes do tipo 2 possuem desempenho superior ao tipo 1. Esta diferença deve-se ao sentido das aberturas. Embora as estruturas do tipo 1 consigam oferecer alguma resistência às combinações das forças de corte e tração, o sentido delas vai facilitar a saída do termoplástico do interior do metal e permitir que o mesmo deslize para fora. No tipo 2 a forma e sentido da poliamida preenchida vai impedir a separação do alumínio. Para entender melhor as mudanças foram feitos os esquemas da Figura 3.10 e Figura 3.11 onde está representado a separação dos provetes, estando a verde a direção por onde o alumínio vai eventualmente separar.

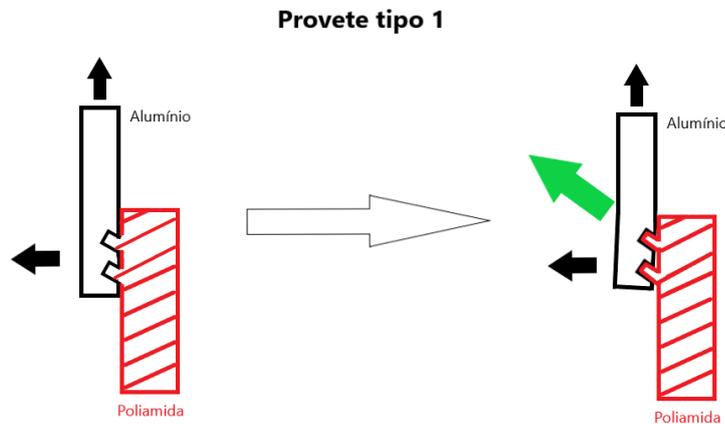


Figura 3.10 - Esquema das deformações nos provetes do tipo 1.

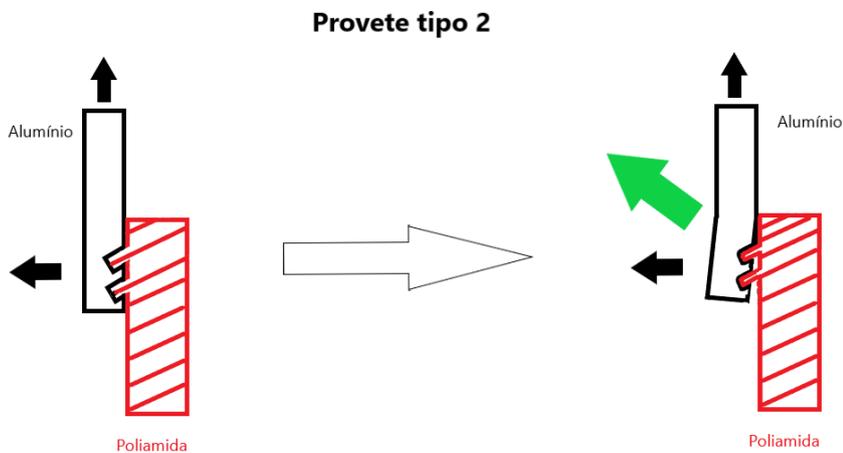


Figura 3.11 - Esquema das deformações nos provetes do tipo 2.

Por observação dos esquemas, conforme as forças aumentam, a poliamida vai impedir a saída do alumínio. Estas travagens em conjunto com o aumento das tensões vão eventualmente provocar deformações no metal. Devido ao design do tipo 1, vai haver uma separação mais facilitada. O tipo 2 vai resistir melhor a este efeito ao fixar o PA às ranhuras do alumínio. Com o incremento das forças, a poliamida vai deformar de modo a impedir a quebra da união, até atingir o limite.

Estas diferenças são visíveis através de uma análise após os ensaios, conforme apresentado na Figura 3.12 onde é possível comparar dois provetes polidos, um testado e com deformações significativas e o outro soldado.

Provete do tipo 2 após ensaio



Provete soldado do tipo 2



Figura 3.12 - Ranhuras de provetes de PA 6 do tipo 2 antes e após os ensaios.

Na Figura 3.13 é possível observar que por comparação aos provetes do tipo 2, o tipo 1 não apresenta deformações significativas. Tal permite concluir que as estruturas deste tipo não ofereceram a mesma resistência à separação. Na Figura 3.14, é visível outro provete, de 3 ranhuras, que apresenta alguma deformação, mas longe da obtida no tipo 2.

Provete do tipo 2 após ensaio



Provete do tipo 1 após ensaio



Figura 3.13 - Provetes de PA 6 com 1 ranhura após os ensaios.

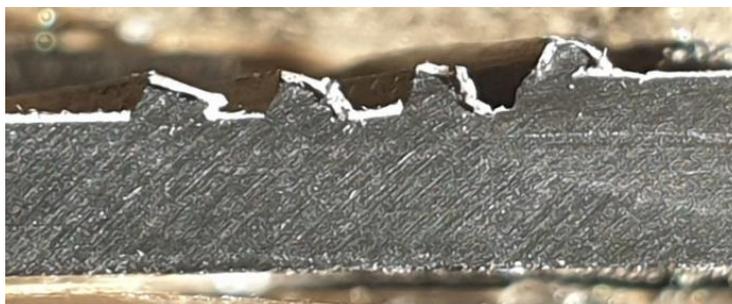


Figura 3.14 - Provete de PA 6 do tipo 1 com 3 ranhuras após ensaio.

Nos resultados das tensões de resistência máxima obtidos, é possível observar que nos provetes do tipo 2 não há variações muito significativas dos valores. Mas no caso das 3 ranhuras, o alumínio quebrou na zona da última abertura, ao invés de separar da poliamida, conforme se verifica na Figura 3.15. Isto indica que a poliamida foi capaz de suportar as tensões sem deformar excessivamente e por isso conseguiu segurar a ligação.

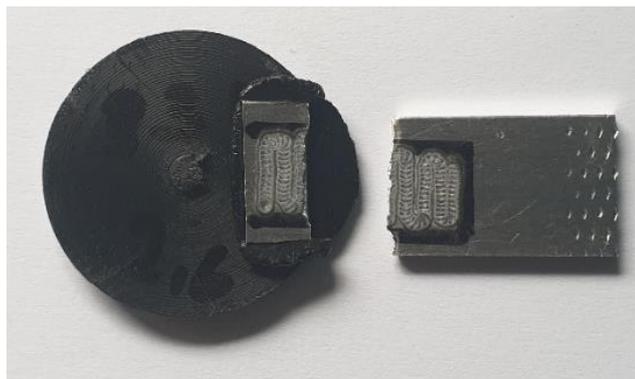


Figura 3.15 - Provete do tipo 2 com 3 ranhuras ensaiado.

Uma comparação à resistência máxima à tração do alumínio de base utilizado e a tensão aparente do provete testado permite observar uma discrepância significativa. Tal explica-se pela deformação dos provetes metálicos. Conforme o metal altera de forma, vai se notar o concentrador de tensão na zona da última ranhura. De facto, atendendo a que a força de rutura foi aproximadamente 1742 N e que a secção resistente no alumínio tem cerca de 1 mm de espessura por 15 mm de largura, a tensão aparente no alumínio foi de 116 MPa, significativamente abaixo da resistência máxima obtida nos ensaios de caracterização do alumínio EN AW 6082-T6. Naturalmente, estes cálculos não tiveram em conta a concentração de tensões nem o efeito do momento fletor. A combinação dos efeitos vai levar a uma falha precoce, com a zona da falha visível na Figura 3.16 e Figura 3.17. As imagens apresentam uma das amostras testada, que conseguiu separar-se antes de partir completamente. Nele são visíveis a fratura que ocorre no tipo 2 de 3 ranhuras.



Figura 3.16 - Vista de fundo de provete do tipo 2 com 3 ranhuras de alumínio ensaiado.

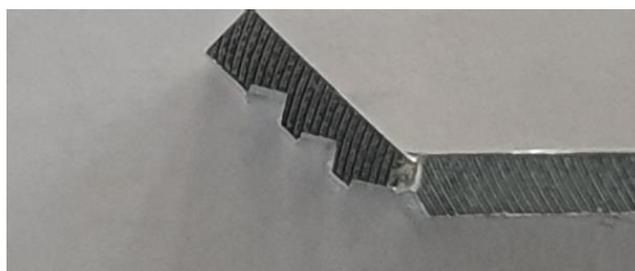


Figura 3.17 - Vista lateral de provete do tipo 2 com 3 ranhuras de alumínio ensaiado.

Ao realizar uma análise global dos resultados do ERTALON 6 SA com ranhuras, é possível concluir que os provetes inclinados possuem melhor performance que os verticais e que no caso dos inclinados, o tipo 2 apresenta melhor desempenho que o tipo 1, devido à capacidade de resistir melhor aos efeitos combinados das forças de tração e de corte gerados nos ensaios de tração. Também foi possível analisar que o número de ranhuras não tem influência significativa na resistência ao corte.

Um problema detetado foi a deformação nos provetes de alumínio, a qual aliada à concentração de tensão, provocou uma falha precoce em casos onde foram produzidas mais ranhuras.

### 3.2.2 Provetes de ERTALON 66 GF30 com ranhuras

Os Gráficos 3.9 e 3.10 apresentam os valores médios e desvios da resistência máxima ao corte de provetes com uma, duas e três ranhuras e a sua comparação com a resistência máxima à tração da poliamida sem soldadura (material base), enquanto os Gráficos 3.11 e 3.12 apresentam os valores médios da eficiência da junta e as linhas os desvios, que indicam o valor máximo e mínimo de cada situação.

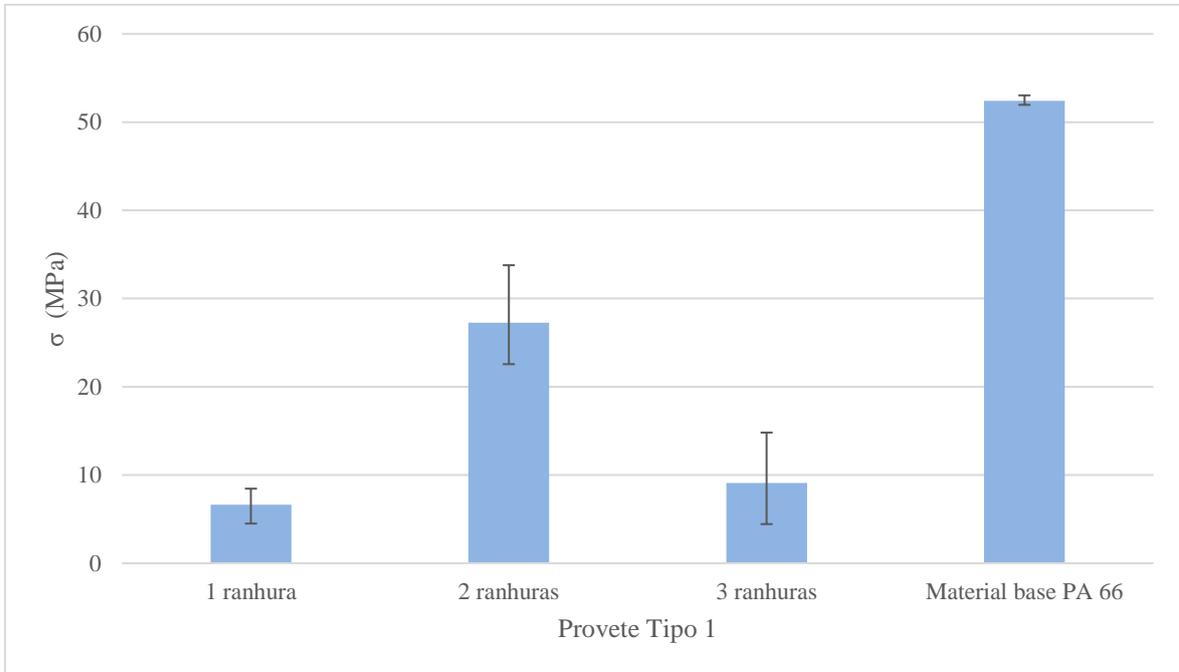


Gráfico 3.9 - Resultados da variação de ranhuras dos provetes do tipo 1 soldados a ERTALON 66 GF30.

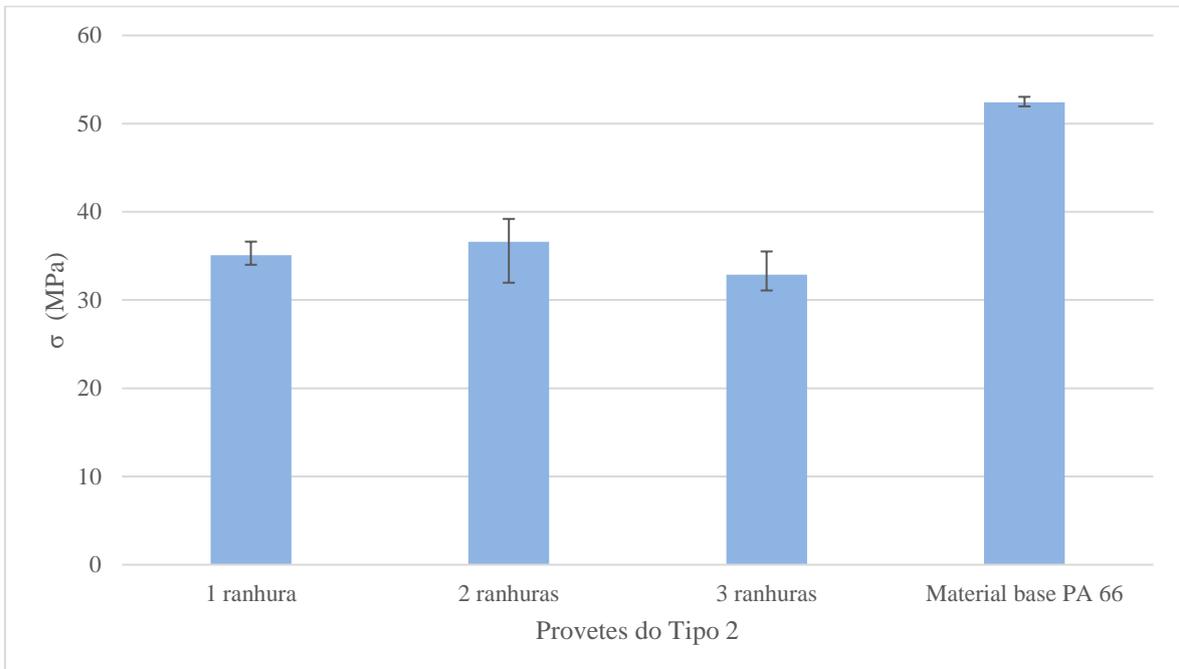


Gráfico 3.10 - Resultados da variação de ranhuras dos provetes do tipo 2 soldados a ERTALON 66 GF30.

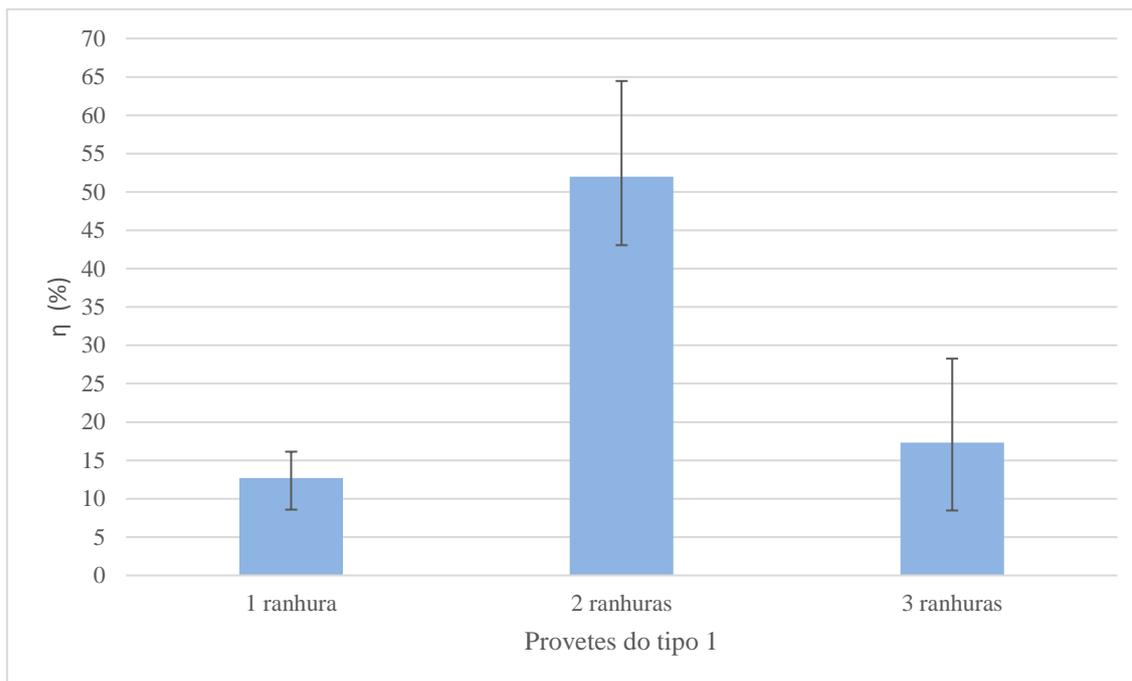


Gráfico 3.11 - Eficiência das juntas dos provetes do tipo 1 soldadas com ERTALON 66 GF30.

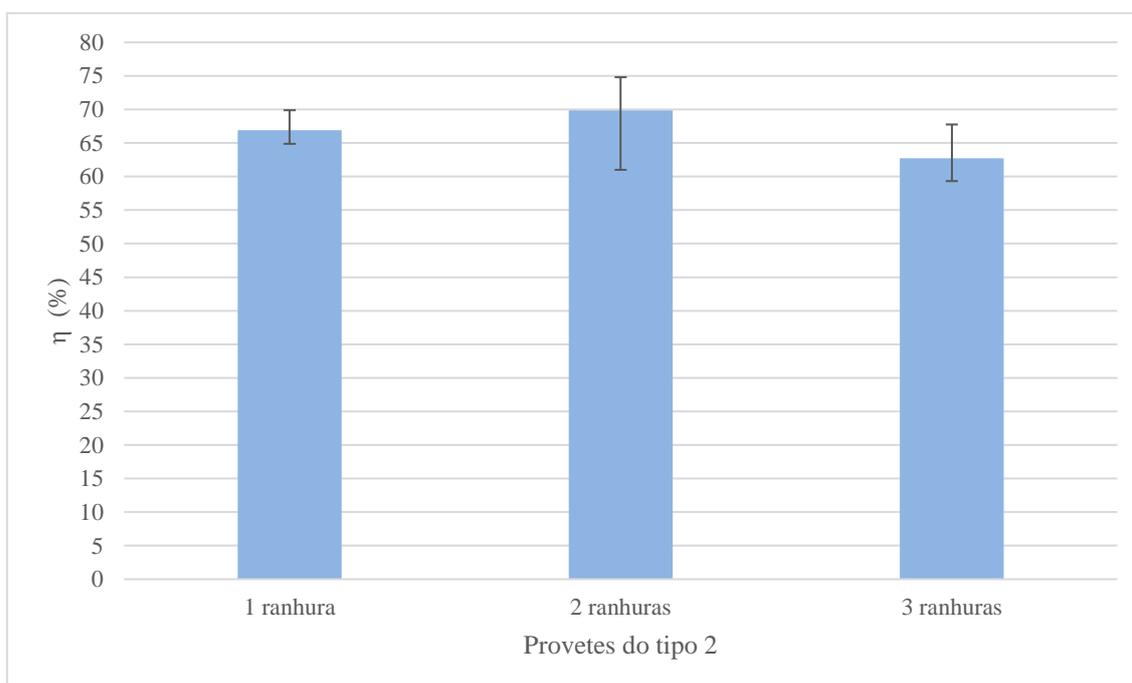


Gráfico 3.12 - Eficiência das juntas dos provetes do tipo 2 soldadas com ERTALON 66 GF30

Os resultados do Gráfico 3.10 mostram que a carga suportada pelas ranhuras do tipo 2 é aproximadamente proporcional ao número de ranhuras, tal como se observou no PA 6. Tal mostra que o número de ranhuras deste tipo soldadas ao PA 66 reforçado tem pouca influência na resistência mecânica ao corte.

Quanto à eficiência da junta em relação ao material base ERTALON 66 GF30, foram obtidos valores de cerca de 50% e 65% para os provetes dos tipos 1 e 2, respetivamente.

As ranhuras do tipo 1 mostraram novamente performances inferiores ao tipo 2. O tipo 1 volta a não apresentar deformações significativas, tal como no caso dos provetes deste tipo testados com o PA 6, algo que se pode observar na Figura 3.18 e Figura 3.19.

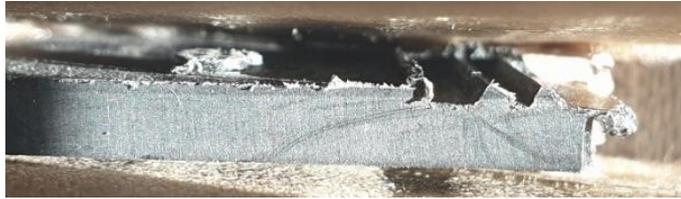


Figura 3.18 - Provete de PA 66 reforçado do tipo 1 com 2 ranhuras após ensaio.

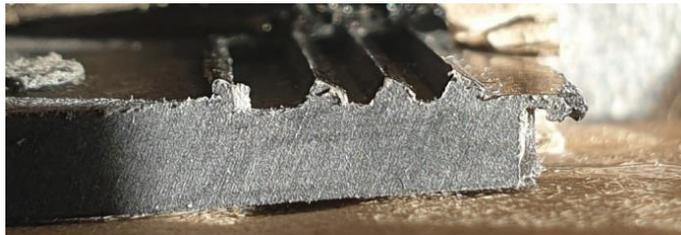


Figura 3.19 - Provete de PA 66 reforçado do tipo 1 com 3 ranhuras após ensaio.

A semelhança com as estruturas geradas após o ensaio do PA 6 permitem concluir que a diferença de performance se deve aos mesmos motivos do ERTALON 6 SA.

As aberturas do tipo 2 com PA 66 reforçado conseguiram performances próximas das obtidas com o PA 6 sem reforço. As diferenças são justificáveis pelas diferenças observadas nos ensaios de caracterização do material, onde o ERTALON 6 SA suporta tensões mais elevadas. O efeito da diferença da tensão de resistência dos materiais é demonstrado nos provetes de 2 e 3 ranhuras, onde ao invés de haver rotura no alumínio, esta ocorre na poliamida, que se pode ver na Figura 3.20 e Figura 3.21, que mostram um provete de 2 ranhuras, e na Figura 3.22, que apresenta um dos provetes de 3 ranhuras e que foi posteriormente polido, com as alterações visíveis na Figura 3.23.



Figura 3.20 - Vista do topo de provete de PA 66 reforçado do tipo 2 com 2 ranhuras.



Figura 3.21 - Vista do fundo de provete de PA 66 reforçado do tipo 2 com 2 ranhuras.



Figura 3.22 - Vista de fundo de provete de PA 66 reforçado do tipo 2 de 3 ranhuras.

Provete de poliamida 66 do tipo 2 após ensaio



Provete soldado do tipo 2



Figura 3.23 - Vistas laterais de provetes polidos antes e após ensaios do tipo 2 com 3 ranhuras.

Embora o alumínio estivesse a deformar de forma significativa, aspeto comprovado na Figura 3.24, a tensão de resistência máxima inferior do PA 66 reforçado provocou a rotura do termoplástico antes do metal e consequentemente as tensões de resistência obtidas vão ser inferiores às do PA 6.



Figura 3.24 - Provete de alumínio do tipo 2 com 3 ranhuras após ensaio.

Uma análise global aos resultados dos provetes com ranhuras de ERTALON 66 GF30 voltam a provar o desempenho superior dos provetes do tipo 2. A cedência que ocorre no PA 66 reforçado provoca resultados inferiores aos do PA 6, mas permite obter valores mais próximos da tensão de rotura do material base. Também se voltou a verificar que o número de ranhuras tem pouca influência na resistência mecânica. Como tal os resultados obtidos para este material são bastante satisfatórios.

### 3.2.3 Provetes Marcados

Os gráficos 3.13 e 3.14 apresentam os resultados experimentais médios dos provetes soldados com marcações a ERTALON 6 SA e ERTALON 66 GF30, com as linhas verticais a representarem os desvios, valor máximo e mínimo obtidos para cada situação. No Gráfico 3.13 é também feita a comparação com a resistência máxima à tração de cada poliamida sem soldadura (material base), com os respetivos desvios.

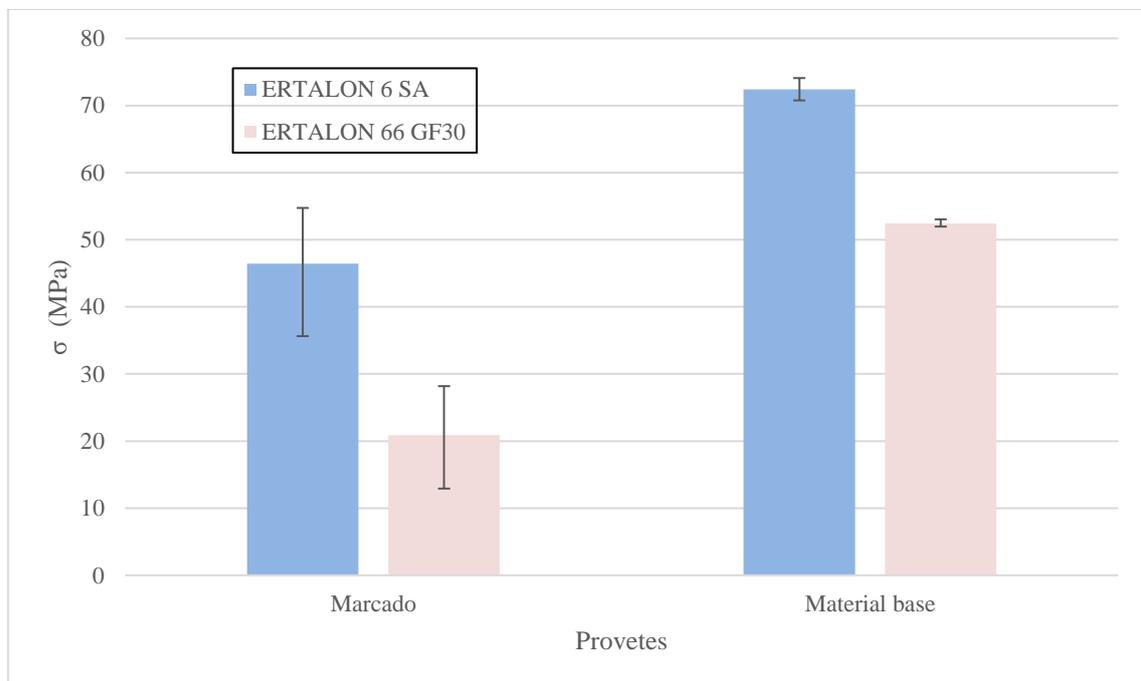


Gráfico 3.13 - Resistência máxima ao corte dos provetes marcados.

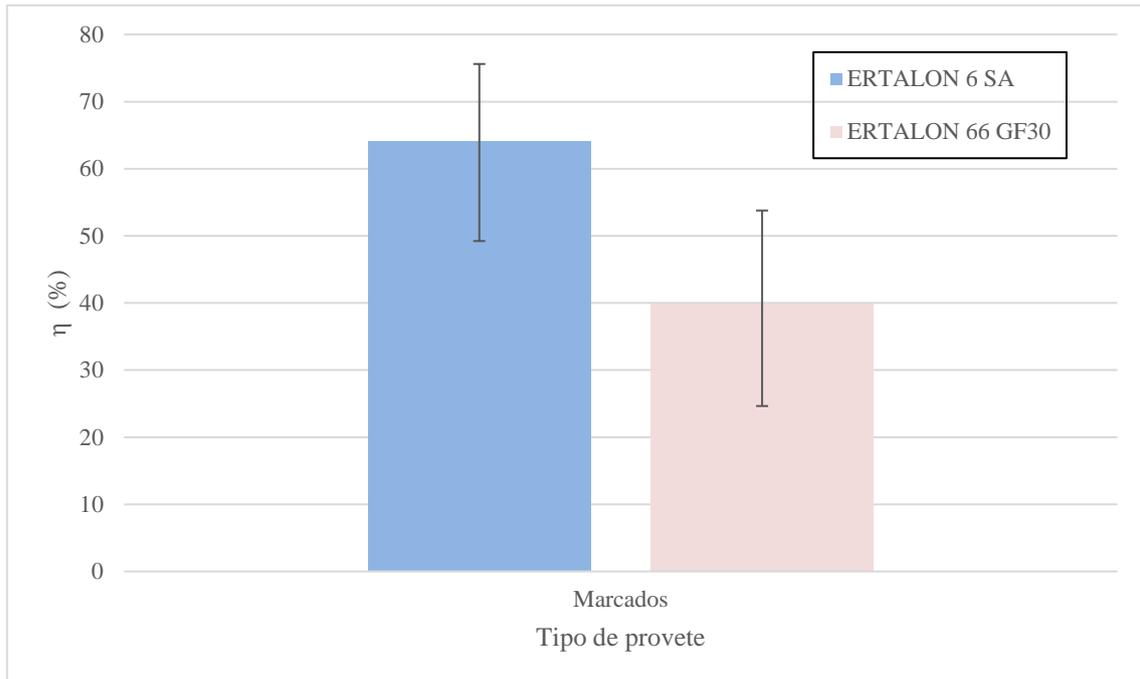


Gráfico 3.14 - Eficiência das juntas dos provetes marcados.

O Gráfico 3.13 apresenta os valores da tensão de resistência máxima ao corte dos provetes marcados e permitem concluir que estas soldaduras são viáveis, com resultados bastante bons para o PA 6.

Quanto à eficiência da junta em relação ao material base, foram obtidos valores de cerca de 65% e 40% para os provetes soldados a PA 6 e PA 66, respetivamente.

A boa união é provocada pela capacidade destes provetes distribuírem de forma mais uniforme as cargas aplicadas, com uma disposição mais homogênea das marcas. Esta distribuição vai impedir deformações excessivas do alumínio e prevenir a formação de um concentrador de tensão, impedindo falhas prematuras. As baixas alterações podem ser vistas na Figura 3.25, que mostra um provete ensaiado.



Figura 3.25 - Provette marcado e soldado a ERTALON 6 SA de alumínio após o ensaio.

As deformações inferiores vão melhorar a capacidade de as marcas suportarem as forças de corte geradas, que em conjunto com a melhor distribuição de cargas vai melhorar os desempenhos das juntas.

O caso do PA 66 reforçado foi menos positivo. Isto é semelhante ao que tem sido visto ao longo dos resultados, onde caso não existam estruturas especificamente projetadas para travar o metal e oferecer resistência adicional às forças de corte, o desempenho vai ser pior.

### 3.3 Análise global dos resultados obtidos

Para analisar os resultados globais obtidos foram criados dois gráficos, o Gráfico 3.15 com as tensões máximas obtidas, e o Gráfico 3.16 que apresenta a eficiência das juntas em relação ao respetivo termoplástico base.

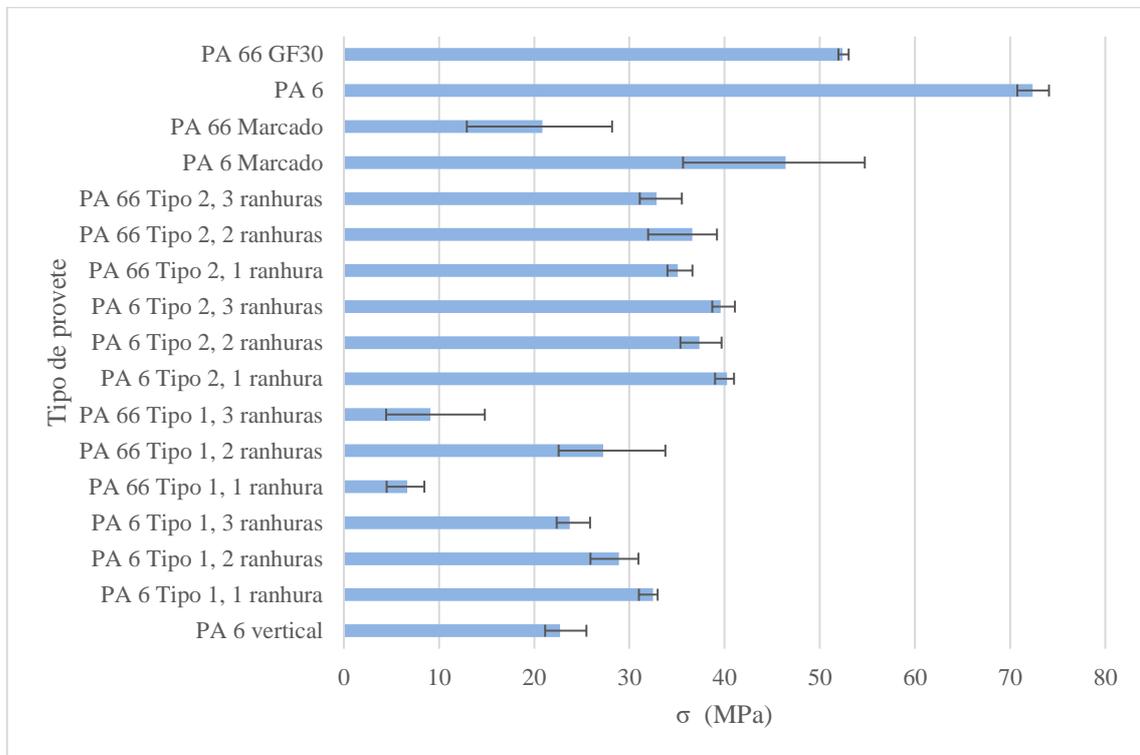


Gráfico 3.15 – Resistência máxima de corte nos vários ensaios.

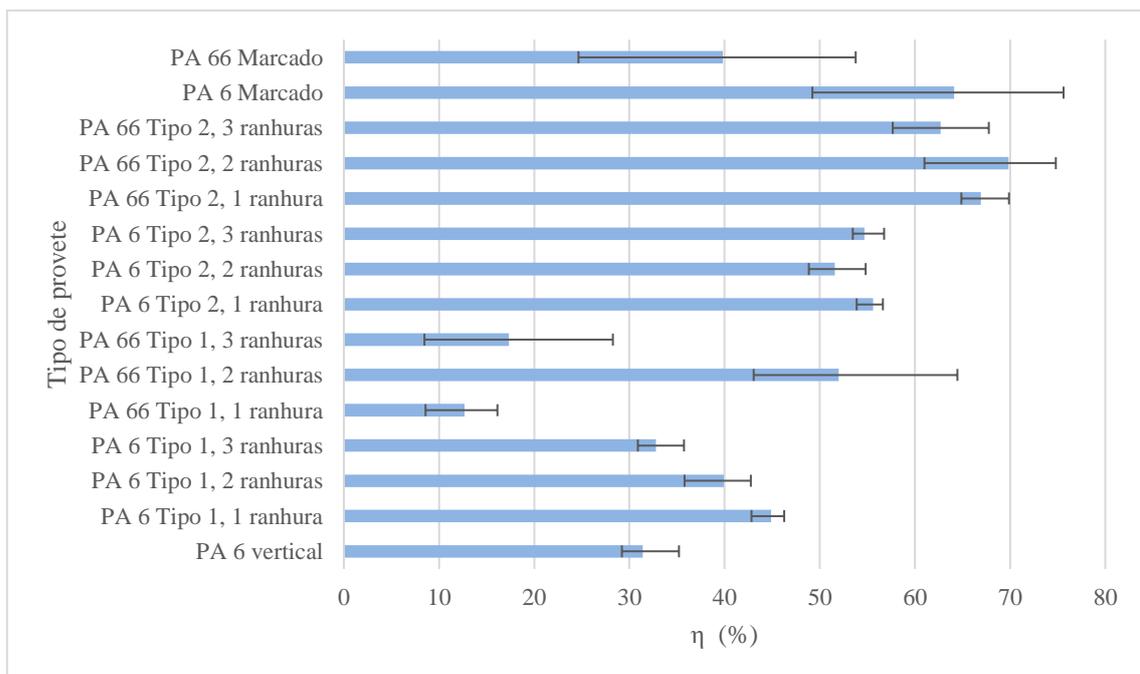


Gráfico 3.16 – Eficiência da junta em relação ao respetivo material termoplástico de base.

Os resultados globais permitem concluir que os métodos testados permitiram obter soldaduras adequadas, com eficiências superiores a 50 % em alguns dos casos ensaiados, nomeadamente os provetes com ranhuras do tipo 2 e os provetes com marcações soldados ao ERTALON 6 SA.

As ranhuras obtiveram em múltiplos casos ligações bastante fortes, nomeadamente no tipo 2, embora algumas uniões do tipo 1 tenham gerado resultados menos positivos.

As marcações originaram juntas fortes no ERTALON 6 SA, mas significativamente piores no ERTALON 66 GF30.

O PA 66 reforçado obteve globalmente resistências máximas ao corte mais baixas em comparação ao PA 6. No entanto, fazendo uma análise da proximidade da resistência máxima do material de base, o PA 66 obteve os melhores resultados dos testes realizados, nos provetes com ranhuras do tipo 2, o que faz sentido por terem sido os únicos ensaios realizados onde houve rotura do termoplástico e mostram o potencial desta técnica de junção.

## Capítulo 4 - Conclusões e trabalhos futuros

Neste trabalho foi possível realizar com recurso ao equipamento de soldadura SISMA SWA 300 soldaduras viáveis e com qualidade de metal-termoplástico.

Com os testes e resultados experimentais obtidos foi possível tirar algumas conclusões:

- A preparação do metal vai ser decisiva para obter boas soldaduras. No caso aqui realizado, a soldadura entre o alumínio e as duas poliamidas selecionadas apenas foi viável com preparação da superfície metálica;
- De modo a maximizar os resultados obtidos nos ensaios de tração, será necessário criar juntas mecânicas adequadas e acautelar não só os efeitos das forças de corte, como das forças de tração devidas aos momentos fletores, que demonstram os problemas que podem surgir em aplicações práticas deste método;
- O método de soldadura por condução utilizado necessita de uma seleção cuidadosa dos parâmetros para assegurar ligações rápidas de executar, mas sem pôr em causa a qualidade final e prevenindo possíveis danos nos materiais utilizados;
- O ERTALON 66 GF30 apresentou maiores problemas no procedimento, o que obriga a uma seleção mais cuidadosa de parâmetros;
- As soldaduras com ERTALON 6 SA são mais fáceis de executar devido à menor temperatura de fusão do termoplástico, que irá necessitar de quantidades inferiores de energia e consequentemente parâmetros inferiores e cordões mais pequenos;
- Os provetes do tipo 2 permitiram obter bons resultados, ao produzirem juntas mecânicas que conseguem resistir de forma eficaz às forças que surgem nos ensaios de corte. As ligações deste tipo resultam em uniões fortes e com tensões máximas acima de 50% da obtida no termoplástico base;
- As deformações que ocorrem nos provetes de alumínio com ranhuras podem provocar falhas precoces, criando algumas limitações da técnica. Se o termoplástico for capaz de suportar tensões elevadas, é necessário considerar as alterações que ocorrem no metal e que podem produzir pontos fracos;
- Os provetes marcados conseguem produzir soldaduras viáveis e com boa performance, embora tal seja muito dependente do termoplástico utilizado. Com uma boa combinação de parâmetros e materiais é possível obter juntas com elevada performance com um método simples e rápido de executar;
- Os provetes marcados podem ser de maior interesse graças à produção simples que pode gerar juntas mais fortes que as obtidas com ranhuras.

O objetivo desta dissertação, que era encontrar os melhores parâmetros de soldadura de laser pulsado Nd:YAG na ligação de termoplásticos avançados a metais, foi cumprido com sucesso devido à obtenção de juntas fortes entre o ERTALON 66 GF30 e o alumínio EN AW-6082-T6.

Com o objetivo cumprido, existem trabalhos que podem ser feitos para complementar o estudo aqui produzido, nomeadamente:

- Efetuar a simulação numérica de um ensaio para averiguar o efeito dos momentos fletores na solicitação à tração que surge na junta ao corte;
- Analisar possíveis alterações das propriedades dos materiais utilizados em consequência do aquecimento a que foram sujeitos;
- Efetuar estudos do método de soldadura por condução com outros termoplásticos e metais;
- Conceber melhorias ao processo de marcação dos provetes de modo a produzir marcas mais consistentes.

# Referências

1. Kah, P. Overview of techniques for joining dissimilar materials. Disponível em linha: <https://www.thefabricator.com/thefabricator/article/assembly/overview-of-techniques-for-joining-dissimilar-materials> (consultado a 13 Dezembro 2020).
2. Bergmann, J.P.; Stambke, M. Potential of laser-manufactured polymer-metal hybrid joints. *Physics Procedia* **2012**, *39*, 84–91, doi:[10.1016/j.phpro.2012.10.017](https://doi.org/10.1016/j.phpro.2012.10.017).
3. In-Mold Assembly - The Next Advance in Manufacturing Efficiency. Disponível em linha: <https://www.cste.com/services/in-mold-assembly> (consultado a 13 Dezembro 2020).
4. Stephen, M. In-Mold Assembly: All Together Now. Disponível em linha: <https://www.canplastics.com/features/in-mold-assembly-all-together-now/> (consultado a 13 Dezembro 2020)
5. Stark, G. Light. Disponível em linha: <https://www.britannica.com/science/light> (consultado a 13 Dezembro 2020).
6. The Electromagnetic Spectrum. Disponível em linha: <https://imagine.gsfc.nasa.gov/science/toolbox/emspectrum1.html> (consultado a 8 Dezembro 2020).
7. Dawes, C.T. *Laser Welding: A Practical Guide*; Abington Publishing: Cambridge, UK, 1992; ISBN 1-85573-034-2.
8. Hecht, J. Laser. Disponível em linha: <https://www.britannica.com/technology/laser> (consultado a 4 Janeiro 2021).
9. Duley, WW. *Laser Welding*; John Wiley & Sons, Inc: New York, NY, USA, 1999. ISBN 0-471-24679-4.
10. Learn – The Fundamentals of Laser Technology. Disponível em linha: <https://www.ulsinc.com/learn> (consultado a 8 Dezembro 2020).
11. Types of lasers for laser welding. Disponível em linha: <https://www.keyence.com/ss/products/measure/welding/laser/type.jsp> (consultado a 4 Janeiro 2021).
12. *Nd: YAG Laser Welding Guide*; Unitek Miyachi Corporation, 2003.
13. Types of Lasers. Disponível em linha: <https://www.newport.com/n/laser-types> (consultado a 4 Janeiro 2021).
14. Paschotta, R. Solid-state Lasers. Disponível em linha: [https://www.rp-photonics.com/solid\\_state\\_lasers.html](https://www.rp-photonics.com/solid_state_lasers.html) (consultado a 4 Janeiro 2021).
15. Paschotta, R. Laser Diodes. Disponível em linha: [https://www.rp-photonics.com/laser\\_diodes.html](https://www.rp-photonics.com/laser_diodes.html) (consultado a 4 Janeiro 2021).
16. Paschotta, R. Fiber Lasers Versus Bulk Lasers. Disponível em linha: [https://www.rp-photonics.com/fiber\\_lasers\\_versus\\_bulk\\_lasers.html](https://www.rp-photonics.com/fiber_lasers_versus_bulk_lasers.html) (consultado a 4 Janeiro 2021).

17. Katayama, S.; Kawahito, Y. Laser direct joining of metal and plastic. *Scripta Materialia* **2008**, *59*, 1247–1250, doi:[10.1016/j.scriptamat.2008.08.026](https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2008.08.026).
18. Roesner, A.; Scheik, S.; Olowinsky, A.; Gillner, A.; Reisgen, U.; Schleser, M. Laser Assisted Joining of Plastic Metal Hybrids. *Physics Procedia* **2011**, *12*, 370–377, doi:[10.1016/j.phpro.2011.03.146](https://doi.org/10.1016/j.phpro.2011.03.146).
19. Webmaster. Ultrasonic Welding of Plastic Parts: Design Considerations. Disponível em linha: <https://www.stelray.com/ultrasonic-welding-of-plastic-parts-design-considerations/> (consultado a 4 Janeiro 2021).
20. Silva, F.J.G; Pereira A.B. *Recent Advances in Welding*. Nova Science Publishers: New York, NY, USA; 2020. ISBN 9781536183429.
21. Dowling, N.E. *Mechanical Behavior of Materials: Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue*; 2nd ed.; Prentice Hall: Upper Saddle River, NJ, USA; 1999. ISBN 0-13-905720-X.
22. Aluminum - Advantages and Properties of Aluminum. Disponível em linha: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=1446> (consultado a 13 Dezembro 2020).
23. Aalco - Ferrous and Non-Ferrous Metals Stockist. Aluminium Alloys - Aluminium 6082 Properties, Fabrication and Applications. Disponível em linha: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=2813> (consultado a 13 Dezembro 2020).
24. SpecialChem. Polyamide (PA) or Nylon: Complete Guide (PA6, PA66, PA11, PA12...). Disponível em linha: <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polyamide-pa-nylon#PA6> (consultado a 13 Dezembro 2020).
25. ai\_admin, a. Nylon 6 or Nylon 66 - Which One Should I Choose? Disponível em linha: <https://www.aiplastics.com/blog/nylon-6-or-nylon-66/> (consultado a 13 Dezembro 2020).
26. PA Ertalon 6 SA (Ficha técnica). Disponível em linha: [https://www.polylanema.pt/client/files/0000000001/ertalon-6sa-fichatecnica\\_1441.pdf](https://www.polylanema.pt/client/files/0000000001/ertalon-6sa-fichatecnica_1441.pdf) (consultado a 13 Dezembro 2020).
27. PA Ertalon 66 GF30 (Ficha técnica). Disponível em linha: [https://www.polylanema.pt/client/files/0000000001/ertalon-66gf30-fichatecnica\\_1430.pdf](https://www.polylanema.pt/client/files/0000000001/ertalon-66gf30-fichatecnica_1430.pdf) (consultado a 13 Dezembro 2020).
28. SWA, semi manual laser welding and mould repair system. Disponível em linha: <https://www.sisma.com/en/products/swa-semi-manual-welder/> (consultado a 13 Dezembro 2020).
29. ISO. *Metallic materials – Tensile testing – Part 1: Method of test at room temperature*; ISO 6892-1: 2019; ISO: Geneva, Switzerland, 2019.
30. Jones, I. Laser welding plastics: A short guide. Disponível em linha: <https://www.industrial-lasers.com/welding/article/16485183/laser-welding-plastics-a-short-guide> (consultado a 13 Dezembro 2020).

# **Anexos**

## Anexo A. Ficha técnica do ERTALON 6 SA [26]



PA ● ○

### ERTALON® 6 SA

**Plástico semi-cristalino**, este material oferece uma ótima combinação de resistência mecânica, resistência ao desgaste, rigidez e tenacidade. Estas características em conjunto com o facto de possuir uma boa capacidade de isolamento elétrico e boa resistência química, torna este material "universal" para o fabrico de elementos mecânicos e de manutenção industrial.



#### PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS

- Alta resistência mecânica, rigidez e dureza
- Muito boa capacidade de recuperação depois do impacto
- Boas propriedades de deslizamento
- Excelente resistência ao desgaste
- Fácil maquinação
- Boa resistência à fadiga
- Boas propriedades de isolamento elétrico
- Alta capacidade de amortecimento mecânico
- Boa resistência às radiações de alta energia (Raios Gama e X)

#### APLICAÇÕES

- Casquilhos
- Rolos, rodas e rodízios
- Peças de desgaste
- Separadores
- Suportes
- Peças estruturais
- Polias
- Rodas dentadas



RESISTÊNCIA QUÍMICA



ISOLAMENTO ELÉTRICO



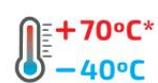
RESISTÊNCIA AO DESGASTE



PROPRIEDADES DESLIZANTES



RESISTÊNCIA AO IMPACTO



AMPLITUDE DE TEMPERATURA

\*uso contínuo (20.000H)

Todos os valores apresentados são meramente indicativos, a Poliamen Lda. não se responsabiliza pela utilização dos materiais sem consultar ao nosso departamento técnico.

PA  
FICHA TÉCNICA



PROPRIEDADES	MÉTODOS DE TESTE	UNIDADES	ERTALON* 6 SA
COR		-	BRANCO/PRETO
DENSIDADE	ISO 1183-1	g/cm <sup>3</sup>	1,14
ABSORÇÃO DE ÁGUA			
APÓS 24/96H DE IMERSÃO EM ÁGUA A 23°C <sup>1</sup>	ISO 62	mg	86/168
APÓS 24/96H DE IMERSÃO EM ÁGUA A 23°C <sup>1</sup>	ISO 62	%	1,28/2,50
NA SATURAÇÃO DO AR A 23°C / 50% RH	-	%	2,6
NA SATURAÇÃO DA ÁGUA A 23°C	-	%	9
<b>PROPRIEDADES TÉRMICAS<sup>2</sup></b>			
TEMPERATURA DE FUSÃO (DSC, 10°C/MIN)	ISO 11357-1/-3	°C	220
TEMPERATURA DE TRANSIÇÃO DO VIDRO (DSC, 20°C/MIN) <sup>3</sup>	ISO 11357-1/-3	°C	-
CONDUTIVIDADE TÉRMICA A 23°C	-	W/(K.m)	0,28
COEFICIENTE DE EXPANSÃO TÉRMICA LINEAR			
VALOR MÉDIO ENTRE 23-60°C	-	M/(m.K)	90 x 10 <sup>-6</sup>
VALOR MÉDIO ENTRE 23-100°C	-	M/(m.K)	105 x 10 <sup>-6</sup>
TEMPERATURA DE DEFORMAÇÃO SOB CARGA			
MÉTODO A 1,8 MPa	+ ISO 75-1/-2	°C	70
TEMPERATURA MÁXIMA DE SERVIÇO NO AR			
PARA CURTOS PERÍODOS <sup>4</sup>	-	°C	160
CONTINUAMENTE: PARA 5.000/20.000H <sup>5</sup>	-	°C	85/70
TEMPERATURA MÍNIMA DE SERVIÇO <sup>4</sup>	-	°C	-40
INFLAMABILIDADE <sup>6</sup>			
*ÍNDICE DE OXIGÉNIO <sup>7</sup>	ISO 4589-1/-2	%	25
DE ACORDO COM UL94 (3/6MM DE ESPESSURA)	-	-	HB/HB
<b>PROPRIEDADES MECÂNICAS A 23°C<sup>2</sup></b>			
TESTE À TRACÇÃO <sup>8</sup>			
RESISTÊNCIA À TRACÇÃO NO ESCOAMENTO/RUTURA <sup>9</sup>	+ ISO 527-1/-2	MPa	80/-
RESISTÊNCIA À TRACÇÃO NO ESCOAMENTO/RUTURA <sup>10</sup>	++ ISO 527-1/-2	MPa	45/-
RESISTÊNCIA À TRACÇÃO <sup>11</sup>	+ ISO 527-1/-2	MPa	80
TENSÃO ELÁSTICA NO ESCOAMENTO <sup>12</sup>	+ ISO 527-1/-2	%	4
TENSÃO ELÁSTICA NA RUTURA <sup>13</sup>	+ ISO 527-1/-2	%	>50
TENSÃO ELÁSTICA NA RUTURA <sup>14</sup>	++ ISO 527-1/-2	%	>100
MÓDULO DE ELASTICIDADE <sup>15</sup>	+ ISO 527-1/-2	MPa	3300
MÓDULO DE ELASTICIDADE <sup>16</sup>	++ ISO 527-1/-2	MPa	1425
TESTE DE COMPRESSÃO <sup>17</sup>			
RESISTÊNCIA A 1/2/5% DE DEFORMAÇÃO NOMINAL <sup>18</sup>	+ ISO 604	MPa	31/59/87
RESISTÊNCIA AO IMPACTO DE CHARPY SEM ENTALHE <sup>19</sup>	+ ISO 179-1/1eU	KJ/m <sup>2</sup>	s/ FRATURA
RESISTÊNCIA AO IMPACTO DE CHARPY COM ENTALHE	+ ISO 179-1/1eA	KJ/m <sup>2</sup>	5,5
DUREZA POR BOLA DE AÇO <sup>20</sup>	+ ISO 2039-1	N/mm <sup>2</sup>	150
DUREZA DE ROCKWELL <sup>21</sup>	+ ISO 2039-2	-	M 85
<b>PROPRIEDADES ELÉTRICAS A 23°C</b>			
RIGIDEZ DIELÉTRICA <sup>22</sup>	+ IEC 60243-1	kV/mm	25
RIGIDEZ DIELÉTRICA <sup>23</sup>	++ IEC 60243-1	kV/mm	16
RESISTIVIDADE VOLUMÉTRICA	+ IEC 60093	Ohm.cm	> 10 <sup>16</sup>
RESISTIVIDADE VOLUMÉTRICA	++ IEC 60093	Ohm.cm	> 10 <sup>12</sup>
RESISTIVIDADE SUPERFICIAL	+ IEC 60093	Ohm	> 10 <sup>13</sup>
RESISTIVIDADE SUPERFICIAL	++ IEC 60093	Ohm	> 10 <sup>12</sup>
PERMEABILIDADE RELATIVA ε <sub>r</sub> : A 100HZ	+ IEC 60250	-	3,9
PERMEABILIDADE RELATIVA ε <sub>r</sub> : A 100HZ	++ IEC 60250	-	7,4
PERMEABILIDADE RELATIVA ε <sub>r</sub> : A 1MHZ	+ IEC 60250	-	3,3
PERMEABILIDADE RELATIVA ε <sub>r</sub> : A 1MHZ	++ IEC 60250	-	3,8
FATOR DE DISSIPACÃO DIELÉTRICA TAN δ: A 100HZ	+ IEC 60250	-	0,019
FATOR DE DISSIPACÃO DIELÉTRICA TAN δ: A 100HZ	++ IEC 60250	-	0,13
FATOR DE DISSIPACÃO DIELÉTRICA TAN δ: A 1MHZ	+ IEC 60250	-	0,021
FATOR DE DISSIPACÃO DIELÉTRICA TAN δ: A 1MHZ	++ IEC 60250	-	0,06
ÍNDICE DE SEGUIMENTO COMPARATIVO (CTI)	+ IEC 60112	-	600
ÍNDICE DE SEGUIMENTO COMPARATIVO (CTI)	++ IEC 60112	-	600

NOTA: 1 g/cm<sup>3</sup> = 1000 kg/m<sup>3</sup> ; 1 MPa = 1 N/mm<sup>2</sup> ; 1KV/mm = 1 MV/m

+ : valores referentes ao material seco

++ : valores referentes a material em equilíbrio com a atmosfera padrão 23°C / 50% rh

(1) De acordo com o método 1 do ISO 62 e medido em discos a 50x3 mm. (2) Os elementos fornecidos para esta propriedade são na sua maior parte fornecidos pelos fabricantes das matérias-primas. (3) Os valores desta propriedade são apenas atribuídos a materiais amorfos e não a semi-cristalinos. (4) Só para períodos de exposição curtos em aplicações em que são aplicadas somente cargas muito baixas sobre o material. (5) Temperatura a que resiste depois de um período de 5 000/20 000 horas. Após este período de tempo, há um decréscimo de cerca de 50% na resistência à tração, comparado com o valor original. Os valores da temperatura dados, são baseados na degradação por oxidação térmica que ocorre que provoca uma redução das propriedades. No entanto, a temperatura máxima de serviço permitível depende, em muitos casos, essencialmente da dedução e da magnitude dos esforços mecânicos a que o material é sujeito. (6) Dado que a resistência ao impacto diminui com a diminuição da temperatura, a temperatura mínima de serviço permitida é determinado pela extensão de impacto ao qual o material é sujeito. Os valores dados são baseados em condições de impacto desfavoráveis e não podem consequentemente ser considerados como sendo os limites absolutos. (7) Estas avaliações, derivam das especificações técnicas dos fabricantes das matérias-primas, não permitindo determinar o comportamento dos materiais em condições de fogo. (8) A maioria das figuras dadas pelas propriedades dos materiais (+), são valores médios dos testes feitos a espécies maquinados com o 40-60 mm. (9) Teste a espécimes: tipo 1b. (10) Teste de velocidade: 5 ou 50 mm/min. (11) Teste de velocidade: 1m/min. (12) Teste a espécimes: cilindros o 8 x 16 mm. (13) Pêndulo usado: 15J. (14) Teste em espécimes com 10 mm de espessura. (15) Configuração do eléctrodo: cilindros o 25 / o 75 mm, no óleo do transformador de acordo com IEC 60296.

Atenção que a força elétrica para o material preto extrudido pode ser consideravelmente mais baixa que a do material natural. A possível micro porosidade no centro de formas conservadas em stock reduz significativamente a força elétrica.

## Anexo B. Ficha técnica do ERTALON 66 GF30 [27]



PA ●

### ERTALON® 66 GF30

**Plástico semi-cristalino**, comparado com o ERTALON® 66 SA, esta poliamida reforçada com 30% de fibra de vidro e estabilizada ao calor, oferece maior resistência mecânica, rigidez, fluência e estabilidade dimensional, mantendo uma excelente resistência ao desgaste.



#### PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS

- Maior retenção da resistência mecânica, rigidez e fluência a temperaturas elevadas, devido à carga FV
- Maior estabilidade dimensional (sem necessidade de estabilização antes do processo de maquinação)
- Boas propriedades de isolamento elétrico
- Boas propriedades de deslizamento
- Excelente resistência ao desgaste
- Alta capacidade de amortecimento mecânico
- Boa resistência às radiações de alta energia (Raios Gama e X)
- Fácil maquinação

#### APLICAÇÕES

- Casquilhos sem rotação
- Isoladores elétricos
- Fieiras
- Peças estruturais
- Protótipos



RESISTÊNCIA QUÍMICA



ISOLAMENTO ELÉTRICO



RESISTÊNCIA AO DESGASTE



PROPRIEDADES DESLIZANTES



RESISTÊNCIA AO IMPACTO



AMPLITUDE DE TEMPERATURA

\*uso contínuo (20.000H)

Todos os valores apresentados são meramente indicativos, a Polyanema Lda, não se responsabiliza pela utilização dos materiais sem consulta ao nosso departamento técnico.

PA  
FICHA TÉCNICA



PROPRIEDADES	MÉTODOS DE TESTE	UNIDADES	ERTALON® 66 GF30
COR		-	PRETO
DENSIDADE	ISO 1183-1	g/cm <sup>3</sup>	1.29
ABSORÇÃO DE ÁGUA			
APÓS 24/96H DE IMERSÃO EM ÁGUA A 23°C <sup>1</sup>	ISO 62	mg	30/56
APÓS 24/96H DE IMERSÃO EM ÁGUA A 23°C <sup>1</sup>	ISO 62	%	0.39/0.74
NA SATURAÇÃO DO AR A 23°C / 50% RH	-	%	1.7
NA SATURAÇÃO DA ÁGUA A 23°C	-	%	5.5
<b>PROPRIEDADES TÉRMICAS<sup>2</sup></b>			
TEMPERATURA DE FUSÃO (DSC, 10°C/MIN)	ISO 11357-1/-3	°C	260
TEMPERATURA DE TRANSIÇÃO DO VIDRO (DSC, 20°C/MIN) <sup>3</sup>	ISO 11357-1/-3	°C	-
CONDUTIVIDADE TÉRMICA A 23°C	-	W/(K.m)	0.30
COEFICIENTE DE EXPANSÃO TÉRMICA LINEAR			
VALOR MÉDIO ENTRE 23-60°C	-	M/(m.K)	50 x 10 <sup>-6</sup>
VALOR MÉDIO ENTRE 23-100°C	-	M/(m.K)	60 x 10 <sup>-6</sup>
TEMPERATURA DE DEFORMAÇÃO SOB A CARGA			
MÉTODO A 1.8 MPa	+ ISO 75-1/-2	°C	150
TEMPERATURA MÁXIMA DE SERVIÇO NO AR			
PARA CURTOS PERÍODOS <sup>4</sup>	-	°C	200
CONTINUAMENTE PARA 5.000/20.000H <sup>5</sup>	-	°C	120/110
TEMPERATURA MÍNIMA DE SERVIÇO <sup>6</sup>	-	°C	-20
<b>INFLAMABILIDADE<sup>7</sup></b>			
"ÍNDICE DE OXIGÉNIO"	ISO 4589-1/-2	%	-
DE ACORDO COM UL94 (3/6MM DE ESPESSURA)	-	-	HB/HB
<b>PROPRIEDADES MECÂNICAS A 23°C<sup>8</sup></b>			
<b>TESTE À TRAÇÃO<sup>9</sup></b>			
RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NO ESCOAMENTO/RUTURA <sup>10</sup> -	ISO 527-1/-2	MPa	NA/85
RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NO ESCOAMENTO/RUTURA <sup>10</sup> ++	ISO 527-1/-2	MPa	-
RESISTÊNCIA À TRAÇÃO <sup>10</sup> +	ISO 527-1/-2	MPa	85
TENSÃO ELÁSTICA NO ESCOAMENTO <sup>11</sup> +	ISO 527-1/-2	%	NA
TENSÃO ELÁSTICA NA RUTURA <sup>11</sup> +	ISO 527-1/-2	%	5
TENSÃO ELÁSTICA NA RUTURA <sup>11</sup> ++	ISO 527-1/-2	%	-
MÓDULO DE ELASTICIDADE <sup>11</sup> +	ISO 527-1/-2	MPa	5000
MÓDULO DE ELASTICIDADE <sup>11</sup> ++	ISO 527-1/-2	MPa	2700
<b>TESTE DE COMPRESSÃO<sup>12</sup></b>			
RESISTÊNCIA A 1/2/5% DE DEFORMAÇÃO NOMINAL <sup>13</sup> +	ISO 604	MPa	43/77/112
RESISTÊNCIA AO IMPACTO DE CHARPY SEM ENTALHE <sup>14</sup> +	ISO 179-1/1eU	KJ/m <sup>2</sup>	50
RESISTÊNCIA AO IMPACTO DE CHARPY COM ENTALHE +	ISO 179-1/1eA	KJ/m <sup>2</sup>	6
DUREZA POR BOLA DE AÇO <sup>15</sup> +	ISO 2039-1	N/mm <sup>2</sup>	165
DUREZA DE ROCKWELL <sup>15</sup> +	ISO 2039-2	-	M 76
<b>PROPRIEDADES ELÉTRICAS A 23°C</b>			
RIGIDEZ DIELÉTRICA <sup>16</sup> +	IEC 60243-1	kV/mm	27
RIGIDEZ DIELÉTRICA <sup>16</sup> ++	IEC 60243-1	kV/mm	18
RESISTIVIDADE VOLUMÉTRICA +	IEC 60093	Ohm.cm	> 10 <sup>14</sup>
RESISTIVIDADE VOLUMÉTRICA ++	IEC 60093	Ohm.cm	> 10 <sup>12</sup>
RESISTIVIDADE SUPERFICIAL +	IEC 60093	Ohm	> 10 <sup>13</sup>
RESISTIVIDADE SUPERFICIAL ++	IEC 60093	Ohm	> 10 <sup>12</sup>
PERMEABILIDADE RELATIVA ε <sub>r</sub> : A 100HZ	IEC 60250	-	3.9
PERMEABILIDADE RELATIVA ε <sub>r</sub> : A 100HZ	IEC 60250	-	6.9
PERMEABILIDADE RELATIVA ε <sub>r</sub> : A 1MHZ	IEC 60250	-	3.6
PERMEABILIDADE RELATIVA ε <sub>r</sub> : A 1MHZ	IEC 60250	-	3.9
FATOR DE DISSIPAÇÃO DIELÉTRICA TAN δ : A 100HZ	IEC 60250	-	0.012
FATOR DE DISSIPAÇÃO DIELÉTRICA TAN δ : A 100HZ	IEC 60250	-	0.19
FATOR DE DISSIPAÇÃO DIELÉTRICA TAN δ : A 1MHZ	IEC 60250	-	0.014
FATOR DE DISSIPAÇÃO DIELÉTRICA TAN δ : A 1MHZ	IEC 60250	-	0.04
ÍNDICE DE SEGUIMENTO COMPARATIVO (CTI)	IEC 60112	-	475
ÍNDICE DE SEGUIMENTO COMPARATIVO (CTI)	IEC 60112	-	475

NOTA: 1 g/cm<sup>3</sup> = 1000 kg/m<sup>3</sup> ; 1 MPa = 1N/mm<sup>2</sup> ; 1KV/mm = 1MV/m

+ : valores referentes ao material seco

++ : valores referentes a material em equilíbrio com a atmosfera padrão 23°C / 50% rh

(1) De acordo com o método 1 do ISO 62 e medido em discos de 50x3 mm. (2) Os elementos fornecidos para esta propriedade são na sua maior parte fornecidos pelos fabricantes das matérias-primas. (3) Os valores desta propriedade são apenas atribuídos a materiais amorfos e não a semi-cristalinos. (4) Só para períodos de exposição curtos em aplicações em que são aplicadas somente cargas muito baixas sobre o material. (5) Temperatura a que resiste depois de um período de 5 000/20.000 horas. Após este período de tempo, há um decréscimo de cerca de 50% na resistência à tração, comparado com o valor original. Os valores da temperatura dados são baseados na degradação por oxidação térmica que ocorre que provoca uma redução das propriedades. No entanto, a temperatura máxima de serviço permitível depende, em muitos casos, essencialmente da dedução e da magnitude dos esforços mecânicos a que o material é sujeito. (6) Dado que a resistência ao impacto diminui com a diminuição da temperatura, a temperatura mínima de serviço permitida é determinado pela extensão de impacto ao qual o material é sujeito. Os valores dados são baseados em condições de impacto desfavoráveis e não podem consequentemente ser considerados como sendo os limites absolutos. (7) Estas avaliações, derivam das especificações técnicas dos fabricantes das matérias-primas, não permitindo determinar o comportamento dos materiais em condições de fogo. (8) A maioria das figuras dadas pelas propriedades dos materiais (+), são valores médios dos testes feitos a espécimes maquinados com φ 40-60 mm. (9) Teste a espécimes: tipo 1b. (10) Teste de velocidade: 5 ou 50 mm/min. (11) Teste de velocidade: 1m/min. (12) Teste a espécimes: cilindros φ 8 x 16 mm. (13) Pêndulo usado: 15J. (14) Teste a espécimes com 10 mm de espessura. (15) Configuração do eléctrodo: cilindros φ 25 / φ 75 mm, no óleo do transformador de acordo com IEC 60295.

Atenção que a força elétrica para o material preto extrudido pode ser consideravelmente mais baixa que a do material natural. A possível micro porosidade no centro de formas conservadas em stock reduz significativamente a força elétrica.