Universidade do Minho
Escola de Engenharia

João Custódio de Miranda Lomba

Estudo da Influência da Adição de Pigmentos e Corantes na Transmitância e na Soldadura Laser por Transmissão de Polimetilmetacrilato

outubro de 2024

Estudo da Influência da Adição de Pigmentos e Corantes na Transmitância e na Soldadura Laser por Transmissão de Polimetilmetacrilato

João Custódio de Miranda Lomba

UMinho |

Universidade do Minho
Escola de Engenharia

João Custódio de Miranda Lomba

Estudo da Influência da Adição de Pigmentos e Corantes na Transmitância e na Soldadura Laser por Transmissão de Polimetilmetacrilato

Dissertação de Mestrado
Mestrado Integrado em Engenharia de Polímeros

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor Fernando Moura Duarte

outubro de 2024

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas

no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

Atribuição-NãoComercial-SemDerivações
CC BY-NC-ND
https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/

Agradecimentos

Esta tese de mestrado não seria possível sem o apoio de algumas pessoas, às quais quero agradecer a ajuda prestada.

Ao meu pai João Lomba e à minha mãe Adelaide Lomba por todo o encorajamento e apoio dado ao longo de todo o meu percurso académico.

Aos meus avós por todo o auxílio e alento dado ao longo de todo o meu percurso académico. À Ângela Gomes pelo apoio e motivação nos momentos mais difíceis.

Aos meus amigos que estiveram presentes e me acompanharam ao longo destes 6 anos. Agradeço-lhes pelos momentos inesquecíveis partilhados e pela ajuda.

Ao Professor Fernando Moura Duarte, pela disponibilidade e apoio dado ao longo desta tese.

Aos colaboradores do PIEP pela disponibilidade, apoio, e conhecimentos técnicos fornecidos ao longo da minha tese.

Por último aos técnicos do departamento de Engenharia de Polímeros por todo o apoio na fase experimental.

A todos os meus sinceros agradecimentos

Declaração de Integridade

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização ou falsificação de informação ou resultados em nenhuma das etapas conducentes à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

Resumo

A soldadura direta e por transmissão, são duas técnicas que provem da subdivisão da soldadura a laser. A segunda, em particular, é amplamente empregue na indústria devido à sua eficácia. Simplificadamente, esta técnica baseia-se no princípio de que uma das peças do conjunto é transparente à radiação emitida pelo laser, enquanto a outra é absorvente a essa radiação na interface do conjunto de ambas as peças.

A qualidade final de soldadura para além de ser influenciada pelas variáveis de soldadura é influenciada pelas propriedades óticas do material, como a cristalinidade do material ou a presença de aditivos o que pode afetar o desempenho mecânico das peças soldadas. O presente estudo teve dois objetivos principais.

O primeiro objetivo consistiu em investigar a influência da espessura e da adição de diferentes concentrações de aditivos (pigmentos e corantes) na peça transparente ao laser o PMMA, e observar quais permitiam ou não a soldadura. De forma a atingir os objetivos, foram definidas as espessuras a avaliar 0,5 milímetros a 4 milímetros com incrementos de 0,5 milímetros, e os aditivos a serem incorporados (pigmentos orgânicos, inorgânicos, metálicos e corantes), assim como a sua concentração na matriz polimérica (0,5%; 1,0%; 2,0%). As amostras foram produzidas através da moldação por injeção e foram realizadas medições num espectrofotómetro para avaliar a sua transmitância num comprimento de onda de 940 e 1040 nanometros. Por último, as amostras foram submetidas ao processo de soldadura a laser e avaliadas visualmente de forma a determinar se ocorreu ou não uma boa soldadura entre as amostras. A análise da incorporação de aditivos, mostra que a adição de pigmentos orgânicos e inorgânicos influencia maioritariamente os resultados de transmitância em comparação com os corantes. Perante o aumento de espessura e de concentração, estas variáveis também apresentam maior influência no caso dos pigmentos, por sua vez, os corantes são mais influenciados pelas condições operatórias da injeção. Na visualização da soldadura, o resultado mostra que se pode utilizar como índice preditivo confiável a relação entre os dados de transmitância e a soldadura final, com exceção do dióxido de titânio e o bronze. Após este estudo conclui-se que a incorporação de corantes num conjunto alargado de espessuras e concentrações apresenta uma aplicabilidade mais ampla para a produção de componentes que exijam elevada transmitância sem comprometer a

integridade da soldadura.

O segundo objetivo visa avaliar quais as condições operatórias do laser que maximizam a eficácia da soldadura para diferentes geometrias e dimensões de *rib* na peça absorvente ao laser, o PC/ABS, e compreender a influência tanto das condições operatórias como das diferentes tipologias de *rib*, através dos ensaios de desempenho mecânico (tração) e ótico (microscopia) das amostras unidas por essa técnica. Assim sendo, foram escolhidas diferentes geometrias e dimensões de *rib* para o estudo, (lisa, quadrangular, triangular, trapezoidal e hermética), bem como diversas condições operatórias no processo de soldadura laser, tais como (temperatura do laser, velocidade do laser, diâmetro do laser, pressão de aperto e número de passagens). Para a realização dos ensaios foi elaborado um plano de experiências. A produção das peças absorventes foi efetuada através de moldação por injeção necessária para a realização do plano de experimentos e com as condições de moldação descritas na *datasheet* do material.

Por último, conduziram-se os ensaios de soldadura a laser por transmissão que posteriormente foram submetidos a testes de tração e microscopia ótica para averiguar a resistência e qualidade de soldadura e da linha de soldadura. Os resultados de tração indicam que as variáveis que mais influenciam a força máxima da soldadura são a largura e altura de *rib*, juntamente com o número de passagens e abertura do laser. Após este estudo conclui-se que a tipologia de *rib* mais eficiente foi a triangular com uma boa relação entre força máxima atingida e área de *rib.* A força máxima mais alta foi atingida para a configuração P 16 (ensaio T92), com um dimensionamento de 0,8 mm de altura e largura de *rib.*

Palavras-Chave

Corantes, condições operatórias do laser, pigmentos, *rib, s*oldadura laser por transmissão

Abstract

Direct and transmission welding are two techniques derived from laser welding. The latter, in particular, is widely used in the industry due to its effectiveness. Simply put, this technique is based on the principle that one of the components in the assembly is transparent to the laser radiation, while the other absorbs this radiation at the interface between both components.

The final welding quality is influenced not only by welding variables but also by the optical properties of the material, such as material crystallinity or the presence of additives, which can affect the mechanical performance of the welded parts. This study had two main objectives.

The first objective was to investigate the influence of thickness and the addition of different concentrations of additives (pigments and dyes) in the laser-transparent part, PMMA, to observe which allowed or prevented welding. To achieve these objectives, the thicknesses to be evaluated were set between
0.5 mm to 4 mm in increments of 0.5 mm, and the additives to be incorporated included organic, inorganic, metallic pigments, and dyes, as well as their concentration in the polymer matrix (0.5%, 1.0%, 2.0%). The samples were produced through injection molding, and measurements were taken using a spectrophotometer to evaluate their transmittance at wavelengths of 940 and 1040 nanometers. Lastly, the samples were subjected to laser welding and visually assessed to determine whether a good weld between the samples had occurred. Analysing the incorporation of additives shows that the addition of organic and inorganic pigments has a greater influence on the transmittance results than dyes. As the thickness and concentration increase, these variables also have a greater influence in the case of pigments, while dyes are more influenced by the injection operating conditions. When visualising the weld, the result shows that the relationship between the transmittance data and the final weld can be used as a reliable predictive index, with the exception of titanium dioxide and bronze. Following this study, it can be concluded that the incorporation of dyes in a wide range of thicknesses and concentrations has wider applicability for the production of components that require high transmittance without compromising the integrity of the weld.

The second objective was to assess which laser operating conditions maximize

welding efficiency for different rib geometries and dimensions in the laser-absorbing part, PC/ABS, and to understand the influence of both operating conditions and different rib types through mechanical performance tests (tensile) and optical tests (microscopy) of the samples joined by this technique. For this purpose, different rib geometries and dimensions were selected for the study (flat, square, triangular, trapezoidal, and hermetic), as well as various operating conditions in the laser welding process, such as laser temperature, laser speed, laser diameter, clamping pressure, and the number of passes. An experimental design plan was created for testing. The production of absorbing parts was carried out through injection molding, following the molding conditions described in the material datasheet.

Finally, laser transmission welding tests were conducted, followed by tensile and optical microscopy tests to assess weld strength, quality, and the quality of the weld line. The tensile results indicate that the variables that most influence the maximum welding force are the rib width and height, together with the number of passes and the laser aperture. After this study it was concluded that the most efficient rib type was triangular with a good relationship between maximum force achieved and rib area. The highest maximum force was achieved for the P 16 configuration (T92 test), with a rib height and width dimensioning of 0.8 mm.

Keywords

Dyes, laser operating conditions, pigments, rib, laser transmission welding

Índice

Agradecimentos iii
Resumo v
Palavras-Chave vi
Abstract vi
Keywords vii
Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos xix
1. INTRODUÇÃO 1
1.1 Enquadramento 1
1.2 Objetivos/Metodologia 2
1.3 Estrutura da Dissertação 3
2. ESTADO DE ARTE 3
2.1 Processo de soldadura laser por transmissão (LTW) 3
2.1.1 Interação do laser com o material 5
2.1.2 Tipos de laser utilizados na soldadura por transmissão 5
2.1.3 Variantes do processo de soldadura laser por transmissão 6
2.1.4 Requisitos básicos ao processo de soldadura laser por transmissão 7
2.1.5 Limitações do material 10
2.2 Matéria-Prima 11
2.2.1 PMMA (Polimetilmetacrilato) 11
2.2.2 PC/ABS (Policarbonato/Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno) 12
2.3 Parâmetros de controlo na soldadura laser por transmissão 13
2.3.1 Parâmetros de soldadura e a sua influência na resistência mecânica e qualidade de solda 15
2.3.2 Influência de pigmentos e corantes na matriz polimérica 16
2.3.3 Influência da espessura 17
2.4 Vantagens e desvantagens 18
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL 19
3.1 Métodos e Materiais 19
Métodos 19
Materiais 21
3.2 Primeiro Caso de Estudo: Parte Transparente (PMMA) 23
3.2.1 Peça e Molde 23
i. Peça de PMMA 23
ii. Molde 24
3.2.2 Moldação por Injeção 25
i. Preparação das Misturas 25

ii. Processo de Injeção 25
3.2.3 Caracterização do PMMA e Misturas 27
i. Medição da Cor 27
ii. Transmitância 28
3.2.4 Soldadura a Laser por Transmissão (LTW) – (PMMA) 30
i. Processo de Soldadura 30
ii. Controlo Visual do provete soldado 31
3.3 Segundo Caso de Estudo: Parte Absorvente (PC/ABS) 31
3.3.1 Peça e Molde 32
i. Peça de PC/ABS 32
ii. Molde 33
3.3.2 Moldação por Injeção 33
3.3.3 Soldadura Laser por Transmissão (LTW) – (PC/ABS) 34
i. Plano de Experimentos das Condições da Soldadura 34
ii. Processo de Soldadura laser por transmissão 45
3.3.4 Caracterização do PC/ABS 46
i. Ensaios Mecânicos (Tração) 46
ii. Ensaios Óticos (Microscopia) 46
4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS 47
4.1 Primeiro Caso de Estudo: Parte Transparente (PMMA) 47
4.1.1 Caracterização do PMMA e Misturas 47
i. Medição da Cor 47
ii. Medição da Transmitância 54
4.1.2 Avaliação Visual da Soldadura a Laser por Transmissão (LTW) 67
4.2 Segundo Caso de Estudo: Parte Absorvente (PC/ABS) 87
4.2.1 Análise dos Ensaios Mecânicos e Óticos (Tração e Microscopia) 87
Ensaios de Microscopia 156
5. Conclusão 159
Bibliografia 162
Anexos 165
Anexos 1 – Ficha Técnica PMMA 166
Anexo 2 – Ficha Técnica PC/ABS 168
Anexo 3 – Provetes de PMMA e Misturas com Pigmentos e Corantes 170
Anexo 4 – Condições Operatórias Moldação por Injeção 178
Anexo 5 – Norma ASTM D1003 179
Anexo 6 – Gráficos da Influência do comprimento de ondas na transmitância dos provetes com mistura de 1 e 2% e espessuras de 0,5 a 4 mm 184

Índice de Figuras

Figura 1 - Processo de soldadura a laser por transmissão (SLT) [1] 4
Figura 2 - Energia transmitida por um policarbonato com 0,5 mm de espessura nos diferentes [9]. 5
Figura 3 - Métodos de soldadura: (a) por contorno; (b) simultânea; (c) quase simultânea [13] 7
Figura 4 - Profundidade de penetração ótica em PP com concentração variável de negro de fumo a 940 nm [1]. 8
Figura 5 –Compatibilidade entre termoplásticos na soldadura a laser [16]. 10
Figura 6 - Grau de complexidade na soldadura laser por transmissão de termoplásticos [14]. 10
Figura 7 - Comparação entre a quantidade de radiação absorvida por um polimetilmetacrilato sem e com aditivo LD120C [1] 11
Figura 8 - Síntese do PMMA a partir do metacrilato de metilo [45] 12
Figura 9 - Estrutura molecular do PC (retirado de [37]) 12
Figura 10 -Estrutura molecular do ABS (retirado e adaptado [39]) 13
Figura 11 - Correlação da resistência de soldadura com a energia aplicada, e imagens da qualidade da soldadura [1]. 15
Figura 12 - Diferença dos pigmentos e corantes na matriz [37] 16
Figura 13 - Relação entre a transmissão laser e a espessura para diferentes polímeros [9] 18
Figura 14 - Esquema referente à organização do procedimento experimental do segundo caso de estudo (PC/ABS) 20
Figura 15 - Pigmentos orgânicos 22
Figura 16 - Pigmentos Inorgânicos 22
Figura 17 -Pigmentos metálicos (inorgânicos) 22
Figura 18 – Corantes 23
Figura 19 - Dimensões dos provetes em estudo, com 30 por 30 milímetros. A - 4 e 3,5mm; B - 3 e 2,5mm; C - 2 e 1,5mm; D - 1 e 0,5mm 23
Figura 20 - No lado esquerdo, esboço referente ao dimensionamento dos provetes de PMMA. No lado direito, demonstração dos provetes transparentes 23
Figura 21 - Imagem das duas placas móveis, com sinalização dos pontos de extração 24
Figura 22 - À esquerda esquematização 3D do molde projetado, à direita desenho técnico do molde com visualização dos sistemas de arrefecimento 24
Figura 23 - Máquina de injeção BOY22 26
Figura 24 -Representação do diagrama do sistema CIELAB [44] 28
Figura 25 - Representação do processo dentro do espectrofotómetro [45] 29
Figura 26 – Demonstração do processo de soldadura a laser por transmissão 30
Figura 27 – Exemplo de peça soldada (Primeiro caso de estudo PMMA com 0,5% de pigmento inorgânico TiO2) 31
Figura 28 - 1- Figura esquemática 2D do provete. 2- Figura esquemática 3D do provete. 3- Provete em PC/ABS com rib 32
Figura 29 – Diferentes configurações de rib 33

Figura 30 - Máquina de injeção ENGLET 45T 34
Figura 31 - Peça soldada (Segundo caso de estudo PC/ABS com rib triangular)..... 45
Figura 32 - Provete fixo com 90 mm de distância entre amarras 46
Figura 33 - Transmitância do PMMA em função dos comprimentos de onda de 940 e 1040 nm 54
Figura 34 - Transmitância da mistura com 0,5% de concentração nos Pigmentos Orgânicos em função dos comprimentos de onda de 940 e 1040 nm 55
Figura 35 - Transmitância da mistura com 0,5% de concentração nos Pigmentos Inorgânicos em função dos comprimentos de onda de 940 e 1040 nm..... 56
Figura 36 - Transmitância da mistura com 0,5% de concentração nos Corantes em função dos comprimentos de onda de 940 e 1040 nm 57
Figura 37 - Variação da espessura dos provetes na transmitância, para PMMA transparente 58
Figura 38 - Variação da espessura dos provetes na transmitância, em concentrações de 0,5% e 1,0% e 2,0% de Verde 7 58
Figura 39 - Variação da espessura dos provetes na transmitância, em concentrações de 0,5% e 1,0% e 2,0% de Vermelho 144 59
Figura 40 - Variação da espessura dos provetes na transmitância, em concentrações de 0,5% e 1,0% e 2,0% de Amarelo 191 59
Figura 41 - Variação da espessura dos provetes na transmitância, em concentrações de 0,5% e 1,0% e 2,0% de Azul 15:1 60
Figura 42 - Variação da espessura dos provetes na transmitância, em concentrações de 0,5% e 1,0% e 2,0% de Negro de Fumo 60
Figura 43 - Variação da espessura dos provetes na transmitância, em concentrações de 0,5% e 1,0% e 2,0% de Dióxido de Titânio (TiO2). 61
Figura 44 - Variação da espessura dos provetes na transmitância, em concentrações de 0,5% e 1,0% e 2,0% de Óxido de Ferro (Feo). 61
Figura 45 - Variação da espessura dos provetes na transmitância, em concentrações de 0,5% e 1,0% e 2,0% de Azul 29 62
Figura 46 - Variação da espessura dos provetes na transmitância, em concentrações de 0,5% e 1,0% e 2,0% de Alumínio..... 62
Figura 47 - Variação da espessura dos provetes na transmitância, em concentrações de 0,5% e 1,0% e 2,0% de Bronze. 63
Figura 48 - Variação da espessura dos provetes na transmitância, em concentrações de 0,5% e 1,0% e 2,0% de Verde 28 63
Figura 49 - Variação da espessura dos provetes na transmitância, em concentrações de 0,5% e 1,0% e 2,0% de Vermelho 135 64
Figura 50 - Variação da espessura dos provetes na transmitância, em concentrações de 0,5% e 1,0% e 2,0% de Amarelo 114 64
Figura 51 - Variação da espessura dos provetes na transmitância, em concentrações de 0,5% e 1,0% e 2,0% de Azul 104 65
Figura 52 - Soldadura a Laser por Transmissão (SLT), do Verde 7 com concentração de 0,5% 68
Figura 53 - Soldadura a Laser por Transmissão (SLT), do Verde 7 com concentração de 1%. 68
Figura 54 - Soldadura a Laser por Transmissão (SLT), do Verde 7 com concentração de 2%. 69
Figura 55 - Soldadura a Laser por Transmissão (SLT), do Vermelho 144 com concentração de 0,5%. 69

Figura 56 - Soldadura a Laser por Transmissão (SLT), do Vermelho 144 com concentração de 1%. 70
Figura 57 - Soldadura a Laser por Transmissão (SLT), do Vermelho 144 com concentração de 2%. 70
Figura 58 - Soldadura a Laser por Transmissão (SLT), do Amarelo 191 com concentração de 0,5%. 71
Figura 59 - Soldadura a Laser por Transmissão (SLT), do Amarelo 191 com concentração de 1%. 71
Figura 60 - Soldadura a Laser por Transmissão (SLT), do Amarelo 191 com concentração de 2%. 71
Figura 61 - Soldadura a Laser por Transmissão (SLT), do Azul 15:1 com concentração de 0,5%. 72
Figura 62 - Soldadura a Laser por Transmissão (SLT), do Azul 15:1 com concentração de 1%. 72
Figura 63 - Soldadura a Laser por Transmissão (SLT), do Azul 15:1 com concentração de 2%. 72
Figura 64 - Soldadura a Laser por Transmissão (SLT), do Negro de Fumo com concentração de 0,5%, 1% e 2%. 73
Figura 65 - Soldadura a Laser por Transmissão (SLT), do Dióxido de Titânio com concentração de 0,5%. 74
Figura 66 - Soldadura a Laser por Transmissão (SLT), do Dióxido de Titânio com concentração de 1%. 74
Figura 67 - Soldadura a Laser por Transmissão (SLT), do Dióxido de Titânio com concentração de 2%. 74
Figura 68 - Soldadura a Laser por Transmissão (SLT), do Óxido de Ferro com concentração de 0,5%. 75
Figura 69 - Soldadura a Laser por Transmissão (SLT), do Óxido de Ferro com concentração de 1%. 76
Figura 70 - Soldadura a Laser por Transmissão (SLT), do Óxido de Ferro com concentração de 2%. 76
Figura 71 - Soldadura a Laser por Transmissão (SLT), do Azul 29 com concentração de 0,5%. 77
Figura 72 - Soldadura a Laser por Transmissão (SLT), do Azul 29 com concentração de 1%. 77
Figura 73 - Soldadura a Laser por Transmissão (SLT), do Azul 29 com concentração de 2%. 77
Figura 74 - Soldadura a Laser por Transmissão (SLT), do Alumínio com concentração de 0,5%, 1% e 2%. 78
Figura 75 - Soldadura a Laser por Transmissão (SLT), do Bronze com concentração de 0,5%. 79
Figura 76 - Soldadura a Laser por Transmissão (SLT), do Bronze com concentração de 1%. 79
Figura 77 - Soldadura a Laser por Transmissão (SLT), do Bronze com concentração de 2%. 79
Figura 78 - Soldadura a Laser por Transmissão (SLT), do Verde 28 com concentração de 0,5%. 80
Figura 79 - Soldadura a Laser por Transmissão (SLT), do Verde 28 com concentração de 1%. 80

Figura 80 - Soldadura a Laser por Transmissão (SLT), do Verde 28 com concentração de 2%. 81
Figura 81 - Soldadura a Laser por Transmissão (SLT), do Vermelho 135 com concentração de 0,5%. 81
Figura 82 - Soldadura a Laser por Transmissão (SLT), do Vermelho 135 com concentração de 1%. 82
Figura 83 - Soldadura a Laser por Transmissão (SLT), do Vermelho 135 com concentração de 2%. 82
Figura 84 - Soldadura a Laser por Transmissão (SLT), do Amarelo 114 com concentração de 0,5%. 82
Figura 85 - Soldadura a Laser por Transmissão (SLT), do Amarelo 114 com concentração de 1%. 83
Figura 86 - Soldadura a Laser por Transmissão (SLT), do Amarelo 114 com concentração de 2%. 83
Figura 87 - Soldadura a Laser por Transmissão (SLT), do Azul 104 com concentração de 0,5%. 84
Figura 88 - Soldadura a Laser por Transmissão (SLT), do Azul 104 com concentração de 1%. 84
Figura 89 - Soldadura a Laser por Transmissão (SLT), do Azul 104 com concentração de 2%. 84
Figura 90 - Ensaio de tração PC/ABS com PMMA 87
Figura 91 - Provetes após ensaio de tração 88
Figura 92 - Rotação dos provetes com rib 89
Figura 93 - Variação da temperatura da soldadura a laser, com velocidade constante 10mm/s e pressão constante 117N (para configuração sem Rib). 91
Figura 94 - Gráfico da variação da velocidade da soldadura a laser, com temperatura constante 300°C e pressão constante 117N (para configuração sem Rib). 92
Figura 95 - Gráfico da variação da pressão da soldadura a laser, com velocidade constante 10mm/s e temperatura constante 300°C (para configuração sem Rib). 93
Figura 96 - Gráfico da variação da temperatura da soldadura a laser, com velocidade constante 10mm/s, pressão de aperto constante 201N e abertura do laser constante 2mm (P 14). 95
Figura 97 - Gráfico da variação da velocidade da soldadura a laser, com temperatura constante 260°C, abertura do laser constante 2mm e pressão de aperto constante 201N (P 14) 96
Figura 98 - Gráfico da variação da pressão da soldadura a laser, com velocidade constante 10mm/s, abertura do laser constante 2mm e temperatura constante 260°C (P 14) 97
Figura 99 - Gráfico dos resultados de força dos ensaios e respetivos desvios padrão. (P 14) 97
Figura 100 - Gráfico da variação da temperatura da soldadura a laser, com velocidade constante 10mm/s e pressão constante 201N (P 7). 99
Figura 101 - Gráfico da variação da velocidade da soldadura a laser, com temperatura constante 280°C e pressão constante 201N (para configuração Rib quadrangular P 7). 99
Figura 102 - Gráfico da variação da pressão da soldadura a laser, com velocidade constante 10mm/s e temperatura constante 280°C (P 7) 100
Figura 103 - Gráfico dos resultados de força dos ensaios e respetivos desvios padrão (P 7) 101
Figura 104 - Gráfico da variação da temperatura da soldadura a laser, com velocidade constante 10mm/s e pressão de aperto constante 201N (P 10) 102

Figura 105 - Gráfico da variação da velocidade da soldadura a laser, com temperatura constante 260°C e pressão de aperto constante 201N (P 10) 103
Figura 106 - Gráfico da variação da pressão da soldadura a laser, com velocidade constante 10mm/s e temperatura constante 260°C (P 10) 103
Figura 107 - Gráfico dos resultados de força dos ensaios e respetivos desvios padrão. (P 10) 104
Figura 108 - Gráfico da variação da temperatura da soldadura a laser, com velocidade constante 10mm/s e pressão constante 201N (para configuração Rib quadrangular P 11). ... 105
Figura 109 - Gráfico da variação da velocidade da soldadura a laser, com temperatura constante 260°C e pressão constante 201N (para configuração Rib quadrangular P 11). 106
Figura 110 - Gráfico da variação da pressão da soldadura a laser, com velocidade constante 10mm/s e temperatura constante 260°C (para configuração Rib quadrangular P 11). 107
Figura 111 - Gráfico dos resultados de força dos ensaios e respetivos desvios padrão. (P 11) 108
Figura 112 - Gráfico da variação da temperatura da soldadura a laser, com velocidade constante 10mm/s e pressão constante 201N e duas passagens do laser (para configuração Rib quadrangular P 15). 110
Figura 113 - Gráfico da variação da velocidade da soldadura a laser, com temperatura constante 220°C e pressão constante 201N e duas passagens do laser (para configuração Rib quadrangular P 15). 110
Figura 114 - Gráfico da variação da pressão de aperto da soldadura a laser, com temperatura constante 220°C, velocidade constante 10mm/s e duas passagens do laser (para configuração Rib quadrangular P 15) 111
Figura 115 - Gráfico dos resultados de força dos ensaios e respetivos desvios padrão. (P 15) 112
Figura 116 – Gráfico dos melhores ensaios das configurações retangulares, consoante a força máxima atingida. 113
Figura 117 - Gráfico da influência da largura (à esquerda) e da influência da altura (à direita) consoante os resultados de força regidos pela Condição 1 115
Figura 118 - Gráfico da variação da temperatura da soldadura a laser, com velocidade constante 10mm/s, pressão constante 201N, 2 passagens e 1 mm de abertura de laser (para configuração Rib triangular P 16) 117
Figura 119 - Gráfico da variação da velocidade da soldadura a laser, com duas passagens, temperatura constante 240°C, pressão constante 201 N e 1 mm de abertura do laser (para configuração Rib triangular P 16) 117
Figura 120 - Gráfico da variação da pressão da soldadura a laser, com velocidade constante 10mm/s, temperatura constante 240°C, 2 passagens do laser e 1 mm de abertura do laser (para configuração Rib triangular P 16). 118
Figura 121 - Gráfico dos resultados de força dos ensaios e respetivos desvios padrão. (P 16) 119
Figura 122 - Gráfico da variação da temperatura da soldadura a laser, com velocidade constante 10 mm/s e pressão constante 201 N (P 8) 120
Figura 123 -Gráfico da variação da velocidade da soldadura a laser, com temperatura constante 240°C e pressão constante 201 N (P 8). 121
Figura 124 - Gráfico da variação da pressão da soldadura a laser, com velocidade constante 10 mm/s e temperatura constante 240°C (P 8) 121
Figura 125 - Gráfico dos resultados de força dos ensaios e respetivos desvios padrão. (P

8)..... 122
Figura 126 - Gráfico da variação da temperatura da soldadura a laser, com velocidade constante 10mm/s e pressão constante 201N (P 12). 123
Figura 127 - Gráfico da variação da velocidade da soldadura a laser, com temperatura constante 240°C e pressão constante 201N (P 12) 124
Figura 128 - Gráfico da variação da pressão da soldadura a laser, com velocidade constante 10mm/s e temperatura constante 240°C (P 12) 125
Figura 129 - Gráfico dos resultados de força dos ensaios e respetivos desvios padrão (P 12) 126
Figura 130 - Gráfico da variação da temperatura da soldadura a laser, com velocidade constante 10 mm/s e pressão de aperto constante 201 N (P 13) 127
Figura 131 - Gráfico da variação da velocidade da soldadura a laser, com temperatura constante 240 °C e pressão de aperto constante 201 N (P 13) 128
Figura 132 - Gráfico da variação da pressão da soldadura a laser, com velocidade constante 10mm/s e temperatura constante 240°C (P 13) 128
Figura 133 - Gráfico dos resultados de força dos ensaios e respetivos desvios padrão. (P 13)..... 129
Figura 134 - Gráfico da variação da temperatura da soldadura a laser, com velocidade constante 10mm/s e pressão de aperto constante 201 N (P 17) 130
Figura 135 - Gráfico da variação da velocidade da soldadura a laser, com temperatura constante 220 °C e pressão constante 201 N (P 17) 131
Figura 136 - Gráfico da variação da pressão da soldadura a laser, com velocidade constante 10 mm/s e temperatura constante 220 °C (P 17) 132
Figura 137 - Gráfico dos resultados de força dos ensaios e respetivos desvios padrão. (P 17)..... 132
Figura 138 - Gráfico dos melhores ensaios das configurações triangulares, consoante a força máxima atingida. 134
Figura 139 - Gráfico da influência da largura (à esquerda) e da influência da altura (à direita) consoante os resultados de força regidos pela Condição 2 135
Figura 140 - Gráfico dos resultados de força dos ensaios e respetivos desvios padrão. (P 18)..... 137
Figura 141 - Gráfico dos resultados de força dos ensaios e respetivos desvios padrão. (P 19)..... 138
Figura 142 - Gráfico da variação da temperatura da soldadura a laser, com velocidade constante 10 mm/s e pressão de aperto constante 201 N (P 20) 139
Figura 143 - Gráfico da variação da velocidade da soldadura a laser, com temperatura constante 240°C e pressão de aperto constante 201 N (P 20) 140
Figura 144 - Gráfico da variação da pressão da soldadura a laser, com velocidade constante 10mm/s e temperatura de laser constante 260°C (P 20) 140
Figura 145 - Gráfico dos resultados de força dos ensaios e respetivos desvios padrão (P 20)..... 141
Figura 146 - Gráfico da variação da temperatura da soldadura a laser, com velocidade de 6mm/s e pressão de aperto de 201N (P 21) 142
Figura 147 - Gráfico da variação da velocidade da soldadura a laser, com temperatura constante 260°C e pressão de aperto constante 201 N (P 21) 143
Figura 148 - Gráfico da variação da pressão da soldadura a laser, com velocidade constante 10mm/s e temperatura de laser constante 260°C (P 21) 144
Figura 149 - Gráfico dos resultados de força dos ensaios e respetivos desvios padrão. (P 21)..... 144

Figura 150 - Gráfico da variação da temperatura da soldadura a laser, com velocidade constante 10 mm/s e pressão de aperto constante 201 N (P 22) 145
Figura 151 - Gráfico da variação da velocidade da soldadura a laser, com temperatura constante 260 °C e pressão de aperto constante 201 N (P 22) 146
Figura 152 - Gráfico da variação da pressão da soldadura a laser, com velocidade constante 10mm/s e temperatura de laser constante 260°C (P 22) 147
Figura 153 - Gráfico dos resultados de força dos ensaios e respetivos desvios padrão (P 22) 147
Figura 154 - Gráfico dos melhores ensaios das configurações herméticas, consoante a força máxima atingida. 149
Figura 155 - Gráfico da variação da temperatura da soldadura a laser, com velocidade de 10mm/s, pressão de aperto de 201N e abertura do laser de 1mm (P 9). 151
Figura 156 - Gráfico da variação da velocidade da soldadura a laser, com temperatura de 240°C, abertura do laser de 2mm e uma pressão de aperto de 201 N (P 9) 151
Figura 157 - Gráfico da variação da pressão da soldadura a laser, com velocidade de 10mm/s, abertura do laser de 2mm e temperatura de 240°C (P 9) 152
Figura 158 – Gráfico dos resultados de força dos ensaios e respetivos desvios padrão. (P 9) 153
Figura 159 - Gráfico dos resultados da tensão de rotura dos melhores ensaios de todas as Configurações 156
Figura 160 - Imagens de microscopia referente aos provetes 7 e 8 de todos os ensaios da Configuração P 14 157
Figura 161 - Imagens de microscopia referente aos provetes 7 e 8 de todos os ensaios da Configuração P 16 158
Figura 162 - Em cima, provetes em PMMA, transparentes. Em baixo, provetes em PMMA, transparentes com luz 170
Figura 163 - Provetes em PMMA com 0.5%,1% e 2% de Pigmento Vermelho 144, (à direita com luz) 171
Figura 164 - Provetes em PMMA com 0.5%,1% e 2% de Pigmento Azul 15:1, (à direita com luz). 171
Figura 165 - Provetes em PMMA com 0.5%,1% e 2% de Pigmento Verde 7, (à direita com luz). 172
Figura 166 - Provetes em PMMA com 0.5%,1% e 2% de Pigmento Amarelo 191, (à direita com luz) 172
Figura 167 - Provetes em PMMA com 0.5%,1% e 2% de Pigmento Azul 29, (à direita com luz). 173
Figura 168 - Provetes em PMMA com 0.5%,1% e 2% de Solvente Vermelho 135, (à direita com luz) 173
Figura 169 - Provetes em PMMA com 0.5%,1% e 2% de Solvente Amarelo 114, (à direita com luz) 174
Figura 170 - Provetes em PMMA com 0.5%,1% e 2% de Solvente Azul 104, (à direita com luz). 174
Figura 171 - Provetes em PMMA com 0.5%,1% e 2% de Solvente Verde 28, (à direita com luz). 175
Figura 172 - Provetes em PMMA com 0.5%,1% e 2% de Pigmento Inorgânico Óxido de Ferro, (à direita com luz). 175
Figura 173 - Provetes em PMMA com 0.5%,1% e 2% de Pigmento Inorgânico Dióxido de Titânio, (à direita com luz). 176
Figura 174 - Provetes em PMMA com 0.5%,1% e 2% de Pigmento Inorgânico Negro de

Fumo, (à direita com luz). 176
Figura 175 - Provetes em PMMA com 0.5%,1% e 2% de Pigmento Metálico Alumínio, (à direita com luz)..... 177
Figura 176 - Provetes em PMMA com 0.5%,1% e 2% de Pigmento Metálico Bronze, (à direita com luz)..... 177
Figura 177 - Transmitância da mistura com 1% de concentração nos Pigmentos Orgânicos em função dos comprimentos de onda de 940 e 1040 nm 184
Figura 178 - Transmitância da mistura com 1% de concentração nos Pigmentos Inorgânicos em função dos comprimentos de onda de 940 e 1040 nm..... 185
Figura 179 - Transmitância da mistura com 1% de concentração nos Corantes em função dos comprimentos de onda de 940 e 1040 nm 186
Figura 180 - Transmitância da mistura com 2% de concentração nos Pigmentos Orgânicos em função dos comprimentos de onda de 940 e 1040 nm 186
Figura 181 - Transmitância da mistura com 2% de concentração nos Pigmentos Inorgânicos em função dos comprimentos de onda de 940 e 1040 nm..... 187
Figura 182 - Transmitância da mistura com 2% de concentração nos Corantes em função dos comprimentos de onda de 940 e 1040 nm 188

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Tipos de laser utilizados na soldadura a laser por transmissão [9]. 6
Tabela 2 - Propriedades do PMMA utilizado segundo a ficha técnica 21
Tabela 3 - Propriedades do PC/ABS utilizado segundo a ficha técnica 21
Tabela 4 - Quantidade de aditivo consoante a percentagem e a quantidade de PMMA 25
Tabela 5 - Condições de processamento dos provetes por moldação por injeção de PMMA..... 26
Tabela 6 - Condições operatórias utilizadas na soldadura a laser por transmissão do primeiro caso de estudo (PMMA)..... 31
Tabela 7 – Variação das condições operatórias do laser nos ensaios dos provetes de PC/ABS lisos (sem rib)..... 36
Tabela 8 - Condições operatórias do laser (Configuração P 14). 37
Tabela 9 - Condições operatórias do laser (Configuração P 7). 37
Tabela 10 - Condições operatórias do laser (Configuração P 10)..... 38
Tabela 11 - Condições operatórias do laser (Configuração P 11)..... 38
Tabela 12 - Condições operatórias do laser (Configuração P 15)..... 39
Tabela 13 - Condições operatórias do laser (Configuração P 16)..... 40
Tabela 14 - Condições operatórias do laser (Configuração P 8)..... 40
Tabela 15 - Condições operatórias do laser (Configuração P 12)..... 41
Tabela 16 - Condições operatórias do laser (Configuração P 13)..... 41
Tabela 17 - Condições operatórias do laser (Configuração P 17)..... 42
Tabela 18 - Condições operatórias do laser (Configuração P 18)..... 42
Tabela 19 - Condições operatórias do laser (Configuração P 19)..... 43
Tabela 20 - Condições operatórias do laser (Configuração P 20)..... 43
Tabela 21 - Condições operatórias do laser (Configuração P 21)..... 43
Tabela 22 - Condições operatórias do laser (Configuração P 22)..... 44
Tabela 23 - Condições operatórias do laser (Configuração P 9)..... 45
Tabela 24 - Coordenadas de cor (CIELab) dos Pigmentos e Corantes em todas as concentrações..... 47

Tabela 25 – Diferenças nas Coordenadas e Magnitude de Cor entre Diferentes Concentrações dos Pigmentos e Corantes 49
Tabela 26 – Comparação entre misturas com a mesma coloração numa concentração de 0,5%. 52
Tabela 27 - Comparação entre misturas com a mesma coloração numa concentração de 1%. 52
Tabela 28 - Comparação entre misturas com a mesma coloração numa concentração de 2%. 53
Tabela 29 – Resultados da transmitância ao longo da espessura e concentração das misturas com as conclusões da inspeção visual 86
Tabela 30 – Legenda de referência dos resultados dos ensaios de tração 88
Tabela 31 – Resultados dos ensaios de tração dos provetes com a configuração sem Rib soldados por soldadura a laser por transmissão 89
Tabela 32 - Resultados dos ensaios de tração dos provetes com a configuração Rib retangular (P 14) 94
Tabela 33 -Resultados dos ensaios de tração dos provetes com a configuração Rib retangular (P 7) 98
Tabela 34 - Resultados dos ensaios de tração dos provetes com a configuração Rib retangular (P 10) 101
Tabela 35 - Resultados dos ensaios de tração dos provetes com a configuração Rib retangular (P 11) 105
Tabela 36 - Resultados dos ensaios de tração dos provetes com a configuração Rib retangular (P 15) 108
Tabela 37 – Resumo dos parâmetros de soldadura dos melhores ensaios das configurações retangulares 112
Tabela 38 – Parâmetros de soldadura comuns a todas as configurações retangulares – Condição 1 114
Tabela 39 - Resultados dos ensaios de tração dos provetes com a configuração Rib triangular (P 16) 115
Tabela 40 - Resultados dos ensaios de tração dos provetes com a configuração Rib triangular (P 8) 119
Tabela 41 - Resultados dos ensaios de tração dos provetes com a configuração Rib triangular (P 12) 123
Tabela 42 - Resultados dos ensaios de tração dos provetes com a configuração Rib triangular (P 13) 126
Tabela 43 - Resultados dos ensaios de tração dos provetes com a configuração Rib triangular (P 17) 129
Tabela 44 - Resumo dos parâmetros de soldadura dos melhores ensaios das configurações triangulares 133
Tabela 45 - Parâmetros de soldadura comuns a todas as configurações triangulares – Condição 2 134
Tabela 46 - Resultados dos ensaios de tração dos provetes com a configuração Rib hermética (P 18) 136
Tabela 47- Resultados dos ensaios de tração dos provetes com a configuração Rib hermética (P 19) 137
Tabela 48 - Resultados dos ensaios de tração dos provetes com a configuração Rib hermética (P 20) 138
Tabela 49 - Resultados dos ensaios de tração dos provetes com a configuração Rib hermética (P 21) 142

Tabela 50 - Resultados dos ensaios de tração dos provetes com a configuração Rib hermética (P 22) 145
Tabela 51 - Resumo dos parâmetros de soldadura dos melhores ensaios das configurações herméticas 148
Tabela 52 - Resultados dos ensaios de tração dos provetes com a configuração Rib trapezoidal (P 9) 149
Tabela 53 - Resultados da força dos Melhores ensaios de cada Configuração 154
Tabela 54 - Condições operatórias usadas para a injeção do PMMA com a placa de menor espessura 178
Tabela 55 - Condições operatórias usadas para a injeção do PMMA com a placa de maior espessura 178

Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos

PMMA - Polimetilmetacrilato

PC/ABS - Policarbonato/Acrilonitrilo – Butadieno - Estireno

NIR - Near-Infrared Spectroscopy

SLT – Soldadura Laser por Transmissão

1. INTRODUÇÃO

A presente Tese de Mestrado, desenvolvida no âmbito da unidade curricular "Dissertação em Engenharia de Polímeros" foi realizada com o apoio da Universidade do Minho, o Departamento de Engenharia de Polímeros e o Polo de Investigação de Engenharia de Polímeros. O projeto, intitulado "Estudo da influência da adição de pigmentos e corantes na transmitância e na soldadura laser por transmissão de PMMA (Polimetilmetacrilato).", contou com a orientação do Prof. Dr. Fernando Moura Duarte representando a Universidade do Minho.

Este primeiro capítulo inicia-se com uma contextualização do tema da dissertação, seguida da apresentação dos objetivos e da estrutura da mesma.

1.1 Enquadramento

Os processos de soldadura de produtos plásticos começaram cada vez mais a serem utilizados a nível industrial na produção de dispositivos plásticos [1]. É uma técnica que permite a junção de dois ou mais componentes, uma vez que nem sempre é possível ou economicamente viável a injeção de um componente plástico no formato final, evitando o uso de partes aderentes como parafusos ou adesivos/"colas", e usualmente a zona de união apresenta uma melhor resistência mecânica quando comparado com o uso de engates rápidos [2].

Diversas técnicas para a soldadura de termoplásticos estão disponíveis como por exemplo, processo de soldadura por vibração ultrassom e linear, soldadura por rotação e são aplicadas consoante a necessidade de geração de energia térmica à fusão do material. Dentro destas técnicas, existe também a soldadura a laser que se destaca ao apresentar características distintas de processamento e desempenho das anteriores.

Embora a soldadura a laser tenha sido demonstrada pela primeira vez na década de 1970, só se tornou amplamente utilizada na década de 1990, como recurso em várias aplicações devido a muitos avanços nas fontes e métodos de laser [1]. Dentro da soldadura a laser há uma variante, a soldadura a laser por transmissão, sendo uma tecnologia inovadora patenteada em 1987 por Nakamata [3] [Nakamata 1987] que permite a união entre dois ou mais termoplásticos através de uma fonte de laser

que vai fundir o material sendo um “transparente” ao laser e outro “absorvente” na interface dos dois termoplásticos.

A eficiência da soldadura por transmissão a laser depende amplamente das propriedades óticas do material a unir, dos parâmetros do processo de soldadura, tipo de laser, técnica de soldadura e design da peça. Sendo uma técnica baseada na deposição de energia localizada, esta pode ser controlada ajustando os parâmetros do laser (potência do laser, comprimento de onda, velocidade de soldadura, etc) e as propriedades do material (matriz polimérica e aditivos) [4].

Cada vez mais novas aplicações são introduzidas neste âmbito, que vão desde o ramo elétrico como, por exemplo montagem de telefones, teclados e sensores, também na medicina na soldadura de todos os tipos de recipientes e filtros para líquidos, junção de bolsas e tubos, à indústria automóvel desde painéis multiuso de habitáculos, às carcaças dos faróis [5].

Esta técnica é vantajosa por ser um processo sem inclusão de nenhum contacto entre as peças e as ferramentas de soldadura obtendo menos stress mecânico nos componentes. É também uma técnica flexível, pois permite unir formas e geometrias complexas assim como materiais de diferentes composições e cores, e oferece maior resistência de soldadura com uma melhor qualidade de solda sem rebarbas visíveis, um tempo de processo reduzido e fácil automatização. Em contrapartida, é um processo sensível ao material polimérico, e incorporação de aditivos e pigmentos, e ao histórico de processamento. Uma vez que a transparência é fortemente influenciada pela espessura da peça e pelos aditivos, incluindo os pigmentos e corantes, para conferir cor. Portanto, é necessário conhecer quais as cores mais problemáticas em termos de transmitância e qual a espessura máxima da peça transparente que permite a soldadura por laser de transmissão (SLT). Para além dos fatores que influenciam a transmitância, a forma e as dimensões do elemento da peça opaca que recebe a energia (designado por *rib*), também influenciam a qualidade da soldura, nomeadamente a sua resistência mecânica. Além disso, os *ribs* acabam por arrecadar um acrescimento no excedente do material, sendo por isso necessário prever a sua eficiência promovendo uma economia mais sustentável e menos dispendiosa, para produções em larga escala.

1.2 Objetivos/Metodologia

Neste trabalho para uma melhor compreensão foram realizados dois estudos distintos. Em cada estudo, foi abordado um dos quatro conceitos e requisitos fundamentais à soldadura a laser por transmissão.

O primeiro tem como objetivo o estudo da influência da incorporação de pigmentos e corantes em várias concentrações, assim como da variação da espessura da peça de PMMA (parte transparente ao laser), na transmissão de energia da fonte laser. Pretende ainda avaliar a relação entre transmitância e soldadura entre provetes de PMMA e provetes de PC/ABS preto (com 1% de negro de fumo em peso) moldados por injeção.

O segundo, enfatiza as características da peça absorvente ao laser, e pretende-se estudar a influência de diferentes geometrias e dimensões de *rib,* consoante a otimização das condições operatórias do laser no processo de soldadura laser por transmissão para cada tipologia de *rib*. Essa classificação foi realizada tendo em consideração o estudo da resistência mecânica e ótica da união das peças (PMMA e PC/ABS), através de ensaios de tração e de microscopia. Deste modo o trabalho foi dividido em dois grandes tópicos, relacionados com a peça transparente e opaca ao laser, respetivamente.

1- Avaliação da peça transparente em PMMA

-Mistura dos pigmentos e corantes na matriz polimérica (PMMA);

-Moldação por injeção de peças de PMMA com diferentes espessuras e concentrações de pigmentos e corantes;

-Moldação por injeção de peças de PC/ABS preto de 2 mm;

-Realização de ensaios de Near-infrared spectroscopy (NIR) às peças de PMMA, de forma a determinar a quantidade de energia do laser transmitida;

-Realização da soldadura a laser de ambas as peças (PMMA e PC/ABS);

-Inspeção ótica da soldadura;

-Correlação dos resultados de transmitância com a inspeção ótica da soldadura;

2- Avaliação da peça opaca em PC/ABS preto

- Moldação por injeção de peças de PC/ABS preto com diferentes geometrias de *rib* e dimensões;

- Moldação por injeção de peças de PC/ABS de 2 mm;

- Realização de um plano experimental perante diferentes condições operatórias da soldadura a laser e geometrias de *rib*;

- Realização da soldadura a laser de ambas as peças (PMMA e PC/ABS);

- Realização de ensaios de tração para determinar qual a força máxima e tensão de rotura suportada pelas peças soldadas;

- Realização de ensaios de microscopia ótica de forma a visualizar a área afetada pela soldadura;

1.3 Estrutura da Dissertação

De modo a cumprir os objetivos propostos, a dissertação está organizada em 5 capítulos.

No capítulo 1 faz-se um enquadramento teórico relativo ao tema abordado neste trabalho, incluindo uma descrição da técnica utilizada e também são apresentados os objetivos que deveriam ser cumpridos na elaboração desta tese.

No capítulo 2 é apresentado o estado da arte, onde são referidos alguns trabalhos realizados na área em estudo, assim como algumas informações sobre os lasers, a interação da luz com os materiais poliméricos, a técnica de soldadura laser por transmissão assim como as limitações desta e por último as suas vantagens e desvantagens.

No capítulo 3 apresenta-se o plano experimental onde são exibidos os planos de experiências utilizadas, os parâmetros de injeção e de soldadura, os materiais utilizados neste estudo, o laser utilizado para se proceder à soldadura das peças e os ensaios realizados.

No capítulo 4 são exibidos e discutidos os resultados obtidos.

Por fim, no capítulo 5 são descritas as conclusões da tese bem como algumas sugestões para trabalhos futuros.

2. ESTADO DE ARTE

2.1 Processo de soldadura laser por transmissão (LTW)

Por norma, a grande maioria dos termoplásticos naturais é capaz de transmitir a radiação com comprimento de onda no infravermelho próximo (NIR), no entanto a incorporação de aditivos absorventes permite a absorção de radiação nesses comprimentos de onda. Por isso, fontes de laser de comprimento de onda NIR de (800 – 1100nm) como (Díodo, Nd: YAG, Fibra) são utilizados para o processo de soldadura a laser por transmissão [6].

A soldadura por transmissão, é o processo mais utilizado na soldadura a laser, assenta-se no princípio em que dois materiais termoplásticos estão sobrepostos um dos materiais é transparente à radiação do laser e o outro absorve a radiação do laser emitido, ilustrado na Figura 1 [7].

O processo de soldadura laser é desencadeado quando ambas as partes do conjunto são fixadas juntas de modo que a parte transparente fique voltada para o laser. Em seguida, o feixe de laser incide sobre a parte superior do conjunto transparente, este é transmitido sem ser provocada nenhuma alteração (química ou física) para a parte inferior que deve absorve essa radiação. A radiação absorvida é transformada em energia térmica (calor) que é transmitida para a parte superior por condução através da interface dos dois conjuntos provocando a fusão do material, por meio da difusão molecular, após o arrefecimento resulta a união do conjunto superior com o inferior. Para assegurar a condução de calor e difusão entre as duas partes do conjunto é crucial garantir uma perfeita pressão de aperto entre ambas as partes do conjunto durante todo o processo de soldadura, sendo por essa razão utilizados sistemas de fixação.

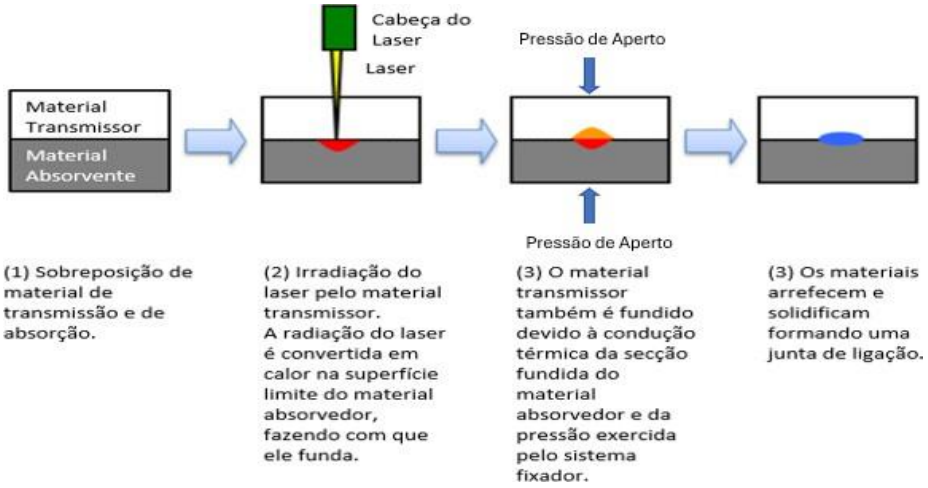


Figura 1 - Processo de soldadura a laser por transmissão (SLT)[1]

A parte transparente possui características relevantes, uma vez que a sua estrutura vai influenciar a transmissão da radiação laser. Por exemplo, termoplásticos semi cristalinos ou termoplásticos contendo reforços ou aditivos vão interagir com a radiação laser influenciando a transmissão [8].

Para a parte absorvente, é necessário a adição de aditivos absorventes. Um aditivo tipicamente utilizado é o negro de fumo, que tem uma elevada absorção em toda a gama de comprimentos de onda. No entanto, com o negro de fumo, os plásticos ficam restritos a cores escuras e componentes plásticos transparentes não são possíveis.

Para permitir uma combinação flexível de coloração plástica também com cores claras ou visualmente transparentes, aditivos adequados de absorção de laser, como corantes e pigmentos orgânicos ou pigmentos inorgânicos, devem ser misturados na matriz polimérica absorvente. Além da mistura o absorvedor pode também ser revestido discretamente na interface do material absorvente, este processo denominado *ClearWeld* faz uso desta técnica e permite a soldadura de qualquer material plástico de qualquer cor, desde que a parte absorvente seja transparente à radiação infravermelha [1].

2.1.1 Interação do laser com o material

Na soldadura laser, uma fonte luminosa (laser) é necessária, portanto quando a radiação do feixe de laser atinge a superfície do material parte dessa radiação é refletida, parte é transmitida e parte é absorvida.

$$\rho + \alpha + \tau = 1, \quad (1)$$

Onde, refletividade, ρ é a fração da energia radiante refletida, absorvente, α é a fração absorvida e transmissividade, τ é a fração da energia radiante transmitida, apresentada na

$$\rho + \alpha + \tau = 1, \quad (1).$$

A aplicação da radiação laser vai depender da interação termo-ótica entre o laser e o material. Portanto, no processamento de soldadura a laser, na interface das partes a unir a radiação laser deve ser absorvida de forma eficiente no local preciso onde a solda será formada. A interação da radiação com a superfície dependerá de várias características, incluindo:

1. As caraterísticas do laser (potência, tamanho ou formato do ponto e qualidade do feixe);
2. Comprimento de onda;
3. Velocidade de soldadura sobre a superfície do material;
4. O tipo de material e do conteúdo do aditivo [9].

A transmissão de energia por um policarbonato com 0,5 mm de espessura, é demonstrada na Figura 2, nos diferentes comprimentos de onda do laser.

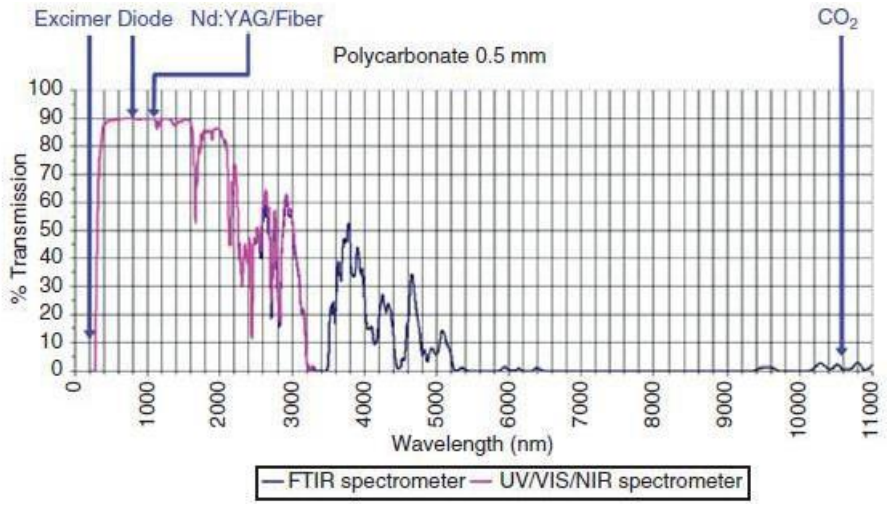


Figura 2 - Energia transmitida por um policarbonato com 0,5 mm de espessura nos diferentes [9].

2.1.2 Tipos de laser utilizados na soldadura por transmissão

Os plásticos têm uma absorção intrínseca mínima na faixa de comprimento de onda de (800nm – 1100nm). Como resultado, três tipos de lasers são geralmente utilizados para a soldadura a laser por transmissão de plásticos como: Nd: YAG, laser de díodo e fibra que operam nessa faixa de comprimento de onda, permitindo uma boa soldadura de conjuntos com espessura milimétrica por transmissão.

Na Tabela 1, estão demonstrados os três tipos de laser utilizados na soldadura a laser por transmissão.

Tabela 1 - Tipos de laser utilizados na soldadura a laser por transmissão [9].

	Nd: YAG	Diodo	Fibra
Comprimento de onda (nm)	1064	780-980	1000-2100
Eficiência (%)*	3	30	20
Qualidade do feixe*	Alto	Baixo	Alto
*Sendo a eficiência a percentagem de energia elétrica consumida pelo laser que é emita pelo feixe. E a qualidade do feixe que é a capacidade de focar o feixe num pequeno tamanho de ponto com alta densidade de energia.			

Destes, os primeiros lasers a serem introduzidos na produção industrial como fonte de laser para a soldadura de plásticos foram os lasers Nd: YAG (1064 nm). Uma fibra ótica de sílica é normalmente usada para guiar o feixe da fonte de laser para a peça de trabalho, permitindo uma operação simples e flexível com a manipulação robótica. No entanto, estes lasers são bastante volumosos e além disso exigem bastante manutenção, assim a aplicação do laser para a soldadura de plásticos permaneceu limitada em parte devido ao elevado custo de investimento e baixa eficiência destes sistemas laser.

Surge o laser de díodo como alternativa ao laser Nd: YAG aumentando sensivelmente o interesse pela soldadura laser de plásticos por serem, compactos, fiáveis, comparativamente baratos e flexíveis (maior abrangência de radiação de diferentes comprimentos de onda). Em termos de consumos energéticos os lasers de díodo possuem um sistema de arrefecimento por ar, que em relação aos complexos e dispendiosos sistemas de arrefecimento por água, permite uma redução de custos. O feixe de laser geralmente é guiado por uma fibra ótica e frequentemente combinado com um sistema de lentes numa única unidade que

pode ser facilmente acoplada a um braço robótico. Outra vantagem é a sua eficiência (37-50%) que é muito superior à dos lasers de Nd: YAG (3-5%). Por outro lado, os lasers de díodo têm uma qualidade de feixe relativamente baixa comparativamente com os lasers Nd: YAG.

Os lasers de fibra operam na gama dos (1100 nm de comprimento de onda) surgiram como alternativa direta dos lasers Nd: YAG no campo da soldadura de plástico. Uma vez que operam muito perto do comprimento de onda dos lasers Nd: YAG, com qualidade de feixe equivalente, mas maior eficiência. Tendo em conta a maior eficiência e a alta qualidade do feixe, os lasers de fibra são aplicados principalmente na soldadura de precisão, bem como na de chapas, filmes, peças moldadas e tecidos [1], [5], [9]. Além disso, lasers de fibra com comprimentos de onda superiores (>1100nm) podem ser facilmente absorvidos por polímeros, evitando assim o uso de absorventes [10], [11].

2.1.3 Variantes do processo de soldadura laser por transmissão

Várias técnicas do processo de soldadura laser por transmissão encontram-se disponíveis, diferindo em relação ao movimento relativo das peças soldadas ou do feixe de laser. Este processo é baseado em três modificações, tais como, soldadura por contorno, simultânea e quase simultânea. Na Figura 3, encontram- se demonstrados as três variantes de processo. Com modelo nestas, vários subtipos de combinações podem ser alcançados como soldadura híbrida, por mascara, *Globo Welding*.

Soldadura de Contorno

Neste método, ou o feixe de laser focalizado num ponto é movido perante a superfície da peça ou o feixe do laser é estático e a peça move-se ao longo da geometria da junta a ser soldada. Num sistema de feixe de laser móvel, a radiação é transmitida para a peça através de um cabo de fibra ótica adjacente a um pórtico ou num sistema de braço robótico. Caso o feixe permaneça fixo a peça pode ser movida através de uma mesa com coordenadas X-Y ou sistema robótico. Esta aplicação traz vantagens como solda de peças grandes e de tridimensionalidade complexas, pelo contrário peca pelos tempos de ciclos lentos [1], [9], [12].

Soldadura Simultânea

Neste processo, um conjunto de módulos de lasers díodo com distribuição homogénea de intensidade estão dispostos de tal forma que irradiam toda a linha de soldadura simultaneamente numa única exposição de tempo de ciclo necessário. Este método é usado principalmente quando grandes volumes de execução são necessários porque os tempos de soldadura podem ser reduzidos. Como desvantagem é um processo complexo, dispendioso e menos flexível, com grande necessidade de manutenção em comparação com o processo de soldadura por laser de contorno [1], [9], [12].

Soldadura Quase Simultânea

Este processo é uma combinação entre a soldadura de contorno e simultânea. Neste caso um único feixe é guiado através de espelhos galvanizados, ao longo da linha de soldadura, várias vezes em velocidades elevadas. Assim, toda a linha de soldadura é gradualmente aquecida e fundida ao mesmo tempo. Esta técnica apresenta a melhor estabilidade geral do processo, e é precisa em casos em que o colapso da soldadura é crítico. Como vantagem é o método mais flexível, apresenta tempos de ciclos rápidos e é a mais adequada para produção em série, como desvantagem não apresenta bons resultados em peças rasas na altura do eixo z [1], [9], [12].

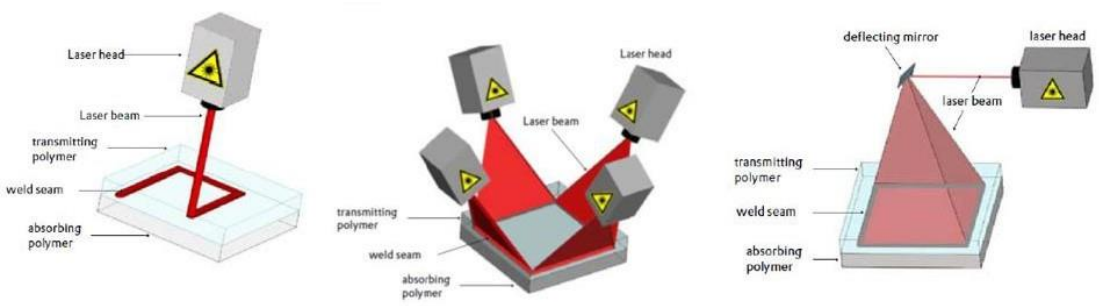


Figura 3 - Métodos de soldadura: (a) por contorno; (b) simultânea; (c) quase simultânea [13]

2.1.4 Requisitos básicos ao processo de soldadura laser por transmissão

A soldadura laser por transmissão possui quatro requisitos básicos de forma a existir uma boa adesão eficaz entre os seus componentes, sendo estes: a parte

superior do conjunto deve ser transparente à radiação emitida pelo feixe do laser; a parte inferior deve ter a capacidade de absorver a radiação; existir compatibilidade entre os materiais utilizados; e é imprescindível garantir um perfeito contacto entre as partes.

Parte transparente ao laser

Conforme discutido no capítulo 2.1 a maioria dos polímeros são transparentes à radiação laser nos comprimentos de onda NIR (800 – 1100nm), permitindo assim que praticamente todos os polímeros podem ser usados na soldadura a laser por transmissão.

De referir que "transparente ao laser" não deve ser confundido com "oticamente transparente", pois as fontes de radiação de soldadura a laser estão fora do espectro de luz visível. Por isso, a cor visível das peças termoplásticas não interfere no processo de soldadura a laser, uma peça totalmente preta ou opaca ainda pode transmitir a radiação do laser NIR. Contudo a incorporação de aditivos e cargas, vai influenciar a transmissão da radiação laser, representando poucos obstáculos ao processo, visto apenas ser necessário uma pequena quantidade de radiação laser transmitida para ocorrer a soldadura a laser, cerca de 4% [9], [12]. Esta influência resulta em reflexão, absorção e dispersão. Porém quanto maior a transmitância melhor é o controlo do processo. A transmitância também é influenciada pela espessura.

Parte absorvente ao laser

A parte inferior (absorvente) é responsável por absorver a radiação laser NIR que é transmitida pela parte superior e convertê-la em calor. Para transformar um polímero em absorvente, é preciso aditava-lo, sendo o aditivo mais usado na soldadura a laser por transmissão o negro de fumo devido a ser eficaz e económico [9]. Geralmente quantidades entre os 0,2 e 0,4% em volume oferecem boas propriedades de absorção aos polímeros [12].

Todavia, quanto maior concentração de negro de fumo, maior a absorção, maior a energia que fica na superfície e menor a penetração ótica onde é necessário realizar a soldadura, assim a fusão do material ocorre na superfície ou próximo dessa

área. A Figura 4 mostra como exemplo, a profundidade de penetração ótica em PP para várias concentrações de negro de fumo no comprimento de onda de 940 nm [1].

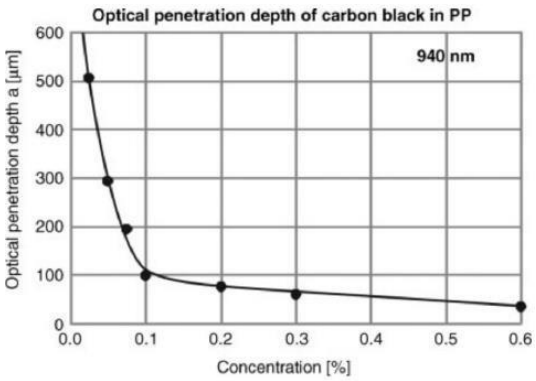


Figura 4 - Profundidade de penetração ótica em PP com concentração variável de negro de fumo a 940 nm [1].

Pressão de aperto

É essencial garantir um contacto íntimo entre as partes a unir para permitir a transferência de calor através de condução térmica da parte absorvente até à parte transparente, de modo a promover e facilitar a fusão na zona interfacial. Para isso, dispositivos de fixação adequados são utilizados, que além de auxiliarem um contacto íntimo, também proporcionam ajuda a superar tolerâncias de projeto de peça, lacunas e empenamento.

A pressão de aperto deve ser aplicada diretamente na junta ou o mais próximo possível e em função da área, as forças de pressão normalmente variam entre 1 N/mm2 a 5 N/mm2 [1]. Os dispositivos de fixação são personalizados e adaptados a cada projeto e a cada peça podendo ser sistemas todos em vidro ou acrílico, ou sistemas de fixação periférica [14].

Compatibilidade de materiais

Por último, ambas as partes devem sem compatíveis em alguns aspetos. Nomeadamente, devem possuir temperaturas de fusão semelhantes (polímeros semi cristalinos) ou temperaturas de transição vítrea semelhantes (polímeros amorfos) e que as suas viscosidades não difiram significativamente, caso contrário, a mistura necessária dos materiais não ocorre. Também, os materiais a serem unidos devem ser quimicamente compatíveis, para que a mistura de ambos possa ser assegurada [15]. Desta forma, termoplásticos iguais obtém melhor soldadura do que

termoplásticos distintos.

Perante a seleção dos materiais, deve-se considerar as exigências do produto final assim como a sua resistência de junta na soldadura. Por este propósito, existem tabelas de combinações de polímeros compatíveis e incompatíveis prontamente disponíveis pelos fornecedores de processos de soldadura laser conforme mostra na Figura 5.

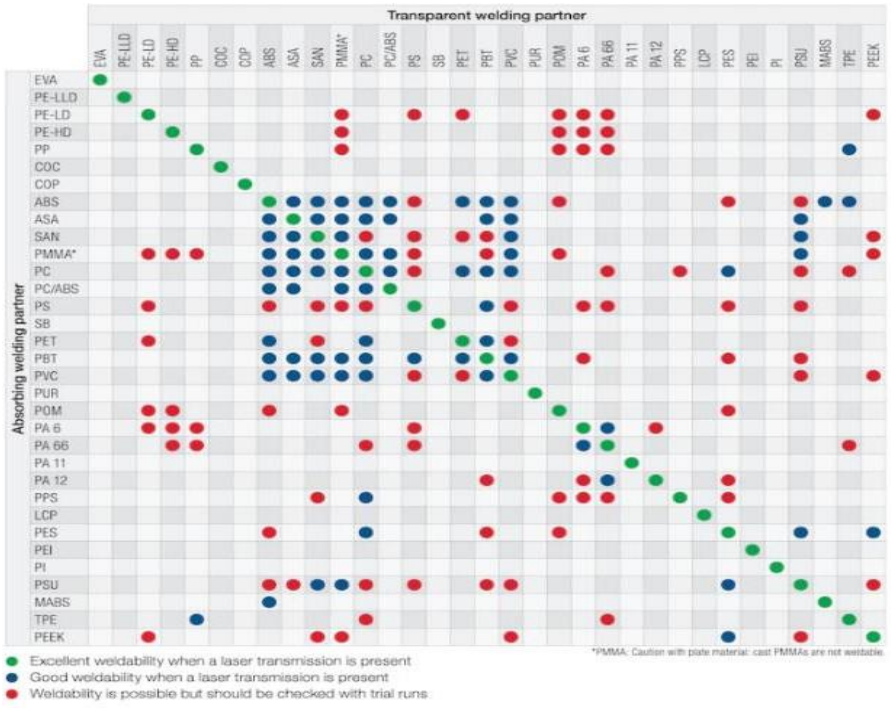


Figura 5 –Compatibilidade entre termoplásticos na soldadura a laser [16].

2.1.5 Limitações do material

A necessidade de combinar as propriedades óticas para atender aos requisitos da soldadura a laser (tanto parte de união transparente como absorvente) e a capacidade reduzida de soldar materiais diferentes reduz drasticamente a liberdade dos projetistas de produtos. Para atenuar esta limitação, um esforço significativo foi feito para o estudo da soldadura a laser de materiais diferentes. Além da compatibilidade necessária dos materiais, nos últimos anos avanços no campo do desenvolvimento de materiais permitiram, através do uso de aditivos e pigmentos adaptados, a soldadura de uma ampla gama de polímeros coloridos e também a soldadura de diferentes combinações de cores [17].

Com base nessas possíveis combinações de cores, uma escala de complexidade para a soldadura laser por transmissão pode ser estabelecida, conforme demonstrado na Figura 6.

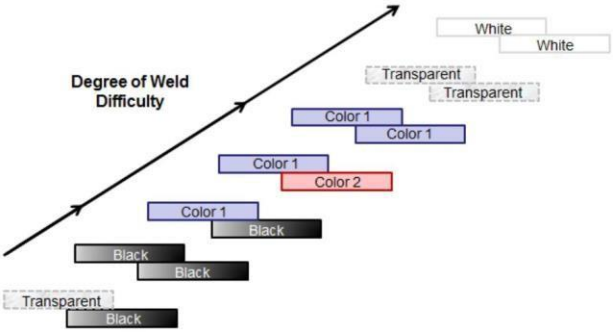


Figura 6 - Grau de complexidade na soldadura laser por transmissão de termoplásticos [14].

Os graus de complexidade mais elevados introduzidos por ordem são a componente de união transparente/transparente e branco/branco. Enquanto para a soldadura de diferentes combinações de cores absorvedores laser como pigmentos inorgânicos, orgânicos e corantes podem ser incorporados na matriz polimérica, no caso da combinação transparente isso não acontece.

Como resultado, foram desenvolvidos novos aditivos que permitem soldar peças com colorações diferentes da cor negra no campo da luz visível ou mesmo transparentes. Um exemplo desse aditivo é o *Clearweld® LD120C* [1].

Vários produtos de diferentes empresas estão disponíveis no mercado para a soldadura de polímeros transparentes, como *ClearWeld®*, *Lumogen®*, etc. A Figura 7, ilustra uma comparação entre a quantidade de radiação absorvida por um polimetilmetacrilato aditivado com *Clearweld®* nos vários comprimentos de onda do laser [1].

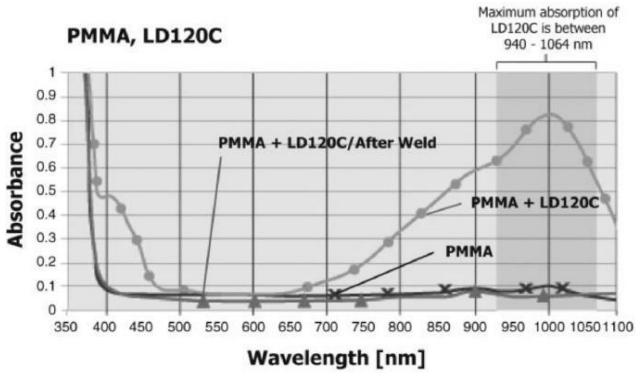


Figura 7 - Comparação entre a quantidade de radiação absorvida por um polimetilmetacrilato sem e com aditivo LD120C [1].

Para a combinação Branco/Branco, o pigmento mais utilizado é o dióxido de titânio, um pigmento bastante reflexivo. Devido à sua reflexão este não vai absorver ou transmitir radiação, isso torna a combinação branca a mais complexa para a soldadura laser por transmissão. No entanto, desenvolvimentos recentes na formulação do dióxido de titânio, quantidade de carga, comprimento de onda do laser usado e controles de processo especializados na soldadura de plásticos brancos também se tornaram muito mais viáveis.

2.2 Matéria-Prima

2.2.1 PMMA (Polimetilmetacrilato)

O PMMA foi produzido pela primeira vez em 1993 pela Rohm and Haas Company. As maiores marcas de comercialização de PMMA atualmente são líderes a *Altuglas*, *Plexiglas* e *Diakon*.

O PMMA utilizado também conhecido por Acrílico, é um polímero sintético de baixo custo e fácil processamento. O PMMA pode ser obtido a partir do seu monómero metacrilato de metilo (Figura 8) através de um processo que se desenvolve em duas etapas. O monómero sofre então a polimerização, que ocorre através dos radicais livres associados ao carbono, iniciada por agentes capazes de formar radicais livres como os peróxidos orgânicos [18],[19],[20].

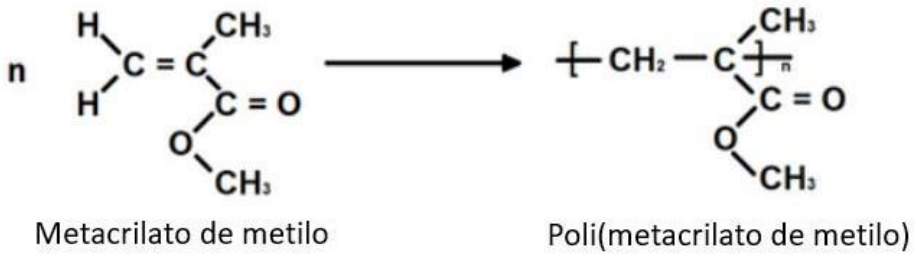


Figura 8 - Síntese do PMMA a partir do metacrilato de metilo (retirado de [45].

O PMMA é um polímero termoplástico extremamente transparente e um material amorfo que possui excelentes propriedades óticas, possui também uma gama completa de cores translúcidas e opacas, resistente às intempéries, tornando-se adequado para produtos exteriores. Este material tem uma grande resistência ao risco e à abrasão, e por norma devido à sua transparência pode ser considerado uma

alternativa ao vidro. Bem processado, o acrílico incolor é capaz de transmitir luz branca até 92%, com os 8% restantes sendo a perda por reflexão, este tem valores de embaçamento de apenas 1-2% [18] – [20].

2.2.2 PC/ABS (Policarbonato/Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno)

O PC/ABS é um exemplo de uma mistura bem-sucedida entre a junção do policarbonato com o copolímero de ABS. Relativamente às propriedades individuais destes termoplásticos de engenharia, o PC, apresentada a estrutura molecular indicada na Figura 9, é caracterizado pela elevada resistência ao impacto, estabilidade dimensional e pelo módulo de elasticidade elevado, porém é difícil de processar [21].

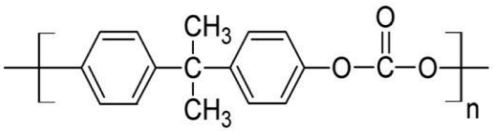


Figura 9 - Estrutura molecular do PC (retirado de [37])

O ABS, com a estrutura química representada na Figura 10, é também um termoplástico de engenharia amorfo que, além de ter custo relativamente baixo, apresenta um grande leque de propriedades interessantes. É constituído por butadieno, que fornece uma boa absorção da energia de impacto, por acrolinitrilo (AN), com elevada resistência mecânica e excelente brilho, e a componente estirénica que o converte num material fácil de processar e rígido devido à sua baixa contração. O copolímero constituído por estireno e AN, vulgarmente denominado por SAN, é também um copolímero comum e com excelentes propriedades [22], [23].

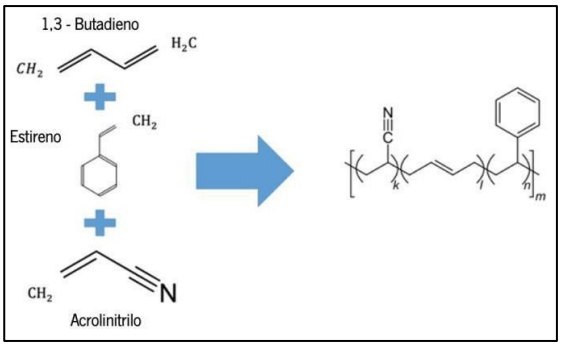


Figura 10 -Estrutura molecular do ABS (retirado e adaptado [39])

Assim, ao misturar estes dois polímeros, ultrapassa-se o difícil processamento

do PC, obtendo um material fácil de processar, com elevada resistência ao impacto mesmo a baixas temperaturas, elevada HDT (*heat deflection temperature*), elevada rigidez, elevada estabilidade dimensional proveniente do PC, ótima resistência a solventes e químicos e uma excelente deposição (*plating*) devido ao butadieno do ABS [21]. Porém, nem tudo é positivo, uma vez que com a adição de ABS no PC, algumas propriedades mecânicas decaem, especialmente a deformação e o impacto, comparando os valores da mistura com os polímeros individuais. Este decréscimo pode ser atribuído à baixa adesão das fases poliméricas, revelando uma incompatibilidade do PC/ABS [24]. Esta baixa adesão resulta do facto da mistura ser imiscível ou apenas parcialmente miscível, [25] onde as duas fases se segregam mutuamente. Por isso, observam-se dois valores de Tg distintos, com o aumento da percentagem de PC [26].

Esta mistura polimérica é muito utilizada e encontra-se em vários produtos de várias indústrias, nomeadamente, no setor automóvel, elétrico, em aplicações domésticas e de lazer. As suas aplicações vão desde os vários objetos que se encontram no interior de automóveis como os painéis de instrumentos, sistemas de ventilação e emblemas, a outras aplicações como revestimentos de colunas, caixas de primeiros socorros, aspiradores de pó, etc. [21].

2.3 Parâmetros de controlo na soldadura laser por transmissão

Os parâmetros de controlo desempenham um papel fundamental na transferência da energia do laser, tanto na soldadura a laser por transmissão como nas restantes técnicas de soldadura laser destacando-se três parâmetros do processo a temperatura, tempo e pressão de aperto como os mais críticos [5], [9].

No contexto específico da soldadura a laser por transmissão, o desempenho da resistência mecânica e qualidade ótica da junta soldada são influenciadas por um conjunto de variáveis operatórias, incluindo a potência do laser, velocidade de soldadura, tempo de irradiação, distância de trabalho do laser, tamanho do ponto do laser, pressão de aperto e tipo e concentração de aditivo absorvente de laser, caso esteja integrado [27].

O campo de temperatura no interior da soldadura durante a soldadura pode ser controlado consoante os parâmetros de processo mencionados [28]. A densidade de

energia utilizada durante a soldadura combina os parâmetros do processo de densidade de potência do laser e o tempo de interação do laser. É determinada pela potência do laser, o tamanho do ponto do feixe laser na peça e o tempo de irradiação laser (soldadura simultânea) (3) ou a velocidade de soldadura (soldadura de contorno) (2) [1].

$$Densidade\ de\ Energia = \frac{Potência\ \ do\ \ laser}{Largura\ do\ ponto\ do\ laser\ x\ Velocidade\ do\ laser} \quad (2)$$

ou

$$Densidade\ de\ Energia = \frac{Potência\ do\ laser\ x\ Tempo\ de\ irradiação}{Tamanho\ do\ ponto\ do\ laser} \quad (3)$$

A resistência da soldadura é limitada por uma densidade de energia muito elevada, o que provoca sobreaquecimento e degradação do material, enquanto uma densidade de energia muito baixa resulta na falta de fusão não ocorrendo soldadura [29]. Entre ambos os limites, existe uma janela de processo com boa correlação entre a densidade de energia aplicada e a resistência da solda alcançada. A largura da janela do processo depende das propriedades térmicas e mecânicas dos termoplásticos e dos parâmetros do processo a laser, como potência do laser e velocidade de soldadura [1].

Neste caso, a mesma densidade de energia pode ser conseguida combinando ou baixa potência com baixa velocidade de soldadura ou alta potência com alta velocidade de soldadura. No caso de baixa velocidade de soldadura requerida pela potência relativamente baixa do laser, a transferência de calor é um fator importante, uma vez que as perdas por condução de calor têm maior impacto a estas velocidades lentas. A velocidades elevadas, utilizando maior potência de laser para a mesma densidade de energia, a perda de calor é minimizada devido ao menor tempo disponível para a dissipação de calor, e o máximo da energia de entrada é depositada na zona de soldadura [4], [27].

Por exemplo, a relação entre potência do laser e velocidade de soldadura, resulta na linha de energia do laser, este valor descreve o processo como uma quantidade normalizada. [1]. Na Figura 11, um diagrama ilustra a correlação entre a resistência de soldadura com a energia de linha do laser fornecida, juntamente com as imagens correspondentes à soldadura.

- A amostra 1 soldada com densidade de energia de linha baixa apresenta uma solda com baixa resistência mecânica, mas boa qualidade ótica;

- A amostra 2 soldada com parâmetros ótimos demonstra boa qualidade ótica e alta resistência mecânica;

- As amostras 3 e 4 são soldadas com densidade de energia de linha muito alta, a amostra 3 está superaquecida com poros na soldadura e a amostra 4 apresenta degradação térmica na soldadura com resistência mecânica insuficiente;

A densidade de energia também é influenciada pelo tipo e concentração do absorvente incorporado na parte absorvente do processo. Cargas de absorvente altas permitem soldas mais rápidas ou menor densidade de energia necessária [27].

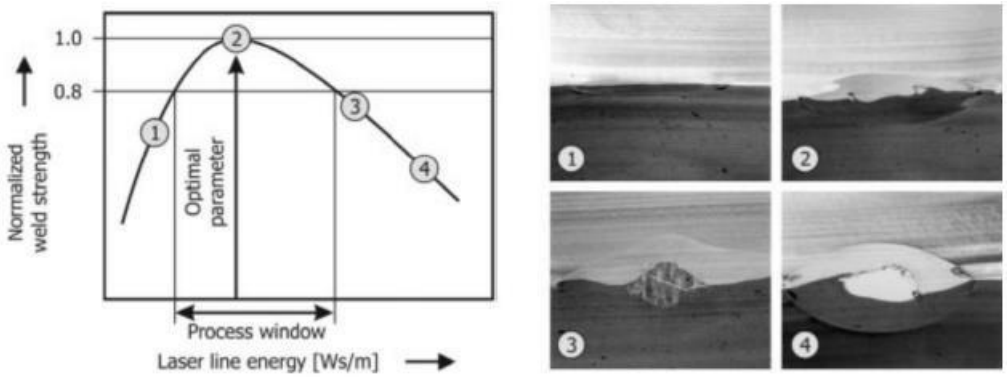


Figura 11 - Correlação da resistência de soldadura com a energia aplicada, e imagens da qualidade da soldadura [1].

2.3.1 Parâmetros de soldadura e a sua influência na resistência mecânica e qualidade de solda

Acherjee et al. [30] apresentaram um estudo detalhado sobre os efeitos dos parâmetros de soldadura por contorno de transmissão laser na qualidade de soldadura dos acrílicos. Eles observaram que tanto a resistência mecânica como a largura da soldadura aumentam com a potência do laser. O aumento da potência do laser resulta numa maior entrada de calor para a zona de soldadura, assim, mais material de base é fundido, resultando numa maior resistência mecânica de soldadura e maior largura de soldadura. No entanto, a resistência mecânica da solda aumenta até que a temperatura crítica de decomposição seja atingida. Verificou-se também que a velocidade de soldadura tem um efeito negativo na resistência da solda, bem como na largura da solda. A pressão de aperto que potencia o contacto

íntimo entre os materiais a soldar exercida por uma braçadeira, mostrou também um pequeno efeito positivo em ambos, na resistência mecânica e largura da soldadura. O diâmetro do ponto do feixe laser foi identificado como tendo um efeito significativo na qualidade da soldadura, pois controla a densidade de potência sobre a zona de irradiação.

Prabhakaran et al. [31] estudaram o efeito dos parâmetros de soldadura de laser por contorno na fusão e resistência de soldadura de Nylon 6 reforçado com fibra de vidro, para uma junta em T. Eles observaram que a fusão é diretamente influenciada pela energia de entrada do laser, definida como a relação entre a potência do laser e a velocidade de soldadura. Verificaram também que a resistência de soldadura ótima pode ser alcançada através de uma combinação apropriada de valores de potência do laser e velocidade de soldadura. Na gama de parâmetros de soldadura estudados, a fusão aumenta, no entanto, a resistência de soldadura diminui com o aumento da pressão de soldadura.

Bhattacharya, et. al. [32] relataram o efeito da potência do laser e velocidade de soldadura, na soldadura laser por transmissão de PC e PMMA numa configuração de junta sobreposta. Através de modelos empíricos utilizando RSM – (conjunto de técnicas matemáticas e de estatística usadas na modelação e análise de problemas em que a resposta é influenciada por diversas variáveis) e análise de variância (ANOVA), eles correlacionaram os parâmetros de entrada com as respostas para identificar os parâmetros mais significativos no processo. Eles descobriram que a potência e a velocidade de soldadura têm influência significativa no controlo da largura da soldadura.

Outro estudo foi conduzido por Douglass e Wu [33] que consideraram a potência do laser, a velocidade de soldadura e a pressão de aperto como parâmetros de entrada e determinaram o seu efeito na resistência ao corte de poliolefinas elastoméricas macias e duras (POE) soldadas em poliolefinas termoplásticas (TPO). A análise de regressão resultante das equações de resistência ao cisalhamento das amostras confirma que a potência e a velocidade têm os efeitos mais significativos sobre a soldadura. Aumentando a potência e diminuindo a velocidade de soldadura, a resistência da solda pode ser aumentada. O seguinte efeito mais significativo foi a da combinação de potência e velocidade, ou seja, a energia da linha, que tende a ser

positiva no que diz respeito à resistência. Para ambos os materiais, a pressão tem um efeito pouco positivo sobre a resistência.

2.3.2 Influência de pigmentos e corantes na matriz polimérica

A eficiência da soldadura por transmissão laser está intrinsecamente relacionada com as propriedades óticas dos materiais poliméricos a unir. A composição básica da matriz polimérica, corantes e aditivos afeta a absorção, reflexão e transmissão da energia laser, determinando, em última instância, o desempenho mecânico da junta da soldadura [34],[35]. É notável que a maioria dos polímeros no seu estado natural manifesta transparência ao comprimento de onda do infravermelho. Quando o raio laser atinge a parte transparente, uma fração da luz incidente é refletida de volta pela superfície superior da peça e a restante energia luminosa é transmitida através do material. Neste processo, uma porção da radiação recebida pode ser absorvida pela parte transparente do material, geralmente devido a fenômenos de dispersão.

Os aditivos colorantes são frequentemente incorporados em plásticos com o propósito de introduzir cor, seja para fins decorativos ou funcionais. Os pigmentos e corantes são diferentes tipos de colorantes. A principal diferença entre os pigmentos e os corantes é a forma como são incorporados na matriz do material, Figura 12. Os pigmentos não se dissolvem, ao passo que os corantes se dissolvem no meio da matriz polimérica, ou seja, as partículas do pigmento proporcionam opacidade e cor, enquanto o corante apenas confere cor e é solúvel no substrato, mantendo a transparência [36].

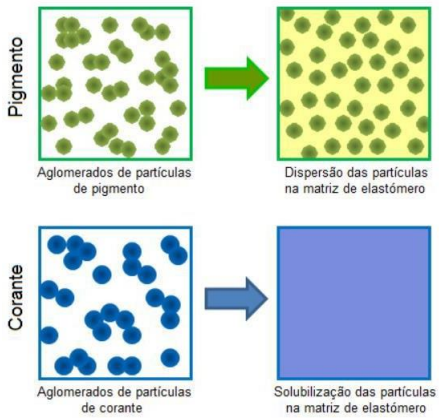


Figura 12 - Diferença dos pigmentos e corantes na matriz [37]

Os pigmentos são geralmente classificados como orgânicos ou inorgânicos. Em

comparação, os pigmentos orgânicos geralmente apresentam melhor transmitância do que os pigmentos inorgânicos (tais como negro de fumo e dióxido de titânio) devido ao tamanho reduzido de partículas e ao baixo índice de refração [38]. A inclusão de pigmentos e corantes em polímeros influencia as propriedades óticas não só na região visível, mas também no infravermelho próximo.

Kagan et al. [39] investigaram os efeitos de diferentes colorantes, nomeadamente: pigmentos verdes, amarelos, vermelhos, brancos e pretos sobre plásticos de nylon 6 de 3,2 mm de espessura. Observaram que a transmissão de luz da amostra vermelha é semelhante à cor natural, enquanto as cores branca, amarela e verde reduzem a transmissão em 75 - 85%. Este padrão sugere que o pigmento vermelho é provavelmente orgânico, enquanto os outros podem ser inorgânicos. Adicionalmente, os plásticos que adquirem coloração negra através da utilização de pigmentos negros de carbono, mostram uma transmissão muito baixa, enquanto os plásticos negros não carboníferos apresentavam níveis de transmissão comparáveis aos colorantes verde e amarelo.

A parte de polímero inferior para o processo de soldadura a laser por transmissão é modificada para absorver o feixe do laser através da sua composição com colorantes como o negro de fumo, em proporções adequadas. O coeficiente de absorção do polímero absorvente aumenta com o teor de negro de fumo na matriz do polímero. A profundidade de penetração do laser diminui com o aumento do teor de negro de fumo na matriz polimérica [40]. Quando se utiliza um polímero pouco pigmentado (pouca %) absorvente, apenas se obtém um aumento moderado da temperatura na interface e a maior parte da energia depositada no interior do material absorvente causa apenas uma transferência limitada de calor para a parte transparente que induz a forma assimétrica da zona de solda nos dois materiais. Um elevado teor de pigmento favorece a absorção na interface do polímero, e, portanto, a difusão térmica ocorre igualmente em ambos os polímeros, o que resulta numa soldadura simétrica em ambas as partes [28],[41]. O aumento do teor de negro de fumo na parte de polímero absorvente de laser provoca uma diminuição da espessura da zona afetada pelo calor e um aumento da temperatura de fusão e da resistência de soldadura [42].

Jansson et al. [35] observaram que o aumento do teor de negro de fumo na

absorção de polímero de 0,5 - 1,5 % em peso provoca um ligeiro aumento da resistência mínima de soldadura. Mas um aumento adicional do teor de negro de fumo não tem um efeito na resistência máxima de soldadura.

2.3.3 Influência da espessura

Outro parâmetro crucial que influencia a transmissão do feixe laser é a espessura da parte transmissora do laser. Esta possui grande efeito tanto na largura como na densidade de energia do feixe laser que interceta a interface da junta.

É de realçar que na soldadura laser por transmissão, a eficiência da soldadura além de depender das variáveis operatórias do laser, também depende das características da peça como aditivos e espessura. A Figura 13, mostra as propriedades de transmissão para polímeros diferentes com uma variedade de espessuras. Polímeros semi cristalinos como Nylon, PE e PP demostram rapidamente uma diminuição da transmissão com a espessura [9].

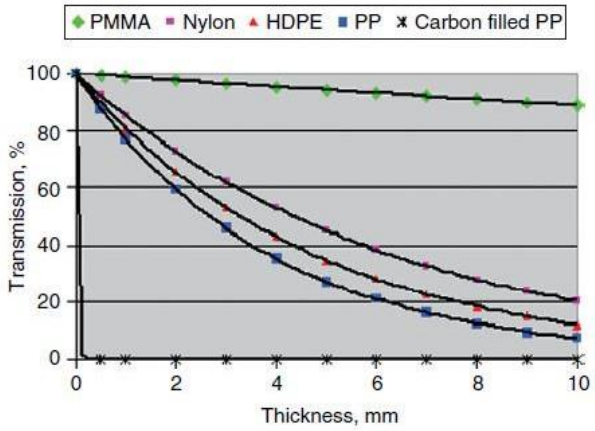


Figura 13 - Relação entre a transmissão laser e a espessura para diferentes polímeros [9]

Kagan et al. [39] observaram que o grau de transmissão do laser em função da espessura da peça plástica para o Nylon 6, um material semi cristalino. Para o Nylon 6 natural e amostras vermelhas, a energia laser diminui gradualmente de 85 - 42% com um aumento na espessura da peça plástica de 0,8 - 6,25 mm. Para amostras em amarelo, verde e branco observou uma redução ainda mais pronunciada de 60 - 3% com o aumento da espessura na mesma condição com a mesma potência de entrada do laser.

Hubatir et al. [43] realizou a soldadura a laser de peças transparentes de PMMA

com laser semicondutor (808 nm) usando diferentes espessuras de peças e várias velocidades de soldadura a laser. Os resultados revelaram que a largura e a profundidade da zona de soldadura foram muito dependentes da velocidade de soldadura, enquanto a espessura da peça transparente teve pouco efeito. A alteração da espessura teve apenas um leve efeito na transmitância da parte transparente, o que foi usado pelos autores para explicar o leve efeito da espessura da peça nos resultados.

2.4 Vantagens e desvantagens

A soldadura a laser por transmissão possui várias vantagens comparativamente a outros processos de soldadura tais como:

- Tempos de ciclo mais rápidos;
- O relevo da solda é mínimo;
- O aquecimento é localizado, logo os danos térmicos são minimizados;
- Pode-se ter um elevado controlo do processo e da qualidade;
- Baixo stress térmico e mecânico;
- Limitações mínimas da geometria da peça e do tamanho a ser soldado;
- Forma uma união de elevada qualidade entre peças;
- Sem desenvolvimento de partículas;
- É uma técnica de elevada precisão;
- Pode realizar juntas herméticas;
- Não existe desgaste nas ferramentas;
- Permite soldar materiais flexíveis e elastómeros;
- É adequado para soldar polímeros com ponto de fusão elevado e para soldar polímeros com viscosidade de fusão baixa;
- Não existe contacto entre os componentes e ferramentas aquecidas;
- Processo automatizado;

Algumas limitações, também são associadas ao processo de soldadura a laser

por transmissão:

- Elevado custo de equipamento;
- Ao soldar dois materiais transparentes, é necessário colocar uma camada intermédia de absorção de IV na interface de soldadura. Isto aumenta o custo por unidade;
- Contacto íntimo necessário entre as peças a soldar;
- Limitação da espessura da peça para materiais cristalinos;
- Depende demasiado das propriedades óticas dos materiais. A parte de cima deve ser transparente a laser e a de baixo deve ser absorvente a laser;

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 Métodos e Materiais

Métodos

O primeiro estudo, enfatiza as características das peças superiores "transparentes" ao laser para a soldadura laser por transmissão. Centrando-se na investigação da transmitância em peças de PMMA, num comprimento de onda de 940 e 1040 nanometros, sob os efeitos da variação da espessura dos 0,5 aos 4 milímetros, com incrementos de 0,5 milímetros e da incorporação de pigmentos orgânicos ou inorgânicos e corantes em diferentes concentrações (0,5%; 1%; 2%), através do auxílio de um espectrofotômetro. Com o objetivo de avaliar a influência desses fatores no desempenho ótico de uma peça soldada, por soldadura a laser por transmissão, recorrendo a uma inspeção visual. Para isso, o estudo está organizado e dividido em cinco tópicos, nomeadamente:

- a descrição de propriedades dos materiais utilizados;

-as etapas da preparação das misturas dos provetes consoante os pigmentos e corantes em diferentes concentrações;

-as etapas de injeção das misturas consoante as diferentes espessuras;

-a descrição dos processos e caracterização ótica, tanto medição da cor quer da transmitância;

-a descrição do processo de soldadura e por fim a avaliação e inspeção visual da

soldadura

Na Figura 13, segue-se em forma de esquema, o procedimento passo-a-passo referente à parte experimental deste primeiro caso de estudo, o PMMA.

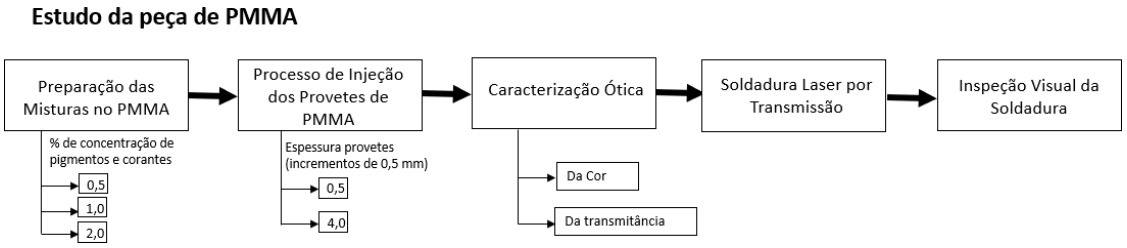


Figura 13 - Esquema referente à organização do procedimento experimental do primeiro caso de estudo (PMMA)

O segundo estudo, aborda as características da peça inferior "absorvente" ao laser, assim como as condições operatórias utilizadas para a soldadura a laser por transmissão. Com o objetivo de investigar qual a configuração de *rib* mais eficiente, consoante as diferentes dimensões e geometrias estudadas, considerando a melhor conjuntura das condições operatórias do laser, no processo de soldadura laser por transmissão. Para isso averiguou-se o desempenho mecânico e ótico, em peças de PC/ABS (Policarbonato/Acrilonitrila butadieno estireno) com 1% de negro de fumo em peso, através de ensaios de tração e de microscopia de reflexão. Pretendendo assim determinar qual a melhor e mais eficiente geometria e dimensão para se proceder à soldadura a laser por transmissão, com base nos resultados de resistência mecânica e óticos, através de uma aparência esteticamente apelativa. Para isso, este estudo está organizado e dividido em cinco tópicos, nomeadamente:

-a descrição de propriedades dos materiais utilizados;

-as etapas da preparação dos provetes com diferentes geometrias de *rib* (lisa, quadrangular, triangular, hermética e trapezoidal) através da moldação por injeção;

-a descrição do planeamento das condições operatórias do laser para cada *rib*;

-a descrição do processo de soldadura a laser consoante o planeamento das condições;

-a descrição dos processos e caracterização mecânica e ótica, tanto nos ensaios de tração, quer nos ensaios de microscopia de reflexão, respetivamente;

Na Figura 14, segue-se em forma de esquema, o procedimento passo-a-passo

referente à parte experimental deste segundo caso de estudo, o PC/ABS.

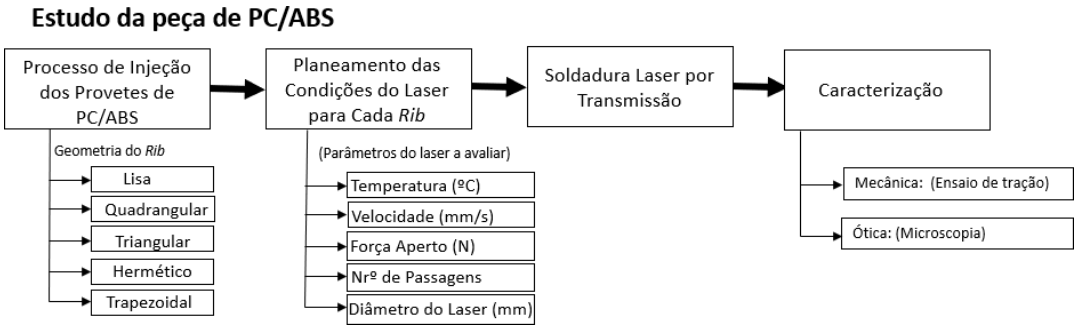


Figura 14 - Esquema referente à organização do procedimento experimental do segundo caso de estudo (PC/ABS)

Esta abordagem experimental abrangente permitiu identificar as melhores condições operatórias e materiais para a soldadura a laser por transmissão, contribuindo para o desenvolvimento de processos mais eficientes e robustos.

Materiais

Para a realização de ambos os casos de estudo, foram utilizados materiais poliméricos disponíveis em forma de grânulo. O PMMA utilizado foi fornecido pela *EVONIK Industries*, com o grade *Plexiglass* 8N, cujas propriedades mais relevantes estão listadas na Tabela 2. Analogamente, na Tabela 3 são apresentadas algumas propriedades do PC/ABS utilizado, fornecido pela *SABIC*, com o grade *CYCOLOY* RESIN C1200HF. As fichas técnicas dos materiais mencionados encontram-se nos Anexos 1 e Anexos 2 – Fichas Técnicas.

Tabela 2 - Propriedades do PMMA utilizado segundo a ficha técnica

Propriedades PMMA	Valores
Índice de Fluidez, MVR (230°C/3,8kg) (cm^3/10min)	3
Transmitância (%)	92
Resistência à tração (MPa)	77
Resistência ao impacto (KJ/m^2) (23°C)	20
Módulo de tensão (MPa)	3300
Temperatura de processamento (°C)	220 - 260

Tabela 3 - Propriedades do PC/ABS utilizado segundo a ficha técnica

Propriedades PC/ABS	Valores
Índice de Fluidez, MVR (260°C/5kg) (cm^3/10min)	22
Densidade (g/cm^3)	1,15
Resistência à tração (MPa)	55
Resistência ao impacto (KJ/m^2) (23°C)	50
Módulo de tensão (MPa)	2300
Temperatura de processamento (°C)	275 - 300

No primeiro caso de estudo também foram utilizados pigmentos e corantes em formato de pó, de forma a conferir cor às peças de PMMA. Classificados como pigmentos orgânicos foram incorporados, o vermelho 144, o amarelo 191, o verde 7 e o azul 15:1, conforme mostra a Figura 15. Estes pigmentos foram escolhidos pelas suas propriedades de tingimento e resistência à luz.

Figura 15 - Pigmentos orgânicos

Além desses, pigmentos inorgânicos também foram utilizados, como o negro de fumo e o dióxido de titânio com uma tonalidade preta e branca, respetivamente. Assim como, pigmentos inorgânicos coloridos, incluindo o óxido de ferro 101 com um tom vermelho alaranjado e o azul 29 ou também designado de azul ultramarinho com uma tonalidade azul avermelhada. Estes pigmentos foram selecionados com base nas suas características de cor, alto poder de tingimento e resistência à luz, como ilustrado na Figura 16.

Figura 16 - Pigmentos Inorgânicos

Adicionalmente, pigmentos inorgânicos metálicos, como o alumínio e o bronze, foram utilizados, conforme ilustrado na Figura 17. Nestes pigmentos o comportamento observado por ambos é semelhante pois a intensidade do brilho e o efeito cintilante, é tanto maior, quanto maior for a transparência do polímero, apresentando bom poder de cobertura e boa resistência à luz e intempéries.

Figura 17 -Pigmentos metálicos (inorgânicos)

Por fim, corantes como o vermelho 135, o amarelo 114, o azul 104 e o verde 28, foram aplicados fornecendo tonalidades semelhantes às dos pigmentos orgânicos, conforme demonstrado na Figura 18.

Figura 18 – Corantes

3.2 Primeiro Caso de Estudo: Parte Transparente (PMMA)

3.2.1 Peça e Molde

i. Peça de PMMA

No primeiro caso de estudo, as peças transparentes foram produzidas em PMMA e fabricadas na forma de provetes retangulares com medições de 60 milímetros de comprimento e 30 milímetros de largura, variando a espessura de 0,5 a 4 milímetros, com incrementos de 0,5 milímetros. Cada provete possuía duas áreas (30 por 30 milímetros) com diferentes espessuras, conforme ilustrado nas Figura 19 e Figura 20. As imagens referentes aos provetes em PMMA com diferentes espessuras e concentrações de pigmentos e corantes encontra-se no Anexo 3.

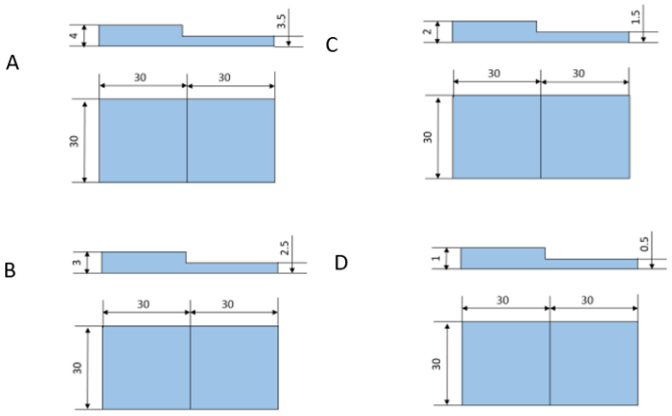


Figura 19 - Dimensões dos provetes em estudo, com 30 por 30 milímetros. A - 4 e 3,5mm; B - 3 e 2,5mm; C - 2 e 1,5mm; D - 1 e 0,5mm

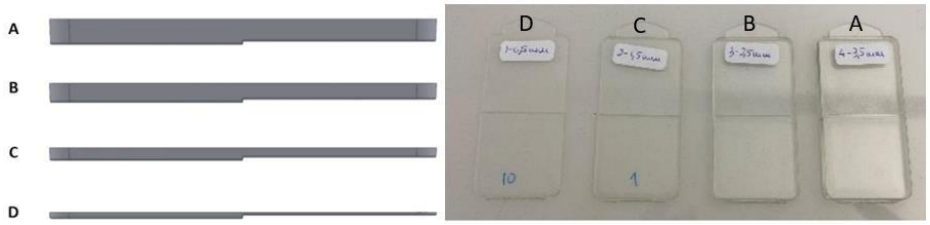


Figura 20 - No lado esquerdo, esboço referente ao dimensionamento dos provetes de PMMA. No lado direito, demonstração dos provetes transparentes

ii. Molde

Para a obtenção dos provetes em PMMA, utilizou-se um molde de pequenas dimensões, composto por duas placas distintas na zona móvel. Essa configuração permitiu a injeção simultânea de provetes com diferentes espessuras. Neste caso, o Molde 1 - (provete A com provete B) e o Molde 2 - (provete C com provete D), conforme necessário para o estudo.

É importante referir que molde apresenta uma estrutura não balanceada, ou seja, os provetes demoram tempos diferentes para preencher a cavidade e a arrefecer, devido às suas diferentes espessuras. Além disso, o acabamento de superfície do molde pode variar mediante a utilização quer do Molde 1 ou Molde 2, podendo influenciar adiante na transmissão de luz dos provetes.

O molde possui um ataque em leque acoplado na região mais espessa do provete, enquanto a extração dos provetes é realizada a partir dos extremos arredondados nos cantos e também junto à zona do ataque em leque, presente na Figura 21.

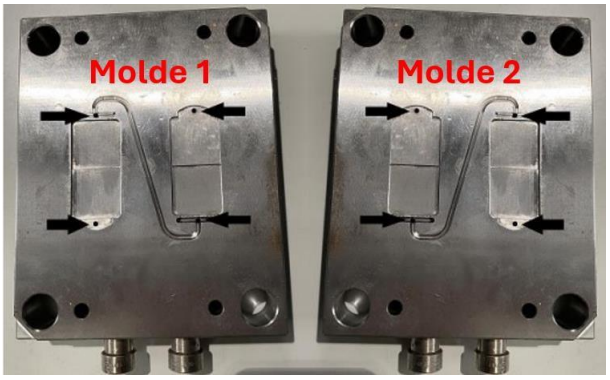


Figura 21 - Imagem das duas placas móveis, com sinalização dos pontos de extração

O molde possui dois sistemas de arrefecimento a água, tanto na placa do lado fixo quanto na do lado móvel, para garantir que os provetes atinjam a temperatura adequada durante o processo de moldação, conforme ilustrado na Figura 22 (imagem à direita).

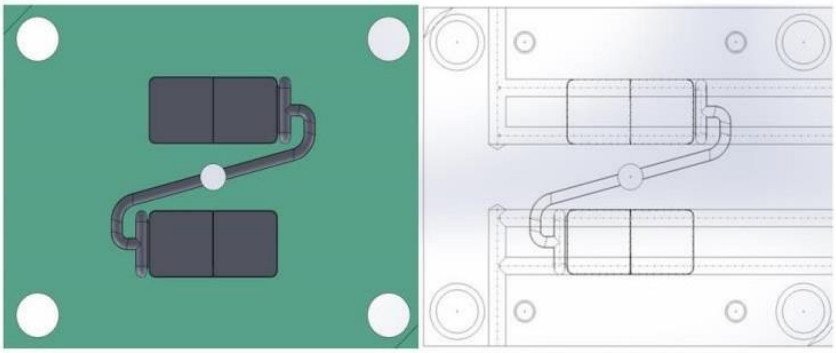


Figura 22 - À esquerda esquematização 3D do molde projetado, à direita desenho técnico do molde com visualização dos sistemas de arrefecimento

3.2.2 Moldação por Injeção

i. Preparação das Misturas

Antes de proceder à injeção dos provetes em PMMA, considerando a incorporação de pigmentos e corantes, foi necessário a realização de misturas. Para isso, recorreu-se a métodos mais práticos e manuais devido à falta de equipamentos adequados para a realização das misturas.

O processo de mistura começa com a pesagem do material, que difere consoante a placa utilizada no molde. Na placa com menores espessuras são necessárias 200g de PMMA e na placa de maiores espessuras 300g, para as seguintes finalidades:

retirar 10 amostras, limpar o fuso da injetora na mudança de material e obter provetes de transição entre os diversos pigmentos e corantes.

Assim, coloca-se na balança um recipiente de alumínio e tara-se a mesma; seguidamente, com o auxílio de uma pá de metal, retira-se o material da estufa, coloca-se no recipiente que se encontra na balança e pesa-se a quantidade pretendida (200g ou 300g).

Em seguida, mede-se a quantidade de colorante que se pretende misturar, o qual varia entre 0,5%, 1% e 2%, em peso, Tabela 4.

Tabela 4 - Quantidade de aditivo consoante a percentagem e a quantidade de PMMA

	Quantidade de aditivo perante a percentagem		
Quantidade de PMMA	0,5%	1%	2%
200 g	1,00 g	2,00 g	3,00 g
300 g	1,50 g	3,00 g	6,00 g

Por fim, introduz-se o PMMA num saco de plástico onde são acrescentadas 3 a 4 gotas de óleo dispersante, as quais facilitam a obtenção de uma mistura mais uniforme, acrescentasse o pigmento ou o corante, fecha-se o saco e abana-se durante uns 2/3 minutos até se obter uma mistura homogénea.

ii. Processo de Injeção

Após a preparação das misturas, procedeu-se à injeção dos provetes, foi utilizada a máquina de injeção *BOY22* da marca *Dr. Boy GmbH & Co. KG*, com uma força de fecho de 220 kN, conforme ilustrado na Figura 23.

Figura 23 - Máquina de injeção BOY22

Na Tabela 5, estão apresenta algumas das condições de processamento do PMMA, os restantes parâmetros encontram-se em Anexo 4.

Tabela 5 - Condições de processamento dos provetes por moldação por injeção de PMMA

Perfil de temperaturas (°C)	Bico	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4
	255	250	245	240	235
Pressão de injeção (bar)	120				
Temperatura do molde (°C)	80				
Velocidade de injeção (mm/s)	120				

O processo de injeção, iniciou-se pelos provetes de maiores espessuras – Molde 2. Após a estabilização do processo, primeiramente foram retirados 10 provetes para cada espessura do PMMA natural (sem mistura de colorantes). Em seguida, retiraram-se também 10 provetes de cada espessura e para todas as concentrações das misturas sequencialmente, nomeadamente com os 0,5%/1%/2%. O mesmo procedimento foi repetido para os provetes com as menores espessuras – Molde 1.

Foram então injetados um total de 3440 provetes, divididos em 240 provetes pelos 14 pigmentos e corantes escolhidos e 80 provetes de PMMA natural.

É relevante mencionar que, uma vez que o processo de injeção começou pela placa do Molde 2, as condições operatórias de injeção foram mantidas constantes também para a placa do Molde 1, exceto a dosagem, que foi ajustada para metade. De modo a garantir um bom processo e que as restantes variáveis permanecessem maioritariamente constantes. Embora essa ação possa resultar em algumas implicações na avaliação da transmitância dos provetes de menor espessura devido às condições morfológicas do material impostas pelas condições de processamento da moldação por injeção. Uma vez que as propriedades óticas têm uma influência significativa na soldadura a laser por transmissão, e as condições de moldação, por sua vez, têm um impacto considerável nas propriedades óticas.

De notar que, previamente a todas as moldações todo o material foi previamente seco de modo a remover toda a humidade, uma vez que a presença de água no material resulta em anomalias e defeitos o processamento. Assim com recurso a uma estufa o material foi seco e desumidificado a uma temperatura de 90°C durante 3 horas, conforme recomendado na *datasheet* do material, no Anexo 2.

3.2.3 Caracterização do PMMA e Misturas

Nesta fase, posteriormente à obtenção dos provetes injetados com as diferentes espessuras de PMMA e respetivas misturas de pigmentos e corantes, procedeu-se à caracterização dos substratos de forma a catalogar e definir a cor das misturas, assim como, para avaliar o impacto da espessura e das diferentes concentrações de pigmentos e corantes, na soldadura a laser por transmissão, através da transmitância.

i. Medição da Cor

A cor é definida como uma modificação física da luz por um objeto que é observado pelo olho humano e interpretado pelo cérebro, ou seja, esta propriedade é relacionada primariamente com a resposta visual, é então necessário um espaço de cor que pode ser descrito como um método para expressar a cor de um objeto usando algum tipo de notação, como os números, por exemplo.

O espaço de cor L*a*b*, também conhecido como espaço de cor CIELAB é atualmente o mais popular dos espaços de cores uniformes usados para avaliar as cores. Esse espaço de cor é amplamente utilizado pois correlaciona de forma consistente os valores de cor com a perceção visual. Quando as cores são ordenadas, elas podem ser expressas em termos de tonalidade, luminosidade e saturação. Com a criação de escalas para esses atributos, podemos expressar cores de forma precisa.

O espaço de cor L*a*b* foi criado com base na teoria de cores opostas, onde duas cores não podem ser simultaneamente verdes e vermelhas, ou amarelas e azuis.

Essas coordenadas são interpretadas através de um diagrama como o da Figura 24. O "L" indica a luminosidade, onde L=0 é preto e L=100 é branco. O eixo do "a" é a coordenada vermelho/verde (+a indica vermelho e –a indica verde), enquanto o eixo do "b" é a coordenada azul/amarelo (+b indica amarelo e –b indica azul). Os espetrofotómetros são equipamentos que fazem essas medições numéricas, ao converter a cor, nas coordenadas "L", "a" e "b".

Esta técnica serviu para perceber e catalogar as diferenças de cor nas misturas efetuadas, através da comparação numérica entre as coordenadas da amostra e o padrão. Neste caso entre a mesma mistura com diferentes quantidades percentuais, e entre as misturas de corantes e de pigmentos com a mesma designação de cor. Ela

indica as diferenças absolutas nas coordenadas de cor entre a amostra e o padrão, conhecidas como Deltas (Δ). Os Deltas para L*=(ΔL), a*=(Δa) e b*=(Δb) podem ser negativas (-) ou positivas (+). A diferença total, Delta E (ΔE), todavia, é sempre positiva. Elas são expressas como:

$$\Delta L = L(amostra) - L(padrão), (+= mais\ claro, -= mais\ escuro) \quad (4)$$
$$\Delta a = a(amostra) - a(padrão), (+= mais\ vermelho, -= mais\ verde) \quad (5)$$
$$\Delta b = b(amostra) - b(padrão), (+= mais\ amarelo, -= mais\ azul) \quad (6)$$
$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2}, (Diferença\ total\ da\ cor) \quad (7)$$

Onde ΔE, indica apenas a magnitude total da diferença de cor. Esta relação faculta valores universais de cor, e permite verificar se a mistura entre a matriz polimérica e os pigmentos ou corantes foi bem empregue, dada a mistura rudimentar explicada em 3.2.1, assim como quais as coordenadas de cor melhores o uso no processo de soldadura a laser por transmissão.

Portanto, numa primeira fase começou-se por ligar o equipamento e conectar ao *software* do computador (o equipamento e o *software* foram os mesmo utilizados para a transmitância). Em seguida, calibrou-se o equipamento com as cores de referência, branco e preto. Depois de calibrado, iniciaram-se os ensaios para cada mistura, onde foram realizadas 10 medições no espaço central de cada provete. Após as medições, a média de todos os valores foi estimada para assim se obter as coordenadas intermédias e valores mais fidedignos de cada colorante.

A medição da cor teve como objetivo especificar e catalogar a cor das diversas misturas efetuadas, tanto de pigmento quanto de corante, e avaliar a diferença de cor entre elas. Além de verificar também que influência o aumento das concentrações das misturas apresenta na diferença da cor individualmente.

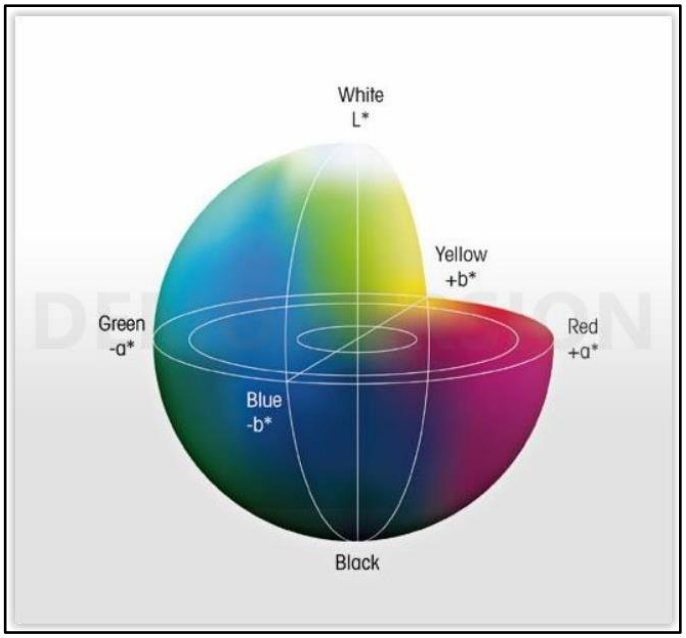


Figura 24 -Representação do diagrama do sistema CIELAB [44]

ii. Transmitância

Para garantir uma soldadura eficaz, é crucial que a energia do laser alcance integralmente a zona de soldadura. Para a analise das interações que ocorrem entre a luz e o polímero de forma não destrutiva, foram estudados os fenômenos de reflexão, absorção e transmissão. Quando a radiação atinge a superfície de um material, parte dela é refletida, parte é transmitida e outra parte é absorvida, ou seja, a transmitância corresponde à fração de luz que atravessa o material num determinado comprimento de onda. Determina- se através da seguinte equação [13],[14]:

$$T = \frac{I}{I_0}$$

Onde I corresponde à intensidade de luz transmitida (que passa pela amostra) e I_0 à intensidade de luz incidente.

A medição da transmissão de um provete foi realizada a partir de dois feixes de luz separados, um é o feixe de referência e o outro feixe incide diretamente sobre a amostra, sendo analisada a diferença de intensidade entre os feixes em função do

comprimento de onda [14].

A transmitância foi medida utilizando um espectrofotómetro *SHIMADZU*, modelo *UV-2401 PC*, capaz de medir numa gama do espectro entre os 190 nm aos 1100 nm (do ultravioleta ao infravermelho), conforme as *guidelines* da norma ASTM D1003 (Anexo 5). O equipamento encontra-se conectado a um computador onde são apresentados os resultados no *software UV-Probe [Spectrum].*

O espectrofotómetro possui um sistema de medição ótica hemisférica, com uma esfera integradora, na qual a amostra é disposta rente à porta da esfera. As superfícies internas da esfera integradora, deflectores e padrões de refletância são foscas, e de refletância substancialmente igual e altamente refletores ao longo dos comprimentos de onda visíveis. O aparelho contém uma fonte de luz e um monocromador que divide a luz em comprimentos de onda individuais, com uma fenda ajustável que permite apenas que um comprimento de onda específico atinja a amostra. A luz que atravessa a amostra é detetada pelo detetor de radiação, como ilustrado na Figura 25. Os resultados são apresentados no computador de duas formas distintas: através da linha tendência do espectro, ou em dados tabelados.

Desta forma, começa-se por ligar o equipamento ao *software* do computador. Verifica-se se o aparelho tem o devido suporte para os provetes em estudo e depois de se traçar a linha de base coloca-se os provetes no espetrofotómetro para se iniciarem os ensaios. Definiu-se a gama de comprimento de onda que se pretendia trabalhar, começando em 1100 nm e terminando em 900 nm. Estas medições foram realizadas 5 vezes na área média do provete, para cada concentração das misturas e espessura, assim como para o PMMA natural, a fim de obter a média e, portanto, um valor mais fidedigno.

Este teste teve como objetivo quantificar a percentagem de luz que atravessa os provetes de PMMA natural, bem como as misturas em diferentes concentrações e espessuras, nos comprimentos de onda de 940 nm e 1040 nm, que correspondem aos comprimentos de onda dos lasers utilizados na soldadura laser por transmissão, tanto no PIEP quanto na empresa.

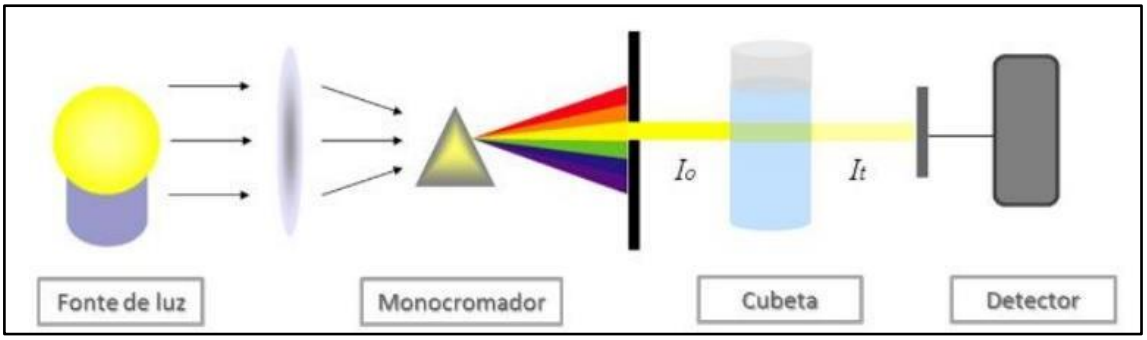


Figura 25 - Representação do processo dentro do espectrofotómetro [44]

3.2.4 Soldadura a Laser por Transmissão (LTW) – (PMMA)

i. Processo de Soldadura

A soldadura a laser por transmissão foi realizada no PIEP. O laser utilizado foi um laser de díodo *LM100*, com *100W* de potência *aircooled*, operando num comprimento de onda de λ=940nm conforme indicado pelo contorno verde na Figura 26. O laser foi manipulado por um robot da marca *Motoman NX100,* destacado pelo contorno vermelho da mesma figura.

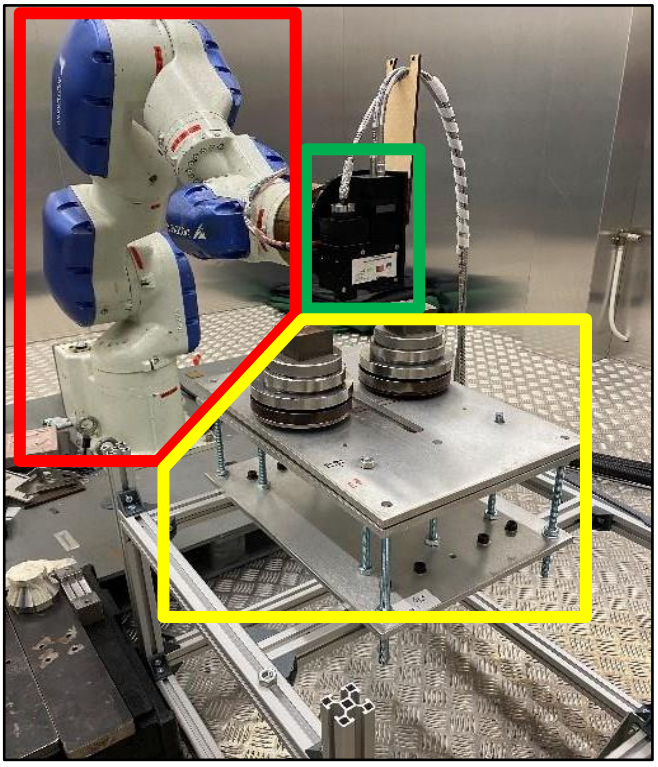


Figura 26 – Demonstração do processo de soldadura a laser por transmissão.

Antes de se proceder ao processo de soldadura, foi necessário preparar e posicionar os provetes de cada mistura consoante as variadas concentrações e espessuras. Para isso, quatro provetes foram simultaneamente posicionados num suporte com o propósito de os fixar ordeiramente, representado pelo contorno amarelo na Figura 26. Em seguida, o suporte foi posicionado numa mesa de trabalho, sobre a qual foi encaixada nos pinos de suporte da mesa uma placa metálica com uma ranhura onde o laser vai atuar. Por cima da placa metálica, usada para fixar as duas metades dos provetes a soldar, são adicionados pesos para garantir uma força de aperto de 4 kg em cada ensaio, garantindo assim um contacto íntimo entre os provetes, como demonstrado na Figura 26.

De notar que, no laser usado para o estudo não se altera a potência diretamente. Esta é definida pela temperatura, ou seja, estabelece-se uma temperatura e a máquina determina a potência necessária para atingir a temperatura imposta.

As condições operatórias do laser escolhidas para a realização da soldadura laser por transmissão foram mantidas constantes para todos os provetes, e encontram-se demonstradas na Tabela 6. A técnica utilizada foi a soldadura por contorno.

Tabela 6 - Condições operatórias utilizadas na soldadura a laser por transmissão do primeiro caso de estudo (PMMA)

Temperatura do Laser	280°C
Velocidade do Laser	8 mm/s
Força de Aperto	4 kg
Abertura do Laser	2 mm
Número de Passagens do Laser	1 passagem

Na Figura 27 encontra-se ilustrado um dos provetes soldados, onde é possível observar a linha de soldadura que permite a união dos provetes. O provete branco representa a parte “transparente” à radiação do laser, enquanto o provete de cor preta representa a parte “absorvente”.

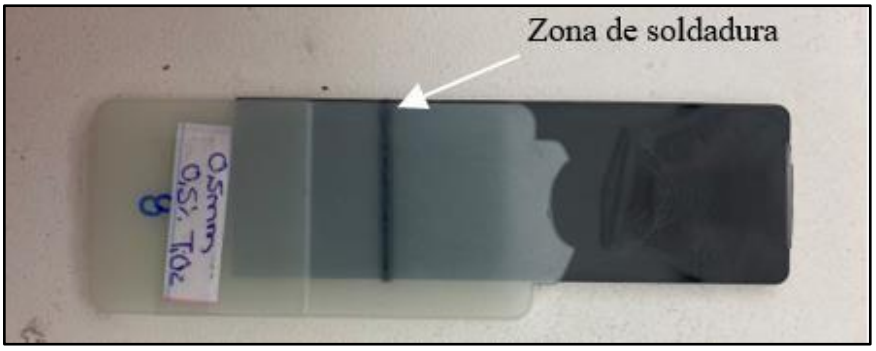


Figura 27 – Exemplo de peça soldada (Primeiro caso de estudo PMMA com 0,5% de pigmento inorgânico TiO2)

ii. Controlo Visual do provete soldado

Após a soldadura entre todos os provetes de PMMA e respetivas misturas com o PC/ABS, em todas as espessuras, realizou-se a inspeção visual das peças finais para que se pudesse comparar e examinar a existência de defeitos na soldadura, uma vez que a incorporação de pigmentos orgânicos, inorgânicos e corantes provocam diferenças na morfologia do provete, e consequentemente na soldadura a laser por transmissão. Permitindo assim, avaliar o comportamento dos colorantes em função da soldadura, nomeadamente se ocorre ou não a soldadura entre os materiais.

Consequentemente, com os resultados obtidos na medição da transmitância e, posteriormente, na avaliação da inspeção visual, procurou-se estabelecer uma relação preditiva entre a transmitância e a inspeção visual da soldadura, de modo a avaliar se os valores de transmitância apresentam uma correlação fiável e previsível consoante os resultados visuais.

3.3 Segundo Caso de Estudo: Parte Absorvente (PC/ABS)

Deve ficar presente, que este estudo foi realizado em colaboração com o PIEP (Pólo de Inovação em Engenharia de Polímeros), e é importante destacar que a execução de grande parte dos ensaios experimentais não foi da responsabilidade direta do autor deste trabalho, mas sim dos investigadores do PIEP. A realização desta fase experimental exigiu conhecimentos e recursos técnicos específicos, disponíveis no PIEP, que seriam de difícil acesso no contexto de uma tese individual.

Após a conclusão dos ensaios experimentais conduzidos pelo PIEP, parte dos

resultados foram partilhados com o autor, o que permitiu uma análise detalhada e a sua integração nas discussões e conclusões finais deste trabalho. Esta abordagem colaborativa visou fortalecer e expandir as conclusões da primeira fase do estudo, proporcionando uma visão mais completa e robusta dos fenómenos observados.

A segunda parte deste estudo, conduzida pelo PIEP, foi essencial para aprofundar o entendimento das variáveis do processo e da aplicabilidade prática dos resultados, respetivamente perante o estudo das diferentes dimensões e geometrias de *rib* presentes na peça absorvente ao laser, permitindo que o trabalho beneficiasse da experiência técnica e do rigor metodológico dos investigadores do instituto.

3.3.1 Peça e Molde

i. Peça de PC/ABS

No segundo caso de estudo, as peças absorventes foram produzidas em PC/ABS e fabricadas na forma de provetes retangulares com medições de 140 milímetros de comprimento e 25 milímetros de largura com 2 milímetros de espessura à exceção da área de solda que tem uma espessura de 1,5 milímetros, como demonstrado na Figura 28. Essa região do provete inclui a geometria do *rib*.

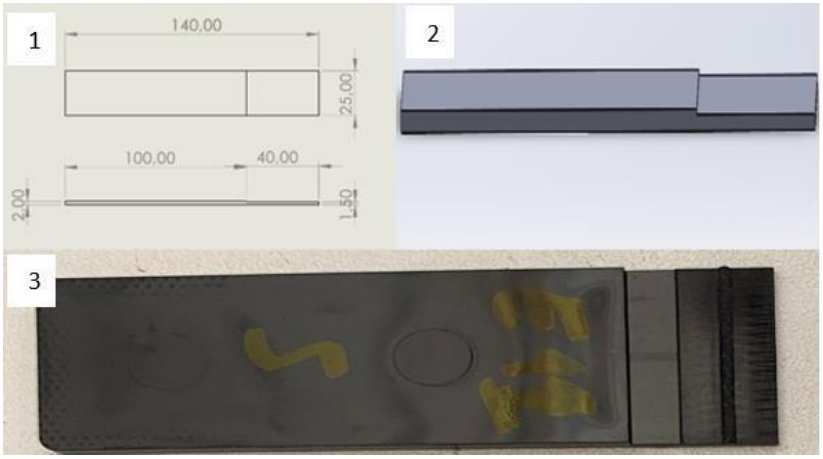


Figura 28 - 1- Figura esquemática 2D do provete. 2- Figura esquemática 3D do provete. 3- Provete em PC/ABS com rib.

Na Figura 29, encontram-se representadas as quatro geometrias com as

respetivas dimensões dos *rib's* estudadas. Em termos de geometria, estas incluem secções quadrangulares, triangulares, herméticas (*rib* retangular ajustado num contra *rib*, de forma a tornar a ligação estanque) e trapezoidais. Em cada uma das geometrias existem 5 configurações com diferentes larguras e alturas, exceto no *rib* trapezoidal onde apenas foi estudada uma configuração. Neste caso, procedeu-se à variação da geometria e dimensionamento do *rib,* com o propósito de averiguar qual a influência na adesão entre os materiais, tanto mecânica como ótica, no processo de soldadura laser por transmissão.

Para cada uma das configurações, designou-se a nomenclatura de P juntamente com um código alfanumérico, variando de P 7 a P 22, num total de 16 configurações.

Geometria	Configuração	Largura [mm]	Altura [mm]
Retangular	P 7	0,8	0,5
	P 10	1	0,5
	P 11	1,2	0,5
	P 14	0,8	0,8
	P 15	0,8	1,1
Triangular	P 8	0,8	0,5
	P 12	1	0,5
	P 13	1,2	0,5
	P 16	0,8	0,8
	P 17	0,8	1,1
Hermético	P 18	0,9	0,3
	P 19	0,9	0,4
	P 20	0,9	0,2
	P 21	1	0,3
	P 22	1,1	0,3
Trapezoidal	P 9	0,8	0,5

Figura 29 – Diferentes configurações de rib

ii. Molde

Quanto aos moldes utilizados para a produção dos provetes em PC/ABS, não foram transmitidas informações nenhumas, visto todos os provetes de PC/ABS terem sido fabricados e fornecidos pelo PIEP.

3.3.2 Moldação por Injeção

Os provetes de PC/ABS com as diferentes configurações foram injetados no PIEP, como referido anteriormente, e foi utilizada uma máquina injetora ENGEL 45T, ilustrada na Figura 30. É uma máquina hidráulica, com uma força de fecho de 450 kN, e um cilindro de diâmetro de 25 mm. As condições operatórias utilizadas do processo de moldação por injeção das configurações dos provetes, também não foram fornecidas ao autor deste trabalho.

Figura 30 - Máquina de injeção ENGLET 45T

3.3.3 Soldadura Laser por Transmissão (LTW) – (PC/ABS)

i. Plano de Experimentos das Condições da Soldadura

Após a injeção dos provetes e antes de se efetuar a soldadura a laser por transmissão, foi elaborado um plano experimental lógico e sequencial para as configurações dos provetes em PC/ABS. De modo a averiguar quais as condições operatórias que se iriam analisar, assim como os respetivos valores.

Esse plano adotou uma metodologia de tentativa erro, com múltiplos ensaios, com o objetivo de obter o desempenho máximo de cada variável na soldadura, considerando as diferentes configurações. Embora essa abordagem promova a realização de muitos ensaios, é necessária devido ao desconhecimento pratico dos resultados obtidos. No entanto, requer uma manipulação metódica das variáveis para classificar as possibilidades que possam acabar em sucesso, acabando por resultar em conclusões fidedignas [5].

As variáveis escolhidas para este estudo foram:

- Velocidade do laser;
- Temperatura do laser;
- Abertura do feixe do laser;
- Número de passagens do laser;
- Força de aperto nos provetes;

Velocidade do Laser: Esta variável foi escolhida porque controla diretamente o tempo de soldadura e influência indiretamente a temperatura atingida na zona de união dos provetes. Como tanto o tempo de soldadura quanto a temperatura atingida na interface de união têm uma grande influência na mistura dos dois materiais, quanto melhor for essa mistura melhor será a resistência da soldadura.

Temperatura do Laser: A temperatura afeta diretamente a zona de união dos materiais. Como mencionado anteriormente, essa temperatura tem influência direta na mistura entre os dois materiais, deste modo vai alterando a área de soldadura assim como a resistência mecânica dos provetes soldados.

Abertura do Feixe do Laser: Esta variável permite aumentar ou diminuir a zona a ser soldada, possibilitando o controlo da largura da soldadura, afetando a área de resistência entre os provetes.

Número de Passagens do Laser: Esta variável influência diretamente a quantidade de energia absorvida pelo material absorvente e, consequentemente, a qualidade e resistência da soldadura. Controlar o número de passagens permite regular a quantidade de calor aplicada à zona de união, garantindo uma fusão uniforme e eficaz.

Força de Aperto: A força de aperto permite a fixação entre os dois provetes, garantindo um contacto íntimo entre os materiais e promovendo uma melhor difusão, o que influencia diretamente a resistência mecânica dos provetes soldados.

Planeamento da Tipologia Lisa (Sem Rib)

Subsequentemente, a primeira fase do plano experimental iniciou-se com os ensaios da tipologia lisa (sem *rib*), por ser a mais simples e comum, servindo como base de referência para as restantes tipologias de *rib* analisadas. Isso permitiu

ajustar melhor o processo, com a finalidade de delimitar os valores a serem utilizados futuramente para cada variável nas tipologias seguintes, evitando resultados muito discrepantes e incoerentes. Nesta tipologia, apenas foram variadas as condições operatórias que mais afetam e influenciam diretamente o processo de soldadura, respetivamente a temperatura, a velocidade do laser e a pressão de aperto.

Na Tabela 7 estão apresentadas as variáveis estudadas para cada ensaio, bem como os seus valores. Os ensaios foram divididos em três grupos (A, B e C), cada um focado na variação de uma única condição operatória, enquanto as restantes condições permaneceram constantes. Isso resultou num total de 26 ensaios.

De notar que, no grupo A, a gama de temperaturas do laser usadas abrange tanto a temperatura de fusão do PMMA, como do PC/ABS, respetivamente 220°C a 260°C e 275°C a 300°C.

Tabela 7 – Variação das condições operatórias do laser nos ensaios dos provetes de PC/ABS lisos (sem rib).

	Temperatura [°C]	Velocidade [mm/s]	Pressão [N]	Ensaio
Grupo A	240	10	117	J1
	250			J2
	260			J3
	270			J4
	280			J5
	290			J6
	300			J7
	310			J8
	320			J9
	330			J10
	340			J11
	350			J12
Grupo B	300	4	117	J13
		6		J14
		8		J15
		10		J7
		12		J17
		14		J18
		16		J19
		18		J20
		20		J21
Grupo C	300	10	0	J22
			33	J23
			89	J24
			117	J7
			145	J26
			173	J27
			201	J28

Planeamento da Tipologia de Rib Retangular

Na segunda fase do plano experimental, foram planejados os ensaios da tipologia de *rib* retangular, baseando-se nos resultados obtidos na fase anterior. Esta fase foi dividida em cinco configurações, assim, começou-se o planeamento dos ensaios pela configuração P 14, seguida sucessivamente pela P 7, P 10, P 11 e por fim P 15.

a) Configuração P 14

Na Tabela 8 estão apresentadas as variáveis estudadas para cada ensaio,

juntamente com os seus respetivos valores, num total de 14 ensaios.

Para a configuração P 14, adicionou-se a análise de mais uma variável, a abertura do feixe do laser. Com base no resultado obtido, detalhados posteriormente no trabalho, decidiu-se manter a abertura do laser com um valor de 2 mm para as configurações subsequentes, nomeadamente P 7, P 10, P 11 e P 15.

Tabela 8 - Condições operatórias do laser (Configuração P 14).

Configuração	Temperatura [°C]	Abertura do laser [mm]	Velocidade [mm/s]	Pressão [N]	Ensaio
P 14	280	2	10	201	T1
	300	2	10	201	T2
	280	1	10	201	T3
	260	2	10	201	T4
	240	2	10	201	T15
	260	2	8	201	T16
	260	2	12	201	T29
	260	2	10	117	T30
	260	2	10	145	T31
	260	2	10	243	T32
	250	2	10	201	T33
	270	2	10	201	T34
	260	2	9	201	T35
	260	2	11	201	T36

b) Configuração P 7

Na Tabela 9 estão apresentadas as variáveis estudadas para cada ensaio da configuração P 7, juntamente com os seus respetivos valores, num total de 9 ensaios.

Tabela 9 - Condições operatórias do laser (Configuração P 7).

Configuração	Temperatura [°C]	Abertura do laser [mm]	Velocidade [mm/s]	Pressão [N]	Ensaio
P 7	280	2	10	201	T6
	260		10	201	T17
	280		10	117	T20
	300		10	201	T37
	280		8	201	T38
	280		10	145	T39
	280		10	243	T40
	240		10	201	T54
	280		12	201	T55

c) Configuração P 10

Na Tabela 10 estão apresentadas as variáveis estudadas para cada ensaio da configuração P 10, juntamente com os seus respetivos valores, num total de 10 ensaios.

Tabela 10 - Condições operatórias do laser (Configuração P 10).

Configuração	Temperatura [°C]	Abertura do laser [mm]	Velocidade [mm/s]	Pressão [N]	Ensaio
P 10	280	2	10	201	T7
	260		10	201	T18
	240		10	201	T41
	260		12	201	T42
	260		10	89	T43
	260		10	145	T44
	260		10	117	T45
	220		10	201	T58
	260		8	201	T59
	260		6	201	T72

d) Configuração P 11

Na Tabela 11 estão apresentadas as variáveis estudadas para cada ensaio da configuração P 11, juntamente com os seus respetivos valores, num total de 11 ensaios.

Tabela 11 - Condições operatórias do laser (Configuração P 11).

Configuração	Temperatura [°C]	Abertura do laser [mm]	Velocidade [mm/s]	Pressão [N]	Ensaio
P 11	280	2	10	201	T8
	260		10	201	T19
	280		10	117	T22
	240		10	201	T46
	260		12	201	T47
	260		10	145	T48
	260		10	243	T49
	300		10	201	T60
	260		8	201	T61
	260		10	173	T73
	260		6	201	T74

e) Configuração P 15

Na Tabela 12 estão apresentadas as variáveis estudadas para cada ensaio, juntamente com os seus respetivos valores, num total de 13 ensaios.

Para a configuração P 15, adicionou-se a análise de mais uma variável, o número de passagens do laser, devido à sua maior altura de *rib* em comparação com as outras comparações.

Tabela 12 - Condições operatórias do laser (Configuração P 15).

Configuração	Temperatura [°C]	Abertura do laser [mm]	Velocidade [mm/s]	Pressão [N]	Nr Passagens	Ensaio
P 15	260	2	10	201	1	T9
	300		10	201	1	T23
	300		10	201	2	T26
	260		10	201	2	T51
	240		10	201	2	T62
	220		10	201	2	T63
	260		8	201	2	T66
	260		8	201	1	T67
	220		6	201	2	T75
	220		8	201	2	T76
	220		10	145	2	T78
	220		10	243	2	T80
	220		4	201	2	T90

Tipologia Rib Triangular

Na terceira fase do plano experimental, procedeu-se ao planeamento dos ensaios da tipologia de *rib* triangular. Esta fase foi dividida em cinco configurações, com as mesmas dimensões da tipologia anterior, exceto a área do *rib* que é reduzia para metade, devido à sua geometria triangular. Assim, começou-se o planeamento dos ensaios pela configuração P 16, seguida sucessivamente pela P 8, P 12, P 13 e por fim P 17.

a) Configuração P 16

Na Tabela 13 estão apresentadas as variáveis estudadas para cada ensaio, juntamente com os seus respetivos valores, num total de 14 ensaios.

Para a configuração P 16, todas as variáveis foram analisadas. Com base nos resultados obtidos, detalhados posteriormente no trabalho, decidiu-se manter a abertura do laser com um valor de 1 mm e o número de passagens com duas passagens para as configurações subsequentes, nomeadamente P 8, P 12, P 13 e P 17.

Tabela 13 - Condições operatórias do laser (Configuração P 16).

Configuração	Temperatura [°C]	Abertura do laser [mm]	Velocidade [mm/s]	Pressão [N]	Nr Passagens	Ensaio
P 16	260	2	10	201	1	T13
	240	2	10	201	1	T24
	280	2	10	201	1	T25
	220	1	10	201	1	T52
	240	1	10	201	2	T53
	220	1	10	201	2	T68
	260	1	10	201	2	T69
	240	1	10	145	2	T70
	240	1	8	201	2	T71
	240	1	6	201	2	T82
	240	1	10	243	2	T83
	250	1	10	201	2	T84
	230	1	10	201	2	T85
	240	2	10	201	2	T92

b) Configuração P 8

Na Tabela 14 estão apresentadas as variáveis estudadas para cada ensaio da configuração P 8, juntamente com os seus respetivos valores, num total de 12 ensaios.

Tabela 14 - Condições operatórias do laser (Configuração P 8).

Configuração	Temperatura [°C]	Abertura do laser [mm]	Velocidade [mm/s]	Pressão [N]	Nr Passagens	Ensaio
P 8	240	1	10	201	2	T86
	220		10	201		T93
	260		10	201		T94
	240		8	201		T95
	240		6	201		T96
	240		10	243		T97
	240		10	173		T98
	260		6	201		E18
	280		10	201		E19
	240		4	201		E20
	300		10	201		E33
	220		6	201		E34

c) Configuração P 12

Na Tabela 15 estão apresentadas as variáveis estudadas para cada ensaio da configuração P 12, juntamente com os seus respetivos valores, num total de 8 ensaios.

Tabela 15 - Condições operatórias do laser (Configuração P 12).

Configuração	Temperatura [°C]	Abertura do laser [mm]	Velocidade [mm/s]	Pressão [N]	Nr Passagens	Ensaio
P 12	240	1	10	201	2	T87
	220		10	201		T99
	260		10	201		E1
	240		8	201		E2
	240		6	201		E3
	240		10	243		E4
	240		10	173		E5
	240		12	201		E21

d) Configuração P 13

Na Tabela 16 estão apresentadas as variáveis estudadas para cada ensaio da configuração P 13, juntamente com os seus respetivos valores, total de 8 ensaios.

Tabela 16 - Condições operatórias do laser (Configuração P 13).

Configuração	Temperatura [°C]	Abertura do laser [mm]	Velocidade [mm/s]	Pressão [N]	Nr Passagens	Ensaio
P 13	240	1	10	201	2	T88
	220		10	201		E6
	260		10	201		E7
	240		8	201		E8
	240		6	201		E9
	240		10	243		E10
	240		10	173		E11
	240		12	201		E22

e) Configuração P 17
f)

Na Tabela 17 estão apresentadas as variáveis estudadas para cada ensaio da configuração P 17, juntamente com os seus respetivos valores, num total de 8 ensaios.

Tabela 17 - Condições operatórias do laser (Configuração P 17).

Configuração	Temperatura [°C]	Abertura do laser [mm]	Velocidade [mm/s]	Pressão [N]	Nr Passagens	Ensaio
P 17	240	1	10	201	2	T89
	220		10	201		E12
	220		8	201		E13
	220		10	243		E14
	220		6	201		E15
	260		10	201		E23
	220		4	201		E24
	220		10	173		E25

Planeamento da Tipologia de Rib Hermético

Na quarta fase do plano experimental, foram planejados os ensaios da tipologia de *rib* hermética. Esta fase foi dividida em cinco configurações, com dimensões diferentes das duas primeiras tipologias. Assim, começou-se o planeamento dos ensaios pela configuração P 18, seguida sucessivamente pela P 19, P 20, P 21 e por fim P 22.

Em todas as configurações e para todos os ensaios, variou-se apenas as variáveis da pressão de aperto, temperatura e velocidade do laser, mantendo constantes as condições operatórias de abertura do laser e número de passagens, em 2 mm e duas passagens, respetivamente.

a) Configuração P 18

Na Tabela 18 estão apresentadas as variáveis estudadas para cada ensaio da configuração P 18, juntamente com os seus respetivos valores, num total de 4 ensaios.

Tabela 18 - Condições operatórias do laser (Configuração P 18).

Configuração	Temperatura [°C]	Abertura do laser [mm]	Velocidade [mm/s]	Pressão [N]	Nr Passagens	Ensaio
P 18	260	2	10	201	1	H1
	260		10	243		H2
	260		8	201		H3
	280		10	201		H4

b) Configuração P 19

Na Tabela 19 estão apresentadas as variáveis estudadas para cada ensaio da configuração P 19, juntamente com os seus respetivos valores, num total de 4 ensaios.

Tabela 19 -Condições operatórias do laser (Configuração P 19).

Configuração	Temperatura [°C]	Abertura do laser [mm]	Velocidade [mm/s]	Pressão [N]	Nr Passagens	Ensaio
P 19	260	2	10	201	1	H5
	260		10	243		H6
	260		8	201		H7
	280		10	201		H8

c) Configuração P 20

Na Tabela 20 estão apresentadas as variáveis estudadas para cada ensaio da configuração P 20, juntamente com os seus respetivos valores, num total de 6 ensaios.

Tabela 20 - Condições operatórias do laser (Configuração P 20).

Configuração	Temperatura [°C]	Abertura do laser [mm]	Velocidade [mm/s]	Pressão [N]	Nr Passagens	Ensaio
P 20	260	2	10	201	1	H9
	260		10	243		H10
	260		8	201		H11
	240		10	201		H26
	260		12	201		H27
	220		10	201		H32

d) Configuração P 21

Na Tabela 21 estão apresentadas as variáveis estudadas para cada ensaio da configuração P 21, juntamente com os seus respetivos valores, num total de 10 ensaios.

Tabela 21 - Condições operatórias do laser (Configuração P 21).

Configuração	Temperatura [°C]	Abertura do laser [mm]	Velocidade [mm/s]	Pressão [N]	Nr Passagens	Ensaio
P 21	260	2	10	201	1	H13
	260		10	243		H14
	260		8	201		H15
	260		6	201		H21
	240		10	201		H22
	280		10	201		H23
	260		4	201		H28
	280		6	201		H29
	240		6	201		H33
	220		6	201		H34

e) Configuração P 22

Na Tabela 22 estão apresentadas as variáveis estudadas para cada ensaio da configuração P 22, juntamente com os seus respetivos valores, num total de 8 ensaios.

Tabela 22 - Condições operatórias do laser (Configuração P 22).

Configuração	Temperatura [°C]	Abertura do laser [mm]	Velocidade [mm/s]	Pressão [N]	Nr Passagens	Ensaio
P 22	260	2	10	201	1	H17
	260		10	243		H18
	260		8	201		H19
	280		10	201		H20
	240		10	201		H24
	260		12	201		H25
	260		14	201		H31
	220		10	201		H35

Planeamento da Tipologia Rib Trapezoidal

Na última fase do plano experimental, foram planejados os ensaios da tipologia de *rib* trapezoidal. Esta secção apresenta apenas uma configuração designada P 9.

a) Configuração P 9

Na Tabela 23 estão apresentadas as variáveis estudadas para cada ensaio, juntamente com os seus respetivos valores, num total de 12 ensaios.

Para a configuração P 9, todas as variáveis foram analisadas à exceção do número de passagens que se manteve em duas passagens.

Tabela 23 - Condições operatórias do laser (Configuração P 9).

Configuração	Temperatura [°C]	Abertura do laser [mm]	Velocidade [mm/s]	Pressão [N]	Nr Passagens	Ensaio
P 9	240	1	10	201	2	E16
	240	2	10	201		E17
	240	1	12	201		E26
	240	1	8	201		E27
	220	1	10	201		E28
	260	1	10	201		E29
	240	1	10	173		E30
	240	1	10	243		E31
	240	1	6	201		E36
	220	1	10	243		E37

Terminado o planeamento para todas as tipologias e configurações de *rib,* foram realizados um total de 178 ensaios. Divididos em 26 ensaios sem *rib,* 57 com *rib* retangular, 50 com *rib* triangular, 32 com *rib* hermético e por último 12 com *rib* trapezoidal.

ii. Processo de Soldadura laser por transmissão

Após a definição da conjuntura dos parâmetros de soldadura do laser para os ensaios, iniciou-se o processo de soldadura laser por transmissão em 6 dos 8 provetes obtidos através da moldação por injeção. A soldadura a laser por transmissão foi realizada no PIEP, assim como no primeiro estudo de caso – Parte transparente (PMMA). Portanto, todos os instrumentos utilizados e procedimentos empregues foram os mesmos, conforme descrito no capítulo 3.2.3. A única diferença entre os estudos ocorreu nos parâmetros de soldadura, que neste caso foram adaptados consoante o plano de experimentos dos ensaios. Assim, desta forma seguiu-se o plano experimental previamente realizado, com variações nas condições operatórias, como demonstrado nas Tabela 7 a Tabela 23.

A Figura 31 mostra uma soldadura já efetuada. Na figura é possível observar a linha de soldadura entre os dois provetes. O provete à esquerda da figura é o provete transparente à radiação do laser. O provete preto à direita da figura é o provete absorvente à radiação, neste caso, com uma secção triangular de *rib.*

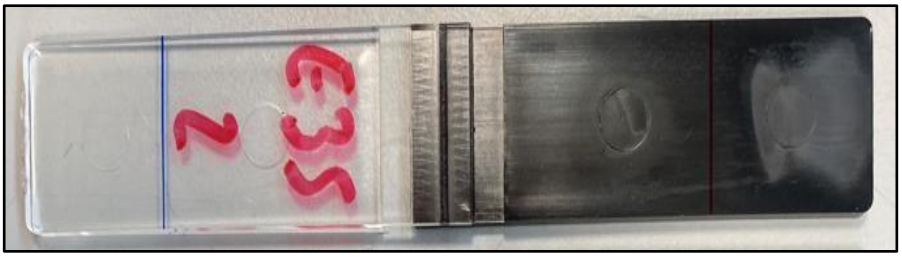


Figura 31 - Peça soldada (Segundo caso de estudo PC/ABS com rib triangular)

3.3.4 Caracterização do PC/ABS

Neste tópico, posteriormente à soldadura laser por transmissão de todos os ensaios, procedeu-se à caracterização mecânica e ótica dos provetes soldados. O objetivo foi avaliar a influência das condições operatórias do laser no desempenho mecânico e ótico consoante as diferentes configurações de *rib* analisadas.

i. Ensaios Mecânicos (Tração)

O ensaio de tração permite observar a resistência da força de adesão entre dois materiais a unir, neste caso o PMMA e o PC/ABS. Desta forma, utilizou-se uma máquina de ensaios universal *INSTRON* modelo 5969, equipada com o *software Instron Bluehill*, para averiguar qual a carga máxima alcançada entre os provetes soldados.

De modo a determinar quais as condições de soldadura mais adequadas para cada tipologia de *rib*, com a finalidade de obter uma junta com maior resistência mecânica e eficiência em termos de relação de força de rutura e material utilizado no *rib*. Os ensaios foram realizados à temperatura ambiente com o posicionamento dos provetes a 180° e submetidos a uma deformação uniaxial a velocidade constante de 1 mm/s e uma distância entre amarras de 90 mm. Os provetes foram fixados a 25 mm de cada extremidade nas amarras, onde na amarra superior ficou o termoplástico rígido PC/ABS e na inferior o PMMA, como demonstrado na Figura 32.

Figura 32 - Provete fixo com 90 mm de distância entre amarras

ii. Ensaios Óticos (Microscopia)

Os ensaios óticos serviram para avaliar o comportamento das diferentes geometrias de *rib* na linha de soldadura, em específico foi medido a largura e altura das respetivas soldaduras. Foi utilizado um microscópio ótico de reflexão OLYMPUS BH-2, com imagens capturadas pelo *software Leica Application Suite* versão 4.4 e recolhidas pela câmara digital LEICA MTV-3. Recorreu-se ao uso de uma ocular de 2,65x e 1,67x, sendo que a ocular 1,67x esteve em uso maioritariamente por isso a dificuldade em conseguir imagens com uma cobertura da zona soldada maior, e uma objetiva de 5x.

Antes de se proceder aos ensaios, a seleção e preparação da amostra são alguns dos fatores mais importantes e relevantes no processo de microscopia, assim, a escolha correta de todos os materiais, tal como o tipo de corte, particularmente, são fundamentais na realização de um ensaio com resultados coerentes.

Para a preparação das amostras foi utilizada uma serra de fio de diamante de forma a primeiramente cortar as amostras depois estas, com auxílio de uma cola, foram fixadas a um molde base, para posterior segregação, e mergulhadas numa resina fria de epóxi com o intuito de obter a amostra a visualizar agregada numa forma de resina, com as dimensões do molde base. Após alguns dias, necessários para o endurecimento da resina e com a zona amostral agregada, procedeu-se à realização do tratamento através do polimento, foram polidas com lixas de 2500, seguidas por lixas de 4000. Contudo em diversos casos as imagens retiradas após o polimento com lixas de 4000 não apresentaram uma nitidez necessária para a realização de medições, assim a maioria das imagens foram obtidas após polimento em lixa de 2500.

É necessário referir que o fio da serra começou a perder rugosidade o que se tornou visível, em algumas amostras mesmo após polimento, imagens com vários riscos profundos e alguma dificuldade de distinção e visualização da linha de soldadura.

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

4.1 Primeiro Caso de Estudo: Parte Transparente (PMMA)

4.1.1 Caracterização do PMMA e Misturas

i. Medição da Cor

Realizou-se a medição da cor das diferentes misturas em todas as concentrações na matriz polimérica, com o objetivo de compreender, catalogar e comparar as diferenças da cor de forma precisa, neste caso com valores numéricos dentro do espaço de cor CIELab.

Exemplificando, as coordenadas fornecidas pelo espectrofotómetro permitem compreender com exatidão as diferenças na cor, tanto na adição da matriz polimérica de pigmento inorgânico azul 29 como de corante azul 104. Os resultados obtidos permitem fornecer *insights* valiosos para a compreensão e comparação das características de cor e, portanto, da sua aplicabilidade.

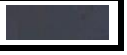
Na Tabela 24 encontram-se catalogadas as médias dos resultados obtidos de todas as misturas em todas as concentrações, juntamente com uma foto ilustrativa dos respetivos provetes.

Tabela 24 - Coordenadas de cor (CIELab) dos Pigmentos e Corantes em todas as concentrações.

(continua)

Pigmentos/Corantes		Concentração	Coordenadas de Cor			Fotos Provetes
			Luminosidade (L*)	Tonalidade (a*)	Saturação (b*)	
Pigmentos Orgânicos	Verde 7	0,5%	25,0	-11,9	-2,2	
		1,0%	23,5	-10,4	-2,7	
		2,0%	22,1	-6,7	-3,2	
	Vermelho 144	0,5%	36,0	25,7	20,3	
		1,0%	37,2	29,2	22,2	
		2,0%	39,2	34,2	24,5	
	Amarelo 191	0,5%	51,0	-14,2	37,9	
		1,0%	57,7	-12,3	49,6	
		2,0%	64,3	-9,5	59,5	
	Azul 15:1	0,5%	22,4	6,6	-17,9	
		1,0%	22,3	6,1	-13,5	
		2,0%	21,8	10,3	-18,4	

(conclusão)

Pigmentos/Corantes		Concentração	Coordenadas de Cor			Fotos Provetes
			Luminosidade (L*)	Tonalidade (a*)	Saturação (b*)	
Pigmentos Inorgânicos/Pastas	Negro de Fumo	0,5%	24,5	0,1	-1,2	
		1,0%	23,1	0,3	-1,3	
		2,0%	22,4	0,2	-1,4	
	Dióxido de Titânio	0,5%	70,8	-4,5	-1,3	
		1,0%	76,5	-5,3	2,2	
		2,0%	83,4	-4,5	0,9	
	Óxido de Ferro	0,5%	36,6	25,3	19,8	
		1,0%	36,7	26,0	19,6	
		2,0%	36,8	26,4	18,8	
	Azul 29	0,5%	29,3	-0,1	-9,5	
		1,0%	25,6	1,3	-16,9	
		2,0%	23,8	5,3	-19,7	
	Bronze	0,5%	52,4	-1,3	15,5	
		1,0%	54,7	-2,2	22,8	
		2,0%	58,1	-2,9	24,9	
	Alumínio	0,5%	61,8	-0,6	-2,6	
		1,0%	62,0	-0,6	-2,6	
		2,0%	64,5	-0,9	-2,8	
Corantes	Verde 28	0,5%	20,6	-4,6	-0,5	
		1,0%	19,7	-1,8	-1,2	
		2,0%	19,1	-0,3	-1,6	
	Vermelho 135	0,5%	24,7	11,3	6,4	
		1,0%	24,9	14,6	6,7	
		2,0%	23,4	12,8	4,2	
	Amarelo 114	0,5%	32,8	-4,8	20,5	
		1,0%	30,7	-4,6	17,6	
		2,0%	29,4	-1,9	15,6	
	Azul 104	0,5%	20,0	3,2	-8,8	
		1,0%	19,5	4,1	-8,6	
		2,0%	19,4	2,5	-5,5	

Na **coordenada (L*)**, L=0 indica preto absoluto e L=100 indica branco. Como se pode observar, para todas as concentrações, o índice de luminosidade mais claro, verificou-se na mistura do pigmento inorgânico dióxido de titânio como espectável com os valores de (70,8; 76,5; 83,4) para (0,5%; 1% e 2%), respetivamente. Contrariamente, as misturas dos corantes verde 28 e azul 104 em todas as concentrações apresentaram o índice de luminosidade mais escuro, com valores de (20,6; 19,7; 19,1) e (20; 19,5; 19,4) para (0,5%; 1% e

2%), respetivamente.

Na **coordenada (a*)**, valores positivos indicam uma saturação vermelha, enquanto valores negativos representam uma saturação verde. Assim, em todas as concentrações, a mistura de pigmento orgânico vermelho 144 com valores de (25,7; 29,2; 34,2) apresentou a maior saturação vermelha.

Por outro lado, a mistura de pigmento orgânico amarelo 191 em todas as concentrações apresentou a maior saturação verde, com valores de (-14,2; -12,2; -9,5).

Na **coordenada (b*)**, valores positivos indicam uma tonalidade amarela, enquanto valores negativos sugerem uma tonalidade azul. Observou-se, em todas as concentrações, que a mistura de pigmento orgânico amarelo 191 com valores de (37,9; 49,6; 59,5) apresentou a maior tonalidade amarela.

Pelo contrário, a mistura de pigmento orgânico azul 15:1 apresentou a maior tonalidade azul com 0,5% de concentração, com um valor de (-17,9). Enquanto para as restantes concentrações a mistura de pigmento inorgânico azul 29 com valores de (-16,9; -19,7), apresentou a maior tonalidade azul.

De referir que, nestas últimas duas coordenadas (a* e b*), valores próximos de zero indicam saturações e tonalidades não pronunciadas em nenhum espectro, seja vermelho/verde ou amarelo/azul indicando uma cor mais acinzentada. Este efeito foi mais notório no caso do pigmento inorgânico negro de fumo e alumínio, bem como no verde 28.

Comparação das misturas consoante o aumento da concentração

Depois de catalogadas todas as misturas de pigmentos e corantes nas diferentes concentrações, realizou-se o cálculo das equações 3, 4, 5 e 6, conforme descrito em 3.2.2. Os resultados obtidos, permitiram verificar as diferenças exatas em cada coordenada de cor (L*, a* e b*) e magnitude de cor (E*) de cada mistura individualmente consoante o aumento de concentração, nomeadamente na transição de 0,5% para 1% e de 1% para 2%, conforme apresentado na Tabela 25.

Na primeira coluna da tabela, a concentração de 0,5% foi utilizada com padrão e a concentração de 1% como amostra. Enquanto na segunda coluna utilizou-se a concentração de 1% como padrão e a de 2% como amostra.

Tabela 25 – Diferenças nas Coordenadas e Magnitude de Cor entre Diferentes Concentrações dos Pigmentos e Corantes

(continua)

		(0,5% → 1%)	(1% → 2%)
Pigmentos Orgânicos	Verde 7	ΔE= 2,1	ΔE= 4,0
		ΔL= -1,5; (1% mais escuro que 0,5%)	ΔL= -1,5; (2% mais escuro que 1%)
		Δa= 1,5; (1% mais vermelho que 0,5%)	Δa= 3,7; (2% mais vermelho que 1%)
		Δb= -0,5; (1% mais azul que 0,5%)	Δb= -0,5; (2% mais azul que 1%)
	Vermelho 144	ΔE= 4,2	ΔE= 5,9
		ΔL= 1,2; (1% mais claro que 0,5%)	ΔL= 2,0; (2% mais claro que 1%)
		Δa= 3,5; (1% mais vermelho que 0,5%)	Δa= 5,0; (2% mais vermelho que 1%)
		Δb= 1,9; (1% mais amarelo que 0,5%)	Δb= 2,2; (2% mais amarelo que 1%)
	Amarelo 191	ΔE= 13,7	ΔE= 12,2
		ΔL= 6,7; (1% mais claro que 0,5%)	ΔL= 6,6; (2% mais claro que 1%)
		Δa= 1,9; (1% mais vermelho que 0,5%)	Δa= 2,7; (2% mais vermelho que 1%)
		Δb= 11,8; (1% mais amarelo que 0,5%)	Δb= 9,9; (2% mais amarelo que 1%)
	Azul 15:1	ΔE= 4,4	ΔE= 6,5
		ΔL= -0,1; (1% mais escuro que 0,5%)	ΔL= -0,5; (2% mais escuro que 1%)
		Δa= -0,6; (1% mais verde que 0,5%)	Δa= 4,3; (2% mais vermelho que 1%)
		Δb= 4,4; (1% mais amarelo que 0,5%)	Δb= -4,9; (2% mais azul que 1%)
Pigmentos Inorgânicos/Pastas	Negro Fumo	ΔE= 1,4	ΔE= 0,7
		ΔL= -1,4; (1% mais escuro que 0,5%)	ΔL= -0,7; (2% mais escuro que 1%)
		Δa= 0,2; (1% mais vermelho que 0,5%)	Δa= -0,1; (2% mais verde que 1%)
		Δb= -0,1; (1% mais azul que 0,5%)	Δb= -0,1; (2% mais azul que 1%)
	Dióxido Titânio	ΔE= 6,7	ΔE= 7,1
		ΔL= 5,7; (1% mais claro que 0,5%)	ΔL= 6,9; (2% mais claro que 1%)
		Δa= -0,8; (1% mais verde que 0,5%)	Δa= 0,8; (2% mais vermelho que 1%)
		Δb= 3,4; (1% mais amarelo que 0,5%)	Δb= -1,3; (2% mais azul que 1%)
	Óxido Ferro	ΔE= 0,7	ΔE= 1,0
		ΔL= 0,1; (1% mais claro que 0,5%)	ΔL= 0,1; (2% mais claro que 1%)
		Δa= 0,7; (1% mais vermelho que 0,5%)	Δa= 0,4; (2% mais vermelho que 1%)
		Δb= -0,1; (1% mais azul que 0,5%)	Δb= -0,9; (2% mais azul que 1%)
	Azul 29	ΔE= 8,4	ΔE= 5,2
		ΔL= -3,7; (1% mais escuro que 0,5%)	ΔL= -1,8; (2% mais escuro que 1%)
		Δa= 1,4; (1% mais vermelho que 0,5%)	Δa= 4,0; (2% mais vermelho que 1%)
		Δb= -7,4; (1% mais azul que 0,5%)	Δb= -2,8; (2% mais azul que 1%)
	Bronze	ΔE= 7,7	ΔE= 4,1
		ΔL= 2,3; (1% mais claro que 0,5%)	ΔL= 3,4; (2% mais claro que 1%)
		Δa= -0,9; (1% mais verde que 0,5%)	Δa= -0,8; (2% mais verde que 1%)
		Δb= 7,3; (1% mais amarelo que 0,5%)	Δb= 2,1; (2% mais amarelo que 1%)
	Alumínio	ΔE= 0,2	ΔE= 2,5
		ΔL= 0,2; (1% mais claro que 0,5%)	ΔL= 2,5; (2% mais claro que 1%)
		Δa= 0; (1% igual a 0,5%)	Δa= -0,3; (2% mais verde que 1%)
		Δb= 0; (1% igual a 0,5%)	Δb= -0,1; (2% mais azul que 1%)

(conclusão)

		(0,5% → 1%)	(1% → 2%)
Corantes	Verde 28	ΔE= 3,1	ΔE= 1,7
		ΔL= -1,0; (1% mais escuro que 0,5%)	ΔL= -0,6; (2% mais escuro que 1%)
		Δa= 2,8; (1% mais vermelho que 0,5%)	Δa= 1,5; (2% mais vermelho que 1%)
		Δb= -0,7; (1% mais azul que 0,5%)	Δb= -0,5; (2% mais azul que 1%)
	Vermelho 135	ΔE= 3,3	ΔE= 3,4
		ΔL= 0,2; (1% mais claro que 0,5%)	ΔL= -1,5; (2% mais escuro que 1%)
		Δa= 3,3; (1% mais vermelho que 0,5%)	Δa= -1,8; (2% mais verde que 1%)
		Δb= 0,3; (1% mais amarelo que 0,5%)	Δb= -2,5; (2% mais azul que 1%)
	Amarelo 114	ΔE= 3,6	ΔE= 3,6
		ΔL= -2,1; (1% mais escuro que 0,5%)	ΔL= -1,3; (2% mais escuro que 1%)
		Δa= 0,2; (1% mais vermelho que 0,5%)	Δa= 2,7; (2% mais vermelho que 1%)
		Δb= -2,9; (1% mais azul que 0,5%)	Δb= -2,0; (2% mais azul que 1%)
	Azul 104	ΔE= 1,0	ΔE= 3,5
		ΔL= -0,5; (1% mais escuro que 0,5%)	ΔL= -0,1; (2% mais escuro que 1%)
		Δa= 0,9; (1% mais vermelho que 0,5%)	Δa= -1,6; (2% mais verde que 1%)
		Δb= 0,2; (1% mais amarelo que 0,5%)	Δb= 3,1; (2% mais amarelo que 1%)

Magnitude de cor (ΔE*): ao analisar os dados tabelados em ambas as colunas, observou-se que a diferença total de cor não apresenta variações significativas na maioria das misturas estudadas, com resultados de diferença total de cor inferiores a 10. Contudo, destaca-se a mistura de pigmento inorgânico amarelo 191, que apresenta uma diferença total na cor superior a 10 nas duas colunas.

Na **coordenada de cor (ΔL*)**, como se pode observar na primeira coluna, com uma concentração de 1% as misturas contendo pigmento orgânico verde 7 e azul 15:1, pigmento inorgânico negro de fumo e azul 29, e ainda corante verde 28, amarelo 114 e azul 104 apresentam uma luminosidade mais escura em comparação com as misturas de 0,5% de concentração. Na segunda coluna, as mesmas misturas enunciadas anteriormente, exibem resultados e comportamentos semelhantes, acrescendo a mistura de corante vermelho 135 que passa a apresentar também uma luminosidade mais escura para uma concentração de 2% comparativamente com 1%.

Era de esperar que, com o aumento da concentração, as misturas apresentassem uma luminosidade mais escura, o que não se verifica no caso das misturas com pigmento orgânico vermelho 144, amarelo 191, pigmento inorgânico dióxido de titânio, óxido de ferro, bronze e alumínio, e na adição do corante vermelho 135 na transição da concentração de 0,5% para 1%. Esse comportamento pode indicar que

uma possível má dispersão tenho ocorrido durante o processo de mistura dos pigmentos e corantes na matriz polimérica.

Nas **coordenadas de cor (Δa*)** e **(Δb*)**, esperava-se que o aumento da concentração das misturas resultasse numa saturação ou uma tonalidade mais pronunciada, respetivamente de vermelho ou verde, ou ainda de amarelo ou azul. No entanto, isso não se verificou em ambas as coordenadas nas misturas de pigmento orgânico azul 15:1, pigmento inorgânico dióxido de titânio e corante vermelho 135. Nas misturas de pigmento inorgânico negro de fumo e corante azul 104, esse fenómeno apenas se evidenciou na coordenada (Δa*). Esse comportamento indica que uma possível má dispersão tenho ocorrido durante o processo de mistura dos pigmentos e corantes na matriz polimérica, fustigado por uma mistura totalmente manual.

Comparação entre as misturas com a mesma cor e concentração

Em seguida, voltou-se a realizar o cálculo das equações 3, 4, 5 e 6, conforme descrito em 3.2.2. Neste caso utilizou-se os pigmentos orgânicos como padrão e os corantes como amostra. Nos casos específicos, utilizou-se o pigmento inorgânico azul 29 como padrão, e tanto o pigmento orgânico azul 15:1 como o corante azul 104 como amostra.

Os resultados obtidos permitiram comparar as diferenças exatas para cada coordenada de cor (L*, a* e b*) e diferença total de cor (E*), entre as mistura com a mesma designação de cor e concentração, conforme apresentado nas Tabela 26, Tabela 27 e Tabela 28.

Tabela 26 – Comparação entre misturas com a mesma coloração numa concentração de 0,5%.

(continua)

		Concentração 0,5%			
		Delta E	Delta L	Delta a	Delta b
Pigmento Orgânico	Verde 7	8,6	-4,4	7,2	1,7
Corante	Verde 28				
Pigmento Orgânico	Vermelho 144	23,0	-11,3	-14,3	-13,9
Corante	Vermelho 135				
Pigmento Orgânico	Amarelo 191	26,9	-18,3	9,4	-17,4
Corante	Amarelo 114				
Pigmento Orgânico	Azul 15:1	10,0	-2,4	-3,5	9,1
Corante	Azul 104				
Pigmento Inorgânico	Azul 29	9,9	-9,3	-3,2	0,7
Corante	Azul 104				

(conclusão)

		Concentração 0,5%			
		Delta E	Delta L	Delta a	Delta b
Pigmento Inorgânico	Azul 29	12,8	-6,9	6,7	-8,4
Pigmento Orgânico	Azul 15:1				

Tabela 27 - Comparação entre misturas com a mesma coloração numa concentração de 1%.

		Concentração 1%			
		Delta E	Delta L	Delta a	Delta b
Pigmento Orgânico	Verde 7	9,6	-3,9	8,6	1,5
Corante	Verde 28				
Pigmento Orgânico	Vermelho 144	24,6	-12,3	-14,6	-15,6
Corante	Vermelho 135				
Pigmento Orgânico	Amarelo 191	42,6	-27,0	7,7	-32,0
Corante	Amarelo 114				
Pigmento Orgânico	Azul 15:1	6,0	-2,8	-2,0	4,9
Corante	Azul 104				
Pigmento Inorgânico	Azul 29	10,7	-6,2	2,8	8,3
Corante	Azul 104				
Pigmento Inorgânico	Azul 29	6,7	-3,4	4,8	3,4
Pigmento Orgânico	Azul 15:1				

Tabela 28 - Comparação entre misturas com a mesma coloração numa concentração de 2%.

		Concentração 2%			
		Delta E	Delta L	Delta a	Delta b
Pigmento Orgânico	Verde 7	7,2	-3,0	6,4	1,6
Corante	Verde 28				
Pigmento Orgânico	Vermelho 144	33,5	-15,8	-21,4	-20,3
Corante	Vermelho 135				
Pigmento Orgânico	Amarelo 191	56,6	-34,9	7,7	-43,9
Corante	Amarelo 114				
Pigmento Orgânico	Azul 15:1	15,3	-2,4	-7,8	12,9
Corante	Azul 104				
Pigmento Inorgânico	Azul 29	15,2	-4,4	-2,8	14,3
Corante	Azul 104				
Pigmento Inorgânico	Azul 29	5,6	-2,0	5,0	1,4
Pigmento Orgânico	Azul 15:1				

Como se pode verificar nas Tabelas 28 a 30, observou-se que em todas as concentrações as maiores diferenças totais da cor (ΔE), e diferenças nas coordenadas de cor (ΔL, Δa e Δb), ocorreram entre a comparação das misturas dos

amarelos e vermelhos. Por outro lado, a comparação das misturas dos verdes e azuis, apresenta as menores diferenças nas coordenadas e magnitude de cor.

Magnitude de cor (ΔE*): evidencia-se que a diferença total de cor entre as misturas, aumenta gradualmente consoante o aumento de concentração, em específico na comparação das misturas dos vermelhos, amarelos e azuis (entre o pigmento inorgânico e o corante). Contrariamente, diminui para o caso das misturas azuis entre o pigmento inorgânico e orgânico. Oscilando nas misturas verdes e azuis (entre o pigmento orgânico e o corante).

Luminosidade (ΔL*): em todas as concentrações, todos os valores apresentados são negativos. Logo pode se afirmar que os corantes tendem a apresentar uma luminosidade mais escura em relação aos pigmentos orgânicos e inorgânico. No caso da mistura de pigmento orgânico azul 15:1, este também exibe uma luminosidade mais escura que a mistura de pigmento inorgânico azul 29.

Coordenada de cor (Δa*): valores positivos indicam que a mistura de corante exibe uma saturação avermelhada em relação à mistura de pigmento orgânico e inorgânico. Esses valores verificam-se em todas as concentrações entre as comparações das misturas verdes e amarelas, também se verificou para uma concentração de 1% entre a comparação da mistura do pigmento inorgânico azul 29 em relação ao corante

104. Com igual resultado, em todas as concentrações também a mistura de pigmento orgânico azul 15:1 apresenta uma saturação avermelhada em relação à mistura de pigmento inorgânico azul 29.

Por outro lado, valores negativos sugerem uma saturação mais esverdeada, esse comportamento observou-se nas restantes comparações não mencionadas.

Coordenada de cor (Δb*): Por último, ao observar os resultados da coordenada de cor (Δb*), valores positivos indicam que a mistura de corante exibe uma saturação mais amarelada em relação à mistura de pigmento orgânico e inorgânico. Verificou-se este fenómenoem todas as concentrações entre a comparação das misturas verdes e em todos os azuis, há exceção da concentração de 0,5% entre o pigmento orgânico azul 15:1 e inorgânico azul 29. Por outro lado, valores negativos sugerem uma tonalidade mais azulada, esse comportamento observou-se entre a comparação das misturas vermelhas e amarelas, e ainda entre o pigmento orgânico azul 15:1 e o pigmento inorgânico azul 29 numa concentração de 0,5%.

ii. Medição da Transmitância

Avaliação do Comprimento de Onda

Em baixo, da Figura 33 à Figura 36, estão apresentados os gráficos relativos à percentagem de transmitância transmitida em função dos comprimentos de onda estudados, nomeadamente 940 nm e 1040 nm. Foram analisadas todas as espessuras dos provetes de PMMA, contendo as misturas de pigmentos e corantes com 0,5% de concentração. (Os demais gráficos com as concentrações de 1% e 2% encontram-se no Anexo 6).

Os gráficos permitiram avaliar e determinar qual o comprimento de onda mais adequado para a realização do processo de soldadura a laser por transmissão, tendo em conta a matéria prima utilizada, neste caso o PMMA e a respetiva incorporação de pigmentos e corantes.

PMMA Natural (Transparente)

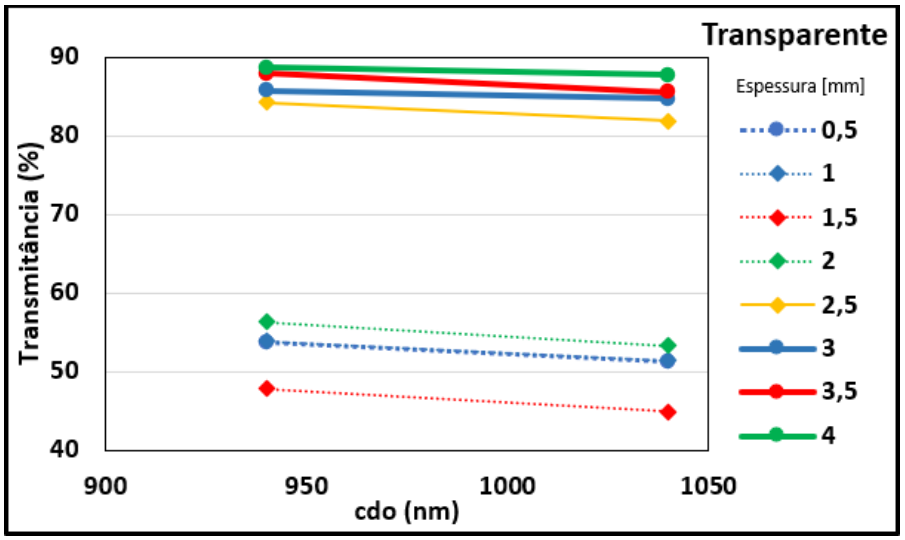


Figura 33 - Transmitância do PMMA em função dos comprimentos de onda de 940 e 1040 nm

Pigmentos Orgânicos

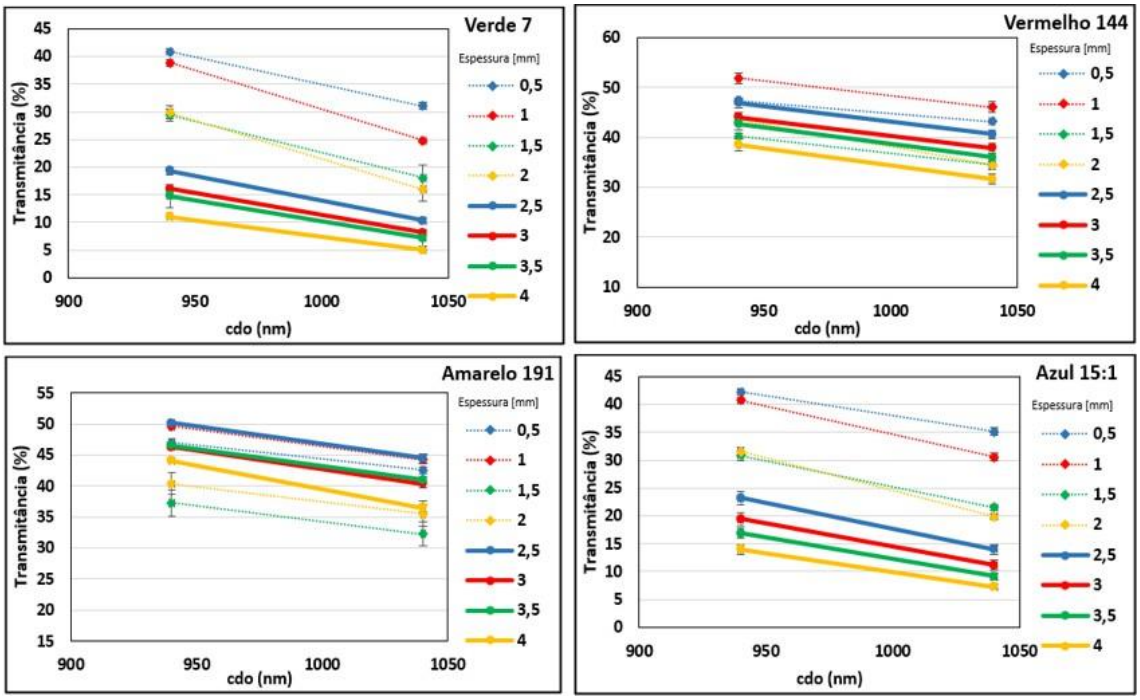


Figura 34 - Transmitância da mistura com 0,5% de concentração nos Pigmentos Orgânicos em função dos comprimentos de onda de 940 e 1040 nm

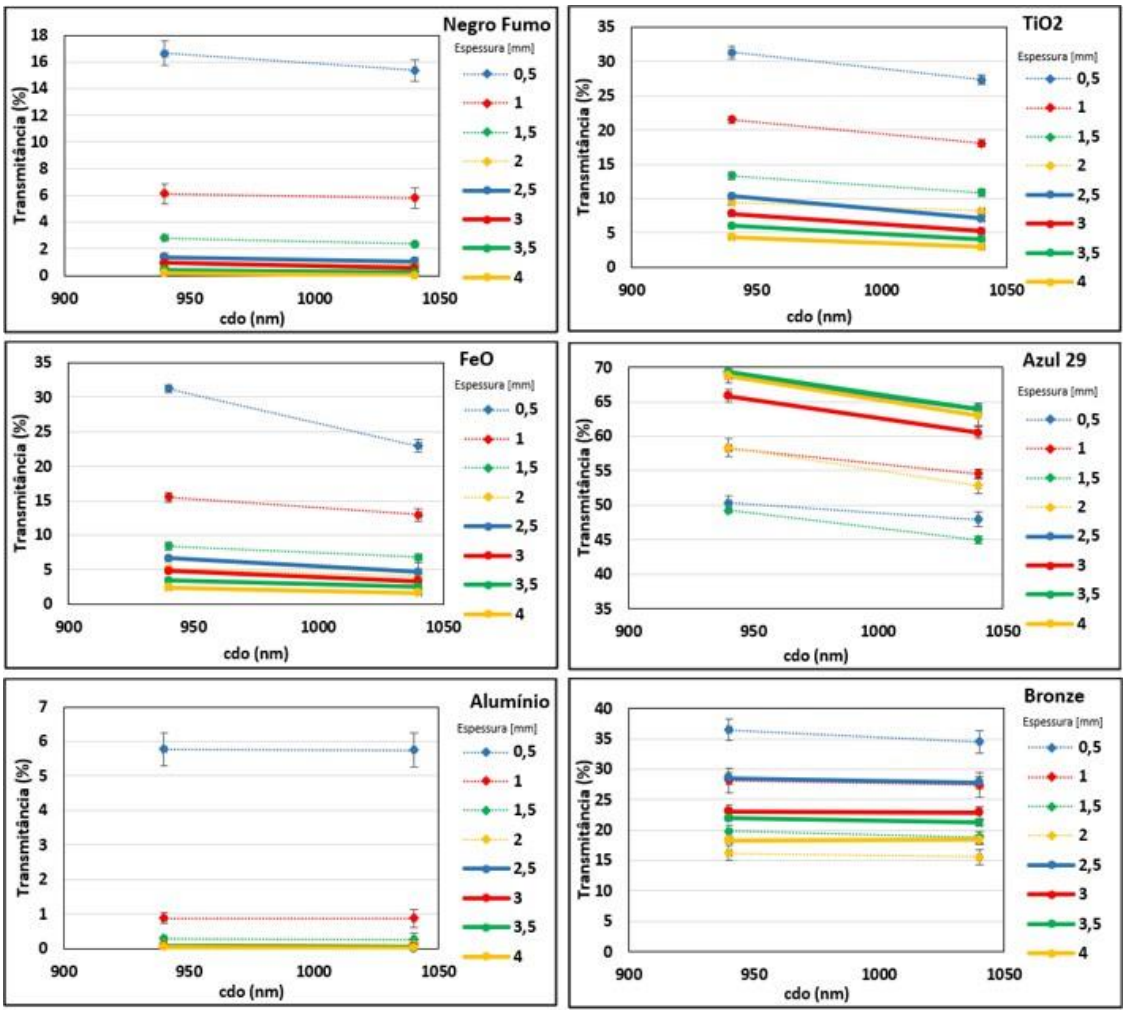


Figura 35 - Transmitância da mistura com 0,5% de concentração nos Pigmentos Inorgânicos em função dos comprimentos de onda de 940 e 1040 nm

Corantes

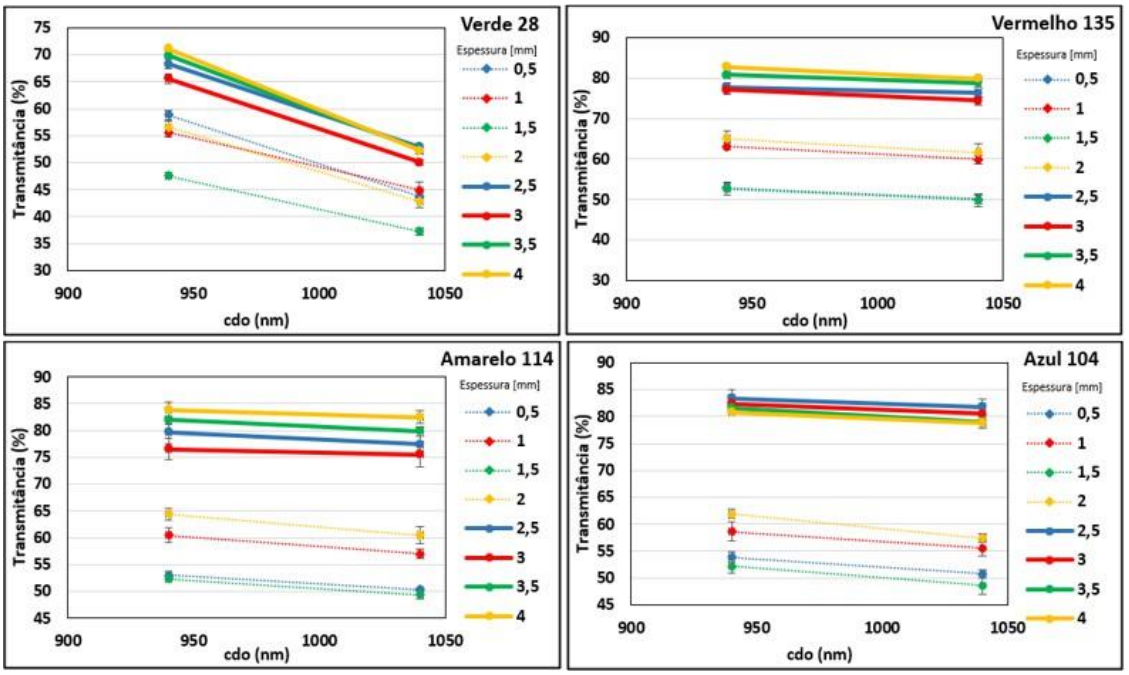


Figura 36 - Transmitância da mistura com 0,5% de concentração nos Corantes em função dos comprimentos de onda de 940 e 1040 nm

A análise dos resultados começou com o gráfico do PMMA, utilizado como base de referência para as demais análises. Verificou-se que a variação percentual de transmitância entre os comprimentos de onda de 940 nm e 1040 nm foi mínima. A ligeira queda na transmitância com o comprimento de onda de 1040 nm mostrou que o PMMA, em todas as espessuras, é ligeiramente mais absorvente nesse comprimento de onda, resultando em uma transmitância mais eficiente em 940 nm.

Esse comportamento foi semelhante para a mistura de pigmento inorgânico negro de fumo, bronze, e em todos os corantes, exceto o Verde 28. Neste último, também houve uma pequena redução na transmitância com o aumento do comprimento de onda, embora não tão acentuada quanto nos outros corantes.

Por outro lado, todas as misturas contendo pigmentos orgânicos, corante Verde 28 e os pigmentos inorgânicos dióxido de titânio, óxido de ferro e azul 29 apresentaram variações mais pronunciadas na transmitância ao aumentar o comprimento de onda, independentemente da espessura do provete.

De forma geral, todos os materiais analisados apresentaram um decréscimo na transmitância ao passar de 940 nm para 1040 nm, indicando que o comprimento de onda de 940 nm oferece o melhor desempenho para a soldadura a laser por

transmissão.

Avaliação da espessura e concentração na transmitância

Na Figura 37 a Figura 51, são apresentados os resultados percentuais de transmitância do PMMA e das respetivas misturas com três diferentes níveis de concentração, observados em função do aumento de espessura para o comprimento de onda de 940 nm, que demonstrou maior transmitância.

PMMA Natural (Transparente)

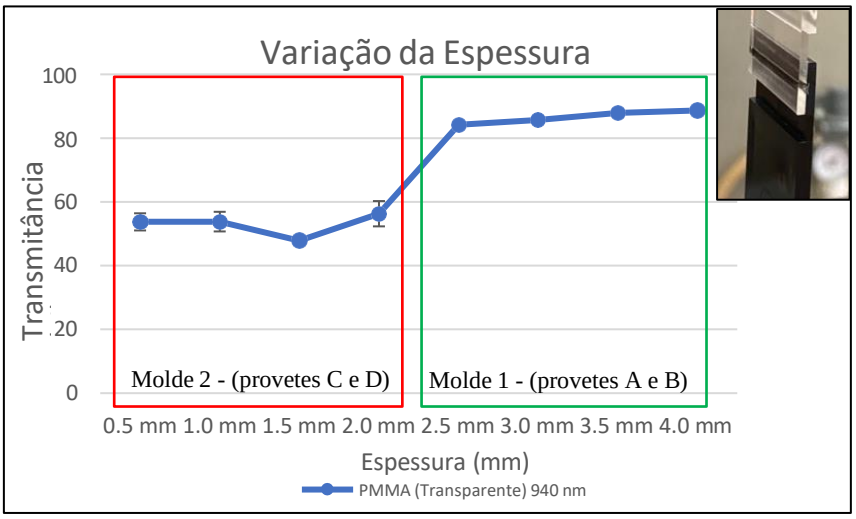


Figura 37 - Variação da espessura dos provetes na transmitância, para PMMA transparente

Pigmentos Orgânicos

Verde 7

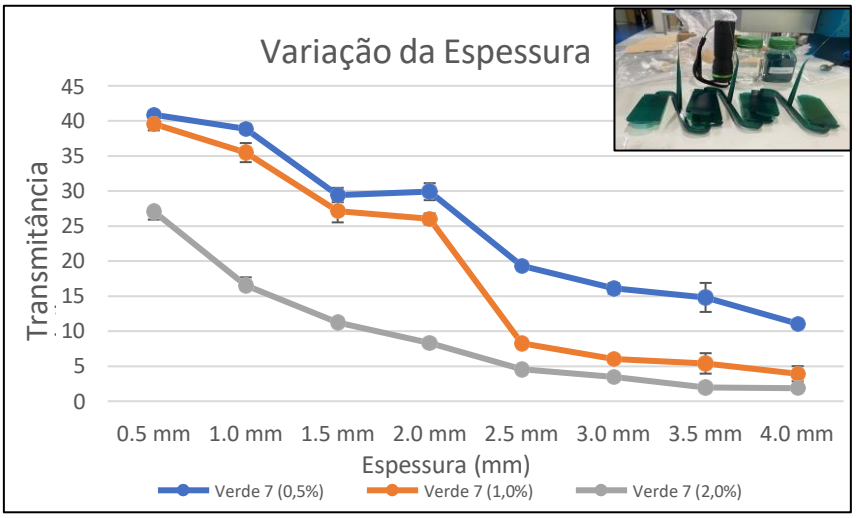


Figura 38 - Variação da espessura dos provetes na transmitância, em concentrações de 0,5% e 1,0% e 2,0% de Verde 7.

Vermelho 144

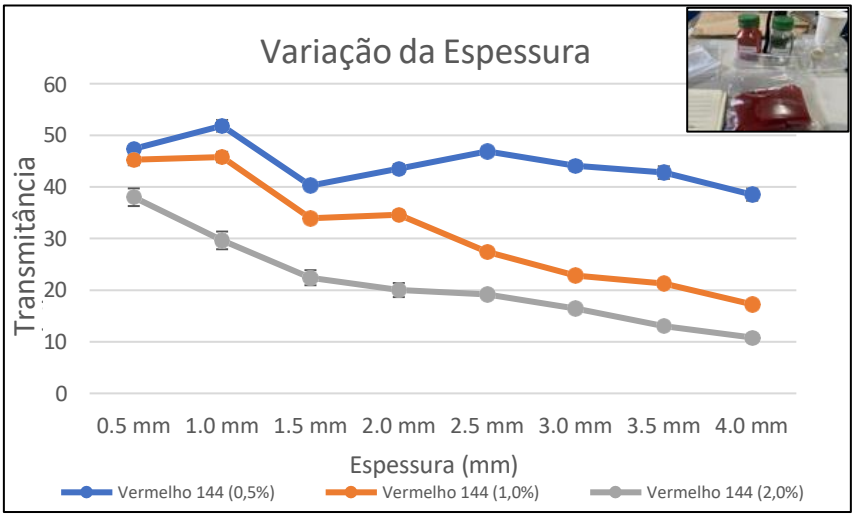


Figura 39 - Variação da espessura dos provetes na transmitância, em concentrações de 0,5% e 1,0% e 2,0% de Vermelho 144.

Amarelo 191

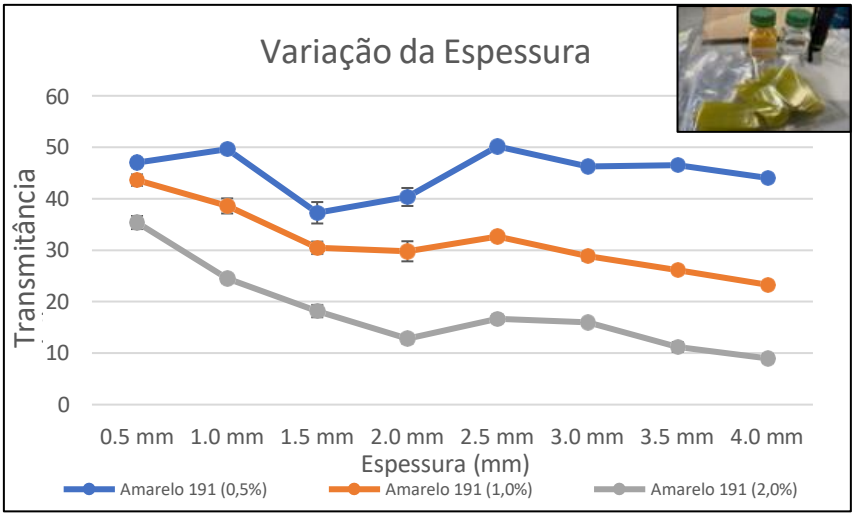


Figura 40 - Variação da espessura dos provetes na transmitância, em concentrações de 0,5% e 1,0% e 2,0% de Amarelo 191.

Azul 15:1

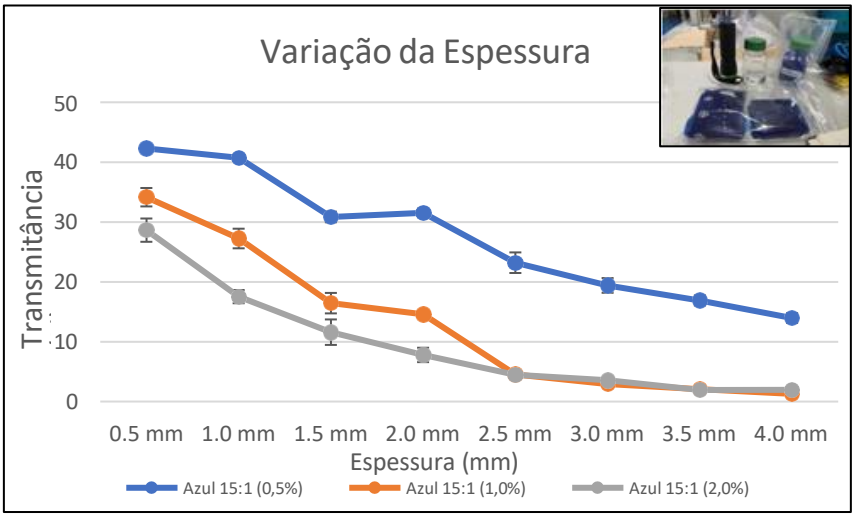


Figura 41 - Variação da espessura dos provetes na transmitância, em concentrações de 0,5% e 1,0% e 2,0% de Azul 15:1.

Pigmentos Inorgânicos

Negro de Fumo

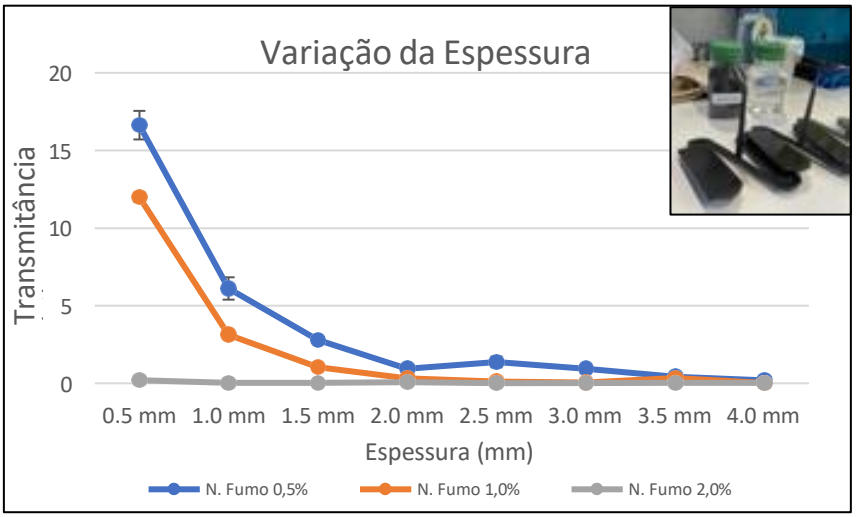


Figura 42 - Variação da espessura dos provetes na transmitância, em concentrações de 0,5% e 1,0% e 2,0% de Negro de Fumo.

Dióxido de Titânio

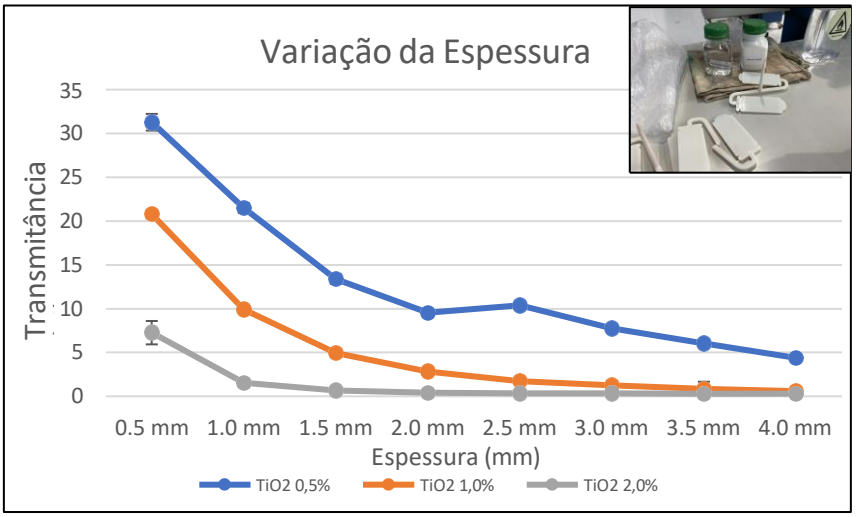


Figura 43 - Variação da espessura dos provetes na transmitância, em concentrações de 0,5% e 1,0% e 2,0% de Dióxido de Titânio (TiO2).

Óxido de Ferro

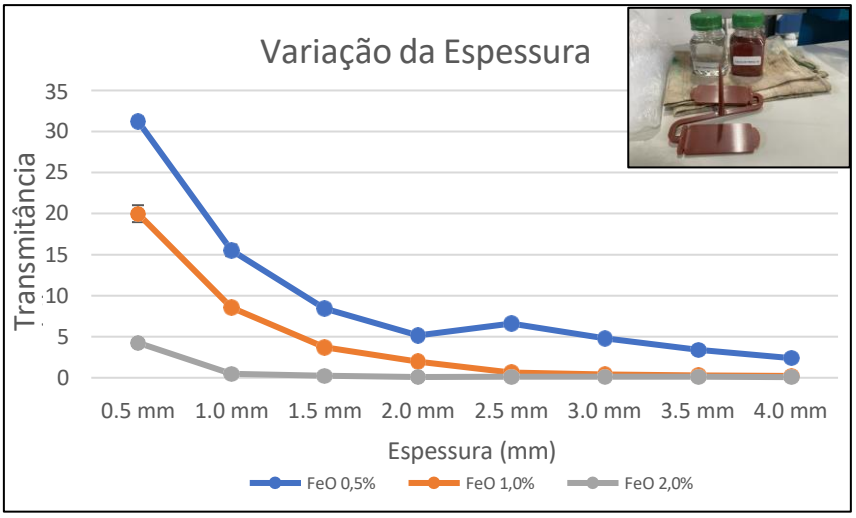


Figura 44 - Variação da espessura dos provetes na transmitância, em concentrações de 0,5% e 1,0% e 2,0% de Óxido de Ferro (Feo).

Azul 29

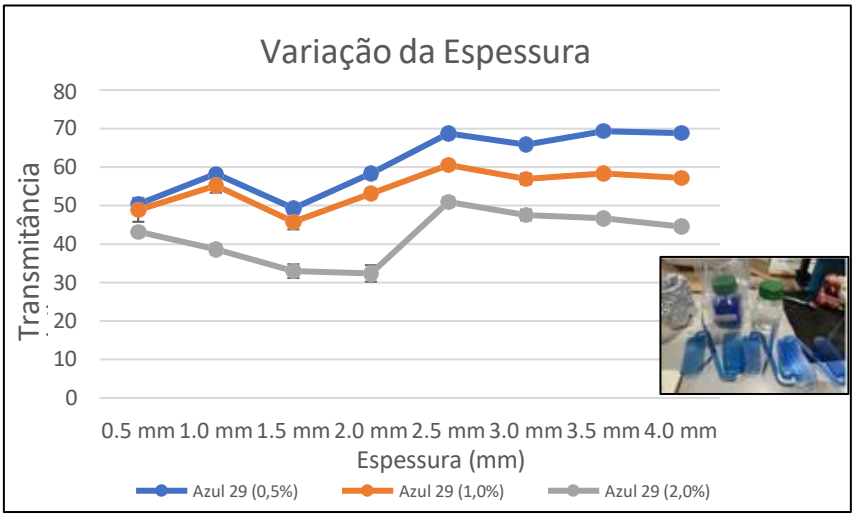


Figura 45 - Variação da espessura dos provetes na transmitância, em concentrações de 0,5% e 1,0% e 2,0% de Azul 29.

Alumínio

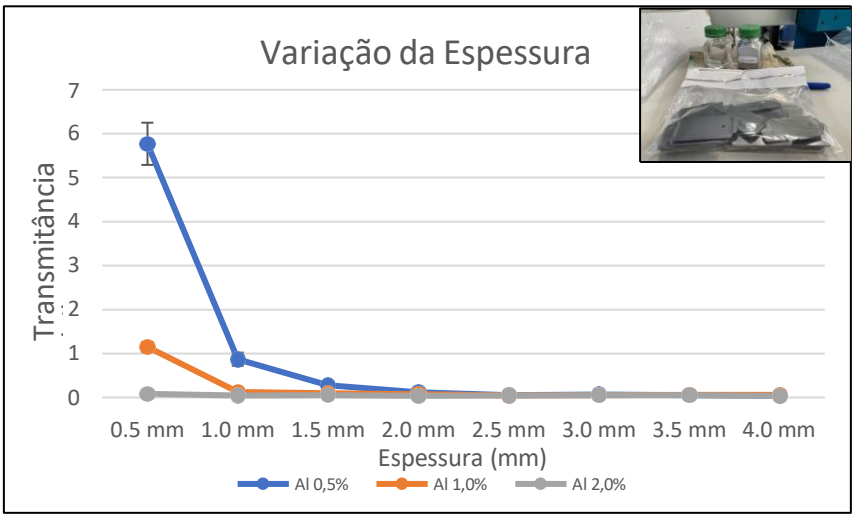


Figura 46 - Variação da espessura dos provetes na transmitância, em concentrações de 0,5% e 1,0% e 2,0% de Alumínio

Bronze

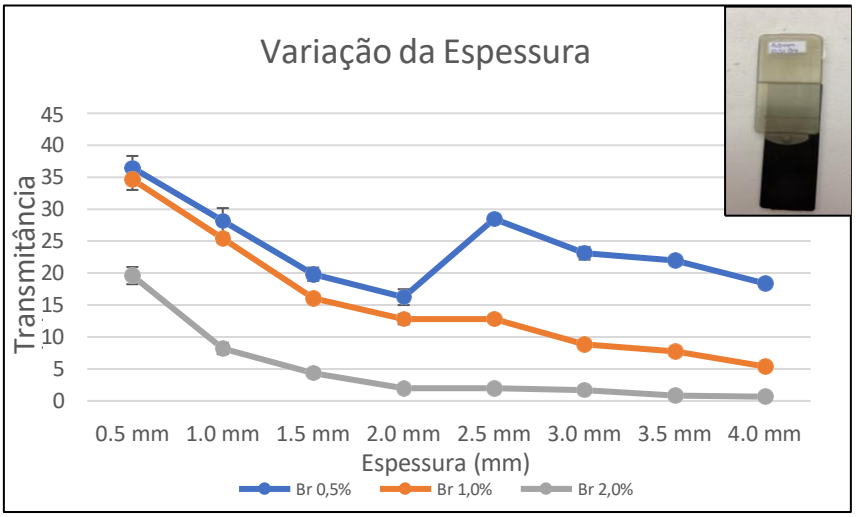


Figura 47 - Variação da espessura dos provetes na transmitância, em concentrações de 0,5% e 1,0% e 2,0% de Bronze.

Corantes

Verde 28

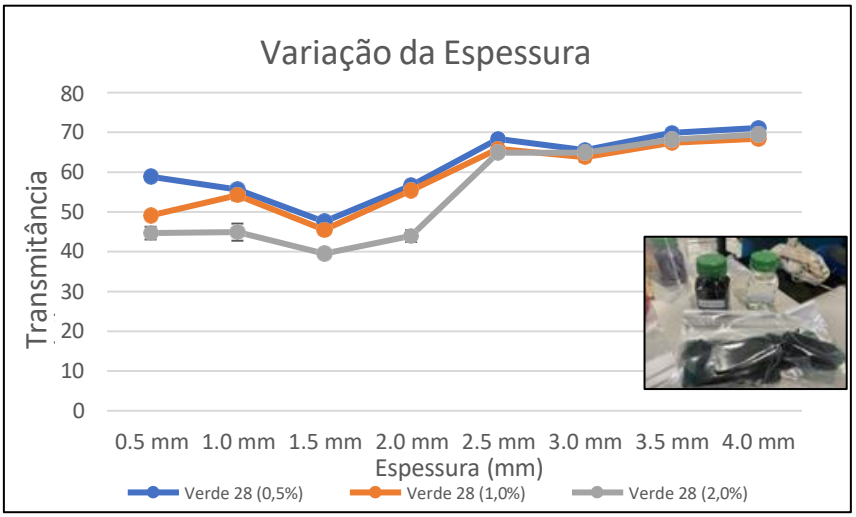


Figura 48 - Variação da espessura dos provetes na transmitância, em concentrações de 0,5% e 1,0% e 2,0% de Verde 28.

Vermelho 135

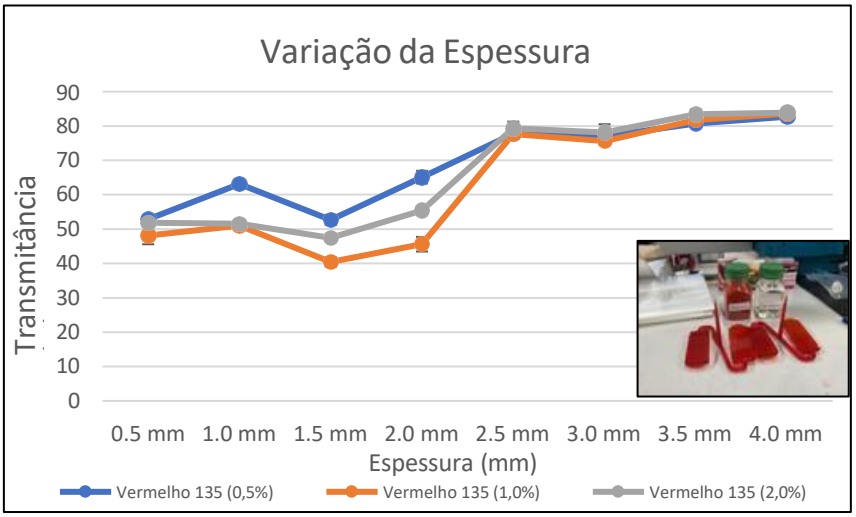


Figura 49 - Variação da espessura dos provetes na transmitância, em concentrações de 0,5% e 1,0% e 2,0% de Vermelho 135.

Amarelo 114

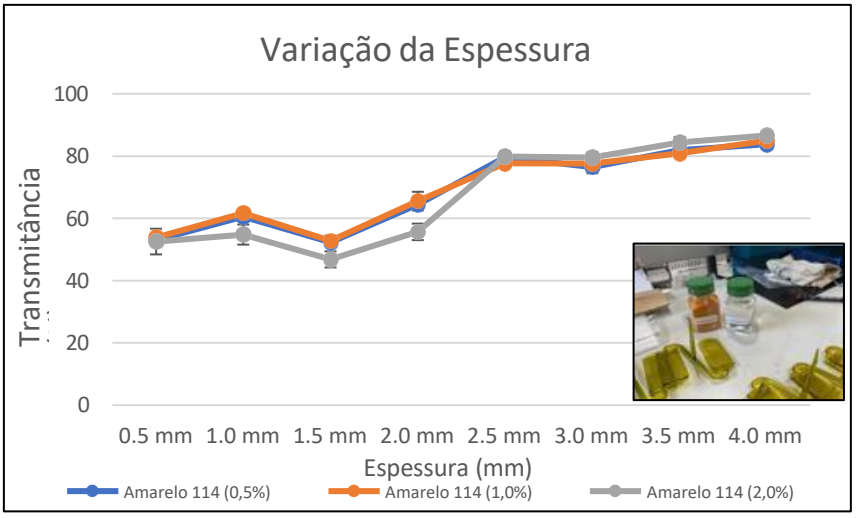


Figura 50 - Variação da espessura dos provetes na transmitância, em concentrações de 0,5% e 1,0% e 2,0% de Amarelo 114.

Azul 104

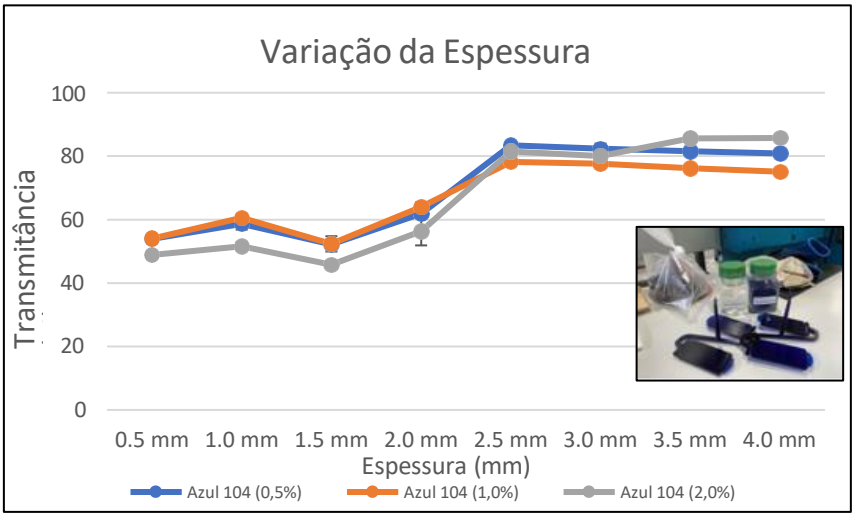


Figura 51 - Variação da espessura dos provetes na transmitância, em concentrações de 0,5% e 1,0% e 2,0% de Azul 104.

a) Espessura

A análise dos resultados começou com o gráfico do PMMA transparente (Figura 37), que serviu como referência para as análises subsequentes das misturas. Observou-se que, ao contrário do esperado, a percentagem de transmitância não diminuiu com o aumento da espessura. Pelo contrário, a transmitância aumentou conforme o aumento da espessura. Atendendo aos resultados, os provetes de menor espessura dos 0,5 mm até aos 2 mm apresentaram valores de transmitância na ordem do 60%, enquanto os de maior espessura dos 2 mm até aos 4 mm registaram transmitância em torno dos 90%, resultando num aumento de 30% na quantidade de luz transmitida.

Dado que esses resultados divergiram dos relatados na literatura, foi realizada uma análise mais aprofundada e com outro escrutínio. Separaram-se os valores obtidos no gráfico da Figura 37, mediante as duas placas de molde utilizadas: respetivamente MOLDE 1 para os provetes A e B mais espessos (representado pelo retângulo verde no gráfico) e MOLDE 2 para os provetes C e D menos espessos (retângulo vermelho no gráfico). Considerando essa separação, a tendência de aumento da transmitância com a espessura permaneceu em ambas as placas de molde.

Na Figura 48 a Figura 51, que exibem os resultados de transmitância para as

diferentes misturas de concentrações de corantes e espessuras, observa-se que as misturas seguem o comportamento do PMMA transparente, embora com valores de transmitância ligeiramente inferiores em todos os casos. O mesmo comportamento é evidenciado por parte das misturas de pigmento inorgânico azul 29 (concentrações de 0,5% e 1%) e na mistura de pigmento orgânico amarelo 191 (concentração de 0,5%), porém com valores de transmitância ainda mais baixos, como observado na Figura 45 e Figura 40, respetivamente.

Este comportamento sugere que vários fatores podem ter influência no culminar desta tendência, tais como:

O *set up* das condições de processamento de injeção foram otimizadas e utilizadas para a placa do MOLDE 1 com as maiores espessuras, este *set up* foi replicado exatamente de igual forma para a placa do MOLDE 2, sem ajustes específicos para as espessuras inferiores. Este procedimento possivelmente possibilitou uma distribuição mais uniforme do material durante o enchimento das cavidades resultando numa estrutura molecular mais homogênea e em menos defeitos de superfície, contribuindo para o evitar de distorções óticas, acabando por resultar em melhores valores de percentagem de transmitância nos provetes obtidos no MOLDE 1 em comparação com os do MOLDE 2.

Adicionalmente, o próprio desbalanceamento apresentado em ambas as placas do molde, fomentado pela distribuição irregular da espessura dos provetes, origina não só taxas de fluxo irregulares em diferentes regiões, como também um arrefecimento não uniforme dos provetes. Eventualmente, é plausível que o acabamento superficial dos moldes possa também ter alguma influência nos resultados obtidos.

Assim, é possível afirmar que a morfologia dos provetes influída por estes fatores, resulta numa maior influência da transmitância quando comparada conjuntamente com o aumento da espessura dos provetes e com o próprio poder de absorção dos colorantes.

Pelo contrário, na Figura 38 a Figura 47 ao analisarem-se os resultados obtidos nas misturas de pigmentos orgânicos e inorgânicos não mencionados anteriormente, verifica-se o comportamento oposto ao do PMMA transparente. Ou seja, é possível indagar uma diminuição da percentagem de transmitância à medida que a espessura dos provetes aumenta. Esse declínio é mais acentuado nos valores de transmitância nas misturas de pigmentos inorgânicos quando comparadas com os

pigmentos orgânicos, chegando a atingir valores nulos em espessuras e concentrações elevadas. Porém esse declínio não se verifica no caso da mistura do pigmento inorgânico azul 29 (concentração de 2%) e de bronze (concentração de 0,5%).

Entre os pigmentos orgânicos, nota-se uma maior queda na percentagem de transmitância na mistura de verde 7 e azul 15:1 em relação às demais misturas. O único caso onde esse decréscimo é atenuado e, portanto, não tão percetível ocorre na mistura do pigmento orgânico vermelho 144 (concentração de 0,5%).

Esta queda de transmissão indica que neste caso o poder de absorção dos pigmentos, combinado com o aumento da espessura, exerce mais influência sobre a transmissão de energia do que as condições morfológicas impostas pelo processo de moldação por injeção.

Em suma, os pigmentos inorgânicos apresentam valores percentuais de transmitância inferiores em comparação com os pigmentos orgânicos, esta ocorrência deve-se também particularmente à inferioridade do tamanho das partículas, bem como ao baixo índice de refração em pigmentos orgânicos, este comportamento encontra-se em concordância com o descrito na literatura. Da mesma forma, a comparação dos valores percentuais de transmitância apresentados entre os pigmentos e os corantes também se encontra em concordância com a literatura, especificamente devido aos pigmentos não se dissolverem na matriz polimérica, proporcionam as suas partículas opacidade e cor, enquanto os corantes dissolvem-se, mantendo a transparência e conferindo apenas cor.

b) Concentração

A análise das diferentes concentrações revelou alguns resultados inesperados em relação à transmitância. Embora fosse previsível que concentrações menores promovessem maior transmitância, observou-se o oposto em algumas situações, como evidenciado na Figura 49 a Figura 51. Especificamente para os corantes vermelho 135, amarelo 114 e azul 104, inclusive, no vermelho 135, verificou-se que os valores correspondentes à concentração de 2% encontram-se acima dos valores de 1%. Tendo em conta que as misturas foram executadas de modo manual, podem ocorrer alguns problemas na execução das mesmas, e ainda que a lei de Lambert-Beer, enuncie que a concentração de um soluto numa solução é diretamente proporcional à absorvência medida por um espectrofotómetro, permite determinar

que uma possível falha na concentração de um soluto tenha promovido um aumento na transmitância.

Nos pigmentos orgânicos e inorgânicos e no corante verde 28, como esperado, consoante o aumento de concentração menor foi a transmitância, conforme observado na Figura 38 a Figura 48.

De uma forma holística, verificou-se que, em algumas condições de espessura e concentração mais elevadas, os valores de transmitância ficaram abaixo dos 4%, o que, consoante o descrito na literatura, pode tornar o processo insuficiente para a viabilização da transmissão de radiação necessária para a realização da soldadura a laser por transmissão. (Esta condição será abordada adiante no trabalho, ao analisar a inspeção visual da qualidade da soldadura laser por transmissão). Não obstante, transmitâncias tão reduzidas foram especialmente observadas em pigmentos inorgânicos, como o negro de fumo, dióxido de titânio, óxido de ferro, bem como no bronze e no alumínio, destacando neste último a presença do efeito de espelho devido à sua superfície, promovendo assim reflexão, não sendo por isso pigmento recomendado em processos de soldadura laser por transmissão. Estes resultados, também foram observados no caso dos pigmentos orgânicos, na mistura do verde 7 e do azul 15:1, para concentrações e espessuras elevadas.

Em relação aos corantes, em nenhum estudo a transmitância transpõe abaixo dos 4% em nenhum nível de concentração e espessura.

Em síntese, pode-se afirmar que a superioridade da transmitância em peças aditivadas com corantes indica uma aplicabilidade potencialmente mais ampla desses colorantes em aplicações que exigem alta transparência.

4.1.2 Avaliação Visual da Soldadura a Laser por Transmissão (LTW)

Após a análise da transmitância, recorreu-se à soldadura laser por transmissão entre as misturas de pigmentos/corantes e o PC/ABS com as condições de processamento exibidas em 3.2.3. Posteriormente, à soldadura os provetes foram inspecionados, essa inspeção restringiu-se a uma análise visual, sem a condução de ensaios mecânicos ou óticos que possibilitassem a investigação da resistência da soldadura nem da qualidade da soldadura. Esta análise, permitiu apenas verificar se as misturas de pigmentos/corantes em diferentes concentrações e espessuras viabiliza ou não a soldadura entre os componentes sem marcas de defeitos

provenientes do laser. Com objetivo de compreender se os indícios demonstrados pelos resultados de transmitância permitem uma identificação da eficácia da soldadura laser por transmissão.

Pigmentos Orgânicos

Verde 7

A análise da mistura do pigmento **Verde 7** revelou que em todos os provetes, com a espessura a variar dos 0,5 mm aos 4 mm e em todas as concentrações a soldadura laser foi bem sucedida, conforme observado na Figura 52 a Figura 54.

Porém, uma inspeção mais detalhada permitiu verificar que, no provete com 0,5 mm de espessura e concentração de 1%, nota-se uma linha de soldadura incompleta na extremidade esquerda, resultado de uma preparação inadequada do processo de soldadura a laser por transmissão. Ainda assim, na área onde incidiu o laser no provete soldou sem irregularidades, como evidenciado na Figura 53.

Para uma concentração mais elevada (2%) com espessuras de 3,5 mm e 4 mm, observa-se a ocorrência de degradação térmica, manifestada por áreas queimadas na região de ação do laser nos provetes de PMMA pigmentados com verde 7 devido à absorção do pigmento, conforme ilustrado na Figura 54.

Evidencia-se que o pigmento verde 7 é uma opção viável como recurso à parte transparente do laser no processo de soldadura a laser por transmissão não sendo recomendável o uso de espessuras superiores a 3,5 mm com concentrações elevadas (2%) de pigmento.

Figura 52 - Soldadura a Laser por Transmissão (SLT), do Verde 7 com concentração de 0,5%

Figura 53 - Soldadura a Laser por Transmissão (SLT), do Verde 7 com concentração de 1%.

Figura 54 - Soldadura a Laser por Transmissão (SLT), do Verde 7 com concentração de 2%.

Vermelho 144

Ao analisar o pigmento **Vermelho 144**, observamos que em todos os provetes, com a espessura a variar dos 0,5 mm aos 4 mm e em todas as concentrações de pigmento, ocorreu a soldadura laser, como demonstrado nas Figura 55 a Figura 57.

Contudo, ao contrário do que ocorre no caso do pigmento verde 7, são observadas anomalias nos provetes mais finos, com uma espessura de 0,5 mm e concentração de 0,5% e 1%. Esses apresentam uma linha esbranquiçada na zona de soldadura Figura 55 e Figura 56, indicando uma ligeira degradação térmica na linha de soldadura. Esta ocorrência pode ser atribuída à baixa espessura dos provetes e à exposição prolongada de energia térmica proveniente do laser.

O pigmento vermelho 144 demonstrou ser uma opção viável como recurso à parte transparente do laser no processo de soldadura a laser por transmissão em todos os casos estudados, com especial atenção à prolongada exposição dos provetes com espessura reduzida.

Figura 55 - Soldadura a Laser por Transmissão (SLT), do Vermelho 144 com concentração de 0,5%.

Figura 56 - Soldadura a Laser por Transmissão (SLT), do Vermelho 144 com concentração de 1%.

Figura 57 - Soldadura a Laser por Transmissão (SLT), do Vermelho 144 com concentração de 2%.

Amarelo 191

O pigmento **Amarelo 191**, foi objeto de análise abrangente, abarcando todos os provetes com todas as espessuras e concentrações. Os resultados revelaram a ocorrência de soldadura a laser em todos os cenários avaliados, conforme ilustrado nas Figura 58 a Figura 60.

Em alguns casos, foram identificadas algumas anomalias durante o processo de

soldadura. Constatou- se uma linha de soldadura incompleta na extremidade direita dos provetes para espessuras de 2,5 e 3,5 mm com 0,5% de concentração, bem como para espessuras de 1,5 e 3 mm com concentração de 1% indicando uma possível falha na preparação do processo de soldadura a laser, no entanto, na zona onde os materiais soldaram, nenhuma irregularidade foi observada.

Além disso, em provetes com uma concentração de 2% e espessura de 0,5 mm, evidenciou-se uma linha esbranquiçada na zona de soldadura, indicando o início de uma ligeira degradação térmica na linha de soldadura, proveniente da baixa espessura do provete e ao excesso de energia transmitida pelo laser, conforme assinalado na Figura 60.

Assim, o pigmento amarelo 191 emerge como uma opção a ser utilizada como parte transparente no processo de soldadura laser por transmissão, com atenção ao uso de espessuras reduzidas com concentrações elevadas.

Figura 58 - Soldadura a Laser por Transmissão (SLT), do Amarelo 191 com concentração de 0,5%.

Figura 59 - Soldadura a Laser por Transmissão (SLT), do Amarelo 191 com concentração de 1%.

Figura 60 - Soldadura a Laser por Transmissão (SLT), do Amarelo 191 com concentração de 2%.

Azul 15:1

O pigmento **Azul 15:1** foi o último a ser analisado, dentro dos pigmentos orgânicos. Em todos os provetes com a espessura a variar dos 0,5 mm aos 4 mm e em todas as concentrações, foi observada a soldadura a laser, como ilustrado nas Figura 61 a Figura 63. Nesta análise, não foram identificadas anomalias em nenhum provete pigmentado, quer na linha de soldadura entre a interceção dos dois materiais, quer na superfície do provete pigmentado.

Evidencia-se com recurso às imagens que o pigmento azul 15:1 é uma opção viável como recurso à parte transparente do laser no processo de soldadura a laser por transmissão perante todos os casos estudados.

Figura 61 - Soldadura a Laser por Transmissão (SLT), do Azul 15:1 com concentração de 0,5%.

Figura 62 - Soldadura a Laser por Transmissão (SLT), do Azul 15:1 com concentração de 1%.

Figura 63 - Soldadura a Laser por Transmissão (SLT), do Azul 15:1 com concentração de 2%.

Pigmentos Inorgânicos

Negro de Fumo

No pigmento **Negro de Fumo**, foram analisadas apenas as espessuras mais reduzidas de 0,5 mm para concentrações de 0,5% e 1%, juntamente com uma espessura de 4 mm correspondente à concentração de 2%, conforme ilustrado na Figura 64. Nas espessuras mais reduzidas de 0,5 mm, observa-se uma soldadura, no entanto, é visível a completa degradação térmica evidenciada por uma total queima dos provetes pigmentados, resultando numa soldadura muito frágil que ocorre apenas nas regiões adjacentes à zona de atuação do laser.

Nas demais espessuras, não se verifica a soldadura entre os materiais, razão pela qual não estão representadas na imagem. Como se encontra visível no provete de 4 mm, onde ocorre apenas degradação térmica evidenciada pela queima superficial do provete pigmentado, devido ao elevado coeficiente de absorção do pigmento, o que impede que a energia do laser alcance a interface de soldadura dos materiais

Neste caso, a adição do pigmento negro de fumo não é recomendada para

processos de soldadura a laser por transmissão como parte transparente ao laser, mas sim como parte absorvente.

Figura 64 - Soldadura a Laser por Transmissão (SLT), do Negro de Fumo com concentração de 0,5%, 1% e 2%.

Dióxido de Titânio

No caso do pigmento **Dióxido de Titânio**, verificou-se a ocorrência da soldadura a laser por transmissão em todos os provetes, variando todas as espessuras e concentrações do pigmento.

Este comportamento foi observado nas Figura 65 a Figura 67, evidenciando a ausência de anomalias durante o processo de soldadura, quer na linha de soldadura na interface dos materiais, quer na superfície dos provetes pigmentados. Surpreendentemente, tais resultados divergem das expectativas literárias, partindo do pressuposto que colorantes brancos provocam um efeito bastante reflexivo na interação do material com o laser, comprovado pelos baixos valores de percentagem de transmitância apresentados nos gráficos 4.1.

Contudo, com base na análise visual das imagens, conclui-se que o Dióxido de Titânio pode ser empregue como parte transparente no processo de soldadura a laser por transmissão, consoante todos os casos estudados.

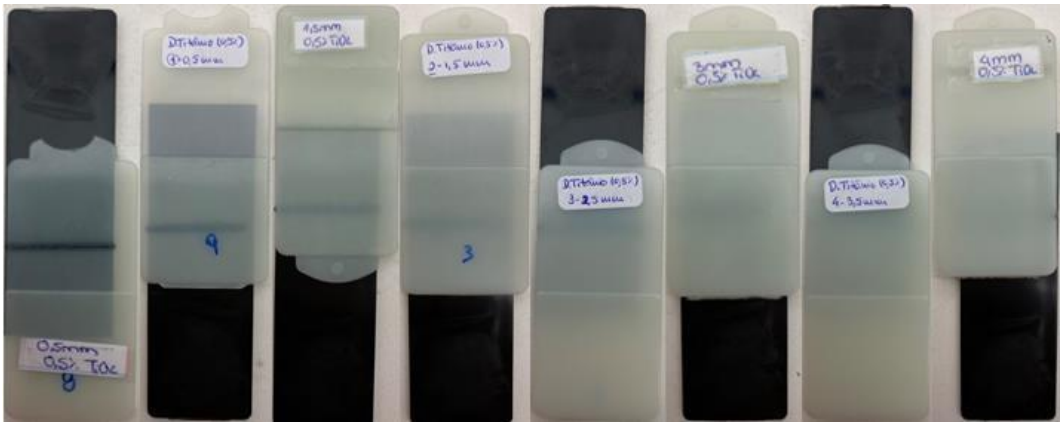


Figura 65 - Soldadura a Laser por Transmissão (SLT), do Dióxido de Titânio com concentração de 0,5%.

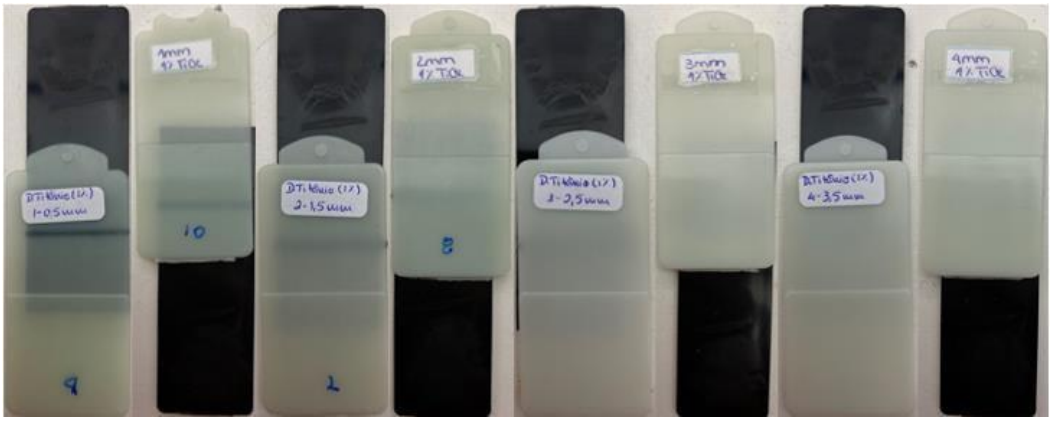


Figura 66 - Soldadura a Laser por Transmissão (SLT), do Dióxido de Titânio com concentração de 1%.

Figura 67 - Soldadura a Laser por Transmissão (SLT), do Dióxido de Titânio com concentração de 2%.

Óxido de Ferro

A análise do pigmento **Óxido de Ferro**, revelou que em todos os provetes, com uma concentração de 0,5% do pigmento, evidenciou-se a soldadura, conforme ilustrado na Figura 68. Porém, uma inspeção minuciosa permitiu constatar uma ligeira degradação térmica na linha de soldadura no provete com 4 mm de espessura, recomendando que uma espessura de 3,5 mm seja a espessura máxima de modo a evitar defeitos estéticos na soldadura.

Na Figura 69, observou-se que com uma concentração de 1%, a soldadura ocorreu em todos os provetes até uma espessura de 3 mm. Contudo, nos 2,5 mm e 3 mm, verificou-se queima superficial nos provetes pigmentados devido à degradação térmica proveniente do laser. As restantes espessuras (3,5 mm e 4 mm), não revelaram soldadura, apenas degradação térmica no provete pigmentado, portanto, não se encontram representados na imagem.

Com uma concentração de 2% de pigmento, verificou-se a soldadura a laser em todos os provetes até uma espessura de 2,5 mm, como demonstrado na Figura 70. Apesar da ocorrência da soldadura nestas espessuras, verificam-se marcas pronunciadas de degradação térmica, demonstradas pela queima superficial do provete pigmentado agravas à medida que a espessura aumenta. Este agravamento proporcionado pelo aumento da espessura e pelo elevado coeficiente de absorção do pigmento nesta concentração consiste num aumento da absorção, reflexão e refração da luz incidente do laser nos provetes. Para espessuras de 3 mm a 4 mm, não ocorreu a soldadura, apenas degradação térmica superficial, encontrando-se representada apenas a espessura de 4 mm na imagem, devido ao comportamento semelhante dos provetes de 3 mm e 3,5 mm.
(O provete de 2 mm não se encontra representado na imagem devido a ter quebrado antes de ser retirada a foto, reforçando a fragilidade da soldadura em concentrações elevadas).

Evidencia-se que o pigmento óxido de ferro pode ser utilizado como parte transparente no processo de soldadura a laser por transmissão, em baixas concentrações (0,5%) até aos 3,5 mm de espessura, assim como numa concentração de 1% até aos 2 mm de espessura. Para uma concentração de 2%, é mais apropriado o uso como parte absorvente.

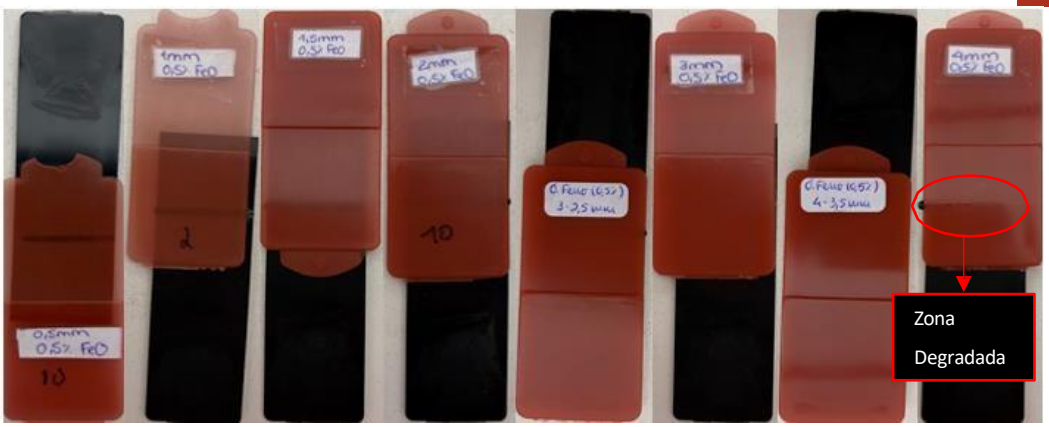


Figura 68 - Soldadura a Laser por Transmissão (SLT), do Óxido de Ferro com concentração de 0,5%.

Figura 69 - Soldadura a Laser por Transmissão (SLT), do Óxido de Ferro com concentração de 1%.

Figura 70 - Soldadura a Laser por Transmissão (SLT), do Óxido de Ferro com concentração de 2%.

Azul 29

Ao analisar o pigmento **Azul 29**, observa-se que em todos os provetes, com todas as concentrações do pigmento, ocorre a soldadura laser, como demonstrado nas Figura 71 a Figura 73.

Não foram observadas anomalias significativas, com exceção dos provetes de 1,5 mm e 3,5 mm de espessura e 0,5% de concentração de pigmento, nos quais a linha

de soldadura apresentou um formato disperso com um espalhamento maior nas extremidades, como destacado na Figura 71. Possivelmente devido a uma preparação inadequada do processo de soldadura a laser, resultante de uma força desbalanceada no sistema de aperto utilizado.

O pigmento Azul 29 demonstra uma semelhança notável com os corantes quando comparados os valores de transmitância. Portanto, com base na análise visual, evidencia-se que a sua adição é uma opção viável como parte transparente no processo de soldagem a laser por transmissão em todos os casos estudados.

Figura 71 - Soldadura a Laser por Transmissão (SLT), do Azul 29 com concentração de 0,5%.

Figura 72 - Soldadura a Laser por Transmissão (SLT), do Azul 29 com concentração de 1%.

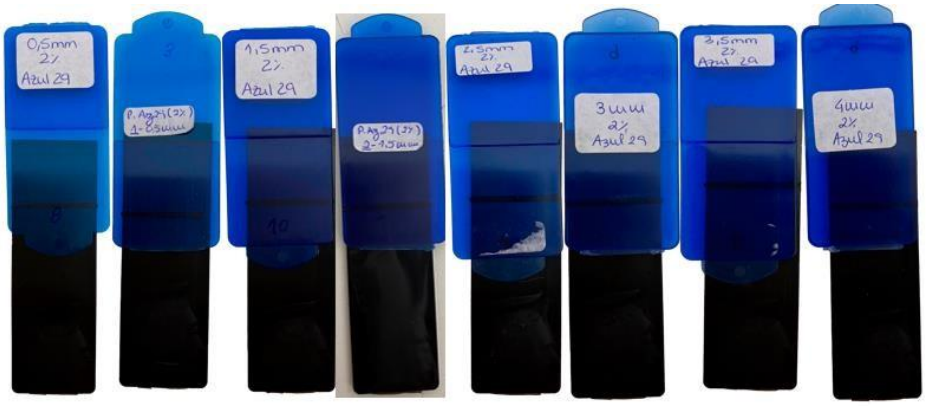


Figura 73 - Soldadura a Laser por Transmissão (SLT), do Azul 29 com concentração de 2%.

(Metálicos) Alumínio

No pigmento **Alumínio**, foram analisadas apenas as espessuras mais reduzidas de 0,5 mm para concentrações de 0,5%, 1% e 2%, juntamente com uma espessura de 4 mm correspondente à concentração de 2%, conforme ilustrado na Figura 74.

Nas espessuras mais reduzidas de 0,5 mm, observou-se uma adesão frágil entre os materiais, principalmente nas áreas adjacentes à zona de soldadura, resultando numa soldadura delicada e propensa à degradação térmica evidenciada por uma total queima nos provetes com alumínio na zona de atuação do laser.

Nas demais espessuras, não se verifica a soldadura entre os materiais, razão pela qual não estão representadas na imagem, como exemplificado pelo provete de 4 mm de espessura e 2% de concentração. Neste caso é visível apenas degradação térmica evidenciada pela queima superficial do provete pigmentado, devido ao efeito reflexivo por parte do pigmento, o que impede que a energia do laser alcance a interface de soldadura dos materiais.

Portanto, a inclusão do pigmento de alumínio não é recomendada para processos de soldadura a laser por transmissão quer como parte transparente ou absorvente, devido ao alto coeficiente de reflexão associado.

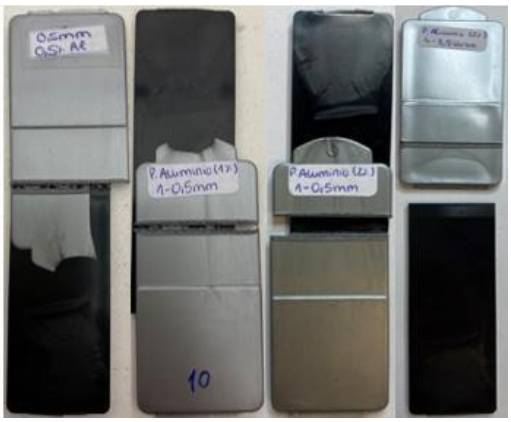


Figura 74 - Soldadura a Laser por Transmissão (SLT), do Alumínio com concentração de 0,5%, 1% e 2%.

(Metálicos) Bronze

A análise do pigmento **Bronze**, revelou que em todos os provetes, com uma concentração de 0,5% do pigmento, evidenciou-se a soldadura a laser, conforme ilustrado na Figura 75. Porém, uma inspeção pormenorizada permitiu constatar uma linha esbranquiçada, resultante de uma ligeira degradação térmica na linha de soldadura dos provetes com espessura superior aos 2,5 mm, recomendando que esta seja a espessura máxima de modo a evitar defeitos estéticos na soldadura. Ainda

para uma espessura de 3,5 mm, nota-se a soldadura incompleta do provete.

Na Figura 76 e Figura 77, para uma concentração de 1% e 2%, observou-se que a soldadura ocorreu em todos os provetes até uma espessura de 2,5 mm. Contudo, para uma concentração de 1%, com 1,5 mm,

2 mm e 2,5 mm, verificam-se marcas evidentes de degradação térmica, demonstradas pela queima superficial nos provetes pigmentados e visivelmente agravadas à medida que a espessura aumenta. Este agravamento proporcionado pelo aumento da espessura e pelo elevado coeficiente de absorção do pigmento nesta concentração consiste num aumento da absorção, reflexão e refração da luz incidente do laser nos provetes. As restantes espessuras, não revelaram soldadura, apenas degradação térmica no provete pigmentado, como representado pelo provete de 4 mm com 2% de concentração. (O provete com 1 mm também não se encontra representado devido a ter quebrado antes de ter sido retirada a foto).

Para uma concentração de 2%, são evidenciadas marcas de degradação térmica, demonstradas pela queima superficial nos provetes, desde os 0,5 mm de espessura, agravando-se ao longo do aumento da espessura. A partir dos 3 mm, não se observou soldadura entre os provetes.

Constata-se que o pigmento bronze pode ser utilizado como parte transparente no processo de soldadura a laser por transmissão, em baixas concentrações (0,5%) até aos 3 mm de espessura. Para uma concentração de 1%, é apropriado o seu uso como parte transparente somente com uma espessura muito reduzida de 0,5 mm, acima disso, é mais adequado o seu uso como parte absorvente. Concentrações mais elevadas, como os 2%, é mais apropriado o uso como parte absorvente.

Figura 75 - Soldadura a Laser por Transmissão (SLT), do Bronze com concentração de 0,5%.

Figura 76 - Soldadura a Laser por Transmissão (SLT), do Bronze com concentração de 1%.

Figura 77 - Soldadura a Laser por Transmissão (SLT), do Bronze com concentração de 2%.

Corante

Verde 28

A análise do corante **Verde 28**, revelou a ocorrência da soldadura a laser por transmissão em todos os provetes, variando todas as espessuras e concentrações do corante.

Este comportamento foi observado nas Figura 78, Figura 79 e Figura 80, evidenciando ausência de anomalias durante o processo de soldadura, quer na linha de soldadura na interface dos materiais, quer na superfície dos provetes pigmentados.

Isto porque, apesar da tonalidade escura do corante Verde 28, a sua característica como corante permite dissolver-se na matriz polimérica, conferindo apenas coloração sem comprometer a transparência.

Consequentemente, a adição de corante Verde 28 representa uma opção viável, com uma tonalidade escura, a ser empregue como parte transparente no processo de soldadura laser por transmissão, conforme evidenciado em todos os casos estudados.

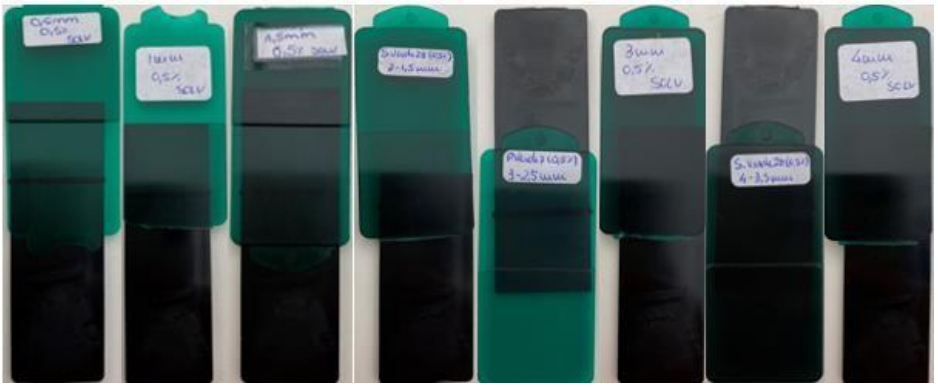


Figura 78 - Soldadura a Laser por Transmissão (SLT), do Verde 28 com concentração de 0,5%.

Figura 79 - Soldadura a Laser por Transmissão (SLT), do Verde 28 com concentração de 1%

Figura 80 -Soldadura a Laser por Transmissão (SLT), do Verde 28 com concentração de 2%.

Vermelho 135

O corante **Vermelho 135**, foi objeto de análise abrangente, abarcando todos os provetes com todas as espessuras e concentrações. Os resultados revelaram a ocorrência de soldadura a laser em todos os provetes avaliados, conforme ilustrado nas na Figura 81, Figura 82 e Figura 83.

No entanto, foram identificadas algumas anomalias em alguns dos provetes soldados. Especificamente, constatou-se a presença de vazios ou sujidade na linha de soldadura nos provetes com uma espessura de 1,5 mm e 2 mm e 0,5% de concentração. Com 3,5 mm e 4 mm começou a evidenciar-se uma zona

esbranquiçada na extremidade esquerda da linha de soldadura, indicando o início de uma ligeira presença de degradação térmica.

Para uma concentração de 1% e espessura de 1,5 mm e 2,5 mm, a linha de soldadura apresentou uma distribuição não uniforme, apresentando um formato disperso e um espalhamento maior nas extremidades da zona de soldadura, provavelmente devido a uma má preparação do processo de soldadura a laser, resultante de uma força não balanceada no sistema de pressão de aperto utilizado. Além disso, para espessuras de 3,5 mm e 4 mm, observou-se também a presença de uma zona esbranquiçada na extremidade esquerda da linha de soldadura, sugerindo o início de uma ligeira presença de degradação térmica.

A mesma zona esbranquiçada na extremidade esquerda da linha de soldadura, foi observada nos provetes com 2% de concentração e espessura superior aos 2 mm, indicando o início de uma ligeira degradação térmica possivelmente proveniente de uma má preparação do processo de soldadura.

O corante vermelho 135, demonstra ser uma opção viável como parte transparente no processo de soldadura laser por transmissão, com especial atenção para espessuras mais elevadas.

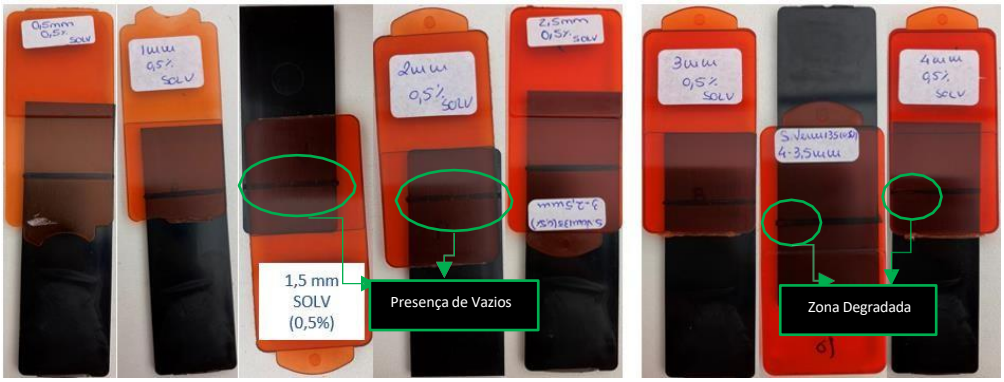


Figura 81 - Soldadura a Laser por Transmissão (SLT), do Vermelho 135 com concentração de 0,5%.

Figura 82 - Soldadura a Laser por Transmissão (SLT), do Vermelho 135 com concentração de 1%.

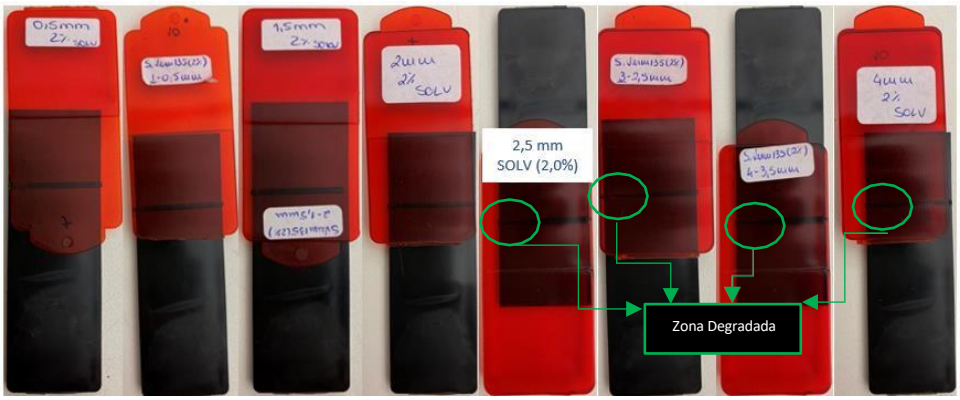


Figura 83 - Soldadura a Laser por Transmissão (SLT), do Vermelho 135 com concentração de 2%.

Amarelo 114

A análise do corante **Amarelo 114**, revelou a ocorrência da soldadura a laser por transmissão em todos os provetes, variando todas as espessuras e concentrações do corante.

Este comportamento foi observado nas Figura 84, Figura 85 e Figura 86, apresentando apenas uma distribuição não uniforme da linha de soldadura para concentrações de 0,5% e 1% nas espessuras de 4 mm e 2,5 mm, respetivamente, provavelmente devido a uma má preparação do processo de soldadura a laser, resultante da força não balanceada do sistema de pressão de aperto utilizado.

Assim, o corante amarelo 114, evidencia-se como uma opção viável como parte transparente no processo de soldadura laser por transmissão, perante todos os casos estudados.

Figura 84 - Soldadura a Laser por Transmissão (SLT), do Amarelo 114 com concentração de 0,5%.

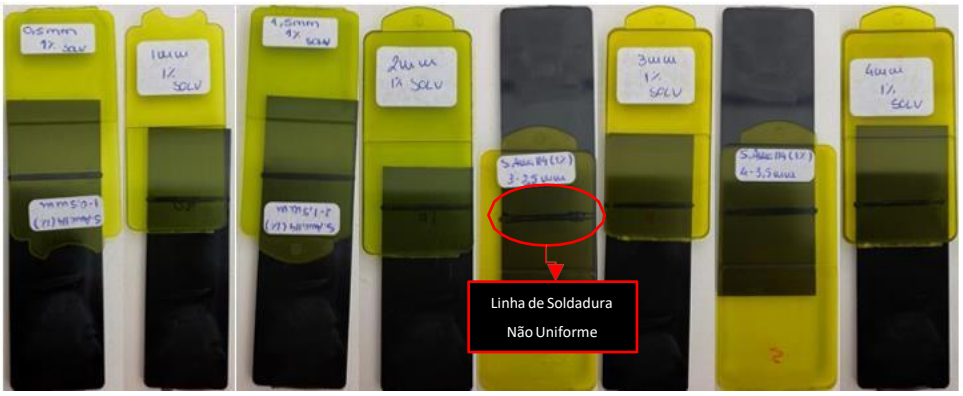


Figura 85 - Soldadura a Laser por Transmissão (SLT), do Amarelo 114 com concentração de 1%.

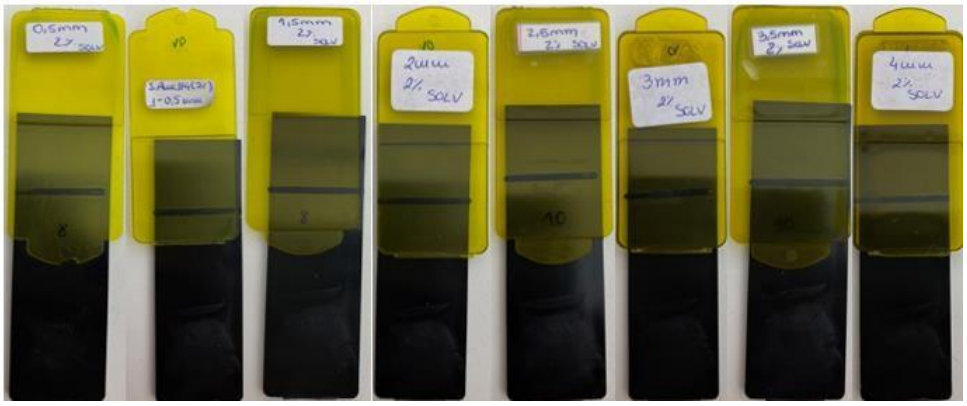


Figura 86 - Soldadura a Laser por Transmissão (SLT), do Amarelo 114 com concentração de 2%.

Azul 104

O corante **Azul 104** foi o último a ser analisado, no conjunto dos corantes. Em todos os provetes, com a espessura a variar dos 0,5 mm aos 4 mm e em todas as concentrações, foi observada a soldadura a laser, como ilustrado nas Figura 87, Figura 88 e Figura 89. A única anomalia observada ocorreu para uma concentração de 0,5% e espessura de 2 mm, onde foi realizada a soldadura apenas até metade do comprimento do provete, devido a um mau posicionamento no suporte de fixação.

O corante azul 104 é um bom colorante com uma tonalidade escura, e que demonstra ser uma opção viável como parte transparente no processo de soldadura a laser por transmissão, consoante todos os casos estudados.

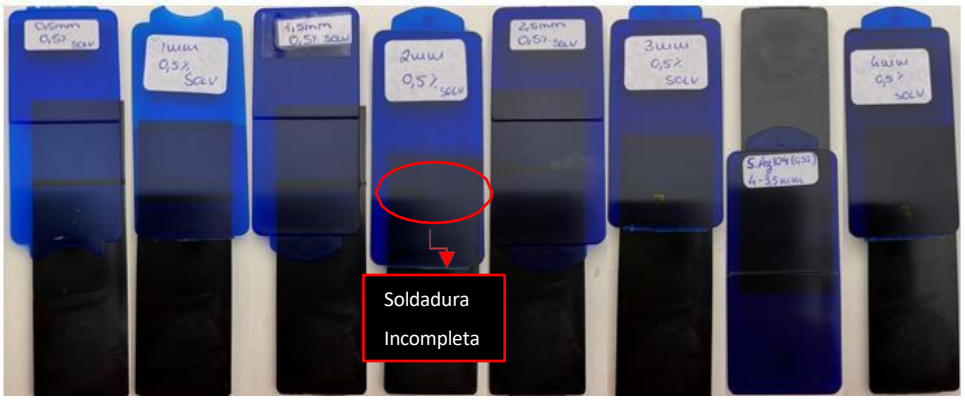


Figura 87 - Soldadura a Laser por Transmissão (SLT), do Azul 104 com concentração de 0,5%.

Figura 88 - Soldadura a Laser por Transmissão (SLT), do Azul 104 com concentração de 1%.

Figura 89 - Soldadura a Laser por Transmissão (SLT), do Azul 104 com concentração de 2%.

Sumário

Após a inspeção visual, e de forma a compreender se os indícios demonstrados pelos resultados de transmitância permitem uma identificação da eficácia da soldadura laser por transmissão, foram agrupados e comparados os resultados da percentagem de transmitância exibidos em 4.1 com as conclusões retiradas anteriormente na inspeção visual, estas anotações encontram-se organizadas na

Tabela 29.

Como mostra a Tabela 29, nas misturas de corantes e pigmentos orgânicos com a mesma cor, os resultados de transmitância mostraram concordância com a análise visual. Embora os pigmentos orgânicos apresentem valores de transmitância inferiores aos corantes, em termos de qualidade de soldadura final, ambos demonstram eficácia ao ser empregues como aditivos na parte transparente no processo de soldadura laser por transmissão. É necessário ter em atenção alguns casos, onde surgem sinais de inícios de degradação térmica, seja providenciado pela reduzida espessura dos provetes combinada com a exposição prolongada ao laser, como ocorre na mistura de vermelho 144 e amarelo 191, seja pela espessura elevada dos provetes e alta concentração do aditivo, como na mistura do verde 7 e vermelho 135.

Entre os pigmentos inorgânicos, a mistura de azul 29 é a única que apresenta um comportamento similar à dos pigmentos orgânicos e corantes, encontrando-se também em concordância com os resultados da transmitância. O óxido de ferro também exibe uma correspondência significativa entre os valores de transmitância e a inspeção visual, permitindo o seu uso como parte transparente em espessuras e concentrações reduzidas, e como parte absorvente em espessuras e concentrações mais elevadas. Da mesma forma, o negro de fumo e o alumínio apresentam também uma boa relação entre os valores de transmitância e a inspeção visual, contudo o negro de fumo pode ser utilizado apenas como parte absorvente em todas as espessuras e concentrações devido ao seu alto coeficiente de absorção, enquanto o alumínio devido ao intrínseco poder de reflexão não deve ser utilizado no processo de soldadura laser por transmissão.

No caso da mistura de bronze, seria de esperar que este apresentasse um comportamento relacional entre os resultados de transmitância e a análise visual, parecido ao óxido de ferro, onde estivesse bem definido que acima dos 4% de transmitância pudesse ser empregue como parte transparente ao processo, e abaixo dos 4% pudesse ser empregue como parte absorvente. Contudo, após análise, verifica-se que mesmo com percentagens de transmitância acima dos 4% este exibe evidencias de degradação, provavelmente devido ao seu coeficiente de absorção elevado, derivado da sua natureza como pigmento inorgânico metálico.

Já a mistura com dióxido de titânio apresentou um comportamento distinto: a soldadura ocorreu sem irregularidades em todos os provetes, contrariando os

baixos valores de transmitância registados (abaixo dos 4% em diversas espessuras e concentrações). Este fenómeno pode ser explicado devido a vários fatores, nomeadamente, pela alta refração e refletividade proporcionada pelo dióxido de titânio, o que significa que este pode dispersar a luz de forma eficaz, mesmo que a transmitância direta seja reduzida, resultando em múltiplas passagens da luz através da interface, o que pode ampliar o efeito do laser. Adicionalmente, a incorporação de 1% de negro de fumo nos provetes de PC/ABS permite que mesmo pequenas quantidades de energia do laser transmitidas sejam convertidas eficientemente em calor, facilitando a soldadura nestes casos.

Assim, conforme a inspeção visual, conclui-se que este pode ser utilizado como parte transparente ao laser no processo de soldadura a laser por transmissão em todos os casos estudados. Este exemplo mostra como a transmissão de luz não é o único fator determinante, e a otimização do processo e dos materiais pode permitir resultados eficientes mesmo com baixa transmitância.

Por fim, os resultados obtidos nos gráficos de transmitância enunciados em 4.1 podem indicar que, em geral, esses dados são preditivos confiáveis para as condições de espessura do provete e concentração dos aditivos sob as condições operacionais normalizadas, com exceção da mistura do pigmento inorgânico bronze e dióxido de titânio.

Tabela 29 – Resultados da transmitância ao longo da espessura e concentração das misturas com as conclusões da inspeção visual

(continua)

Colorantes		Concentração/Espessura	0,5 mm	1 mm	1,5 mm	2 mm	2,5 mm	3 mm	3,5 mm	4 mm
Pigmentos Orgânicos	Verde 7	0,50%	(40) S +**	(39) S	(29) S	(30) S	(19) S	(16) S	(15) S	(11) S
		1%	(40) S	(35) S	(27) S	(26) S	(8) S	(6) S	(5) S	(4) S
		2%	(27) S	(17) S	(11) S	(8) S	(5) S	(3) S	(2) SID	(2) SID
	Vermelho 144	0,50%	(47) SID	(52) S	(40) S	(44) S	(47) S	(44) S	(43) S	(39) S
		1%	(45) SID	(46) S	(34) S	(35) S	(27) S	(23) S	(21) S	(17) S
		2%	(38) S	(30) S	(22) S	(20) S	(19) S	(16) S	(13) S	(11) S
	Amarelo 191	0,50%	(47) S	(50) S	(37) S	(40) S	(50) S +**	(47) S	(47) S +**	(44) S
		1%	(44) S	(39) S	(30) S +**	(30) S	(33) S	(29) S +**	(26) S	(23) S
		2%	(35) SID	(25) S	(18) S	(13) S	(17) S	(16) S	(11) S	(9) S
	Azul 15:1	0,50%	(42) S	(41) S	(31) S	(32) S	(23) S	(19) S	(17) S	(14) S
		1%	(34) S	(27) S	(16) S	(15) S	(5) S	(3) S	(2) S	(2) S
		2%	(29) S	(18) S	(12) S	(8) S	(4) S	(4) S	(2) S	(2) S

(conclusão)

	Colorantes	Concentração/Espessura	0,5 mm	1 mm	1,5 mm	2 mm	2,5 mm	3 mm	3,5 mm	4 mm
Pigmentos Inorgânicos	Negro Fumo	0,50%	(17) SQS	(6) NS	(3) NS	(1) NS	(1) NS	(1) NS	(0) NS	(0) NS
		1%	(12) SQS	(3) NS	(1) NS	(0) NS	(0) NS	(0) NS	(0) NS	(0) NS
		2%	(0) NS	(0) NS	(0) NS	(0) NS	(0) NS	(0) NS	(0) NS	(0) NS
	D. Titânio	0,50%	(31) S	(21) S	(13) S	(10) S	(10) S	(8) S	(6) S	(4) S
		1%	(21) S	(10) S	(5) S	(3) S	(2) S	(1) S	(1) S	(1) S
		2%	(7) S	(2) S	(1) S	(0) S	(0) S	(0) S	(0) S	(0) S
	O. Ferro	0,50%	(31) S	(16) S	(8) S	(5) S	(7) S	(5) S	(3) S	(2) SID
		1%	(20) S	(9) S	(4) S	(2) S	(1) SID	(0) SID	(0) NS	(0) NS
		2%	(4) SQS	(1) SQS	(0) SQS	(0) SQS	(0) NS	(0) NS	(0) NS	(0) NS
	Azul 29	0,50%	(50) S	(58) S	(49) S +*	(58) S	(69) S	(66) S	(69) S +*	(69) S
		1%	(49) S	(55) S	(46) S	(53) S	(61) S	(57) S	(58) S	(57) S
		2%	(43) S	(39) S	(33) S	(32) S	(51) S	(48) S	(47) S	(45) S
	Alumínio	0,50%	(6) SQS	(1) NS	(0) NS	(0) NS	(0) NS	(0) NS	(0) NS	(0) NS
		1%	(1) SQS	(0) NS	(0) NS	(0) NS	(0) NS	(0) NS	(0) NS	(0) NS
		2%	(0) SQS	(0) NS	(0) NS	(0) NS	(0) NS	(0) NS	(0) NS	(0) NS
	Bronze	0,50%	(37) S	(28) S	(20) S	(16) S	(29) S	(23) SID	(22) SID	(18) SID
		1%	(35) S	(25) S	(16) SID	(13) SID	(13) SQS	(9) NS	(8) NS	(5) NS
		2%	(20) SID	(8) SQS	(4) SQS	(2) SQS	(2) SQS	(2) NS	(1) NS	(1) NS
Corantes	Verde 28	0,50%	(59) S	(56) S	(48) S	(57) S	(68) S	(66) S	(70) S	(71) S
		1%	(49) S	(54) S	(46) S	(55) S	(66) S	(64) S	(67) S	(68) S
		2%	(45) S	(45) S	(40) S	(44) S	(65) S	(65) S	(68) S	(69) S
	Vermelho 135	0,50%	(59) S	(56) S	(48) S +***	(57) S +***	(68) S	(66) S	(70) SID	(71) SID
		1%	(49) S	(54) S	(46) S +*	(55) S	(66) S +*	(64) S	(67) SID	(68) SID
		2%	(45) S	(45) S	(40) S	(44) S	(65) SID	(65) SID	(68) SID	(69) SID
	Amarelo 114	0,50%	(53) S	(60) S	(52) S	(64) S	(80) S	(76) S	(82) S	(84) S +*
		1%	(54) S	(62) S	(53) S	(66) S	(78) S +*	(78) S	(81) S	(85) S
		2%	(53) S	(55) S	(47) S	(56) S	(80) S	(80) S	(84) S	(87) S
	Azul 104	0,50%	(54) S	(59) S	(52) S	(62) S +**	(83) S	(82) S	(82) S	(81) S
		1%	(54) S	(61) S	(52) S	(64) S	(78) S	(78) S	(76) S	(75) S
		2%	(49) S	(52) S	(46) S	(56) S	(81) S	(80) S	(86) S	(86) S

S - Soldou bem *SID - Soldou com Inícios de Degradação* *SQS - Solou com Queima Superficial* *NS - Não Soldou*

( ) – Valores de Transmitância ** - Soldadura Não Uniforme* *** - Soldadura Incompleta* **** - Presença de Vazios*

4.2 Segundo Caso de Estudo: Parte Absorvente (PC/ABS)

Deve ficar presente, que este estudo foi realizado em colaboração com o PIEP (Pólo de Inovação em Engenharia de Polímeros), e é importante destacar que a execução de grande parte dos ensaios experimentais não foi da responsabilidade direta do autor deste trabalho, mas sim dos investigadores do PIEP. A realização

desta fase experimental exigiu conhecimentos e recursos técnicos específicos, disponíveis no PIEP, que seriam de difícil acesso no contexto de uma tese individual.

Após a conclusão dos ensaios experimentais conduzidos pelo PIEP, parte dos resultados foram partilhados com o autor, o que permitiu uma análise detalhada e a sua integração nas discussões e conclusões finais deste trabalho. Esta abordagem colaborativa visou fortalecer e expandir as conclusões da primeira fase do estudo, proporcionando uma visão mais completa e robusta dos fenómenos observados.

A segunda parte deste estudo, conduzida pelo PIEP, foi essencial para aprofundar o entendimento das variáveis do processo e da aplicabilidade prática dos resultados, respetivamente perante o estudo das diferentes dimensões e geometrias de rib presentes na peça absorvente ao laser, permitindo que o trabalho beneficiasse da experiência técnica e do rigor metodológico dos investigadores do instituto.

4.2.1 Análise dos Ensaios Mecânicos e Óticos (Tração e Microscopia)

Na Figura 90, são observadas imagens capturadas durante o ensaio de tração de um provete composto por PC/ABS e PMMA.

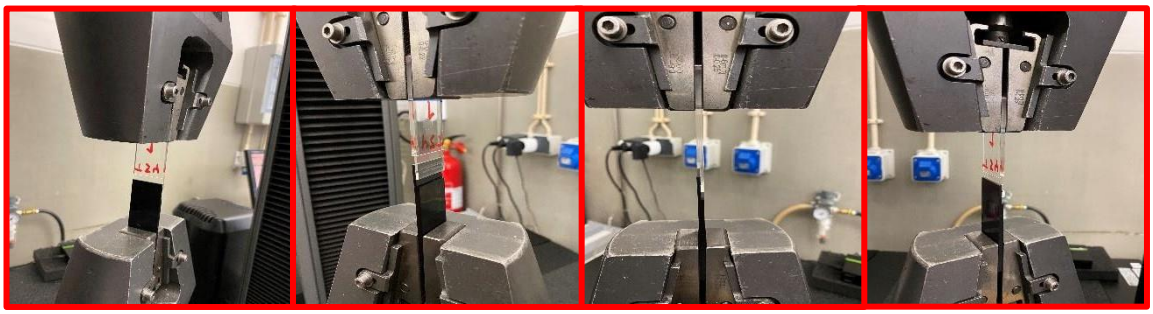


Figura 90 - Ensaio de tração PC/ABS com PMMA

Os ensaios de tração ocorreram de acordo com o plano de experiências apresentado em 3.3.3. Mediante uma análise atenta e pormenorizada, esta permitiu a categorização dos resultados, através de uma legenda explicativa de referência detalhada na Tabela 30. A legenda por sinal, associa cores específicas a diferentes cenários de rutura dos provetes, especificamente, (vermelho) caso o provete partisse ao ser colocado nas amarras, (verde) caso a soldadura seja resistente e os provetes não dessoldaram tendo partido pelo PMMA e, por fim, (azul) caso não se compreenda o que aconteceu durante o ensaio quando apresentado um resultado muito baixo. Essa abordagem facilita a interpretação e compreensão dos resultados obtidos durante o ensaio de tração nos 6 de 8 provetes analisados.

Tabela 30 – Legenda de referência dos resultados dos ensaios de tração

	Partiu ao colocar na amarra / Partiu por falta de cuidado
	Partiu no PMMA
	Não sei o que se passou

Por exemplo, na Figura 91 encontram-se apresentados dois cenários diferentes de rutura dos provetes após o ensaio de tração. Na imagem, à esquerda visualiza-se uma rutura onde os provetes não dessoldaram na zona de soldadura, mas sim devido ao PMMA ter quebrado, enquanto à direita a rutura dessoldou na zona de soldadura.

Figura 91 - Provetes após ensaio de tração.

Na Figura 92 é visível uma pequena rotação dos provetes, devido à diferença de espessuras nas amarras. Isto é, a amarra inferior pode ter um provete com uma configuração de *rib* com uma altura de 0,5, 0,8 e 1,1 mm no caso dos *ribs* quadrangulares, triangulares e trapezoidal, possuindo a amarra inferior sempre a mesma espessura do provete. Assim, nos ensaios de tração teve se sempre em atenção a ocorrência desta rotação, na influência dos resultados obtidos.

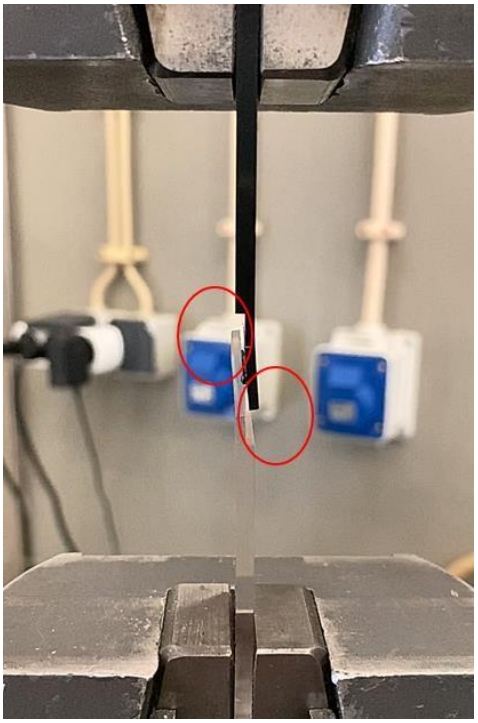


Figura 92 - Rotação dos provetes com rib

Tipologia Sem Rib

Na Tabela 31, encontram-se apresentados os resultados dos ensaios de tração para a tipologia sem *rib* consoante as condições operatórias descritas em 3.3.3. Os resultados exibem a máxima força alcançada em cada ensaio, assim como a respetiva média e desvio padrão correspondentes.

Neste contexto, cada ensaio compreendeu a análise de quatro provetes. Em determinados casos, quando os provetes apresentaram comportamentos anómalos (sinalizados a vermelho), de forma a garantir a integridade dos valores de média e desvio padrão, esses casos foram excluídos da análise. Verifica-se ainda que os resultados dos ensaios tendem a favorecer os provetes 1 e 4, possivelmente devido ao seu posicionamento no suporte, correspondendo, respetivamente, ao primeiro e último ponto de incidência do laser.

Nesta primeira fase dos ensaios, evidenciou-se uma considerável disparidade nos resultados, refletido nos elevados desvio padrão. Esse comportamento sugere uma instabilidade no processo de soldadura a laser por transmissão para uma tipologia de *rib* lisa.

Como já discutido anteriormente, esses primeiros ensaios serviram como base para a definição das melhores condições para os ensaios subsequentes de outras tipologias e dimensões de *rib*. Deste modo, distribuído pelos **Grupo A**, **Grupo B** e

Grupo C avaliou-se a influência da variação da temperatura, velocidade e pressão de aperto, respetivamente.

Tabela 31 – Resultados dos ensaios de tração dos provetes com a configuração sem Rib soldados por soldadura a laser por transmissão.

	Ensaio	Provetes				Força [N]	Desvio Padrão
		1	2	3	4		
Grupo A	J1	-	121,9	-	296,3	209,1	87,2
	J2	383,7	-	127,7	144,2	218,5	117,0
	J3	250,0	261,2	170,4	237,7	229,8	35,3
	J4	304,7	283,7	294	-	294,1	8,6
	J5	297,8	299,0	-	-	298,4	0,6
	J6	-	294,4	-	307	300,7	6,3
	J7	313,5	295,5	296,5	-	301,8	8,3
	J8	456,4	210,7	263,7	451	345,5	109,9
	J9	-	292,2	275,1	437	334,8	72,6
	J10	268,3	274,9	370,7	521,9	359,0	102,4
	J11	Material Queimado					
	J12	Material Queimado					
Grupo B	J13	346,5	341,7	381,7	480,7	387,7	55,9
	J14	277,2	274,6	369,6	348,4	317,5	42,2
	J15	313,0	270,7	286,2	337,1	301,7	25,4
	J7	Igual ao J7					
	J17	-	259,9	303,8	321,6	295,1	25,9
	J18	295,1	279,1	-	310,3	294,8	12,8
	J19	255,0	211,3	138,0	129,0	183,3	52,3
	J20	320,4	163,8	205,9	172,2	215,6	62,5
	J21	-	-	208,6	203,2	205,9	2,7
Grupo C	J22	-	151,0	127,2	-	139,1	11,9
	J23	318,8	236,8	184,0	313,8	263,3	56,2
	J24	-	291,1	-	324,7	307,9	16,8
	J7	Igual ao J7					
	J26	291,3	369,6	381,4	254,9	324,3	53,0
	J28	306,3	303,0	301,3	330,3	310,2	11,7
	J29	344,1	341,6	330,0	422,4	359,5	36,7

Variação da Temperatura do Laser

A Figura 93 mostra os resultados da média da força atingida em cada ensaio do **Grupo A** com o respetivo desvio padrão, em função da variação da temperatura, mantendo as demais condições operatórias constantes.

No gráfico, observa-se que o aumento da temperatura do laser resulta num aumento da força. Esse aumento deriva de uma maior deposição de energia na zona

da junta, fomentando uma melhor adesão entre os materiais. No entanto, ao atingir um certo limite de temperatura, o material começa a degradar e demostrar indícios de queima, representado nos ensaios J11 e J12 para temperaturas de 340 e 350°C, respetivamente.

Nos primeiros ensaios J1, J2 e J3, com as temperaturas mais reduzidas de 240 a 260°C, registaram-se os resultados mais baixos de força com desvios padrão elevados, indicando que a energia proveniente do laser não foi suficiente para promover soldaduras com um bom desempenho mecânico (força máxima atingida).

Os melhores resultados de força verificaram-se nos ensaios J8, J9 e J10, com temperaturas de 310 a 330°C na ordem dos 335 a 360 N, porém, apesar desses resultados apresentaram também valores de desvio padrão bastante elevados, indicando que para essas temperaturas o processo de soldadura a laser torna-se bastante instável furtuito de uma excessiva deposição de energia proveniente do laser, tendo sido por isso descartados.

Deste modo, os ensaios de J4 a J7 com valores de desvio padrão bastante mais reduzidos, e com resultados de força na ordem dos 300 N apresentam resultados mais confiáveis.

Portanto, com base na análise dos resultados, os valores de temperatura mais consistentes para os planeamentos subsequentes das restantes tipologias de *rib* variaram predominantemente entre 260°C e 300°C.

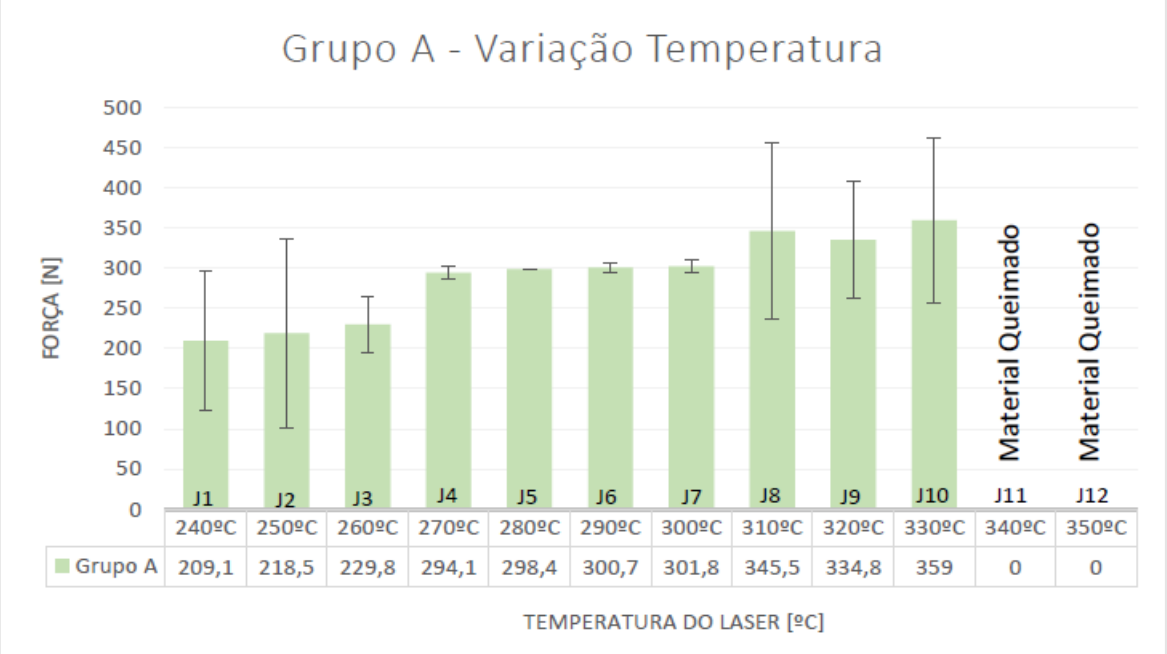


Figura 93 - Variação da temperatura da soldadura a laser, com velocidade constante 10mm/s e pressão constante 117N (para configuração sem Rib).

A Figura 94 mostra os resultados da média da força atingida em cada ensaio do **Grupo** B com o respetivo desvio padrão, em função da variação da velocidade, mantendo as demais condições operatórias constantes.

No gráfico, observa-se que à medida que a velocidade do laser aumenta os resultados de força diminuem. Essa diminuição ocorre devido a um menor tempo de interação da irradiação do laser na zona de soldadura provocado pelo aumento da velocidade do laser, resultando numa menor deposição de energia na interface dos materiais.

O melhor desempenho mecânico verificou-se no ensaio J13, com uma velocidade de 4 mm/s, e um resultado de força de 387,7 N, contudo, apresentou um elevado desvio padrão de 55,9, sugerindo que para uma velocidade tão reduzida o processo de soldadura a laser torna-se instável devido a uma exposição prolongada da energia proveniente do laser, tendo sido por isso descartado.

Desta forma, os ensaios J14, J15, J7, J17 e J18 correspondentes à velocidade de 6 a 14 mm/s apresentaram valores de desvio padrão bastante mais baixos, e resultados de força na ordem dos 300 aos 320 N apresentando desempenhos mecânicos mais confiáveis e estáveis devido a uma adequada deposição de energia.

Com velocidades superiores a 14 mm/s nos ensaios J19 a J21, é notória uma redução acentuada nos resultados de força. Essa queda ocorre derivado de um menor tempo de irradiação do laser na zona de soldadura, resultando numa deposição de energia insuficiente e, consequentemente uma interdifusão molecular limitada entre os materiais.

Portanto, com base na análise dos resultados, os valores de velocidade mais consistentes para os planeamentos futuros das restantes tipologias de *rib* variam maioritariamente entre 6 mm/s a 14 mm/s.

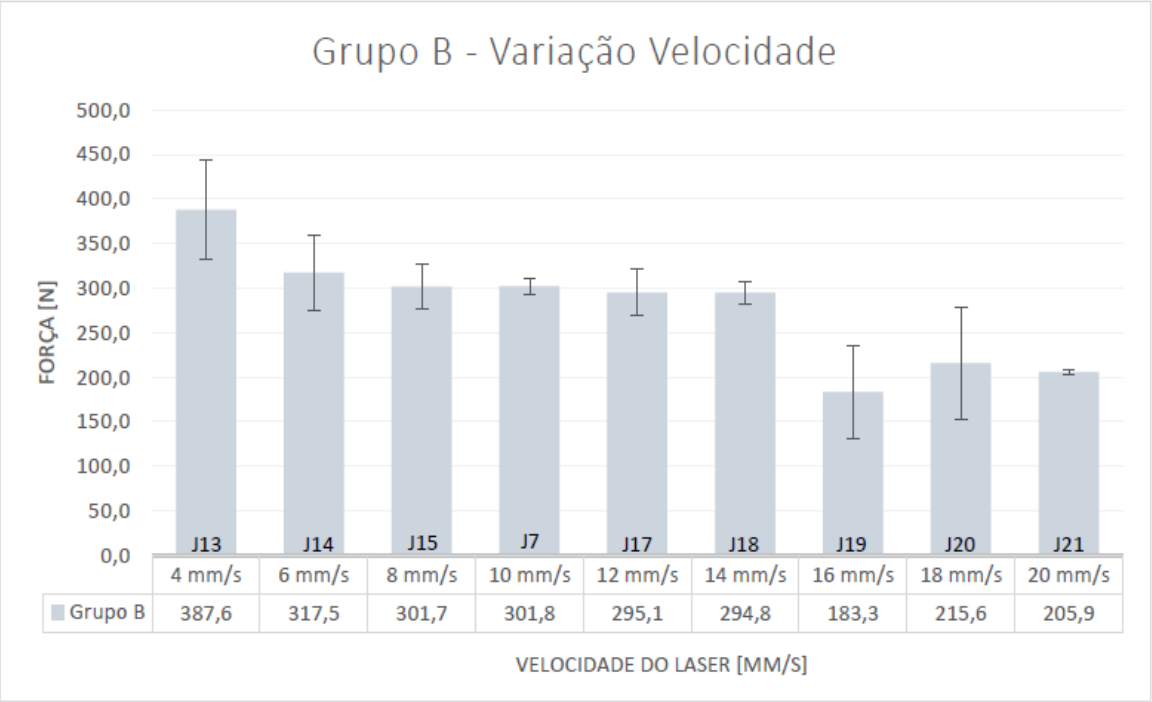


Figura 94 - Gráfico da variação da velocidade da soldadura a laser, com temperatura constante 300°C e pressão constante 117N (para configuração sem Rib).

Variação da Pressão de Aperto

Por último, a Figura 95 mostra os resultados da média da força atingida em cada ensaio do **Grupo C** com o respetivo desvio padrão, em função da variação da temperatura, mantendo as demais condições operatórias constantes.

No gráfico, observa-se que, apesar de uma ligeira flutuação nos resultados, há uma tendência clara de aumento da força consoante o aumento da pressão de aperto. Esse fenómeno é compreendido pelo aumento da pressão, permitindo assim um melhor controlo do contacto íntimo entre os materiais e, consequentemente, uma melhor interdifusão molecular.

O ensaio J22, realizado sem pressão de aperto, correspondeu ao pior resultado de força, sugerindo que não existe um contacto íntimo adequado entre os materiais, resultando num desempenho mecânico frágil.

Pelo contrário, o ensaio J28 com a maior pressão de aperto analisada de 201 N, registou o melhor resultado de força com um valor de 359,5 N, indicando que com o aumento da pressão é assegurado um contacto íntimo adequado entre os materiais, resultando em desempenhos mecânicas fortes.

Portanto, com base na análise dos resultados, os valores de pressão mais consistentes para os planeamentos subsequentes das restantes tipologias de *rib*

variaram predominantemente entre 89 N a 201 N.

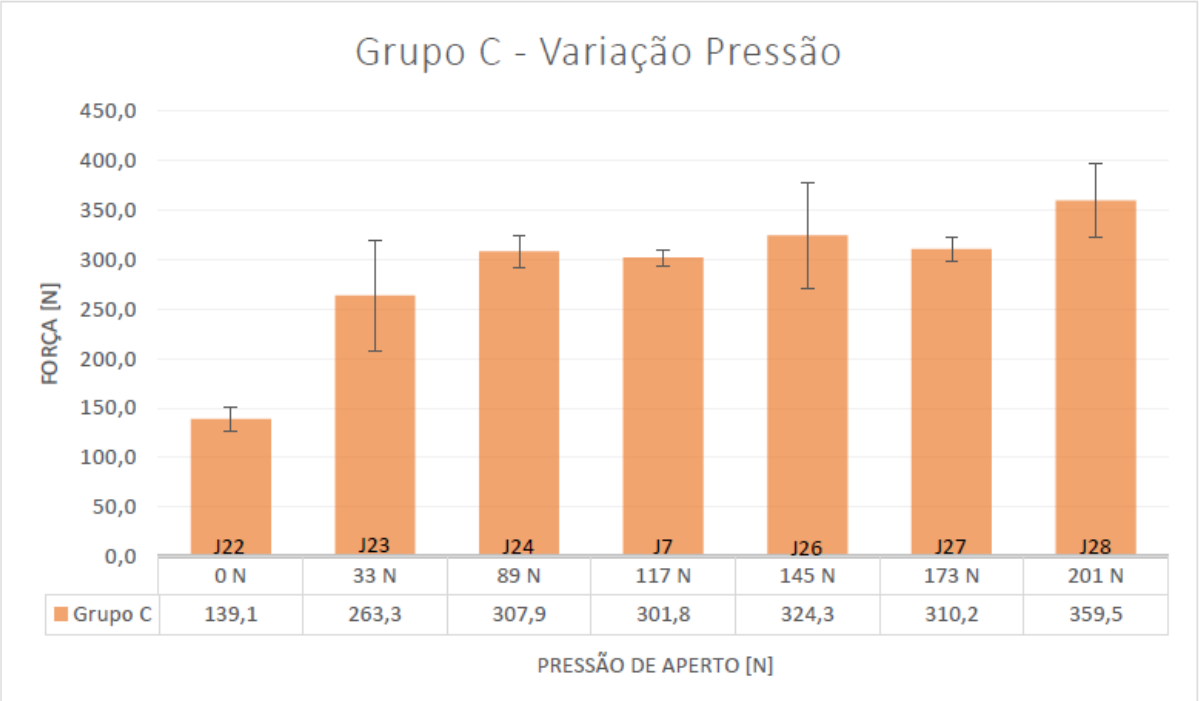


Figura 95 - Gráfico da variação da pressão da soldadura a laser, com velocidade constante 10mm/s e temperatura constante 300°C (para configuração sem Rib).

Tipologia Rib Retangular

Os resultados dos ensaio de tração para a tipologia de *rib* retangular, consoante as condições operatórias descritas em 3.3.3, encontram-se apresentados nas Tabela 32, Tabela 33, Tabela 34, Tabela 35 e Tabela 36, correspondendo às configurações P 14, P 7, P 10, P 11 e P 15, respetivamente. Nas tabelas, os valores apresentam a força máxima atingida em cada ensaio, juntamente com a respetiva média e desvio padrão. Nesta tipologia, cada ensaio compreendeu a análise de seis provetes. Nos casos em que os provetes tiverem comportamentos anómalos, estes não foram considerados nas médias.

a) Configuração P 14

Na Tabela 32 estão apresentados todos os resultados dos ensaios de tração realizados, estes permitiram analisar a influência das seguintes condições operatórias individualmente: a abertura do laser, a temperatura do laser, a velocidade do laser e a pressão de aperto.

Tabela 32 - Resultados dos ensaios de tração dos provetes com a configuração Rib retangular (P 14)

Ensaio	Provetes						Força [N]	Desvio Padrão
	1	2	3	4	5	6		
T1	168,3	188,2	188,3	228,9	269,6	262,7	217,7	38,8
T2	151,6	129,6	-	177,6	168,4	207,4	166,9	26,0
T3	170,3	184,2	132,7	163,2	222,4	148,1	170,1	28,5
T4	321,6	256,5	249,4	241,6	282,4	283,6	272,5	27,0
T15	244,2	263,4	227,0	245,2	243,2	264,7	248,0	12,9
T16	197,0	164,5	176,4	185,1	189,2	236,0	191,4	22,4
T29	213,6	182,3	269,0	284,1	200,3	236,2	230,9	36,3
T30	265,2	256,8	237,8	281,4	264,1	244,8	258,4	14,2
T31	200,4	238,6	254,2	262,2	128,4	205,6	232,2	25,1
T32	236,9	273,2	261,6	388	208,5	211,5	263,3	60,6
T33	249,5	269,3	297,5	284,1	-	248,8	269,8	19,1
T34	-	200,8	246,8	227,3	167,4	-	210,6	29,8
T35	225,0	208,7	230,4	311,6	240,0	227,5	240,6	33,1
T36	263,6	229,0	286,4	333,6	257,0	244,8	269,1	33,8

Abertura do Laser

Na análise da influência da abertura do laser, esta variou entre 1 mm e 2 mm nos ensaios T1 e T3, respetivamente, mantendo as restantes condições operatórias constantes.

De forma direta, comparando os resultados dois ensaios é possível identificar que o resultado do ensaio T1 com uma força de 217,7 N é superior ao resultado do ensaio T3 com uma força de 170,1 N, como ilustrado na Tabela 32.

Embora o aumento da abertura do laser não proporcione um controlo tão eficiente da temperatura e, consequentemente, da energia do laser incidente no *rib,* esse aumento desencadeia uma maior área de ação do laser na interface dos materiais a serem soldados, acabando por promover melhores soldaduras e mais resistentes. Pode-se assim afirmar que o aumento da abertura do laser teve um efeito positivo no desempenho mecânico da soldadura.

Portanto, nos restantes ensaios da configuração P 14, a abertura do laser foi mantida em 2 milímetros.

Temperatura do Laser

No gráfico da Figura 96 estão apresentados os resultados médios da força dos ensaios T15, T33, T4, T34, T1 e T2 em função da variação da temperatura entre os 240, 250, 260, 270, 280 e os 300°C, respetivamente, mantendo as restantes

condições operatórias constantes

No gráfico, verifica-se um efeito positivo no desempenho mecânico da soldadura com o aumento da temperatura, até ser atingida uma temperatura entre os 250 e os 260°C correspondente aos ensaios T33 e T4 com um resultado de força de 269,8 e 272,5 N e um desvio padrão de 19,1 e 27. Para temperaturas superiores à do ensaio T4 observa-se um efeito negativo resultante numa diminuição do desempenho mecânico da soldadura.

Este comportamento indica que para temperaturas inferiores a 250°C a energia proveniente do laser depositada na interface entre os provetes não foi suficiente para garantir uma interdifusão molecular entre os materiais adequada. Pelo contrário para temperaturas superiores a 260°C, a energia proveniente do laser foi excessiva proporcionando uma mistura inadequada dos materiais, possivelmente devido a um início de degradação na soldadura.

Portanto, para a configuração P 14, a melhor gama de temperaturas do laser situa-se entre os 250°C e os 260°C, conforme apresentado nos resultados dos ensaios T33 e T4, respetivamente.

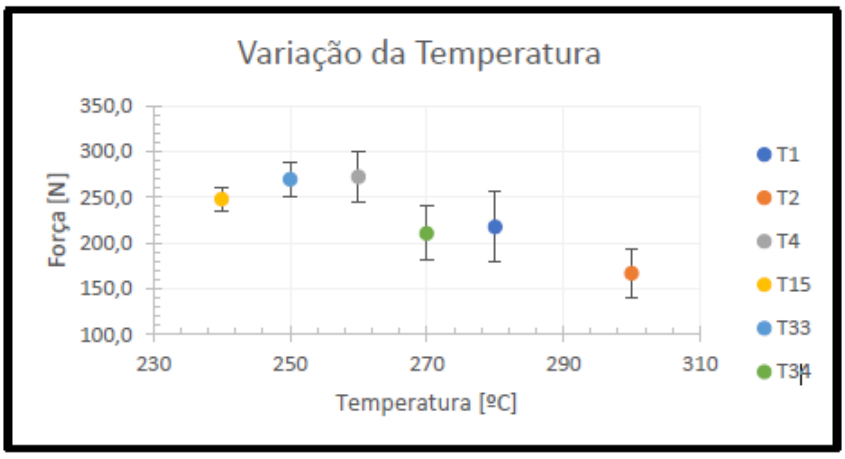


Figura 96 - Gráfico da variação da temperatura da soldadura a laser, com velocidade constante 10mm/s, pressão de aperto constante 201N e abertura do laser constante 2mm (P 14).

Velocidade do Laser

No gráfico da Figura 97 estão apresentados os resultados médios da força dos ensaios T16, T35, T4, T36 e T29 em função da variação da velocidade entre os 8, 9, 10, 11 e 12 mm/s, respetivamente, mantendo as restantes condições operatórias constantes

Como se pode observar, o gráfico apresenta um formato parabólico com a concavidade para baixo. Neste caso, verifica-se que o aumento da velocidade

apresentou um efeito positivo no desempenho mecânico da soldadura, até atingir uma zona de inflexão máximo do gráfico para uma velocidade de 10 e 11 mm/s correspondente ao ensaio T4 e T36 com os melhores resultados de força de 272,5 e 269,1 N. Para velocidades superiores à do ensaio T36 observa-se um efeito negativo resultante numa diminuição do desempenho mecânico da soldadura, comprovado pelos resultados inferiores de força quando comparados com T4 e T36.

Este comportamento indica que para velocidades inferiores a 10 mm/s, a energia proveniente do laser depositada na interface dos provetes foi excessiva devido a um maior tempo de interação entre estes, inadequando o processo de mistura entre os materiais possivelmente devido a um início de degradação na soldadura. Pelo contrário, para velocidades superiores a 11 mm/s, a energia proveniente do laser depositada na interface dos provetes não foi suficiente para garantir uma interdifusão molecular adequada entre os materiais devido a um menor tempo de interação.

Desta forma, para a configuração P 14, a melhor gama de velocidade do laser situa-se entre os 10 e 11 mm/s demonstrando ser a mais eficaz, como apresentado pelos resultados dos ensaios T4 e T36.

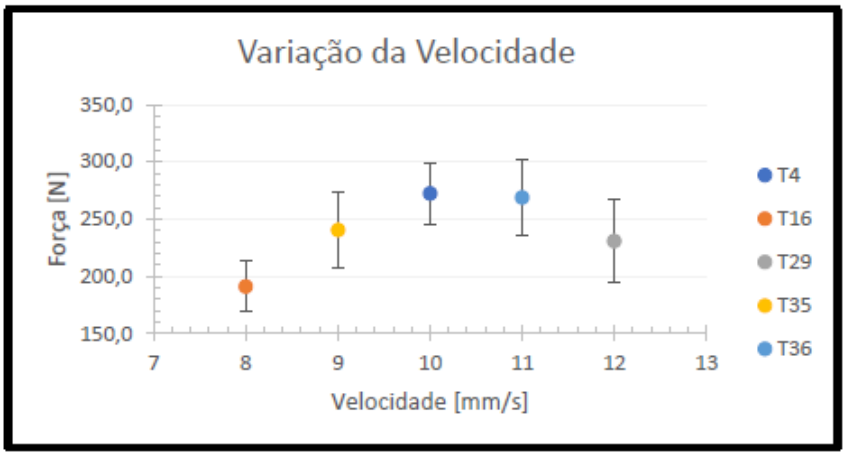


Figura 97 - Gráfico da variação da velocidade da soldadura a laser, com temperatura constante 260°C, abertura do laser constante 2mm e pressão de aperto constante 201N (P 14)

Pressão de Aperto

No gráfico da Figura 98 estão apresentados os resultados médios da força dos ensaios T30, T31, T4 e T32 em função da variação da pressão de aperto entre os 117, 145, 201 e 243 N, respetivamente, mantendo as restantes condições operatórias constantes

Neste caso, observa-se no gráfico que o ensaio T4 apresentou o melhor desempenho mecânico, atingindo uma força no valor de 272,5 N com uma pressão

de aperto de 201 N. Os restantes ensaios, tanto com pressões de aperto superiores como inferiores, exibiram resultados de força próximos a T4, contudo ligeiramente inferiores. Este comportamento indica que a variação na pressão de aperto não teve uma influência tão significativa sobre o desempenho mecânico da soldadura.
Notavelmente, o ensaio T31 apesar de ter uma pressão de aperto intermediária de 145 N, registou uma força de apenas 232,2 N, um valor significativamente inferior aos demais ensaios. A discrepância observada no ensaio T31 sugere que algo anômalo possa ter ocorrido durante o processo de soldadura, resultando num desempenho mecânico anormalmente baixo.

Além disso, para a maior pressão de aperto analisada de 243 N, no ensaio T32, resultou num desvio padrão elevado, sugerindo que com o aumento da pressão de aperto, o processo de soldadura a laser torna- se mais instável, devido a um contacto íntimo inadequado entre os materiais, possivelmente causado por um maior esmagamento dos provetes.

No entanto, para a configuração P 14, a pressão de aperto de 201 N verificou ser a mais adequada, como apresentado no ensaio T4 que atingiu o melhor resultado de força de 272,5 N.

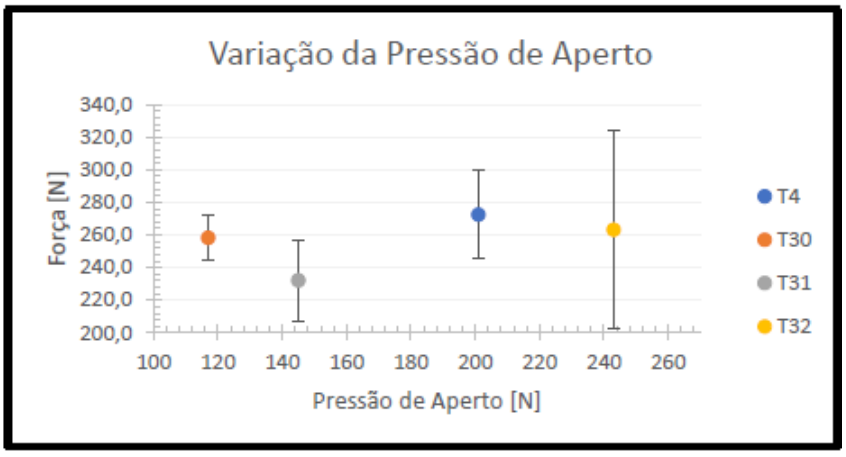


Figura 98 - Gráfico da variação da pressão da soldadura a laser, com velocidade constante 10mm/s, abertura do laser constante 2mm e temperatura constante 260°C (P 14)

Para finalizar a configuração P 14, na Figura 99 observa-se os resultados da média da força de todos os ensaios.

De um modo geral, nesta configuração é visível uma flutuação significativa nos resultados obtidos. No entanto, o ensaio com melhor desempenho mecânico foi T4 com uma força de 272,5 N e um desvio padrão de 27. As condições operatórias deste ensaio foram: abertura do laser de 2 mm; temperatura do laser de 260°C; velocidade

do laser de 10 mm/s; e pressão de aperto de 201 N.

Por outro lado, o ensaio T2 registou o pior desempenho mecânico, com uma força de 166,9 N e um desvio padrão de 26,0. As condições operatórias deste ensaio foram idênticas às do ensaio T4, exceto pela temperatura do laser, que foi de 300°C.

Destaca-se que o ensaio T4 demonstrou consistentemente bons resultados em todas as análises, exceto na análise da abertura do laser. Esta consistência sublinha a eficácia das condições operatórias utilizadas no ensaio T4.

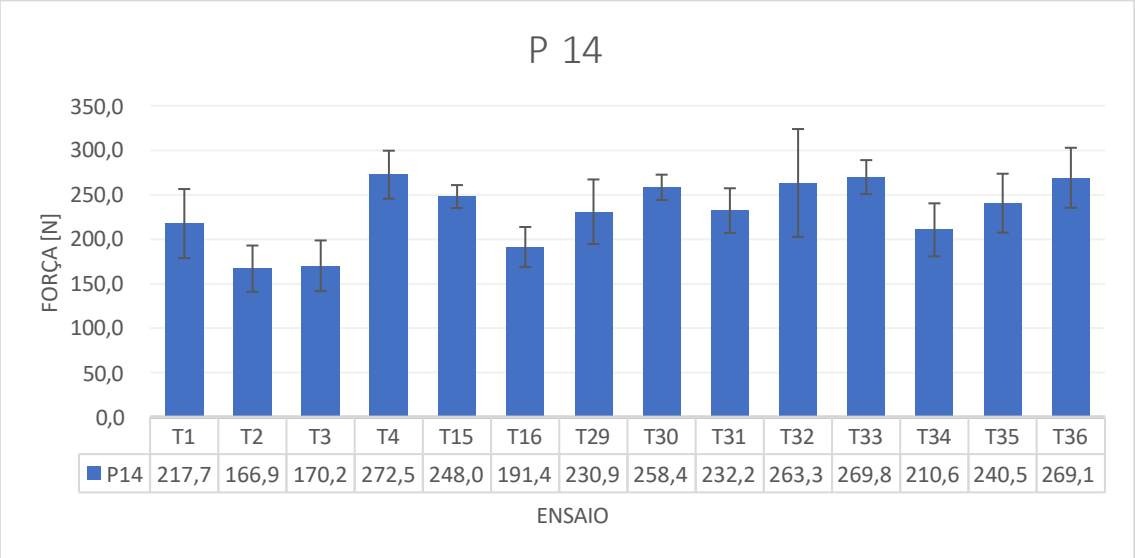


Figura 99 - Gráfico dos resultados de força dos ensaios e respetivos desvios padrão. (P 14)

b) Configuração P 7

Na Tabela 33 estão apresentados todos os resultados dos ensaios de tração realizados, estes permitiram avaliar os comportamentos das seguintes condições operatórias individualmente: a temperatura do laser, a velocidade do laser e a pressão de aperto.

A abertura do laser não foi analisada para esta configuração proveniente das conclusões retiradas na configuração anterior, permanecendo em todos os ensaios uma abertura de laser em 2 mm.

Tabela 33 -Resultados dos ensaios de tração dos provetes com a configuração Rib retangular (P 7)

Ensaio	Provetes						Força [N]	Desvio Padrão
	1	2	3	4	5	6		
T6	415,3	374,2	-	432,4	419,5	416,6	402,0	19,7
T17	351,2	392,8	383,0	411,9	330,4	412,5	380,3	30,4
T20	351,3	331,7	362,5	317,7	-	302,2	333,1	21,9
T37	109,5	97,1	113,5	129,6	104,4	123,8	116,1	9,3
T38	227,5	173,6	165,7	278,8	136,2	150,5	188,7	49,3
T39	117,5	93,9	154,5	161	173,1	158,7	153,0	18,8
T40	192,9	-	196,0	237,7	176,0	-	200,7	22,7
T54	281,0	291,3	331,1	322,6	267,1	306,4	299,9	22,5
T55	245,6	191,8	206,9	264,7	203,8	221,3	222,4	25,3

Temperatura do Laser

No gráfico da Figura 100 estão apresentados os resultados da média da força dos ensaios T54, T17, T6 e T37 consoante a variação da temperatura entre os 240, 260, 280 e 300°C, respetivamente, mantendo as restantes condições operatórias constantes.

No gráfico, verifica-se um efeito positivo no desempenho mecânico da soldadura com o aumento da temperatura, até ser atingida a temperatura de 280°C, correspondente ao ensaio T6, que apresenta o melhor resultado de força, com 402 N e um desvio padrão de 19,7. Para temperaturas superiores à do ensaio T6, observa-se um efeito negativo, resultante numa diminuição do desempenho mecânico da soldadura, comprovado pelos resultados inferiores de força quando comparados com o T6. Este comportamento assemelha-se ao da Configuração P 14 referente à temperatura do laser.

Para a configuração P 7, a temperatura de laser de 280°C demonstrou ser a mais eficaz, como apresentado pelo resultado do ensaio T6.

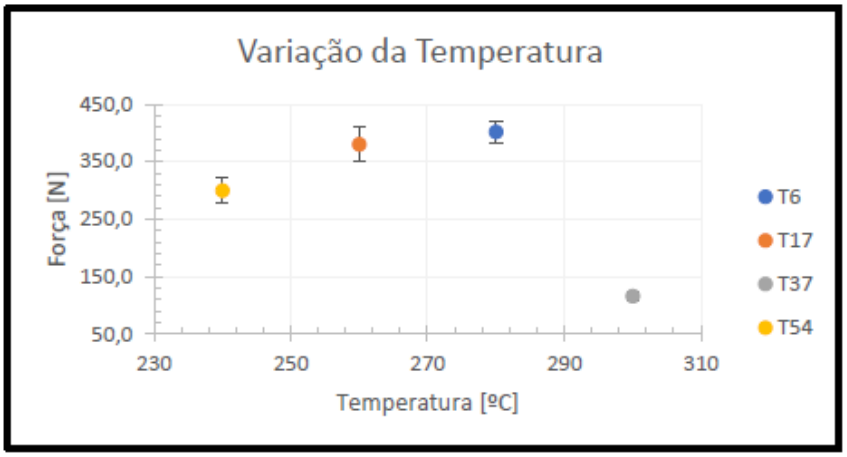


Figura 100 - Gráfico da variação da temperatura da soldadura a laser, com velocidade constante 10mm/s e pressão constante 201N (P 7).

Velocidade do Laser

Por sua vez, no gráfico da Figura 101 estão apresentados os resultados da média da força dos ensaios T38, T6 e T55 consoante a variação da velocidade entre os 8, 10 e 12 mm/s, respetivamente, mantendo as restantes condições operatórias constantes.

Como se pode observar, o gráfico exibe um formato parabólico com a concavidade para baixo. Verifica-se que o aumento da velocidade teve um efeito positivo no desempenho mecânico da soldadura, até atingir o ponto de inflexão máximo do gráfico, para uma velocidade de 10 mm/s, correspondente ao ensaio T6, que apresentou o melhor resultado de força, com 402 N. Para a velocidade superior à do ensaio T6, observa-se um efeito negativo resultante numa diminuição do desempenho mecânico da soldadura. Este comportamento assemelha-se ao da Configuração P 14 referente à velocidade do laser.

Assim, para a configuração P 7, a velocidade do laser de 10 mm/s demonstrou ser a mais eficaz, como apresentado pelo resultado do ensaio T6.

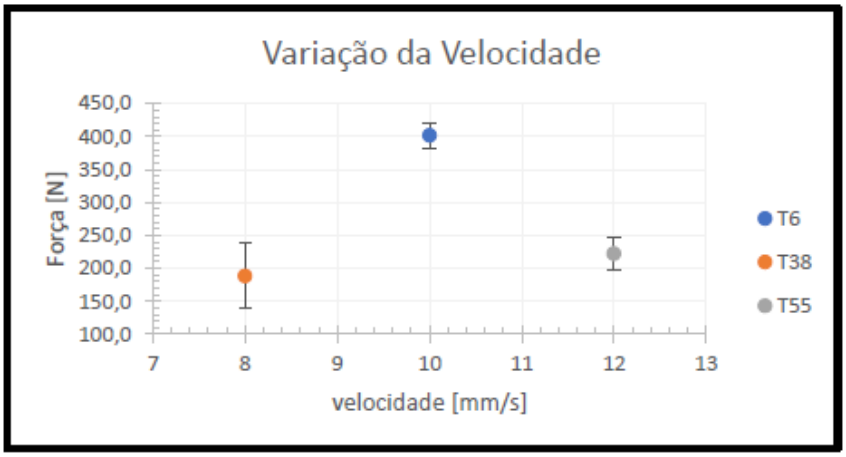


Figura 101 - Gráfico da variação da velocidade da soldadura a laser, com temperatura constante 280°C e pressão constante 201N (para configuração Rib quadrangular P 7).

Pressão de Aperto

No gráfico da Figura 102 estão apresentados os resultados da média da força dos ensaios T20, T39, T6 e T40 consoante a variação da pressão de aperto entre os 117, 145, 201 e 243 N, respetivamente, mantendo as restantes condições operatórias constantes.

Neste caso, observa-se no gráfico que o ensaio T6 apresentou o melhor desempenho mecânico, atingindo uma força de 402,0 N com uma pressão de aperto de 201 N. Os restantes ensaios, tanto com pressões de aperto superiores quanto inferiores, exibiram resultados de força menores.

Notavelmente, o ensaio T39, apesar de ter uma pressão de aperto intermediária de 145 N, registou uma força de apenas 153 N, um valor significativamente inferior aos demais ensaios. Em comparação, tanto com o ensaio T20, com uma pressão de aperto de 117 N, que alcançou uma força máxima de 333,1 N, quer com o ensaio T6. A discrepância observada no ensaio T39 sugere que algo anômalo possa ter ocorrido durante o processo de soldadura, resultando num desempenho anormalmente baixo. Este comportamento assemelha-se ao da Configuração P 14 referente à pressão de aperto.

Portanto para a configuração P 7, a melhor pressão de aperto foi de 201 N como apresentado no resultado de ensaio T6.

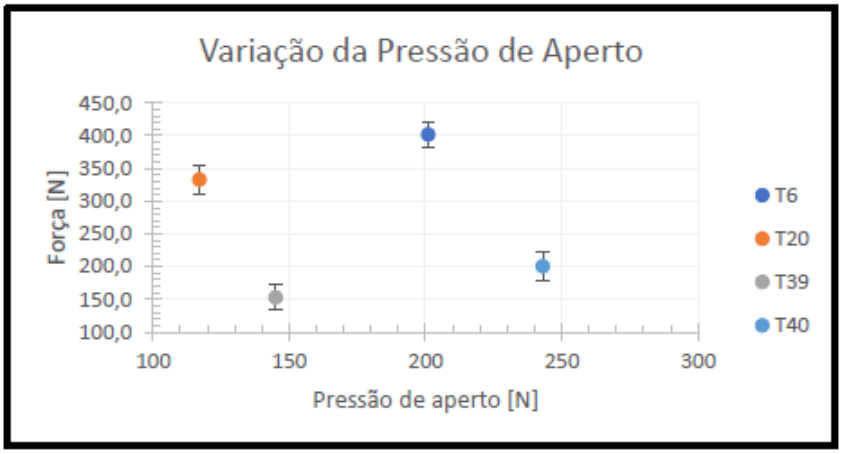


Figura 102 - Gráfico da variação da pressão da soldadura a laser, com velocidade constante 10mm/s e temperatura constante 280°C (P 7)

Por fim, para a configuração P 7, na Figura 103 observa-se os resultados da média da força de todos os ensaios.

De forma geral, é notório que os ensaios T6, T17 e T20 apresentam os melhores resultados de força registando valores bastante semelhantes entre si. Por outro lado, os restantes ensaios exibem valores muito mais redúzios de força e bastante dispares entre si.

O ensaio T6 foi o que registou o melhor desempenho mecânico com uma força de 394,7 N e um desvio padrão de 41,8. As condições operatórias deste ensaio foram: abertura do laser de 2 mm; temperatura do laser de 280°C; velocidade do laser de 10 mm/s; e pressão de aperto de 201 N.

Contrariamente, o ensaio T37 registou o pior desempenho mecânico, com uma força de 116,1 N e um desvio padrão de 9,3 As condições operatórias deste ensaio foram idênticas às do ensaio T6, exceto pela temperatura do laser, que foi de 300°C.

Destaca-se que o ensaio T6 demonstrou consistentemente bons resultados em todas as análises. Esta consistência sublinha a eficácia das condições operatórias utilizadas no ensaio T6.

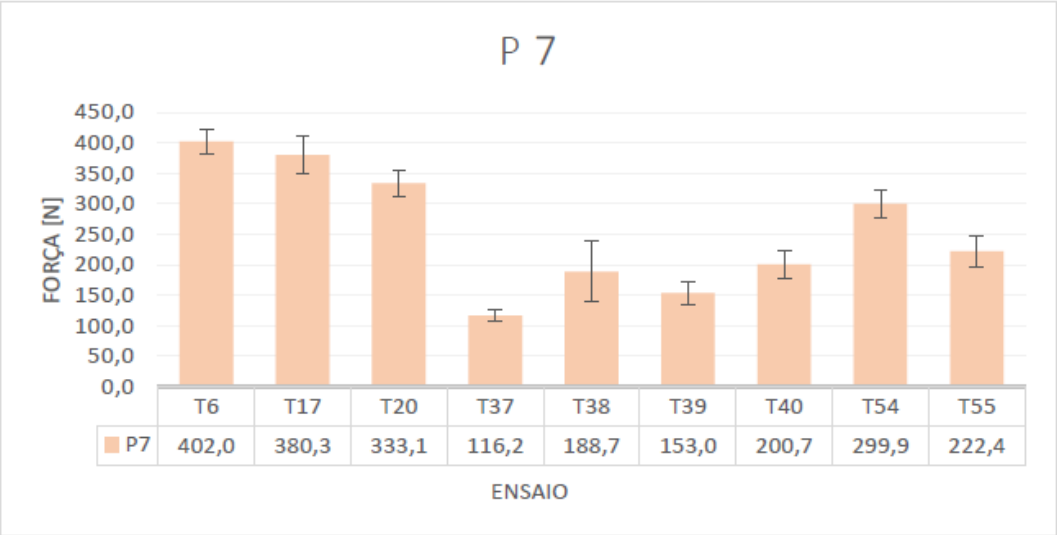


Figura 103 - Gráfico dos resultados de força dos ensaios e respetivos desvios padrão (P 7)

c) Configuração P 10

Na Tabela 34 estão apresentados todos os resultados dos ensaios de tração realizados, estes permitiram avaliar os comportamentos das seguintes condições operatórias individualmente: a temperatura do laser, a velocidade do laser e a pressão de aperto.

Tabela 34 - Resultados dos ensaios de tração dos provetes com a configuração Rib retangular (P 10)

Ensaio	Provetes						Força [N]	Desvio Padrão
	1	2	3	4	5	6		
T7	323,5	384,7	348,5	380,1	409,0	466,9	385,5	45,5
T18	437,3	420,5	434,6	483,4	364,9	452,6	432,2	35,9
T41	397,9	428,7	473,5	491,7	435,5	388,5	436,0	37,1
T42	456,7	428,5	508,9	444,7	330,6	407,2	429,4	54,1
T43	455,7	441,1	401,1	451,8	437,0	369,6	426,0	30,8
T44	455,3	448,7	432,8	487,2	405,5	394,7	437,4	31,1
T45	412,6	328,0	445,9	505,2	478,1	441,8	435,3	56,1
T58	424,1	406,7	416,9	429,0	425,1	414,0	419,3	7,6
T59	419,9	443,8	460,9	441,2	423,7	412,1	433,6	16,6
T72	461,1	477,3	487,5	456,8	443,5	429,3	459,3	19,5

Temperatura do Laser

No gráfico da Figura 104 estão apresentados os resultados da média da força dos ensaios T58, T41, T18 e T7 consoante a variação da temperatura entre os 220, 240, 260 e 280°C, respetivamente, mantendo as restantes condições operatórias constantes.

Como se pode observar, o gráfico exibe um formato parabólico com a concavidade para baixo. Evidencia-se que o aumento da temperatura provocou um efeito positivo no desempenho mecânico da soldadura, até ser atingida a zona de inflexão máxima do gráfico, para temperaturas de 240 e 260°C, correspondentes aos ensaios T41 e T18, com valores de força de 436 e 432,3 N e com os respetivos desvios padrão de 37,1 e 35,9. Para temperaturas superiores à do ensaio T18, observa-se um efeito negativo, resultando numa diminuição do desempenho mecânico da soldadura.

Este comportamento assemelha-se ao da Configuração P 14, referente à temperatura do laser. Contudo, os ensaios desta configuração apresentaram resultados de força semelhantes, à exceção do ensaio T7, que apresentou um resultado significativamente inferior.

Assim, para a configuração P 10, a melhor gama de temperaturas do laser situa-se entre os 240°C e os 260°C, conforme apresentado pelos resultados dos ensaios T41 e T18, respetivamente.

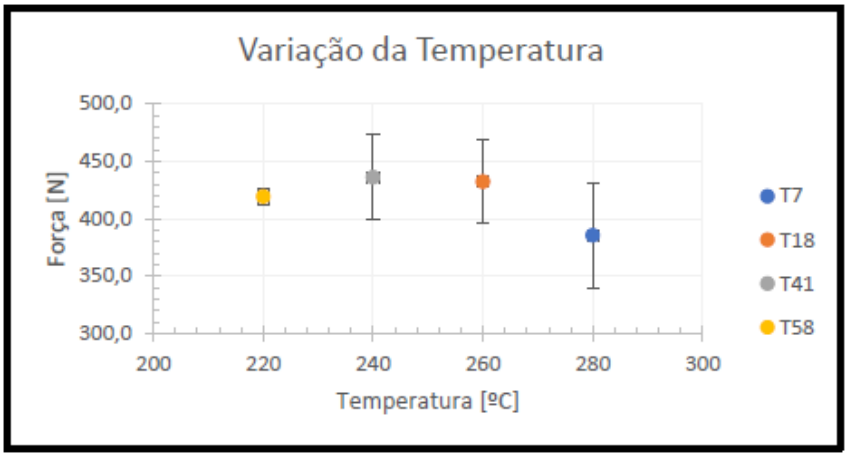


Figura 104 - Gráfico da variação da temperatura da soldadura a laser, com velocidade constante 10mm/s e pressão de aperto constante 201N (P 10)

Velocidade do Laser

No gráfico da Figura 105 estão apresentados os resultados da média da força dos ensaios T72, T59, T18 e T42 consoante a variação da velocidade entre os 6, 8, 10 e 12 mm/s, respetivamente, mantendo as restantes condições operatórias constantes.

O gráfico mostra que, com o aumento da velocidade, o desempenho mecânico da soldadura diminui. O ensaio T72, com a velocidade mais reduzida estudada (6 mm/s), exibiu um resultado médio de força de 459,3 N e um desvio padrão de 19,5. Com o aumento da velocidade para valores de 8, 10 e 12 mm/s, verificou-se um efeito negativo no desempenho mecânico das soldaduras nos ensaios T59, T18 e T42,

com resultados de força média inferiores. Salienta-se ainda que, com esse aumento, os desvios padrão também aumentaram, sugerindo que o processo de soldadura se torna mais instável.

Este comportamento indica que, para velocidades superiores a 6 mm/s, devido a um menor tempo de interação, a energia proveniente do laser entre os provetes não foi suficiente para assegurar uma interdifusão molecular entre os materiais adequada, resultando em desempenhos mecânicos mais frágeis.

Portanto para a configuração P 10, a velocidade do laser de 6 mm/s demonstrou ser a mais eficaz, como apresentado pelo resultado do ensaio T72.

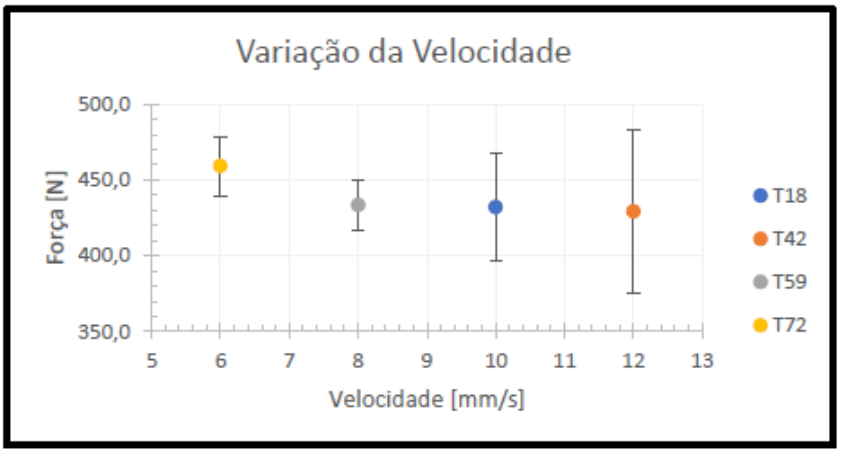


Figura 105 - Gráfico da variação da velocidade da soldadura a laser, com temperatura constante 260°C e pressão de aperto constante 201N (P 10)

Pressão de Aperto

No gráfico da Figura 106 estão apresentados os resultados da média da força dos ensaios T43, T44, T45 e T18 consoante a variação da pressão de aperto entre os 89, 117, 145 e 201 N, respetivamente, mantendo as restantes condições operatórias constantes.

O gráfico mostra que os valores de força obtidos em todos os ensaios são muito semelhantes, verificando apenas uma disparidade em torno dos 10 N entre os resultados. Isso sugere que a variação na pressão de aperto não teve uma influência significativa sobre o desempenho mecânico dos ensaios analisados.

Para a configuração P 10, o ensaio que exibiu melhor desempenho mecânico foi T44 com uma pressão de aperto de 145 N, obtendo um resultado de força de 437,4 N e um desvio padrão de 31,1.

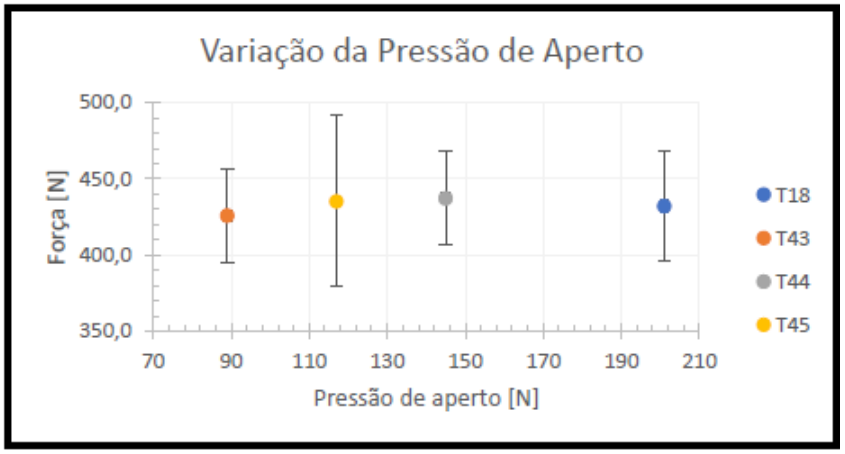


Figura 106 - Gráfico da variação da pressão da soldadura a laser, com velocidade constante 10mm/s e temperatura constante 260°C (P 10)

Para finalizar, para a configuração P 10, conforme ilustrado na Figura 107, observa-se os resultados da média da força de todos os ensaios.

À exceção do ensaio T7, todos os restantes ensaios apresentaram bons resultados de força, assim como, uma discrepância pouco acentuada. Isso sugere que estas dimensões de *rib* têm uma influência positiva no desempenho mecânico do processo de soldadura a laser por transmissão, tornando-o um processo bastante estável e fidedigno para a sua aplicação e reprodutibilidade, mesmo considerando os vários ensaios reproduzidos com diferentes condições operatórias.

Neste contexto, o ensaio que registou o melhor desempenho mecânico foi o T72, com um resultado de força de 459,3 N com um desvio padrão de 19,5. As condições operatórias deste ensaio foram: abertura do laser de 2 mm; temperatura do laser de 260°C; velocidade do laser de 6 mm/s; e pressão de aperto de 201
N. Por outro lado, o ensaio T7 registou o pior desempenho mecânico, atingindo apenas uma força de 385,5 N e um desvio padrão de 45,5. As condições operatórias deste ensaio foram idênticas às do ensaio T72, exceto pela temperatura, que foi de 280°C, e pela velocidade do laser, que foi de 10 mm/s.

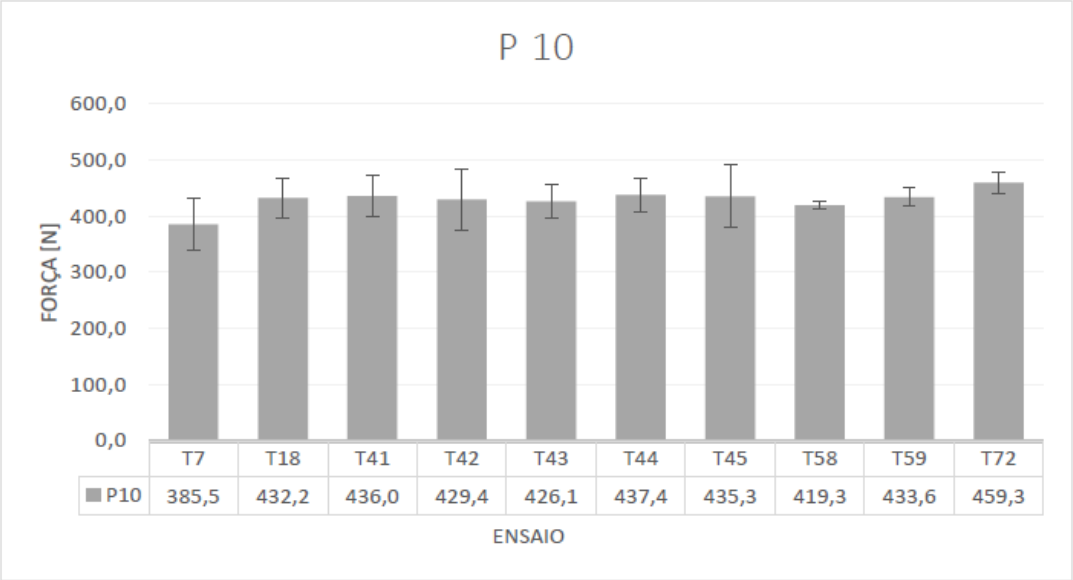


Figura 107 - Gráfico dos resultados de força dos ensaios e respetivos desvios padrão. (P 10)

d) Configuração P 11

Na Tabela 35, estão apresentados todos os resultados dos ensaios de tração realizados, estes permitiram avaliar os comportamentos das seguintes condições operatórias individualmente: a temperatura do laser, a velocidade do laser e a pressão de aperto.

Tabela 35 - Resultados dos ensaios de tração dos provetes com a configuração Rib retangular (P 11)

Ensaio	Provetes						Força [N]	Desvio Padrão
	1	2	3	4	5	6		
T8	467,3	530,9	494,3	509,0	473,2	521,7	499,4	23,5
T19	519,5	502,4	529,6	562,0	440,7	502,6	509,5	36,7
T22	433,1	506,7	413,7	426,6	377,7	441,6	433,2	38,7
T46	528,5	490,5	405,5	470,0	419,6	468,6	463,8	41,5
T47	458,8	463,2	474,1	541,0	502,7	462,2	483,7	29,5
T48	427,8	284,6	536,2	420,3	512,7	390,6	457,5	56,5
T49	512,5	506,8	483,6	525,5	497,0	443,7	494,8	26,3
T60	283,4	217,0	321,6	293,0	392,0	273,8	312,8	42,7
T61	523,2	504,2	553,3	509,3	533,7	468,9	515,4	26,3
T73	502,9	537,9	573,8	549,4	493,2	477,2	522,4	33,9
T74	505,4	477,1	498,7	521,8	479,1	454,4	489,4	21,9

Temperatura do Laser

No gráfico da Figura 108 estão apresentados os resultados da média da força dos ensaios T46, T19, T8 e T60 consoante a variação da temperatura entre os 240, 260,

280 e 300°C, respetivamente, mantendo as restantes condições operatórias constantes

Através do gráfico, observa-se um efeito positivo no desempenho mecânico da soldadura com o aumento da temperatura, até ser alcançada uma temperatura intermédia de 260 e 280°C correspondente aos ensaios T19 e T8, com resultados de força de 509,5 e 499,4 N e um desvio padrão de 36,7 e 23,5, respetivamente. Para temperaturas superiores às do ensaio T8, verifica-se um efeito negativo, resultando numa diminuição do desempenho mecânico da soldadura. Este comportamento assemelha-se ao da Configuração P 14, referente à temperatura do laser.

Portanto, para a configuração P 11, a melhor gama de temperaturas do laser situa-se entre os 260 e os 280°C, conforme apresentado pelos resultados dos ensaios T19 e T8, respetivamente.

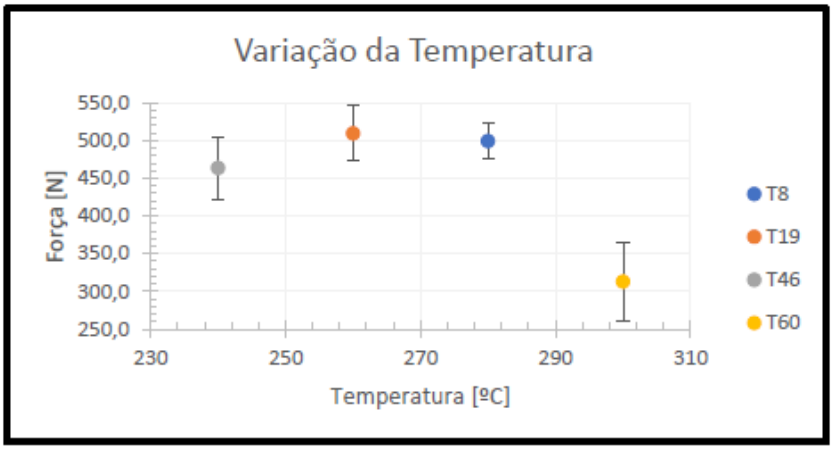


Figura 108 - Gráfico da variação da temperatura da soldadura a laser, com velocidade constante 10mm/s e pressão constante 201N (para configuração Rib quadrangular P 11).

Velocidade do Laser

No gráfico da Figura 109 estão apresentados os resultados da média da força dos ensaios T74, T61, T19 e T47 consoante a variação da temperatura entre os 6, 8, 10 e 12 mm/s, respetivamente, mantendo as restantes condições operatórias constantes.

Como se pode observar, o gráfico exibe um formato parabólico com a concavidade para baixo. Apesar dos ensaios apresentarem resultados de força próximos, verifica-se que o aumento da velocidade apresentou uma ligeira melhoria no desempenho mecânico da soldadura, até ser atingida a zona de inflexão máxima do gráfico para uma velocidade intermédia de 8 e 10 mm/s nos ensaios T61 e T19, com resultados de força de 515,4 e 509,5 N e respetivos desvio padrão de 26,3 e 36,7. Após uma velocidade de 10 mm/s observa- se uma ligeira diminuição no desempenho mecânico da soldadura no ensaio T47. Este comportamento

assemelha-se ao da Configuração P 14 referente à velocidade do laser.

Assim, para a configuração P 11, a melhor faixa de velocidade do laser situa-se entre os 8 e os 10 mm/s, conforme apresentado pelos resultados dos ensaios T61 e T19, respetivamente.

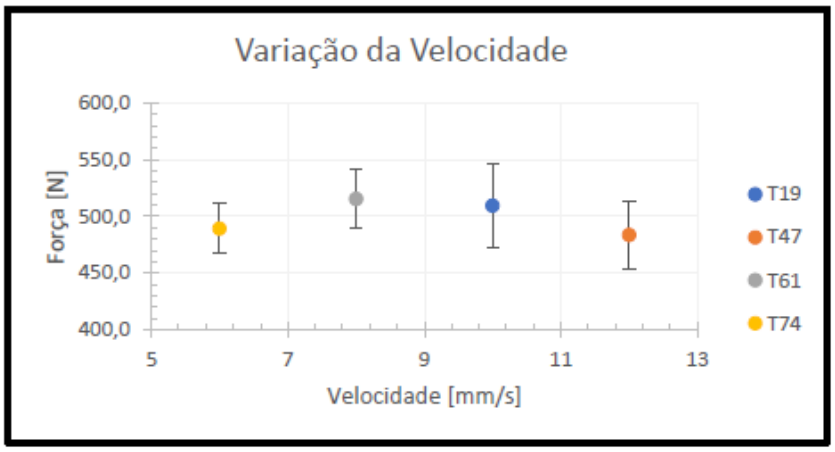


Figura 109 - Gráfico da variação da velocidade da soldadura a laser, com temperatura constante 260°C e pressão constante 201N (para configuração Rib quadrangular P 11).

Pressão de Aperto

No gráfico da Figura 110 estão apresentados os resultados da média da força dos ensaios T48, T73, T19 e T49 consoante a variação da temperatura entre os 145, 173, 201 e 243 N, respetivamente, mantendo as restantes condições operatórias constantes.

No gráfico, verifica-se um efeito positivo no desempenho mecânico da soldadura com o aumento da pressão de aperto, até ser alcançada uma pressão de 173 N, correspondente ao ensaio T73, com um resultado de força de 522,4 N e um desvio padrão de 33,9. Para pressões superiores à do ensaio T73, observa-se um efeito negativo, resultando numa diminuição no desempenho mecânico da soldadura.

Portanto para a configuração P 11, a melhor gama de pressão de aperto situa-se entre os 173 e 201 N como apresentado pelos resultados dos ensaios T73 e T19.

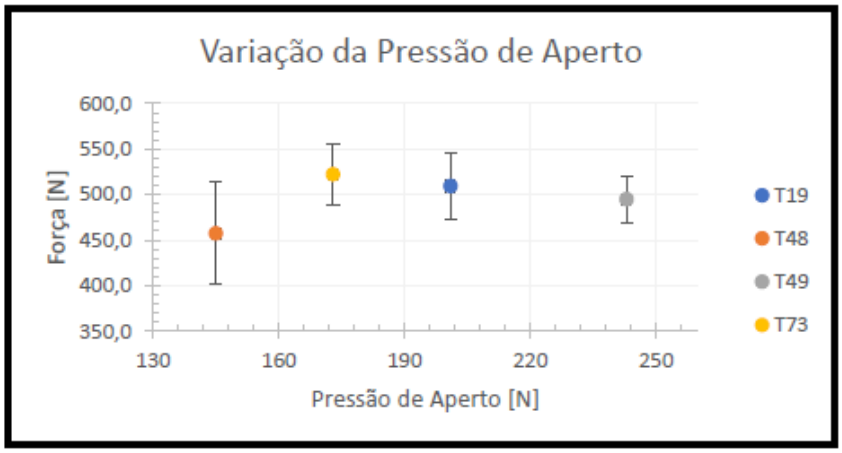


Figura 110 - Gráfico da variação da pressão da soldadura a laser, com velocidade constante 10mm/s e temperatura constante 260°C (para configuração Rib quadrangular P 11).

Para finalizar, conforme mostrado na Figura 111, observa-se os resultados da média da força de todos os ensaios para a configuração P 11.

Todos os ensaios, à exceção do ensaio T60, apresentaram bons resultados de força, assim como, uma discrepância pouco acentuada. Isso sugere que essas dimensões de *rib* têm uma influência positiva no processo de soldadura a laser por transmissão, tornando-o um processo bastante estável e fidedigno para a sua aplicação e reprodutibilidade, mesmo considerando os vários ensaios reproduzidos com diferentes condições operatórias.

Neste contexto, o ensaio que registou o melhor desempenho mecânico foi o T73, com um resultado de força de 522,4 N com um desvio padrão de 33,9. As condições operatórias deste ensaio foram: abertura do laser de 2 mm; temperatura do laser de 260°C; velocidade do laser de 10 mm/s; e pressão de aperto de 173 N.

Por outro lado, o ensaio T60 que registou o pior desempenho mecânico, com uma força de 312,8 N e um desvio padrão de 52,9. As condições operatórias deste ensaio foram idênticas às do ensaio T73, exceto pela temperatura, que foi de 300°C, e pela pressão de aperto, que foi de 201 N.

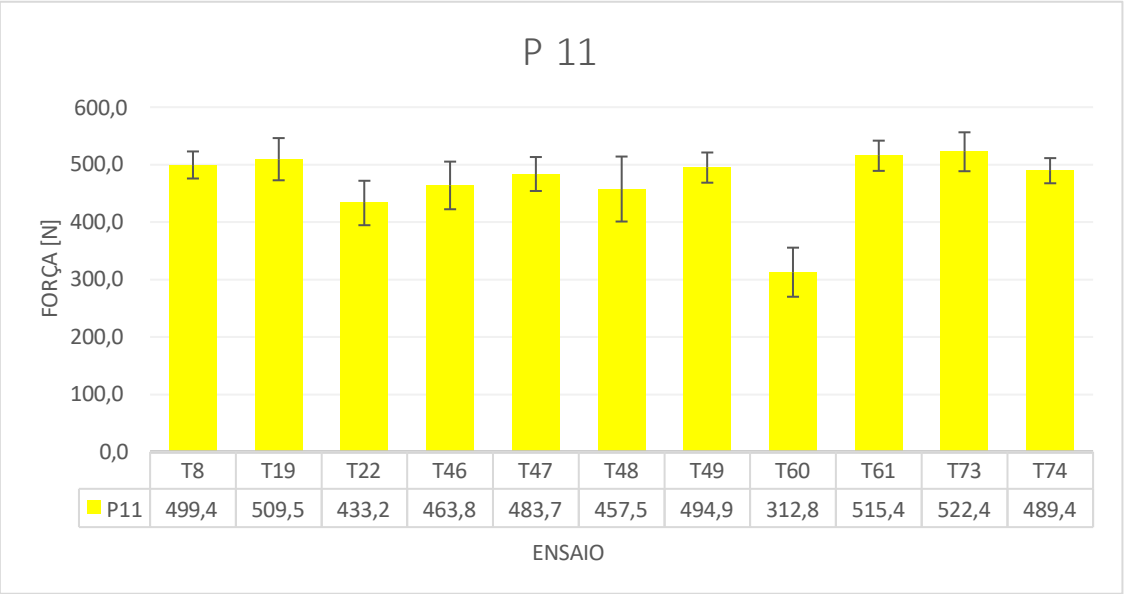


Figura 111 - Gráfico dos resultados de força dos ensaios e respetivos desvios padrão. (P 11)

e) Configuração P 15

Na Tabela 36 estão apresentados todos os resultados dos ensaios de tração realizados, estes permitiram avaliar os comportamentos das seguintes condições operatórias individualmente: o número de passagens do laser, a temperatura do laser, a velocidade do laser e a pressão de aperto.

Tabela 36 - Resultados dos ensaios de tração dos provetes com a configuração Rib retangular (P 15)

Ensaio	Provetes						Força [N]	Desvio Padrão
	1	2	3	4	5	6		
T9	170,3	195,0	124,1	122,1	-	185,0	159,3	30,6
T23	117,2	128,0	145,6	-	-	133,9	131,2	10,3
T26	164,1	272,7	350,0	475,4	203,8	259,7	287,6	102,0
T51	245,6	235,9	301,5	446,4	275,9	313,3	303,1	69,7
T62	256,9	260,3	337,7	396,5	283,4	292,0	304,5	49,0
T63	320,5	366,5	309,4	365,2	387,4	341,7	348,5	27,3
T66	334,2	307,8	298,4	404,1	317,9	319,8	330,4	34,8
T67	170,3	159,3	190,2	222,9	184,9	200,0	187,9	20,4
T75	362,1	393,5	427,7	402,6	371,2	363,0	386,7	23,8
T76	349,7	380,9	375,5	409,0	381,1	413,3	384,9	21,4
T78	291,5	322,3	353,3	438,5	309,0	325,4	340,0	47,8
T80	383,4	389,3	398,6	429,8	390,4	406,9	399,7	15,4
T90	354,1	377,9	378,0	352,6	363,8	360,8	364,5	10,2

Número de Passagens do Laser

Na análise da influência do número de passagens, esta condição variou apenas entre 1 e 2 passagens, permanecendo as restantes condições operatórias constantes. Devido a um número avultado de ensaios, foi possível realizar a comparação entre os ensaios com estas condições em três casos distintos, nomeadamente entre os ensaios T9 e T51, entre os ensaios T23 e T26 e, por último, entre os ensaios T66 e T67.

Em todos os casos, ao comparar os resultados dos ensaios verificou-se que os resultados dos ensaios T51, T26 e T66 com 2 passagens do laser foram superiores em relação aos ensaios T9, T23 e T67 com apenas 1 passagem do laser, como se pode observar nos resultados da Tabela 36. Este comportamento justifica que duas passagens do laser coadunam numa melhor deposição e distribuição de energia no *rib* e na zona da interface de ambos os materiais, devido ao aumento de tempo de interação do laser com o *rib*.

Portanto, nas restantes análises das condições operatórias da configuração P 15, o número de passagens do laser foi mantido em 2 passagens, visto ser a mais eficaz na obtenção de soldaduras com melhor desempenho mecânico.

Temperatura do Laser

Para a análise da influência da temperatura do laser, todas as restantes condições operatórias foram mantidas constantes. Esta condição verificou-se em dois casos distintos, tendo em conta o elevado número de ensaios. Nomeadamente entre os ensaios T66 e T76, e entre os ensaios T26, T51, T62 e T63, optou-se por analisar a condição com mais ensaios.

No gráfico da Figura 112 estão apresentados os resultados da média da força dos ensaios T63, T62, T51 e T26 consoante a variação da temperatura entre os 220, 240, 260 e 300°C, respetivamente, mantendo as restantes condições operatórias constantes

O gráfico mostra que com o aumento da temperatura, o desempenho mecânico da soldadura diminui. O ensaio T63, com a menor temperatura de laser analisada 220°C, apresentou o melhor resultado de força de 348,5 N e um desvio padrão de 27,3. Perante o aumento da temperatura para valores de 240, 260 e 280°C verificou-se um ligeiro efeito negativo no desempenho mecânico da soldadura, nos ensaios T62, T51 e T26, com resultados de força inferiores. De salientar que com esse aumento da temperatura, os desvios padrão também aumentaram

substancialmente, sugerindo que o processo de soldadura se torna mais instável.

Este comportamento indica que, para temperaturas superiores a 220°C, a energia proveniente do laser foi excessiva proporcionando uma mistura inadequada dos materiais, possivelmente devido a um início de degradação na soldadura.

Portanto para a configuração P 15, a melhor temperatura do laser foi de 220°C como apresentado no resultado de ensaio T63.

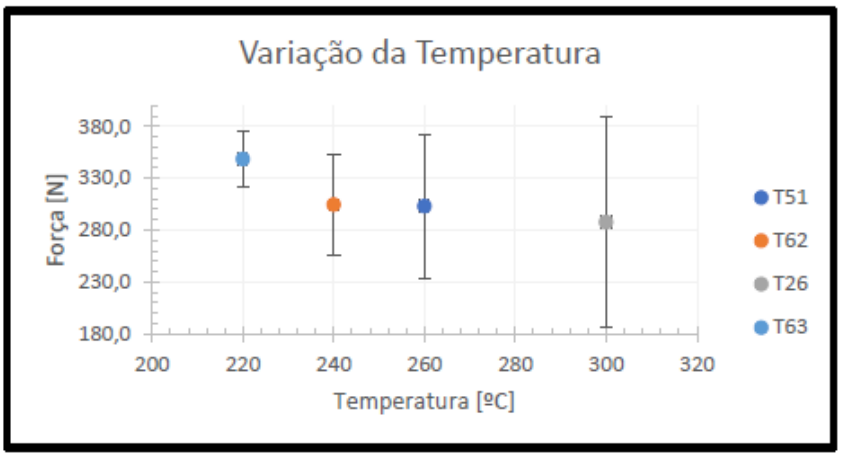


Figura 112 - Gráfico da variação da temperatura da soldadura a laser, com velocidade constante 10mm/s e pressão constante 201N e duas passagens do laser (para configuração Rib quadrangular P 15).

Velocidade do Laser

No gráfico da Figura 113 estão apresentados os resultados da média da força dos ensaios T90, T75, T76 e T63 consoante a variação da velocidade entre os 4, 6, 8 e 10 mm/s, respetivamente, mantendo as restantes condições operatórias constantes.

Como se pode observar, o gráfico exibe um formato parabólico com a concavidade para baixo. Verifica-se que o aumento da velocidade espelhou um efeito positivo no desempenho mecânico da soldadura, até atingir a zona de inflexão máximo do gráfico para uma velocidade intermédia de 6 e 8 mm/s, nos ensaios T75 e T76, com resultados de força de 386,7 e 384,9 N e respetivos desvio padrão de 23,8 e 21,4. Para uma velocidade superior a 8 mm/s observa-se uma diminuição no desempenho mecânico da soldadura no ensaio T63. Este comportamento assemelha-se ao da Configuração P 14 referente à velocidade do laser.

Então para a configuração P 15, a gama de velocidades do laser entre os 6 mm/s e os 8 mm/s, demonstrou ser a mais eficaz, como apresentado pelos resultados dos ensaios T75 e T76.

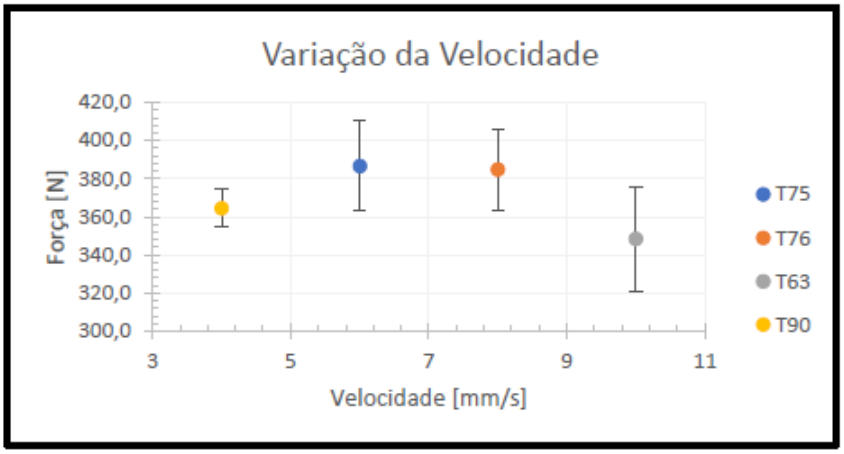


Figura 113 - Gráfico da variação da velocidade da soldadura a laser, com temperatura constante 220°C e pressão constante 201N e duas passagens do laser (para configuração Rib quadrangular P 15).

Pressão de Aperto

No gráfico da Figura 114 estão apresentados os resultados da média da força dos ensaios T78, T63 e T80 consoante a variação da pressão de aperto entre os 145, 201 e 243 N, respetivamente, mantendo as restantes condições operatórias constantes.

No gráfico, com o aumento da pressão de aperto verificou-se um efeito positivo no desempenho mecânico da soldadura até à pressão máxima avaliada de 243 N, no ensaio T80 com um resultado de força de 399,7 N e um desvio padrão de 15,4. Com esse aumento também se observou uma diminuição no desvio padrão, sugerindo uma maior estabilidade e resultados mais fidedignos no processo de soldadura a laser para pressões mais elevadas. Neste caso, como esta foi a configuração com a maior altura de *rib* é notório que o aumento na pressão de aperto proporcionou um contacto mais adequado entre os provetes a soldar permitindo uma melhor mistura entre os materiais.

Portanto para a configuração P 15, a melhor pressão de aperto foi de 243 N como apresentado no resultado de ensaio T80.

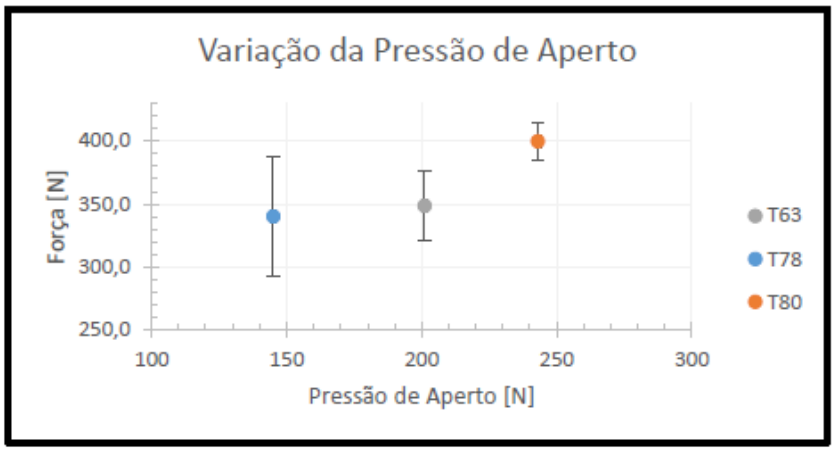


Figura 114 - Gráfico da variação da pressão de aperto da soldadura a laser, com temperatura constante 220°C, velocidade constante 10mm/s e duas passagens do laser (para configuração Rib quadrangular P 15).

Para finalizar a configuração P 15, na Figura 115 observa-se os resultados da média da força de todos os ensaios, onde é visível uma flutuação dos resultados. Verifica-se também que os ensaios T9, T23 e T67 com apenas 1 passagem do laser apresentaram resultados mais baixos em comparação com os restantes ensaios com 2 passagens do laser.

O ensaio com melhor desempenho mecânico foi o T80, que registou o melhor valor de força de 399,7N e um desvio padrão de 15,4. As condições operatórias deste ensaio foram: abertura do laser de 2 mm; número de passagens do laser 2; temperatura do laser de 220°C; velocidade do laser de 10 mm/s; e pressão de aperto de 243N.

Por outro lado, o ensaio T23 foi o que registou o pior desempenho mecânico, com uma força de 131,2 N e um desvio padrão de 21,7. As condições operatórias deste ensaio foram: abertura do laser de 2mm; número de passagens do laser 1; temperatura do laser de 300°C; velocidade do laser de 10mm/s; e pressão de aperto de 201N.

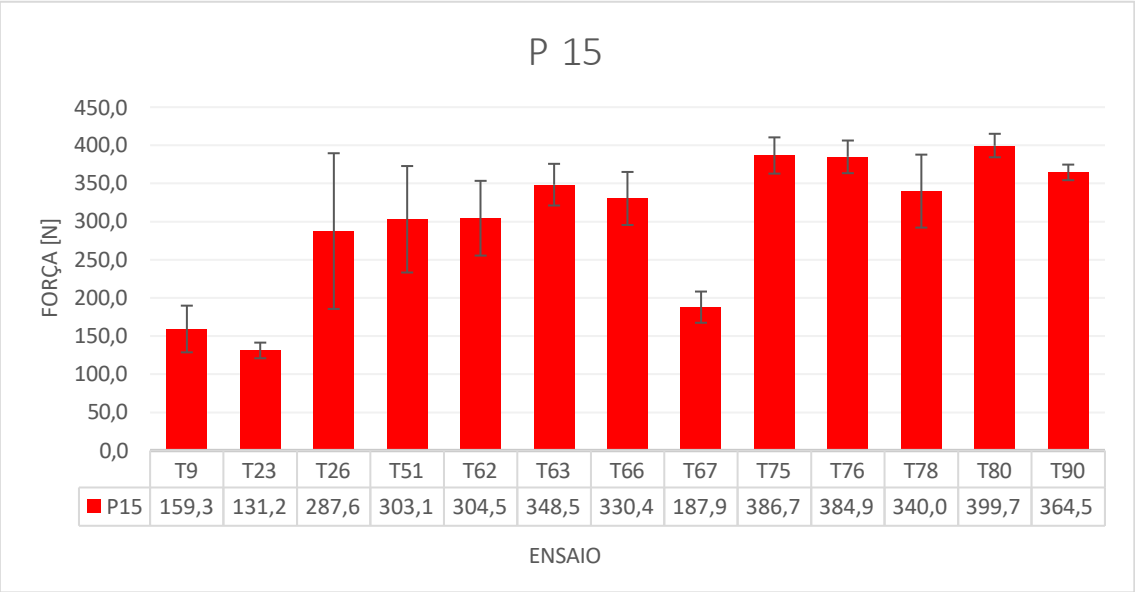


Figura 115 - Gráfico dos resultados de força dos ensaios e respetivos desvios padrão. (P 15)

Resumo das Configurações Retangulares

A Tabela 37 apresenta um resumo dos parâmetros operatórios de soldadura a laser que proporcionaram o melhor desempenho mecânico para cada configuração de *rib* retangular.

Tabela 37 – Resumo dos parâmetros de soldadura dos melhores ensaios das configurações retangulares

Configuração	Ensaio	Dimensões de *rib*			Parâmetros de Soldadura					Força [N]
		Largura [mm]	Altura [mm]	Área [mm^2]	T [°C]	V [mm/s]	P [N]	Ab Laser [mm]	Nr Passagens	
P 7	T6	0,8	0,5	0,4	280	10	201	2	1	402,0
P 10	T72	1	0,5	0,5	260	6	201	2	1	459,3
P 11	T73	1,2	0,5	0,6	260	10	173	2	1	522,4
P 14	T4	0,8	0,8	0,64	260	10	201	2	1	272,5
P 15	T80	0,8	1,1	0,88	220	10	243	2	2	399,7

Observando os ensaios e relacionando-os entre si, nota-se que, após a otimização do processo de soldadura para cada configuração, os parâmetros de soldadura variaram de uma configuração para outra, sem uma repetição exata em nenhum caso. Isso sugere que tanto os parâmetros de soldadura quanto as dimensões do *rib* retangular têm impacto considerável nos valores de força atingidos.

O gráfico da Figura 116, ilustra a força máxima atingida para as configurações P 7, P 10, P 11, P 14 e P 15, correspondendo respetivamente aos ensaios T6, T72, T73, T4 e T80. Ao comparar os valores registados, observa-se que a configuração P 11 no ensaio T73 alcançou o melhor desempenho mecânico, com uma força de 522,4 N. Este resultado foi obtido com a maior largura de *rib* (1,2 mm) e uma altura relativamente baixa (0,5 mm), usando a menor pressão de aperto entre os ensaios (173 N), o que pode indicar que esta combinação específica de dimensões e pressão é eficiente para uma soldadura robusta.

Em contrapartida, a configuração P 14 no ensaio T4 apresentou o pior resultado de força, com 272,5 N, demonstrando uma discrepância significativa em comparação com as demais configurações. Este desempenho pode estar relacionado ao facto de que P 14 possui uma altura de *rib* de 0,8 mm, maior do que outras configurações com resultados superiores, como P 7 e P 11, o que pode ter comprometido a difusão térmica e, consequentemente, a resistência da soldadura. Além disso, é relevante mencionar que esta foi a primeira configuração testada, o que poderia indicar que ajustes posteriores no processo de soldadura tenham influenciado os melhores resultados das outras configurações.

Assinala-se ainda que o ensaio T80, da configuração P 15, foi o único onde a passagem do laser atuou duas vezes. Talvez devido a esse fator, tenha atingido um resultado de força superior ao da configuração P 14, considerando a comparação dimensional dos *ribs*. A dupla atuação do laser, permitiu que P 15 utilizasse uma temperatura mais baixa (220°C) em comparação com as restantes configurações, obtendo ainda assim um bom desempenho mecânico. No entanto, a configuração P 15, que possui a maior altura de *rib* (1,1 mm), exigiu uma pressão de aperto mais alta (243 N) para assegurar uma soldadura eficaz, destacando a influência da altura do *rib* na necessidade de pressão adicional para garantir uma boa adesão.

Em síntese, os resultados mostram que as configurações de *rib* retangular com maior largura e menor altura tendem a melhorar o desempenho mecânico da soldadura, especialmente quando combinadas com pressões de aperto moderadas. A variação dos parâmetros de soldadura para cada configuração indica que a otimização do processo requer um ajuste específico e individualizado, levando em consideração tanto as dimensões do *rib* quanto os parâmetros operatórios, de modo a maximizar a resistência da soldadura.

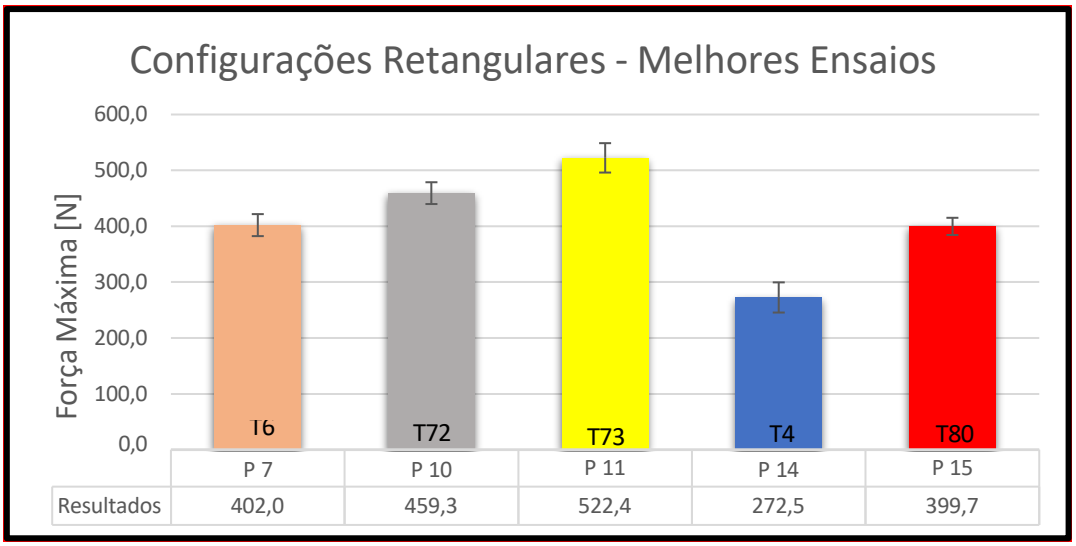


Figura 116 – Gráfico dos melhores ensaios das configurações retangulares, consoante a força máxima atingida.

Influência da altura e largura do rib

De forma a identificar a influência das dimensões da altura e largura do *rib* retangular, foram analisados apenas os ensaios que compreendiam os parâmetros de soldadura comuns em todas as configurações, esta condição designou-se como Condição 1. Os ensaios, assim como, os valores utilizados nos parâmetros de soldadura encontram-se identificados na Tabela 38.

Tabela 38 – Parâmetros de soldadura comuns a todas as configurações retangulares – Condição 1

			Condição 1				
Configuração	**Ensaio**	**Força [N]**	**T [°C]**	**V [mm/s]**	**P [N]**	**Ab Laser [mm]**	**Nr Passagens**
P 15	T9	159,3	260	10	201	2	1
P 14	T4	272,5					
P 7	T17	380,3					
P 10	T18	432,2					
P11	T19	509,5					

Na Figura 117, do lado direito, observa-se os resultados de força atingidos e respetivos desvio padrão, consoante a condição 1, para os ensaios T17, T4 e T9, correspondentes às configurações P 7, P 14 e P15, respetivamente.

A variação da altura do *rib* ocorre entre os 0,8; 1 e 1,1 mm, permanecendo a largura num valor constante de 0,8 mm. Através do gráfico, verifica-se que à medida que a altura do *rib* aumenta o desempenho mecânico diminui. Esta tendência sugere que quanto maior o espaçamento entre os provetes nas amarras, mais se viabiliza o

efeito de rotação nos ensaios de tração, como se pode constatar na Figura 92, isso reflete-se num menor desempenho mecânico da soldadura.

Na Figura 117, do lado esquerdo, observa-se os resultados de força atingidos e respetivos desvio padrão, consoante a condição 1, para os ensaios T17, T18 e T19, correspondentes às configurações P 7, P 10 e P11, respetivamente. A variação da largura do *rib* ocorre entre os 0,8; 1 e 1,2 mm, permanecendo a altura num valor constante de 0,5 mm. O gráfico mostra que à medida que a largura do *rib* aumenta o desempenho mecânico também aumenta. Esta tendência sugere que ao aumentar a largura do *rib*, progressivamente também se vai aumentar a área de contacto entre os dois provetes a soldar, que consequentemente vai permitir uma melhor adesão entre os materiais.

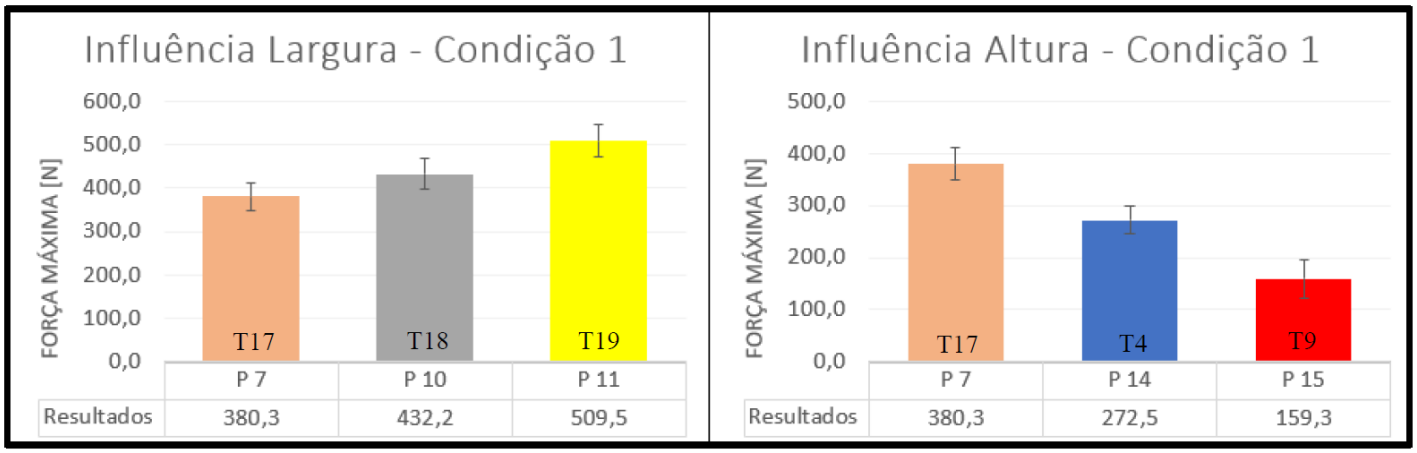


Figura 117 - Gráfico da influência da largura (à esquerda) e da influência da altura (à direita) consoante os resultados de força regidos pela Condição 1

Tipologia de rib triangular

Os resultados dos ensaio de tração para a tipologia de *rib* triangular, consoante as condições operatórias descritas em 3.3.3, encontram-se apresentados nas Tabela 39, Tabela 40, Tabela 41, Tabela 42 e Tabela 43, correspondendo às configurações P 16, P 8, P 12, P 13 e P 16, respetivamente. Os valores apresentam a força máxima atingida em cada ensaio, assim como a respetiva média e desvio padrão correspondentes. Nesta tipologia, cada ensaio compreendeu a análise de seis provetes. Nos casos em que os provetes tiverem comportamentos anómalos, estes não foram considerados nas médias.

a) Configuração P 16

Na Tabela 39 estão apresentados todos os resultados dos ensaios de tração realizados, estes permitiram avaliar a influência das seguintes condições operatórias individualmente: a abertura do laser, a temperatura do laser, a velocidade do laser e a pressão de aperto.

Tabela 39 - Resultados dos ensaios de tração dos provetes com a configuração Rib triangular (P 16)

Ensaio	Provetes						Força [N]	Desvio Padrão
	1	2	3	4	5	6		
T13	-	98,9	112,7	145,5	142,5	185,7	137,1	30,0
T24	152,1	-	162,8	163,8	154,7	182,7	163,2	10,7
T25	-	112,8	121,72	76,14	-	176	121,7	35,7
T52	186,9	-	177,3	264,5	175,4	170,8	195,0	35,2
T53	345,1	-	369,2	396,0	330,3	355,4	359,2	22,4
T68	329,8	315,0	306,8	375,3	319,5	313,7	326,7	22,8
T69	341,4	324,8	331,2	404,0	327,4	302,9	338,6	31,4
T70	225,8	301,3	308,4	355,8	178,8	-	297,8	46,6
T71	-	340,7	339,4	405,9	348,5	369,1	360,7	25,0
T82	353,2	350,4	398,0	381,4	366,0	322,6	361,9	24,0
T83	417,4	362,3	386,1	411,4	365,0	354,5	382,8	24,4
T84	365,0	327,5	393,0	434,5	354,2	353,5	371,3	34,3
T85	359,3	354,9	404,3	443,6	352,3	346,2	376,8	35,5
T92	596,8	538,7	509,6	665,5	606,5	564,6	580,3	50,3

Abertura do Laser

Na análise da influência da abertura do laser, esta variou entre 1 e 2 mm nos ensaios T53 e T92, respetivamente, mantendo as restantes condições operatórias constantes.

Comparando os resultados dos dois ensaios, de forma direta, é possível identificar que o resultado do ensaio T92 com uma força de 580,3 N é superior ao resultado do ensaio T53 com uma força de 359,2 N, conforme ilustrado na Tabela 39. Este comportamento assemelha-se ao da Configuração P 14 referente à abertura do laser.

Contudo, apesar do resultado observado em T92, a maioria dos ensaios em seguida analisados apresentam apenas 1 mm de abertura do laser, por este ensaio ter sido o último a ser planeado e realizado.

Número de Passagens do Laser

Na análise da influência do número de passagens, esta condição variou apenas entre 1 e 2 passagens nos ensaios T24 e T92, respetivamente, permanecendo as restantes condições operatórias constantes

Neste caso, ao comparar os resultados dos dois ensaios verificou-se que o ensaio T92 com 2 passagens do laser e uma força de 580,3 N é bastante superior ao resultado do ensaio T24 com apenas 1 passagem do laser e uma força de 163,2 N, como apresentado na Tabela 39. Este comportamento assemelha-se ao da Configuração P 15 referente ao número de passagens.

Portanto, as restantes condições operatórias analisadas para a configuração P 16, apresentam apenas 2 passagens do laser.

Temperatura do Laser

No gráfico da Figura 118 estão apresentados os resultados da média da força dos ensaios T68, T85, T53, T84, e T69 consoante a variação da temperatura entre os 220, 230, 240, 250 e os 260°C, respetivamente, mantendo as restantes condições operatórias constantes.

Observando o gráfico, verifica-se que os ensaios T85, T53 e T84 com temperaturas do laser intermédias de 230°C, 240°C e 250°C com um resultado de força de 376,8, 359,2 e 371,3 N e respetivos desvio padrão de 35,5, 22,4 e 34,3, apresentaram os melhores resultados de força e, consequentemente, melhores desempenhos mecânicos. Nos restantes ensaios T68 e T69, com uma temperatura inferior de 220°C e uma temperatura superior de 260°C, observou-se uma diminuição no desempenho mecânico na soldadura. Este comportamento indica que para temperaturas inferiores a 230°C a energia proveniente do laser depositada na interface entre os provetes não foi suficiente para garantir uma interdifusão molecular entre os materiais adequada. Pelo contrário para temperaturas superiores a 250°C, a energia proveniente do laser foi excessiva proporcionando uma mistura inadequada dos materiais, possivelmente devido a um início de degradação na soldadura.

Portanto, para a configuração P 16, a melhor gama de temperaturas do laser situa-se entre os 230°C a 250°C, conforme apresentado pelos resultados dos ensaios T85, T53 e T84, respetivamente.

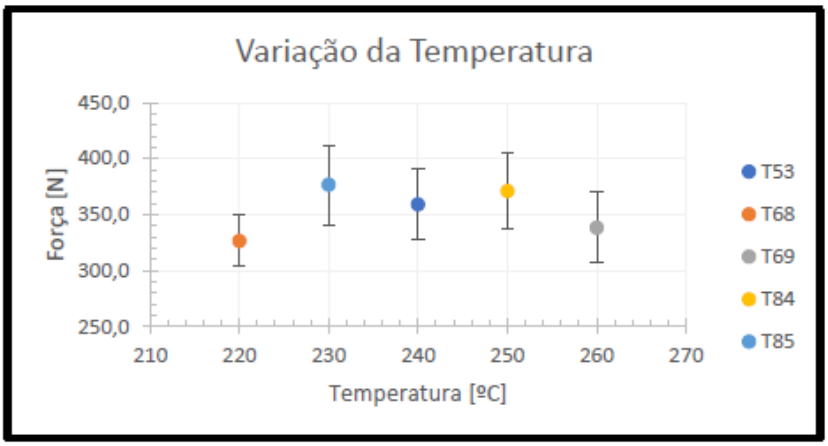


Figura 118 - Gráfico da variação da temperatura da soldadura a laser, com velocidade constante 10mm/s, pressão constante 201N, 2 passagens e 1 mm de abertura de laser (para configuração Rib triangular P 16)

Velocidade do Laser

No gráfico da Figura 119 estão apresentados os resultados da média da força dos ensaios T82, T71 e T53 consoante a variação da velocidade entre os 6, 8 e 10 mm/s, respetivamente, mantendo as restantes condições operatórias constantes.

O gráfico mostra que os valores de força obtidos em todos os ensaios são muito semelhantes, verificando apenas uma disparidade na ordem dos 3 N entre os resultados. Isso sugere que a variação na velocidade do laser não teve uma influência significativa sobre o desempenho mecânico dos ensaios analisados.

Para a configuração P 16, todas as velocidades analisadas podem ser utilizadas no processo de soldadura laser por transmissão, visto, neste caso, a velocidade do laser não ter apresentado uma influência assinalável no desempenho mecânico.

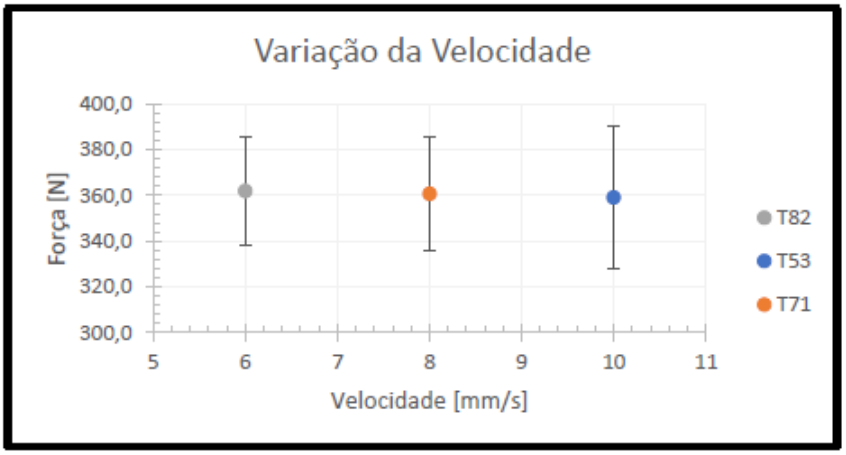


Figura 119 - Gráfico da variação da velocidade da soldadura a laser, com duas passagens, temperatura constante 240°C, pressão constante 201 N e 1 mm de abertura do laser (para configuração Rib triangular P 16).

Força de Aperto

No gráfico da Figura 120 estão apresentados os resultados da média da força dos ensaios T70, T53 e T83 consoante a variação da pressão entre os 145, 201 e 243 N, respetivamente, mantendo as restantes condições operatórias constantes.

No gráfico, com o aumento da pressão de aperto verificou-se um efeito positivo no desempenho mecânico da soldadura até à pressão máxima estudada de 243 N, referente ao ensaio T83 com um resultado de força de 382,8 N e um desvio padrão de 24,4. Além disso, com esse aumento também se observou observou-se uma diminuição no desvio padrão, sugerindo uma maior estabilidade e resultados mais fidedignos no processo de soldadura a laser para pressões mais elevadas.

Neste caso, como o formato do *rib* é triangular, este comportamento indica que forças de aperto mais elevadas vão garantir um contacto íntimo entre os materiais mais adequado, promovendo uma melhor difusão e consequentemente melhores desempenhos mecânicos.

Portanto para a configuração P 16, a melhor pressão de aperto foi de 243 N como apresentado no resultado de ensaio T83.

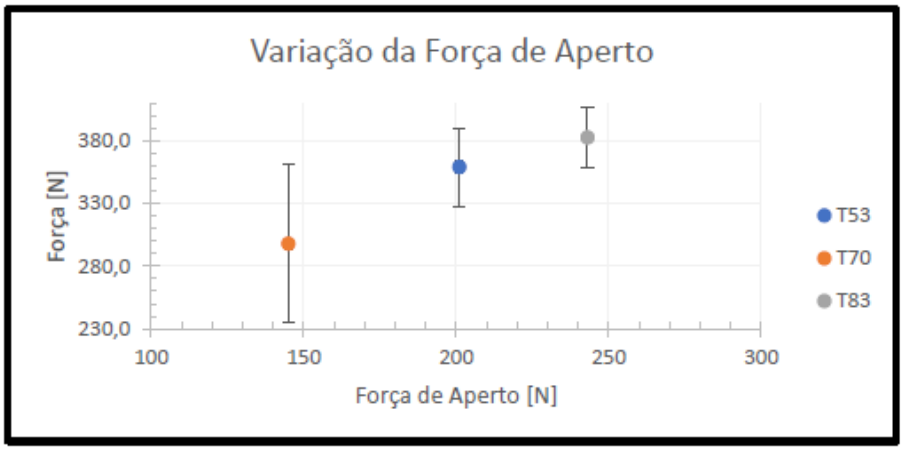


Figura 120 - Gráfico da variação da pressão da soldadura a laser, com velocidade constante 10mm/s, temperatura constante 240°C, 2 passagens do laser e 1 mm de abertura do laser (para configuração Rib triangular P 16).

Para finalizar, conforme ilustrado na Figura 121, para a configuração P 16, observa-se os resultados da média da força de todos os ensaios. Verifica-se que com apenas 1 passagem do laser, os ensaios T13, T24, T25 e T52, em comparação com os restantes ensaios com 2 passagens do laser, apresentaram o pior desempenho mecânico na soldadura com os resultados mais baixos. Observa-se ainda que destacadamente, o ensaio T92 sendo o único com 2 passagens do laser e uma abertura do laser de 2 mm apresentou o melhor desempenho mecânico na

soldadura. Os restantes ensaios registaram resultados intermédios semelhantes entre si.

Com um resultado de força de 580,3 N e um desvio padrão de 50,3, o ensaio T92 foi o que registou o melhor desempenho mecânico. As condições operatórias deste ensaio foram: 2 passagens do laser; abertura do laser de 2 mm; temperatura do laser de 240°C; velocidade do laser de 10 mm/s; e pressão de aperto de 201 N. Como o ensaio T92 foi o único com as condições operatórias de 2 mm de abertura do laser e 2 passagens do laser, o segundo ensaio com melhor desempenho mecânico foi o T83, com um resultado de força de 382,8 N e um desvio padrão de 24,4. As condições operatórias deste ensaio foram: 2 passagens do laser; abertura do laser de 1 mm; temperatura do laser de 240°C; velocidade do laser de 10 mm/s; e pressão de aperto de 243 N.

Por outro lado, o ensaio T25 que registou o pior desempenho mecânico, com uma força de 121,7 N e um desvio padrão de 35,7. As condições operatórias deste ensaio foram idênticas às do ensaio T92, exceto pela temperatura, que foi de 280°C, e pelo número de passagens, que foi de 1 passagem.

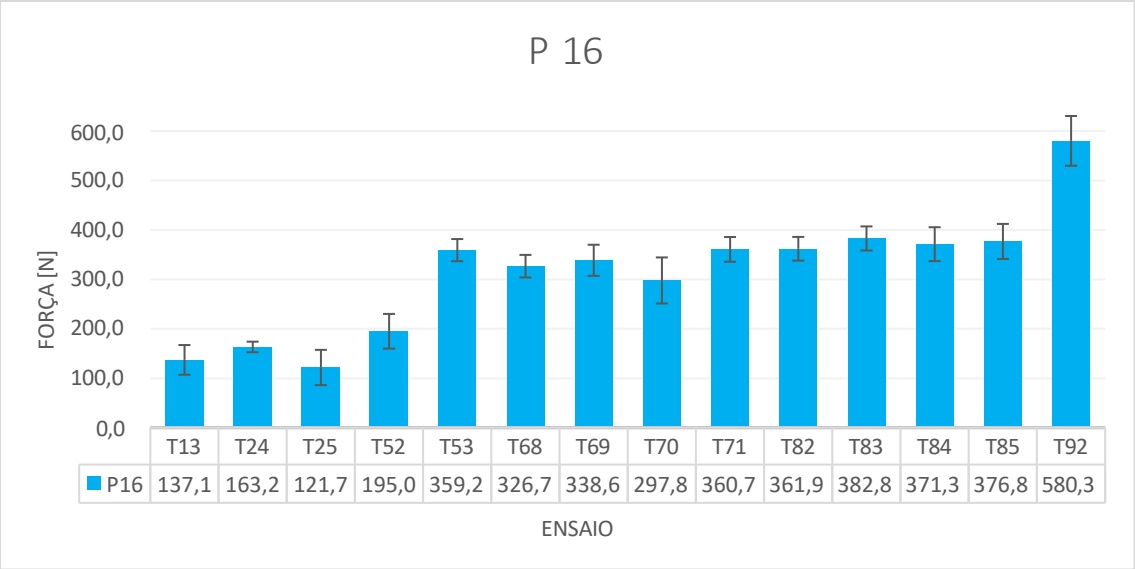


Figura 121 - Gráfico dos resultados de força dos ensaios e respetivos desvios padrão. (P 16)

b) Configuração P 8

Na Tabela 40 estão apresentados todos os resultados dos ensaios de tração realizados, estes permitiram avaliar os comportamentos das seguintes condições operatórias individualmente: a temperatura do laser, a velocidade do laser e a pressão de aperto.

Tabela 40 - Resultados dos ensaios de tração dos provetes com a configuração Rib triangular (P 8)

Ensaio	Provetes						Força [N]	Desvio Padrão
	1	2	3	4	5	6		
T86	352,6	369,4	403,2	370,0	342,7	380,3	369,7	19,4
T93	405,4	349,8	353,9	416,1	385,0	331,8	373,7	30,7
T94	392,5	352,9	386,8	426,4	416,1	370,6	390,9	25,1
T95	365,8	344,3	332,1	447,1	412,1	344,6	374,3	41,6
T96	442,1	393,2	389,9	456,4	378,1	460,5	420,0	33,8
T97	387,2	380,8	424,2	516,4	446,8	398,3	425,6	46,4
T98	342,4	365,1	372,0	400,3	369,7	354,8	367,4	17,8
E18	423,3	381,3	354,3	507,6	433,8	417,3	419,6	47,8
E19	446,6	393,9	346,1	489,0	441,5	348,6	410,9	52,7
E20	418,5	413,4	410,5	441,5	392,5	390,4	411,1	17,1
E33	431,8	294,5	244,6	-	461,0	293,2	345,0	85,2
E34	-	377,8	392,3	484,1	-	358,6	403,2	48,2

Temperatura do Laser

Para a análise da influência da temperatura do laser, todas as restantes condições operatórias foram mantidas constantes. Esta condição verificou-se em dois casos distintos, tendo em conta o elevado número de ensaios nomeadamente, entre os ensaios T96, E18 e E34, e entre os ensaios T86, T93, T94, E19 e E33. No gráfico da Figura 122 estão apresentados os resultados da média da força dos ensaios T93, T86, T94, E19 e E33 consoante a variação da temperatura entre os 220, 240, 260, 280 e 300°C, respetivamente. No gráfico, verifica-se um efeito positivo no desempenho mecânico da soldadura com o aumento da temperatura, até ser atingida uma temperatura de 280°C correspondente ao ensaio E19 com um resultado de força de 410,9 N e um desvio padrão de 52,7. Para temperaturas superiores à do ensaio E19 observa-se um efeito negativo resultante numa diminuição do desempenho mecânico da soldadura. Com o aumenta da temperatura nos ensaios estudados, também aumenta o desvio padrão, sugerindo que o processo se torna mais instável. Este comportamento assemelha-se ao da Configuração P 14 referente à temperatura do laser.

Para a configuração P 8, a temperatura de laser de 280°C demonstrou ser a mais eficaz, como apresentado pelo resultado do ensaio E19.

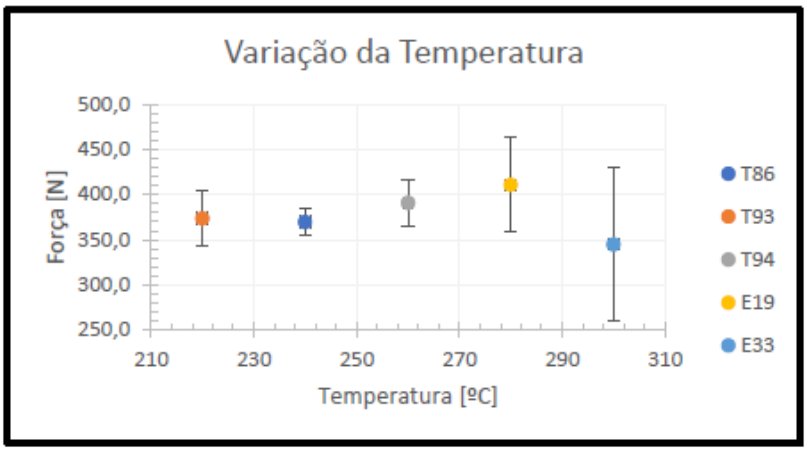


Figura 122 - Gráfico da variação da temperatura da soldadura a laser, com velocidade constante 10 mm/s e pressão constante 201 N (P 8)

Velocidade do Laser

No gráfico da Figura 123 estão apresentados os resultados da média da força dos ensaios T86, T96, T95 e E20 consoante a variação da temperatura entre os 4, 6, 8 e 10 mm/s, respetivamente, mantendo as restantes condições operatórias constantes.

Como se pode observar no gráfico este apresenta resultados de força próximos na transição da velocidade de 4 para os 6 mm/s, contudo com o aumento da velocidade verifica-se uma ligeira melhoria no desempenho mecânico da soldadura, até ser atingido o ponto de inflexão máxima do gráfico para uma velocidade de 6 mm/s no ensaio T95, com um resultado de força de 420 N e um desvio padrão de 33,8. Após uma velocidade de 6 mm/s observa-se um efeito negativo no desempenho mecânico da soldadura nos ensaios T95 e E20.

Assim, para a configuração P 8, a melhor faixa de velocidade do laser situa-se entre os 4 e os 6 mm/s, conforme apresentado pelos resultados dos ensaios T86 e T196, respetivamente.

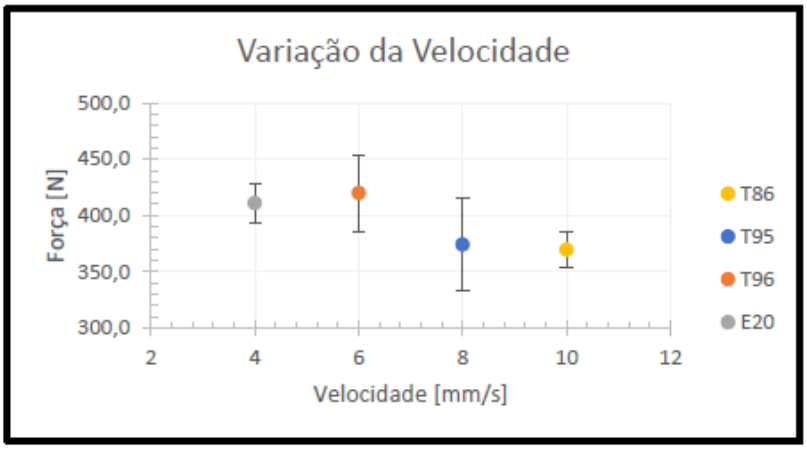


Figura 123 - Gráfico da variação da velocidade da soldadura a laser, com temperatura constante 240°C e pressão constante 201 N (P 8).

Pressão de Aperto

No gráfico da Figura 124 estão apresentados os resultados da média da força dos ensaios T98, T86 e T97 consoante a variação da pressão de aperto entre os 173, 201 e 243 N, respetivamente, mantendo as restantes condições operatórias constantes.

No gráfico, com o aumento da pressão de aperto verificou-se um efeito positivo no desempenho mecânico da soldadura até à pressão máxima avaliada de 243 N, referente ao ensaio T97 com o maior resultado de força de 425,6 N e um desvio padrão de 46,4. Este comportamento assemelha-se ao da configuração P 16 referente à pressão de aperto, com exceção dos valores apresentados no desvio padrão dos ensaios. Neste caso, consoante o aumento da pressão, também o desvio padrão aumentou, sugerindo uma maior instabilidade no processo de soldadura a laser para pressões mais elevadas.

Contudo para a configuração P 8, a melhor pressão de aperto foi de 243 N como apresentado no resultado de ensaio T97.

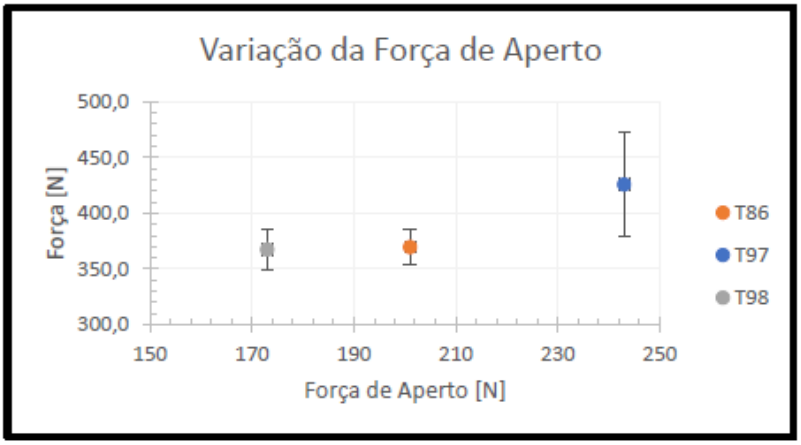


Figura 124 - Gráfico da variação da pressão da soldadura a laser, com velocidade constante 10 mm/s e temperatura constante 240°C (P 8)

Para finalizar a configuração P 8, conforme ilustrado na Figura 125, observa-se os resultados da média da força de todos os ensaios. Os ensaios T96, T97 e E18 foram os que apresentaram o melhor desempenho mecânico com os resultados de força mais elevados. Os restantes ensaios apresentaram resultados de força mais reduzidos, mas todos bastante semelhantes entre si, com exceção do ensaio E33 que registou o pior resultado de força.

Neste contexto, o ensaio que registou o melhor desempenho mecânico foi o T97, com um resultado de força de 425,6 N e um desvio padrão de 46,4. As condições operatórias deste ensaio foram: abertura do laser de 1 mm; temperatura do laser de 240°C; velocidade do laser de 10 mm/s; pressão de aperto de 243 N e duas passagens do laser.

Contrariamente, o ensaio E33 que registou o pior desempenho mecânico, atingiu apenas uma força de 345 N e um desvio padrão de 85,2. As condições operatórias deste ensaio foram idênticas às do ensaio E21, exceto pela temperatura, que foi de 300°C, e pela pressão de aperto, que foi de 201 N.

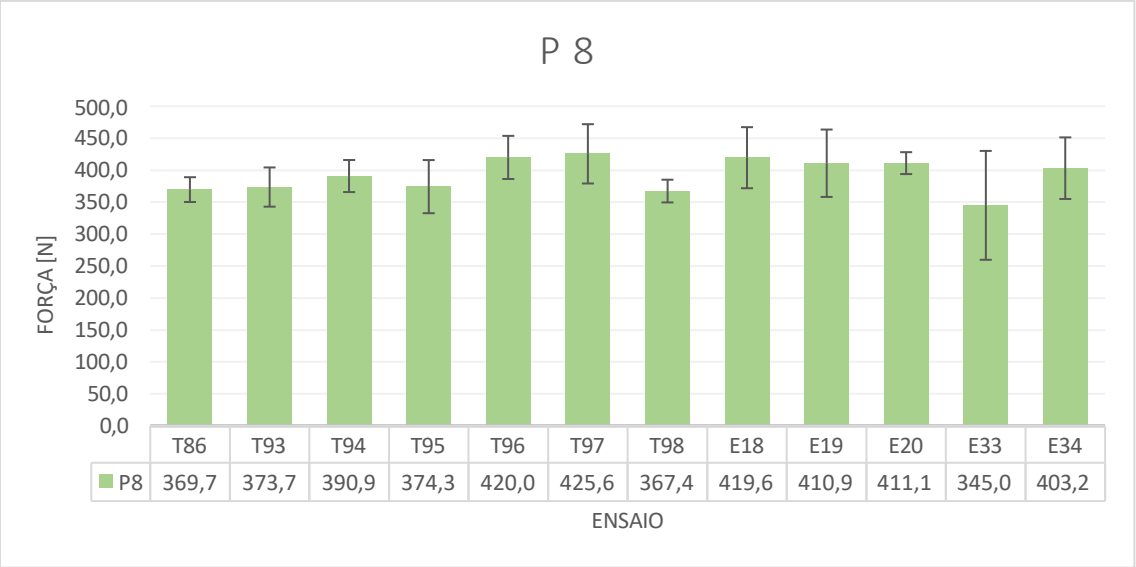


Figura 125 - Gráfico dos resultados de força dos ensaios e respetivos desvios padrão. (P 8)

c) Configuração P 12

Na Tabela 41 estão apresentados todos os resultados dos ensaios de tração realizados, estes permitiram avaliar os comportamentos das seguintes condições operatórias individualmente: a temperatura do laser, a velocidade do laser e a pressão de aperto.

Tabela 41 - Resultados dos ensaios de tração dos provetes com a configuração Rib triangular (P 12)

Ensaio	Provetes						Força [N]	Desvio Padrão
	1	2	3	4	5	6		
T87	490,6	461,7	397,3	430,4	385,3	-	433,1	39,2
T99	263,0	307,4	319,1	359,6	-	294,3	308,7	31,6
E1	222,4	283,1	258,2	304,5	206,1	259,8	255,7	33,5
E2	244,6	282,1	311,1	379,9	241,0	285,2	290,7	46,7
E3	250,8	301,3	326,7	381,7	258,4	275,3	299,0	45,0
E4	251,0	296,4	307,9	364,6	254,2	310,6	297,4	38,3
E5	255,2	287,5	313,3	366,3	273,9	310,9	301,2	35,4
E21	356,3	347,3	367,8	445,0	400,6	397,5	385,8	33,0

Temperatura do Laser

No gráfico da Figura 126 estão apresentados os resultados da média da força dos ensaios T99, T87 e E1 consoante a variação da temperatura entre os 220, 240 e 260°C, respetivamente, mantendo as restantes condições operatórias constantes.

Como se pode observar, o gráfico exibe um formato parabólico com a concavidade para baixo. Neste caso, verifica-se que o aumento da temperatura

apresentou um efeito positivo no desempenho mecânico da soldadura, até atingir o ponto de inflexão máximo do gráfico para uma temperatura de 240°C correspondente ao ensaio T87 com um resultado de força de 433,1 N e um desvio padrão de 39,2. Para temperaturas superiores à do ensaio T87 observa-se um efeito negativo resultante numa diminuição do desempenho mecânico da soldadura. Este comportamento assemelha-se ao da Configuração P 14 referente à temperatura do laser.

Para a configuração P 12, uma temperatura de 240°C propicia o melhor desempenho mecânico, como evidenciado no ensaio T87.

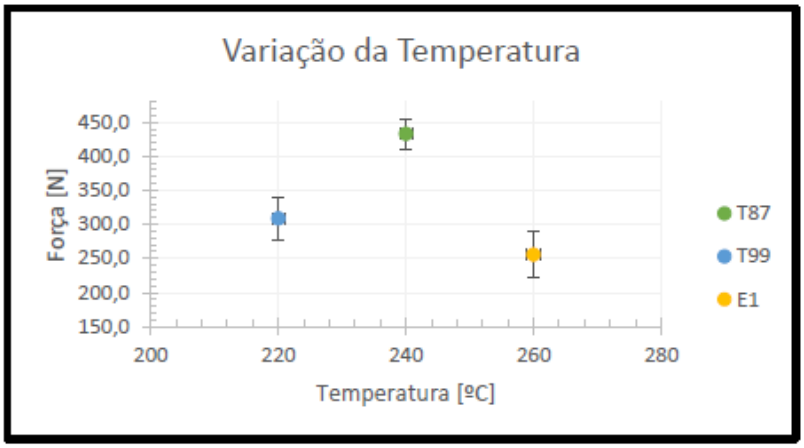


Figura 126 - Gráfico da variação da temperatura da soldadura a laser, com velocidade constante 10mm/s e pressão constante 201N (P 12).

Velocidade do Laser

No gráfico da Figura 127 estão apresentados os resultados da média da força dos ensaios E3, E2, T87 e E21 consoante a variação da velocidade entre os 6, 8, 10 e 12 mm/s, respetivamente, mantendo as restantes condições operatórias constantes.

O gráfico mostra que com o aumento da velocidade os resultados de força alcançados também aumentaram até uma velocidade de 10 mm/s, onde a partir dessa velocidade decaíram

Neste caso, nos ensaios E3 e E2 com as velocidades mais reduzidas (6 e 8 mm/s) verificou-se o pior desempenho mecânico na soldadura, com resultados de força baixos e desvios padrão elevados, sugerindo que uma menor velocidade do laser ao permitir um maior tempo de interação do laser com os provetes possa ter resultado numa deposição excessiva de energia e possível degradação originando soldaduras mais frágeis e instáveis.

Por sua vez, com o aumento da velocidade até aos 10 mm/s, no ensaio T87, ao reduzir-se o tempo de interação entre o laser e os provetes, observou-se o melhor

desempenho mecânico, com um resultado de força de 433,1 N e um desvio padrão de 39,2. Ao aumentar a velocidade para os 12 mm/s, no ensaio E21, nota-se um decaimento da força devido ao pouco tempo de interação entre o laser e os provetes.

Portanto para a configuração P 12, a melhor velocidade do laser encontra-se nos 10 mm/s, conforme apresentado pelo resultado do ensaio T87.

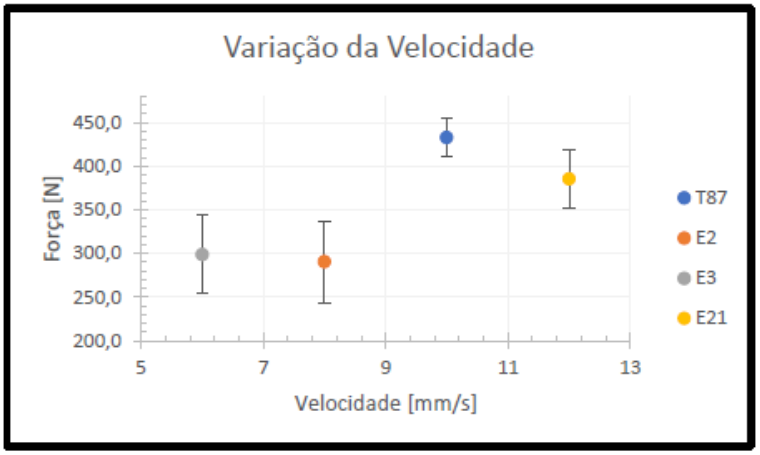


Figura 127 - Gráfico da variação da velocidade da soldadura a laser, com temperatura constante 240°C e pressão constante 201N (P 12)

Pressão de Aperto

No gráfico da Figura 128 estão apresentados os resultados da média da força dos ensaios E4, T87 e E5 consoante a variação da pressão de aperto entre os 173, 201 e 243 N, respetivamente, mantendo as restantes condições operatórias constantes.

Conforme observado no gráfico, este exibe formato parabólico com a concavidade para baixo. Neste contexto, verifica-se que o aumento da pressão apresentou um efeito positivo no desempenho mecânico da soldadura, até atingir o ponto de inflexão máximo do gráfico para uma pressão de aperto intermédia de 201 N correspondente ao ensaio T87 com o resultado de força de 433,1 N e um desvio padrão de 39,2. Para uma pressão superior à do ensaio T87 observa-se um efeito negativo resultante numa diminuição do desempenho mecânico da soldadura. Este comportamento sugere que pressões inferiores a 201 N não são suficientes para providenciar um contacto íntimo entre as interfaces dos materiais proporcionando uma difusão inadequada, resultando em soldaduras fracas. Em contrapartida, para pressões superiores a 201 N, ao aplicar demasiada pressão, esta vai comprimir em demasia o *rib* face à sua altura reduzida provocando espalhamento disforme entre os materiais, causando uma difusão não adequada, resultando em soldaduras fracas.

Para a configuração P 12, a melhor pressão de aperto foi de 201 N como apresentado no resultado de ensaio T87.

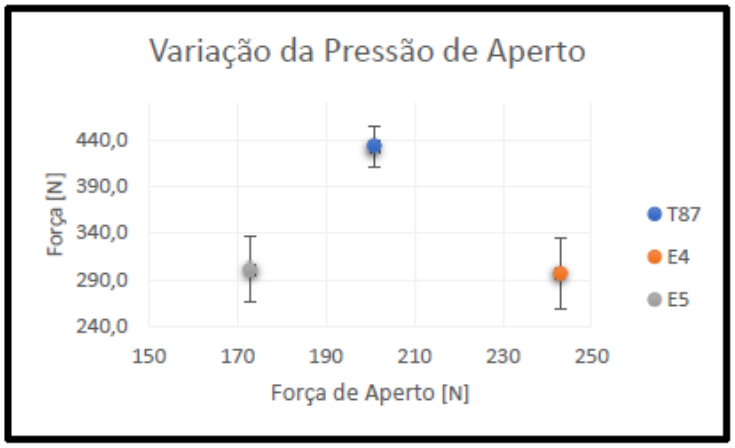


Figura 128 - Gráfico da variação da pressão da soldadura a laser, com velocidade constante 10mm/s e temperatura constante 240°C (P 12)

Para finalizar a configuração P 12, conforme ilustrado na Figura 129, observa-se os resultados da média da força de todos os ensaios.

Destacadamente, os ensaios T87 e E21 foram os que apresentaram o melhor desempenho mecânico com os resultados de força mais elevados. Os restantes ensaios apresentaram piores desempenhos mecânicos com resultados de força mais reduzidos, mas todos bastante semelhantes entre si.

Neste contexto, o ensaio que registou o melhor desempenho mecânico foi o E21, com um resultado de força de 385,8 N e um desvio padrão de 33. As condições operatórias deste ensaio foram: abertura do laser de 1 mm; temperatura do laser de 240°C; velocidade do laser de 12 mm/s; pressão de aperto de 201 N e duas passagens do laser.

Contrariamente, o ensaio E1 que registou o pior desempenho mecânico, atingindo apenas uma força de 255,7 N e um desvio padrão de 33,5. As condições operatórias deste ensaio foram idênticas às do ensaio E21, exceto pela temperatura, que foi de 260°C, e pela velocidade do laser, que foi de 10 mm/s.

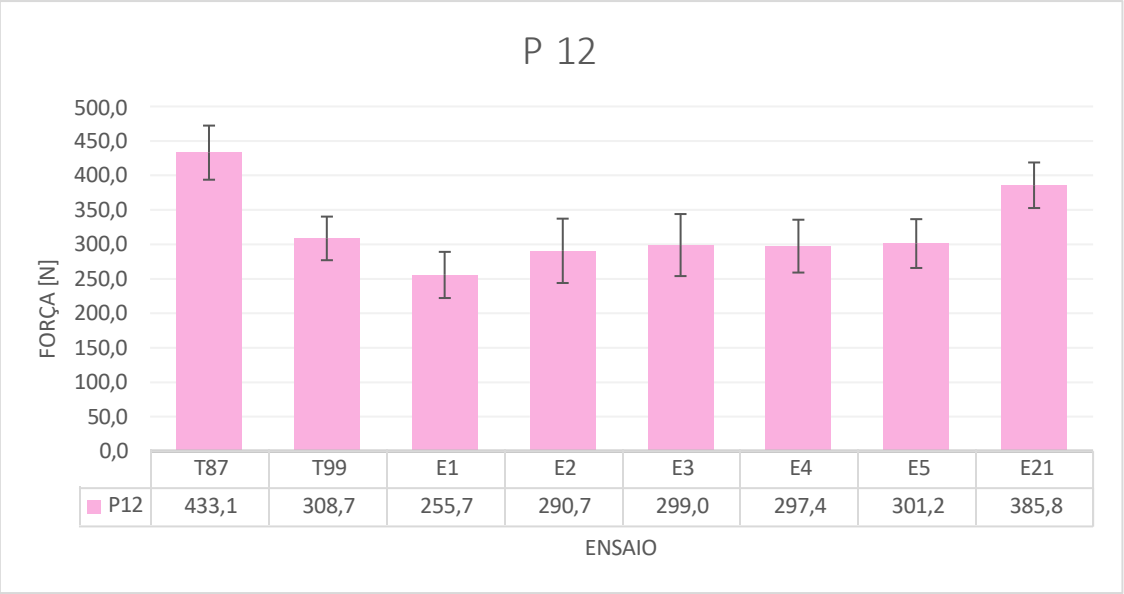


Figura 129 - Gráfico dos resultados de força dos ensaios e respetivos desvios padrão (P 12)

Na Tabela 42 estão apresentados todos os resultados dos ensaios de tração realizados, estes permitiram avaliar os comportamentos das seguintes condições operatórias individualmente: a temperatura do laser, a velocidade do laser e a pressão de aperto.

Tabela 42 - Resultados dos ensaios de tração dos provetes com a configuração Rib triangular (P 13)

Ensaio	Provetes						Força [N]	Desvio Padrão
	1	2	3	4	5	6		
T88	478,4	515,7	503,0	513,5	519,2	488,4	503,0	15,0
E6	335,1	377,3	362,8	350,9	403,3	313,0	357,1	29,0
E7	312,6	335,4	379,9	448,3	292,4	319,2	347,9	52,3
E8	329,5	394,6	390,8	479,0	341,5	359,8	382,5	49,2
E9	355,1	397,9	421,9	473,5	341,9	379,0	394,9	43,9
E10	285,2	331,3	380,9	395,5	328,8	353,4	345,9	36,4
E11	429,2	353,9	385,6	464,7	334,5	357,5	387,6	45,7
E22	488,5	434,9	467,5	546,7	449,8	465,8	475,5	35,8

Temperatura do Laser

No gráfico da Figura 130 estão apresentados os resultados da média da força dos ensaios E6, T88 e E7 consoante a variação da temperatura entre os 220, 240 e 260°C, respetivamente, mantendo as restantes condições operatórias constantes.

Como se pode observar, o gráfico exibe um formato parabólico com a

concavidade para baixo. Neste caso, verifica-se que o aumento da temperatura apresentou um efeito positivo no desempenho mecânico da soldadura, até atingir o ponto de inflexão máximo do gráfico para uma temperatura intermédia de 240°C correspondente ao ensaio T88 com um resultado de força de 503 N e um desvio padrão de 15. Para uma temperatura superior à do ensaio T88 observa-se um efeito negativo resultante numa diminuição do desempenho mecânico da soldadura. Este comportamento assemelha-se ao da Configuração P 14 referente à temperatura do laser.

Portanto, para a configuração P 13, a melhor temperatura do laser situa-se destacadamente nos 240°C, conforme apresentado pelo resultado do ensaio T88.

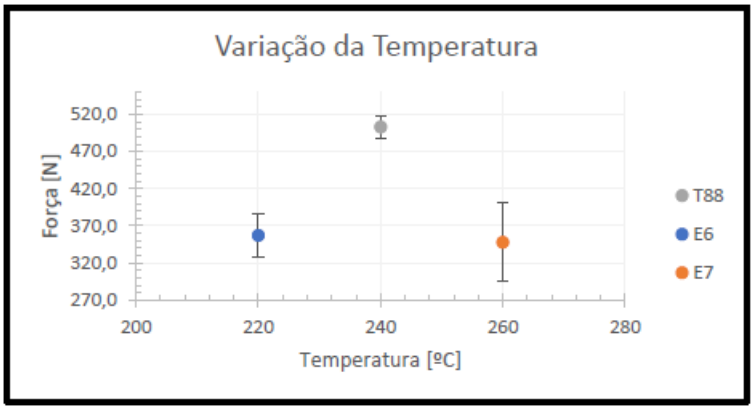


Figura 130 - Gráfico da variação da temperatura da soldadura a laser, com velocidade constante 10 mm/s e pressão de aperto constante 201 N (P 13)

Velocidade do Laser

No gráfico da Figura 131 estão apresentados os resultados da média da força dos ensaios E9, E8, T88 e E22 consoante a variação da velocidade entre os 6, 8, 10 e 12 mm/s, respetivamente, mantendo as restantes condições operatórias constantes.

O gráfico mostra que com o aumento da velocidade os resultados de força também aumentaram até uma velocidade de 10 mm/s, onde a partir dessa velocidade decaíram.

Nos ensaios E8 e E9 com as velocidades mais reduzidas (6 e 8 mm/s) verificou-se o pior desempenho mecânico na soldadura, com resultados de força reduzidos e desvios padrão elevados, sugerindo que uma menor velocidade do laser ao permitir um maior tempo de interação dos provetes com o laser possa ter resultado numa deposição excessiva de energia e possível degradação originando soldaduras mais frágeis e instáveis.

Por outro lado, com o aumento da velocidade até aos 10 mm/s, no ensaio T88,

ao reduzir-se o tempo de interação entre o laser e os provetes, observou-se o melhor desempenho mecânico, com um resultado de força de 503 N e um desvio padrão de 15. Ao aumentar a velocidade para os 12 mm/s, no ensaio E22, nota- se um decaimento da força devido ao pouco tempo de interação entre o laser e os provetes.

Portanto para a configuração P 13, a velocidade do laser mais adequada encontra-se nos 10 mm/s, como apresentado pelo resultado do ensaio T88.

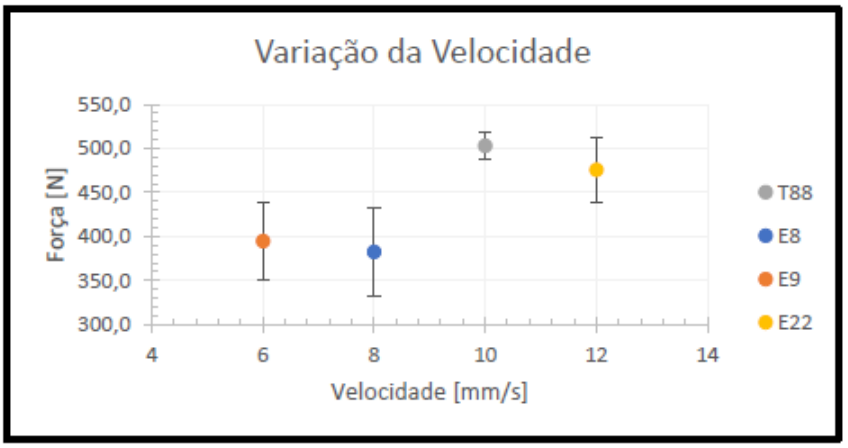


Figura 131 - Gráfico da variação da velocidade da soldadura a laser, com temperatura constante 240 °C e pressão de aperto constante 201 N (P 13)

Pressão de Aperto

No gráfico da Figura 132 estão apresentados os resultados da média da força dos ensaios E11, T88 e E10 consoante a variação da pressão entre os 173, 201 e 243 N, respetivamente, mantendo as restantes condições operatórias constantes.

Conforme observado no gráfico, este exibe formato parabólico com a concavidade para baixo. Neste contexto, verifica-se que o aumento da pressão apresentou um efeito positivo no desempenho mecânico da soldadura, até atingir o ponto de inflexão máximo do gráfico para uma pressão de aperto intermédia de 201 N correspondente ao ensaio T88 com um resultado de força de 503 N. Para uma pressão superior à do ensaio T88 observa-se um efeito negativo resultante numa diminuição do desempenho mecânico da soldadura. Este comportamento assemelha-se ao da Configuração P 12 referente à pressão de aperto.

Portanto para a configuração P 13, a melhor pressão de aperto foi de 201 N como apresentado no resultado do ensaio T88.

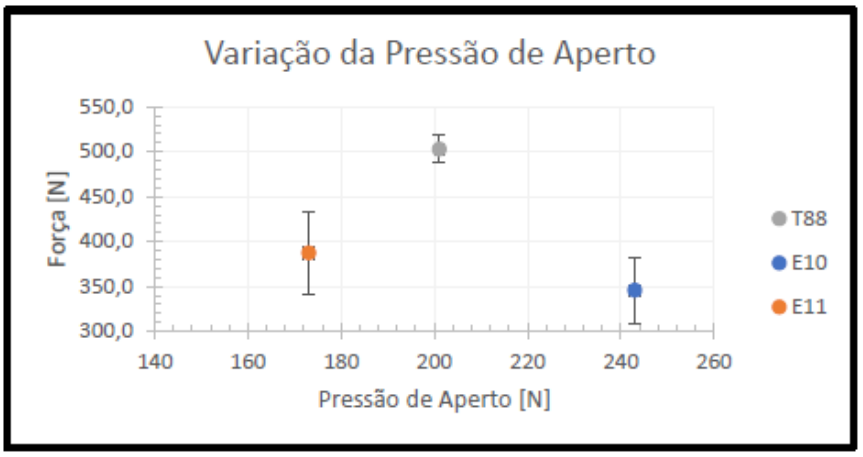


Figura 132 - Gráfico da variação da pressão da soldadura a laser, com velocidade constante 10mm/s e temperatura constante 240°C (P 13)

Para finalizar a configuração P 13, conforme ilustrado na Figura 133, observa-se os resultados da média da força de todos os ensaios. Destacadamente, os ensaios T88 e E22 foram os que apresentaram o melhor desempenho mecânico com os resultados de força mais elevados. Os restantes ensaios apresentaram piores desempenhos mecânicos com resultados de força mais reduzidos, mas todos bastante semelhantes entre si.

Neste contexto, o ensaio que registou o melhor desempenho mecânico foi o T88, com um resultado de força de 503 N e um desvio padrão de 15. As condições operatórias deste ensaio foram: abertura do laser de 1 mm; temperatura do laser de 240°C; velocidade do laser de 10 mm/s; pressão de aperto de 201 N e duas passagens do laser.

Contrariamente, o ensaio E10 que registou o pior desempenho mecânico, atingindo apenas uma força de 345,9 N e um desvio padrão de 36,4. As condições operatórias deste ensaio foram idênticas às do ensaio T88, exceto pela pressão de aperto, que foi de 243 N.

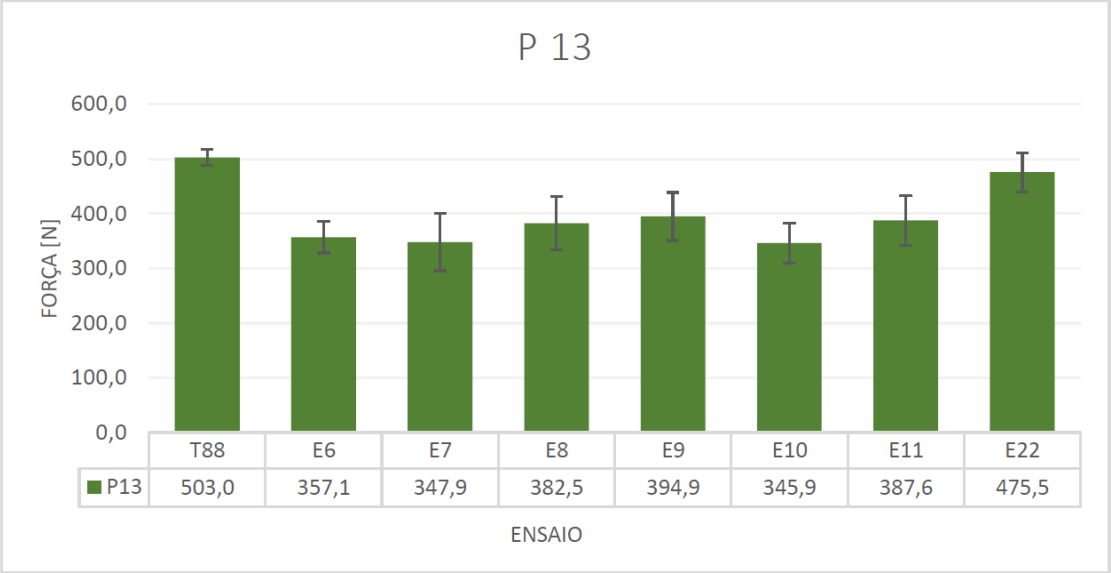


Figura 133 - Gráfico dos resultados de força dos ensaios e respetivos desvios padrão. (P 13)

e) Configuração P 17

Na Tabela 43 estão apresentados todos os resultados dos ensaios de tração realizados, estes permitiram avaliar os comportamentos das seguintes condições operatórias individualmente: a temperatura do laser, a velocidade do laser e a pressão de aperto.

Tabela 43 - Resultados dos ensaios de tração dos provetes com a configuração Rib triangular (P 17)

Ensaio	Provetes						Força [N]	Desvio Padrão
	1	2	3	4	5	6		
T89	246,2	188,9	176,2	191,0	245,1	204,0	208,6	27,4
E12	218,2	219,0	178,7	238,5	207,2	168,5	205,0	24,2
E13	238,5	215,4	197,8	212,3	234,0	209,1	217,8	14,2
E14	219,2	182,4	168,8	201,5	217,9	212,4	200,4	18,8
E15	225,1	219,5	209,6	236,4	224,0	222,6	222,9	7,9
E23	213,6	179,9	233,9	303,1	206,5	178,4	219,2	42,2
E24	305,4	267,6	274,2	337,3	267,0	232,2	280,6	33,1
E25	223,8	209,9	217,4	259,8	231,6	209,4	225,3	17,3

Temperatura do Laser

No gráfico da Figura 134 estão apresentados os resultados da média da força dos ensaios E12, T89 e E23 consoante a variação da temperatura entre os 220, 240 e 260°C, respetivamente, mantendo as restantes condições operatórias constantes.

O gráfico mostra que os valores de força obtidos em todos os ensaios são muito semelhantes, verificando apenas uma disparidade em torno dos 15 N entre os resultados. Isso sugere que a variação na temperatura do laser não teve uma influência significativa sobre o desempenho mecânico dos ensaios analisados.

Contudo entre os ensaios analisados, o que exibiu melhor desempenho mecânico foi o E23 com uma temperatura de 260°C, atingindo uma força de 219,2 N e um desvio padrão de 42,2. Todavia este ensaio apresentou um desvio padrão elevado quando comparado com os outros ensaios, sugerindo que para temperaturas mais elevadas o processo de soldadura a laser torna-se instável.

Assim para a configuração P 17, uma gama ampla de velocidades pode ser utilizada no processo de soldadura laser sem influência considerável na resistência mecânica da solda, consoante estas condições operatórias avaliadas.

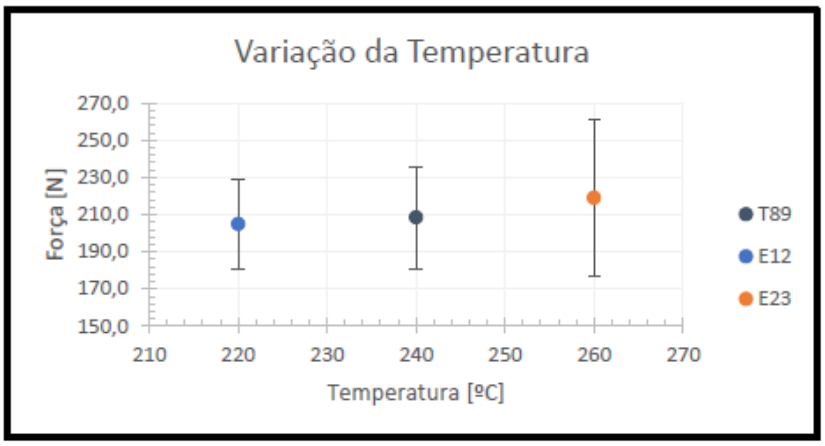


Figura 134 - Gráfico da variação da temperatura da soldadura a laser, com velocidade constante 10mm/s e pressão de aperto constante 201 N (P 17)

Velocidade do Laser

No gráfico da Figura 135 estão apresentados os resultados da média da força dos ensaios E24, E15, E13 e E12 consoante a variação da velocidade entre os 4, 6, 8 e 10 mm/s, respetivamente, mantendo as restantes condições operatórias constantes.

O gráfico mostra que com o aumento da velocidade, o desempenho mecânico da soldadura diminui. Assim, o ensaio E24, com a velocidade mais reduzida estudada (4 mm/s), foi o que apresentou o melhor desempenho mecânico com um resultado

de força de 280,6 N e um desvio padrão de 33,1. Com o aumento da velocidade para valores de 6, 8 e 10 mm/s verificou-se um efeito negativo no desempenho mecânico das soldaduras, nos ensaios E15, E13 e E12. Este comportamento significa que para velocidades superiores a 4 mm/s, devido a um menor tempo de interação entre os provetes e a energia proveniente do laser depositava na interface não foi suficiente para assegurar uma interdifusão molecular entre os materiais adequada.

Apesar do ensaio E24, apresentar o melhor resultado de força, deve-se ter em atenção o seu desvio padrão de 33,1 pois este encontra-se um pouco elevado em comparação com os restantes ensaios, sugerindo uma possível instabilidade de processo devido a uma maior deposição de energia providenciada por um maior tempo de irradiação do laser.

No entanto, para a configuração P 17, a melhor velocidade do laser situa-se nos 4 mm/s como evidenciado no ensaio E24.

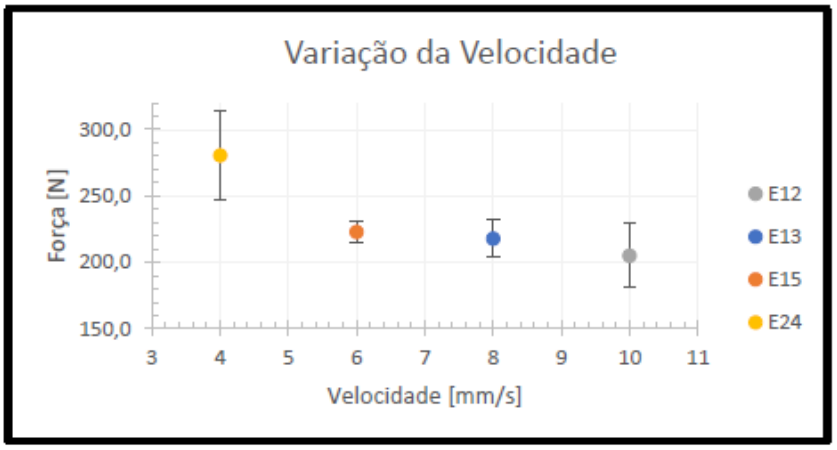


Figura 135 - Gráfico da variação da velocidade da soldadura a laser, com temperatura constante 220 °C e pressão constante 201 N (P 17)

Pressão de Aperto

No gráfico da Figura 136 estão apresentados os resultados da média da força dos ensaios E25, T89 e E14 consoante a variação da pressão entre os 173, 201 e 243 N, respetivamente, mantendo as restantes condições operatórias constantes.

Verifica-se que com o aumento da pressão ocorre um ligeiro efeito negativo no desempenho mecânico da soldadura. O ensaio E25, com a menor pressão analisada 173 N, apresentou o melhor desempenho mecânico com um resultado de força de 225,3 N e um desvio padrão de 17,3. Com o aumento da pressão para valores de 201 e 243 N observou-se um efeito negativo no desempenho mecânico da soldadura, nos ensaios T89 e E14.

Assim, para a configuração P 17, a melhor pressão de aperto estudada foi de 173 N como um valor de força de 225,3 N e um desvio padrão de 17,3 como apresentado no resultado do ensaio E25.

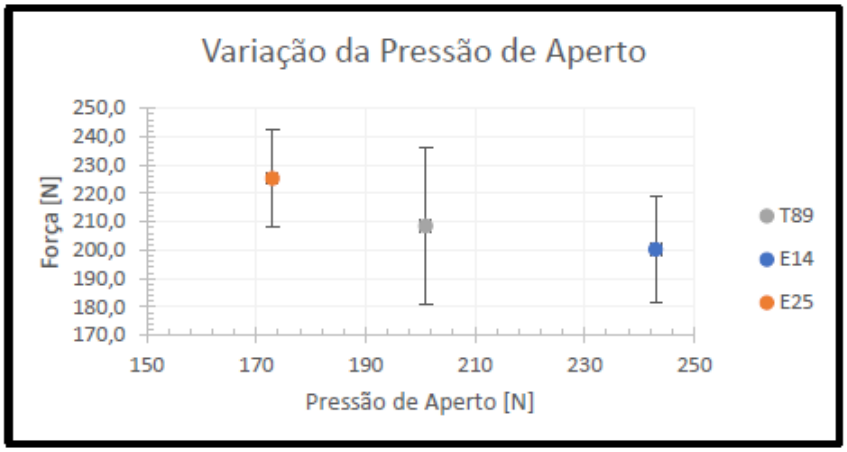


Figura 136 - Gráfico da variação da pressão da soldadura a laser, com velocidade constante 10 mm/s e temperatura constante 220 °C (P 17)

Por fim, conforme ilustrado na Figura 137, para a configuração P 17, observa-se os resultados da média da força de todos os ensaios. Todos os ensaios registaram um desempenho mecânico semelhante com valores de força próximos na ordem dos 200 N aos 225 N, contudo destaca-se o ensaio E24 com o melhor desempenho mecânico apresentado e um resultado de força de 280,6 N com um desvio padrão de 33,1. As condições operatórias deste ensaio foram: abertura do laser de 1 mm; temperatura do laser de 220°C; velocidade do laser de 4 mm/s; pressão de aperto de 201 N e duas passagens do laser.

Contrariamente, o ensaio E14 registou o pior desempenho mecânico, atingindo apenas uma força de 200,4 N e um desvio padrão de 18,8. As condições operatórias deste ensaio foram idênticas às do ensaio E24, exceto pela velocidade do laser, que foi de 10 mm/s, e pela pressão de aperto, que foi de 243 N.

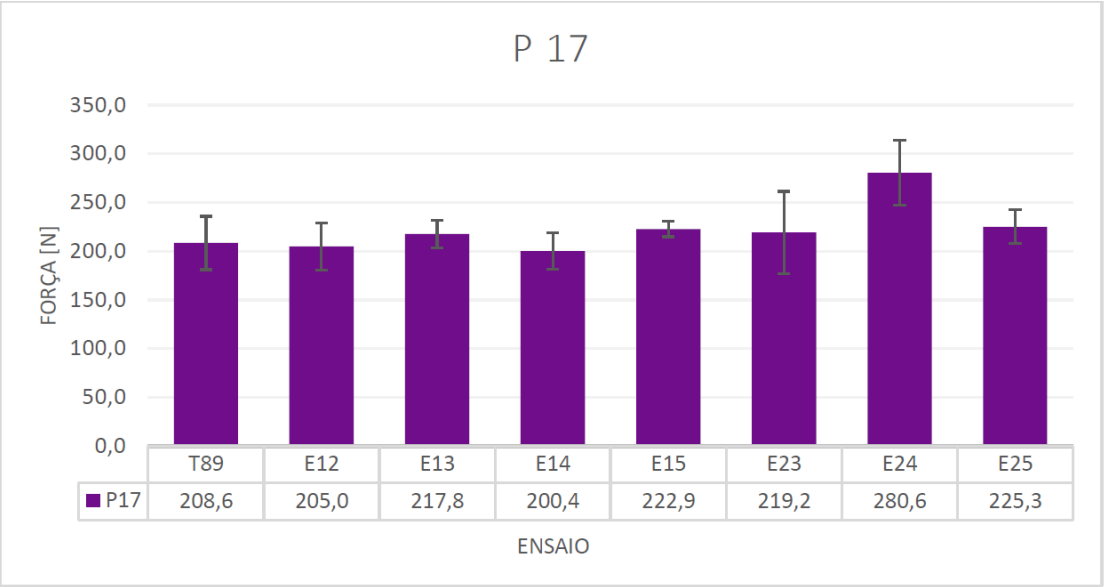


Figura 137 - Gráfico dos resultados de força dos ensaios e respetivos desvios padrão. (P 17)

Resumo das Configurações Triangulares

De forma a avaliar a influência das condições operatórias e das dimensões do *rib* triangular no desempenho mecânico da soldadura, analisaram-se as configurações apresentadas na Tabela 44, que inclui os parâmetros maximizantes para cada ensaio. As configurações P 8, P 12, P 13, P 16 e P 17, identificados pelos ensaios T97, T87, T88, T92 e E24, respetivamente, foram selecionados como representativos dos melhores ensaios de cada configuração triangular.

Tabela 44 - Resumo dos parâmetros de soldadura dos melhores ensaios das configurações triangulares

Configuração	Ensaio	Dimensões			Parâmetros de Soldadura					Força [N]
		Largura [mm]	Altura [mm]	Área [mm^2]	T [°C]	V [mm/s]	P [N]	Ab Laser [mm]	Nr Passagens	
P 8	T97	0,8	0,5	0,2	240	10	243	1	2	425,6
P 12	T87	1	0,5	0,25	240	10	201	1	2	433,1
P 13	T88	1,2	0,5	0,3	240	10	201	1	2	503,0
P 16	T92	0,8	0,8	0,32	240	10	201	2	2	580,3
P 17	E24	0,8	1,1	0,44	220	4	201	1	2	280,6

Ao observar os resultados do gráfico da Figura 138, nota-se que as condições operatórias ideais variam ligeiramente entre as configurações, com algumas repetições notáveis. As configurações P 12 e P 13, nos ensaios T87 e T88,

apresentaram valores idênticos de temperatura do laser (240°C), velocidade de soldadura (10 mm/s), pressão de aperto (201 N), abertura do laser (1 mm) e número de passagens (2), sugerindo uma consistência nos parâmetros de soldadura para essas dimensões específicas.

Apesar dessa uniformidade em alguns parâmetros, pequenas variações foram notórias noutras configurações. Por exemplo:

- Na configuração P 8 (ensaio T97), a pressão foi aumentada para 243 N.

- Na configuração P 16 (ensaio T92), a abertura do laser foi ampliada para 2 mm.

- Na configuração P 17 (ensaio E24), a temperatura do laser foi reduzida para 220°C e a velocidade de soldadura para 4 mm/s.

Essas adaptações indicam que, embora os parâmetros de soldadura gerais sejam similares entre as configurações, ajustes específicos em cada configuração podem otimizar o desempenho mecânico, especialmente quando as dimensões do *rib* variam.

Ao comparar os resultados de força, a configuração P 16 (ensaio T92) destacou-se com o melhor desempenho mecânico, atingindo 580,3 N, com um *rib* de altura e largura de 0,8 mm. Esta configuração foi a única a incluir uma abertura de laser de 2 mm e duas passagens, o que demonstra que a repetição da passagem do laser e uma abertura mais ampla podem aumentar significativamente o desempenho mecânico, devido a um aumento na área de contacto e consequentemente melhor adesão entre os materiais. Em condições onde a abertura foi mantida em 1 mm, o melhor desempenho da configuração P 16 foi observado no ensaio T83, com uma força de apenas 382,8 N. Se mantidos esses parâmetros de 1 mm de abertura, a configuração P 13 (ensaio T88) seria a que atinge o melhor desempenho mecânico, com uma força de 503 N, neste caso, com uma largura de 1,2 mm e uma altura de 0,5 mm de *rib*. Este ensaio evidencia que uma largura do *rib* de 1,2 mm contribui significativamente para o desempenho mecânico, mesmo com uma abertura de laser menor.

Em contrapartida, a configuração P 17, com uma altura de *rib* aumentada para 1,1 mm, apresentou o pior desempenho mecânico com uma discrepância assinalável, alcançando apenas 280,6 N no ensaio E24. Esta configuração necessitou de uma redução na temperatura do laser e na velocidade de soldadura, fatores que indicam que o aumento da altura do *rib* requer ajustes nos parâmetros operacionais para evitar falhas na soldadura, provavelmente devido a uma menor eficiência de adesão e maior suscetibilidade a efeitos de flexão.

As configurações P 8 e P 12, com forças de 425,6 N e 433,1 N, respetivamente, tiveram desempenhos razoáveis, embora inferiores a P 13 e P 16. Esses resultados estão em concordância com a hipótese de que uma menor largura do *rib* limita a força máxima atingida.

Em síntese, para otimizar a resistência mecânica, é ideal manter uma largura de *rib* elevada e limitar a altura do *rib*, aplicando condições operacionais considerando uma maior abertura do laser e, sempre que possível, múltiplas passagens. Estes ajustes maximizam a área de contacto e a adesão entre os materiais a soldar, aumentando a resistência mecânica da soldadura.

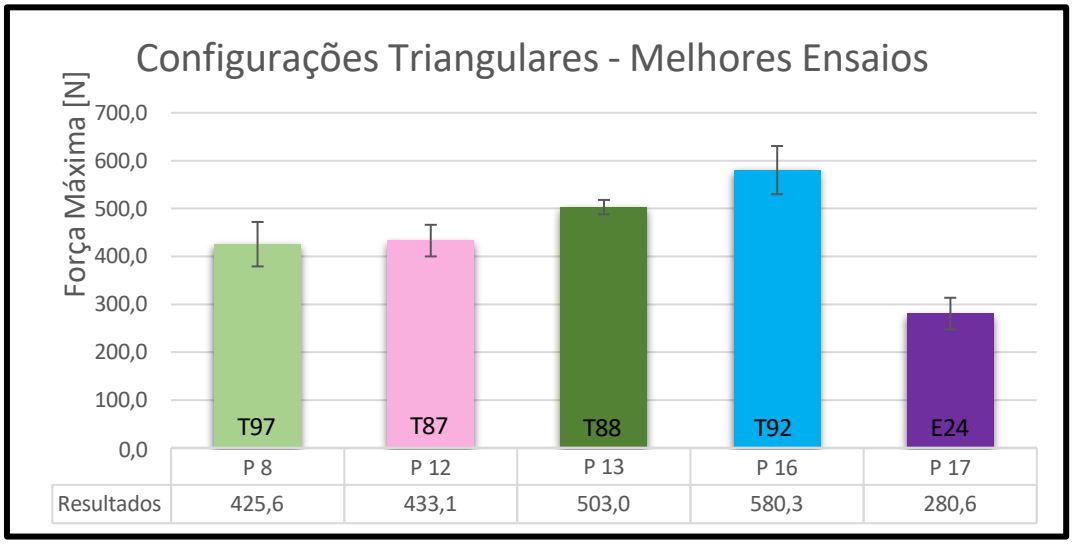


Figura 138 - Gráfico dos melhores ensaios das configurações triangulares, consoante a força máxima atingida.

Influência da altura e largura do rib

De forma a identificar a influência das dimensões da altura e largura do *rib* triangular, foram analisados apenas os ensaios que compreendiam os parâmetros de soldadura comuns em todas as configurações, esta condição designou-se como Condição 2. Os ensaios, assim como, os valores utilizados nos parâmetros de

soldadura encontram-se identificados na Tabela 45.

Tabela 45 - Parâmetros de soldadura comuns a todas as configurações triangulares – Condição 2

			Condição 2				
Configuração	Ensaio	Força [N]	T [°C]	Ab Laser [mm]	V [mm/s]	P [N]	Nr Passagens
P 16	T53	359,2	240	1	10	201	2
P 8	T86	369,7					
P 12	T87	433,1					
P 13	T88	503					
P 17	T89	208,6					

Na Figura 139, observa-se os resultados de força atingidos e respetivos desvio padrão, consoante a Condição 2, para os ensaios T86, T53 e T89, correspondentes às configurações P 8, P 16 e P 17, respetivamente.

A variação da altura do *rib* ocorre entre os 0,8; 1 e 1,1 mm, permanecendo a largura num valor constante de 0,8 mm. Através do gráfico, verifica-se que à medida que a altura do *rib* aumenta o desempenho mecânico diminui. Esta tendência sugere que quanto maior o espaçamento entre os provetes nas amarras, mais se viabiliza o efeito de rotação nos ensaios de tração, como se pode constatar na Figura 92, isso reflete-se num menor desempenho mecânico da soldadura.

Na Figura 139, observa-se os resultados de força atingidos e respetivos desvio padrão, consoante a Condição 2, para os ensaios T86, T87 e T88, correspondentes às configurações P 8, P 12 e P 13, respetivamente. A variação da largura do *rib* ocorre entre os 0,8; 1 e 1,2 mm, permanecendo a altura num valor constante de 0,5 mm. O gráfico mostra que à medida que a largura do *rib* aumenta o desempenho mecânico também aumenta. Esta tendência sugere que ao aumentar a largura do *rib*, progressivamente também se vai aumentar a área de contacto entre os dois provetes a soldar, que consequentemente vai permitir uma melhor adesão entre os materiais.

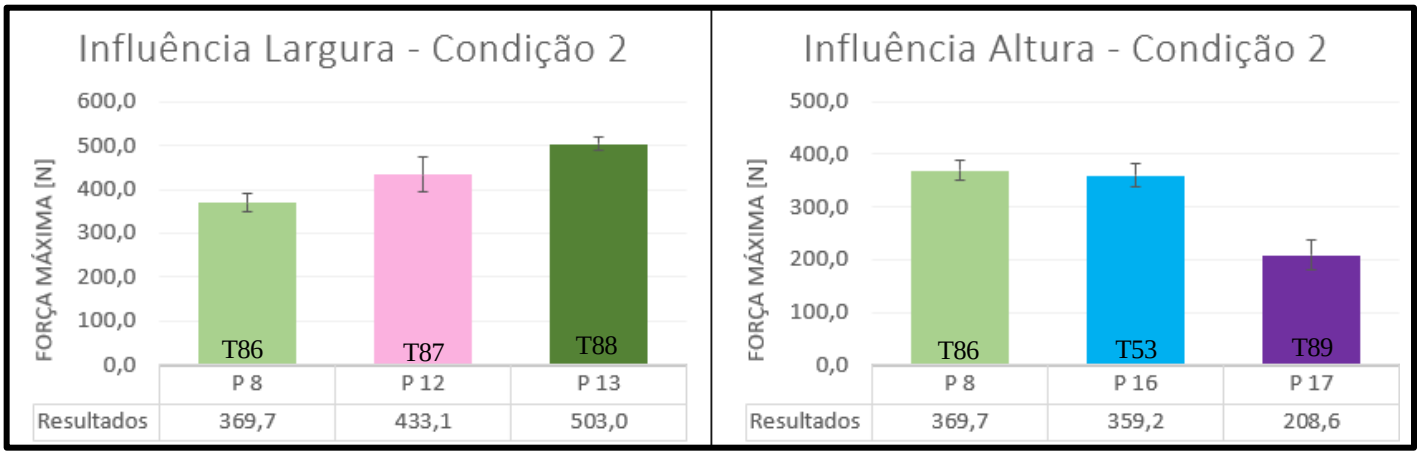


Figura 139 - Gráfico da influência da largura (à esquerda) e da influência da altura (à direita) consoante os resultados de força regidos pela Condição 2

Tipologia de rib hermético

Os resultados dos ensaio de tração para a tipologia de *rib* hermética, consoante as condições operatórias descritas em 3.3.3, encontram-se apresentados nas Tabela 46, Tabela 47, Tabela 48, Tabela 49 e Tabela 50, correspondendo às configurações P 18, P 19, P 20, P 21 e P 22, respetivamente. Os valores apresentam a força máxima atingida em cada ensaio, assim como a respetiva média e desvio padrão correspondentes. Nesta tipologia, cada ensaio compreendeu a análise de seis provetes. Nos casos em que os provetes tiverem comportamentos anómalos, estes não foram considerados nas médias.

a) Configuração P 18

Na Tabela 46 estão apresentados todos os resultados dos ensaios de tração realizados, estes permitiram avaliar os comportamentos das seguintes condições operatórias individualmente: a temperatura do laser, a velocidade do laser e a pressão de aperto. Como para esta configuração só foram realizados 4 ensaios, apenas foi variada a temperatura entre os 260° e os 280°C. A velocidade entre os 8 mm/s e os 10 mm/s. E a pressão de aperto entre os 201 N e os 243 N.

Tabela 46 - Resultados dos ensaios de tração dos provetes com a configuração Rib hermética (P 18)

Ensaio	Provetes						Força [N]	Desvio Padrão
	1	2	3	4	5	6		
H1	176,3	185,6	185,4	208,9	180,4	194,8	188,6	10,7
H2	167,5	183,8	179,4	257,2	173,8	186,4	191,4	30,1
H3	171,3	177,3	184,2	185,7	180,9	193,3	182,1	6,9
H4	-	209,6	163,7	215,3	191,6	233,3	202,7	23,6

Para a configuração P 18, a Figura 140 mostra os resultados da média da força dos quatro ensaios realizados. Observa-se uma diferença pouco acentuada nos resultados de força com os valores a situarem- se entre os 180 N e os 200 N.

Neste caso, como os valores contemplados são relativamente baixos e diferem pouco entre si, é possível aferir que as variações dos parâmetros de soldadura não refletiram num efeito significativo no desempenho mecânico da soldadura. Ou seja, não foi observada nenhuma tendência assinalável com a variação tanto da temperatura, como da velocidade ou até mesmo da pressão da perto.

Todavia, entre os quatros ensaios realizados, o H4 foi o que registou o melhor desempenho mecânico, com um resultado de força de 202,7 N e um desvio padrão de 23,6. As condições operatórias deste ensaio foram: uma passagem de laser; abertura de laser de 2 mm; 280°C de temperatura de laser; 10 mm/s de velocidade; e uma pressão de aperto de 201 N.

Por outro lado, o ensaio H3 registou o pior desempenho mecânico, atingindo apenas uma força de 182,1 N e um desvio padrão de 6,9. As condições operatórias deste ensaio foram idênticas às do ensaio H4, exceto pela temperatura, que foi de 260°C, e pela velocidade do laser, que foi de 8 mm/s.

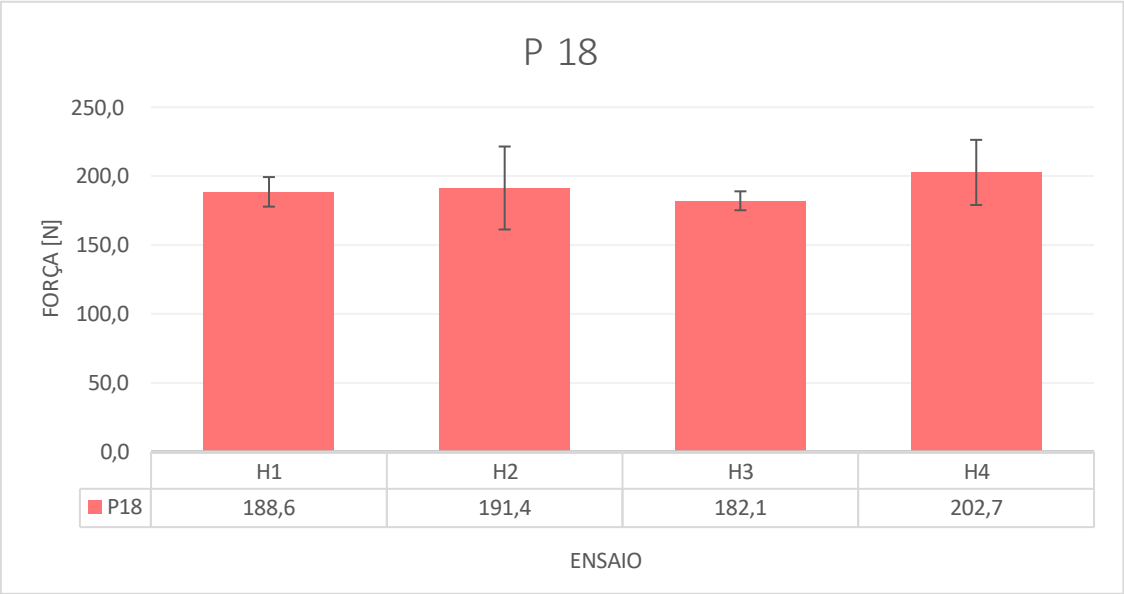


Figura 140 - Gráfico dos resultados de força dos ensaios e respetivos desvios padrão. (P 18)

b) Configuração P 19

Na Tabela 47 estão apresentados todos os resultados dos ensaios de tração realizados, estes permitiram avaliar os comportamentos das seguintes condições operatórias individualmente: a temperatura do laser, a velocidade do laser e a pressão de aperto. Como para esta configuração só foram realizados 4 ensaios, apenas foi variada a temperatura entre os 260° e os 280°C. A velocidade entre os 8 mm/s e os 10 mm/s. E a pressão de aperto entre os 201 N e os 243 N.

Tabela 47- Resultados dos ensaios de tração dos provetes com a configuração Rib hermética (P 19)

Ensaio	Provetes						Força [N]	Desvio Padrão
	1	2	3	4	5	6		
H5	200,2	209,2	218,0	230,9	221,1	210,9	215,0	9,7
H6	200,5	220,7	231,8	264,6	231,7	260,9	235,0	22,2
H7	285,4	208,3	239,3	212,2	218,8	227,5	231,9	26,0
H8	265,4	192,4	253,1	212,2	247,2	183,9	225,7	31,2

Para a configuração P19, a Figura 141 mostra os resultados da média da força dos quatro ensaios realizados. Observa-se uma diferença pouco acentuada nos resultados de força com os valores a situarem- se entre os 215 N e os 235 N.

Estes resultados assemelham-se aos dos ensaios da configuração P 18, e, portanto, também não foi observada nenhuma tendência assinalável com a variação tanto da temperatura, como da velocidade ou até mesmo da pressão de aperto.

Contudo, entre os quatro ensaios realizados, o H6 foi o que registou o melhor desempenho mecânico, com um resultado de força de 235 N e um desvio padrão de 22,2. As condições operatórias deste ensaio foram: uma passagem de laser; abertura de laser de 2 mm; 260°C de temperatura de laser; 10 mm/s de velocidade; e uma pressão de aperto de 243 N.

Pelo contrário, o ensaio H5 registou o pior desempenho mecânico, atingindo apenas uma força de 215 N e um desvio padrão de 9,7. As condições operatórias deste ensaio foram idênticas às do ensaio H6, exceto pela pressão de aperto, que foi de 243 N.

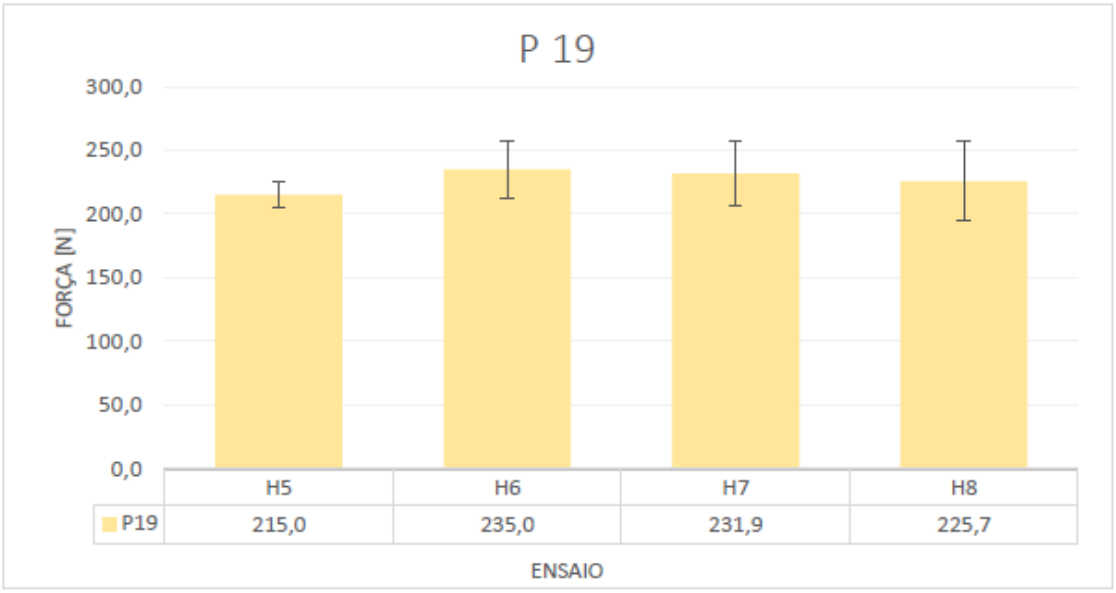


Figura 141 - Gráfico dos resultados de força dos ensaios e respetivos desvios padrão. (P 19)

c) Configuração P 20

Na Tabela 48 estão apresentados todos os resultados dos ensaios de tração realizados, estes permitiram avaliar os comportamentos das seguintes condições operatórias individualmente: a temperatura do laser, a velocidade do laser e a pressão de aperto.

Tabela 48 - Resultados dos ensaios de tração dos provetes com a configuração Rib hermética (P 20)

Ensaio	Provetes						Força [N]	Desvio Padrão
	1	2	3	4	5	6		
H9	177,8	124,6	202,4	278,5	174,6	177,2	189,2	46,2
H10	160,1	197,0	203,7	283,7	174,8	172,5	198,6	40,8
H11	150,5	178,2	147,4	256,5	138,5	150,3	170,2	40,4
H26	331,2	334,6	312,6	275,1	329,7	323,9	317,9	20,4
H27	301,2	282,2	273,5	318,5	266,3	292,4	289,0	17,5
H32	256,3	302,8	248,0	260,5	311,2	329,7	284,8	31,1

Temperatura do Laser

No gráfico da Figura 142 estão apresentados os resultados da média da força dos ensaios H32, H26 e H9 consoante a variação da temperatura entre os 220, 240 e 260°C, respetivamente, mantendo as restantes condições operatórias constantes.

Como se pode observar, o gráfico exibe um formato parabólico com a concavidade para baixo. Neste caso, verifica-se que o aumento da temperatura apresentou um efeito positivo no desempenho mecânico da soldadura, até atingir o ponto de inflexão máximo do gráfico para uma temperatura de 240°C correspondente ao ensaio H26 com o melhor resultado de força de 317,9 N e um desvio padrão de 20,4. Para uma temperatura superior à do ensaio H26 observa-se um efeito negativo significativo resultante numa diminuição do desempenho mecânico da soldadura. Este comportamento assemelha-se ao da configuração 14, referente à temperatura do laser.

Para a configuração P 20, uma temperatura de 240°C propicia o melhor desempenho mecânico, como evidenciado no ensaio H26.

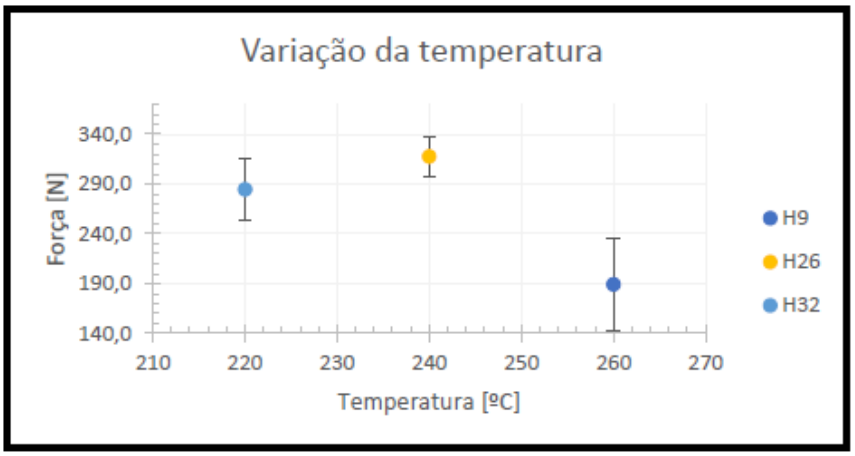


Figura 142 - Gráfico da variação da temperatura da soldadura a laser, com velocidade constante 10 mm/s e pressão de aperto constante 201 N (P 20)

Velocidade do Laser

No gráfico da Figura 143 estão apresentados os resultados da média da força dos ensaios H11, H9 e H27 consoante a variação da velocidade entre os 8, 10 e 12 mm/s, respetivamente, mantendo as restantes condições operatórias constantes.

No gráfico, com o aumento da velocidade verificou-se um efeito positivo no desempenho mecânico da soldadura até à velocidade máxima avaliada de 12 mm/s, referente ao ensaio H27 com um resultado de força de 289 N e um desvio padrão de 17,5. Além disso, com esse aumento também se observou uma diminuição no desvio padrão, sugerindo uma maior estabilidade e resultados mais fidedignos no processo de soldadura a laser para velocidades mais elevadas. Portanto, com o aumento da velocidade o tempo de interação entre o laser e os materiais reduziu, essa redução permitiu uma melhor mistura dos materiais. Velocidades reduzidas sugerem que ocorreu uma acumulação excessiva de energia transmitida pelo laser, resultando em soldaduras mais frágeis.

Portanto para a configuração P 20, uma velocidade de 12 mm/s propicia a melhor resistência mecânica, como evidenciado no ensaio H27.

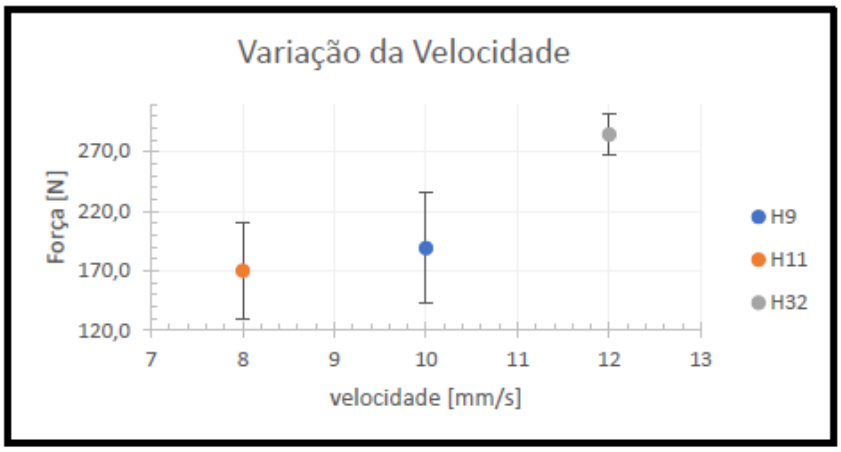


Figura 143 - Gráfico da variação da velocidade da soldadura a laser, com temperatura constante 240°C e pressão de aperto constante 201 N (P 20)

Pressão de Aperto

No gráfico da Figura 144 estão apresentados os resultados da média da força dos ensaios H9 e H10 consoante a variação da pressão entre os 201 e 243 N, respetivamente, mantendo as restantes condições operatórias constantes.

O gráfico mostra que os resultados de força obtidos em todos os ensaios são muito semelhantes, com uma diferença na ordem dos 10 N entre os resultados. Neste caso, como o tipo de *rib* apresentado é hermético, este permite um encaixe

perfeito entre o provete de PMMA e de PC/ABS a soldar, transitando a pressão de aperto para todo o provete e não apenas na área a soldar. Isso sugere que a variação na pressão de aperto não teve uma influência significativa sobre o desempenho mecânico da soldadura.

Contudo, o ensaio que exibiu melhor resultado de força máxima foi o H10 com 198,6 N, para uma pressão de aperto de 243 N.

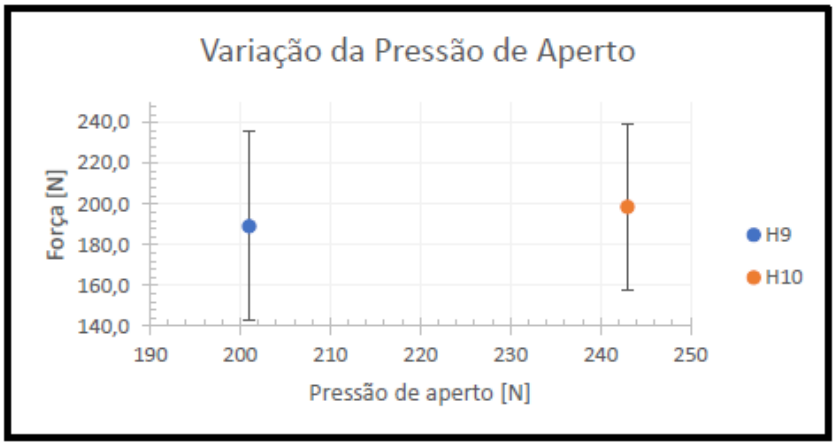


Figura 144 - Gráfico da variação da pressão da soldadura a laser, com velocidade constante 10mm/s e temperatura de laser constante 260°C (P 20)

Para finalizar a configuração P 20, o gráfico da Figura 145 mostra se os resultados da média da força de todos os ensaios. Destaca-se que nesta configuração os ensaios H26, H27 e H32 com temperaturas de laser mais baixas e velocidades de laser superiores apresentam resultados de força superiores em relação aos restantes ensaios.

Neste contexto, o ensaio que registou o melhor desempenho mecânico foi o H26 com um resultado de força de 317,9 N e um desvio padrão 20,4. As condições operatórias deste ensaio foram: uma passagem de laser; abertura de laser de 2 mm; 240°C de temperatura de laser; 10 mm/s de velocidade; e uma pressão de aperto de 201 N.

Por outro lado, o H11 registou o pior desempenho mecânico, atingindo apenas uma força de 170,2 N e um desvio padrão de 40,4. As condições operatórias deste ensaio foram idênticas às do ensaio H26, exceto pela temperatura, que foi de 260°C e pela velocidade, que foi de 8 mm/s.

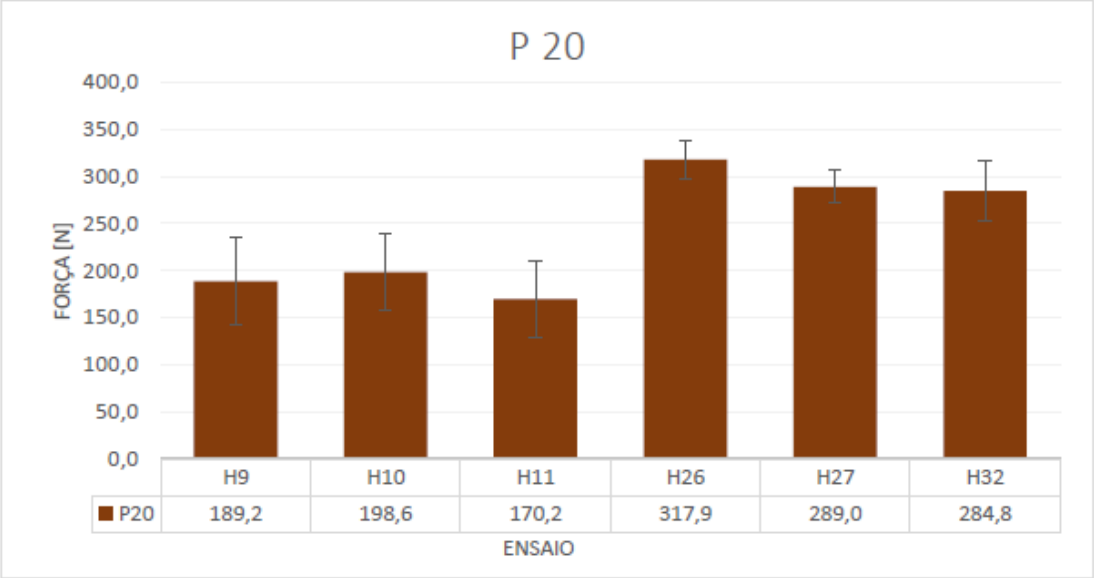


Figura 145 - Gráfico dos resultados de força dos ensaios e respetivos desvios padrão (P 20)

d) Configuração P 21

Na Tabela 49 estão apresentados todos os resultados dos ensaios de tração realizados, estes permitiram avaliar os comportamentos das seguintes condições operatórias individualmente: a temperatura do laser, a velocidade do laser e a pressão de aperto.

Tabela 49 - Resultados dos ensaios de tração dos provetes com a configuração Rib hermética (P 21)

Ensaio	Provetes						Força [N]	Desvio Padrão
	1	2	3	4	5	6		
H13	311,5	303,9	264,9	261,1	334,0	323,8	299,9	27,8
H14	291,8	323,4	332,2	323,8	286,9	313,7	311,9	16,9
H15	329,0	312,8	331,2	309,0	317,3	321,9	320,2	8,1
H21	302,1	281,4	285,3	293,0	321,2	308,6	298,6	13,7
H22	316,6	296,5	267,4	276,4	292,2	276,2	287,5	16,4
H23	320,6	324,6	302,1	339,5	-	-	321,7	13,3
H28	275,0	306,5	308,7	291,6	303,0	299,6	297,4	11,4
H29	217,3	302,8	316,8	295,5	271,2	328,1	288,6	36,5
H33	320,0	343,8	330,7	321,0	308,9	324,1	324,7	10,7
H34	322,3	297,3	316,6	268,4	345,0	375,4	320,8	33,9

Temperatura do Laser

No gráfico da Figura 146 estão apresentados os resultados da média da força dos ensaios H34, H33, H21 e H29 consoante a variação da temperatura entre os 220, 240, 260 e 280°C, respetivamente, mantendo as restantes condições operatórias

constantes.

Perante o gráfico, verifica-se um efeito positivo no desempenho mecânico da soldadura com o aumento da temperatura, até ser atingida uma temperatura de 240°C correspondente ao ensaio H33 com um resultado de força de 324,7 N e um desvio padrão de 10,7. Para temperaturas superiores à do ensaio H33 observa-se um efeito negativo resultante numa diminuição do desempenho mecânico da soldadura. Portanto, verificou- se que para uma temperatura de 240°C foi proporcionada uma transferência de energia mais eficaz. Para temperaturas inferiores ou superiores evidencia-se uma deposição de energia menos adequada, fustigada por uma insuficiência ou excesso de energia do sistema.

Portanto para a configuração P 21, a melhor temperatura de laser é de 240°C que potencia uma melhor resistência mecânica de soldadura, conforme demonstrado no resultado do ensaio H33.

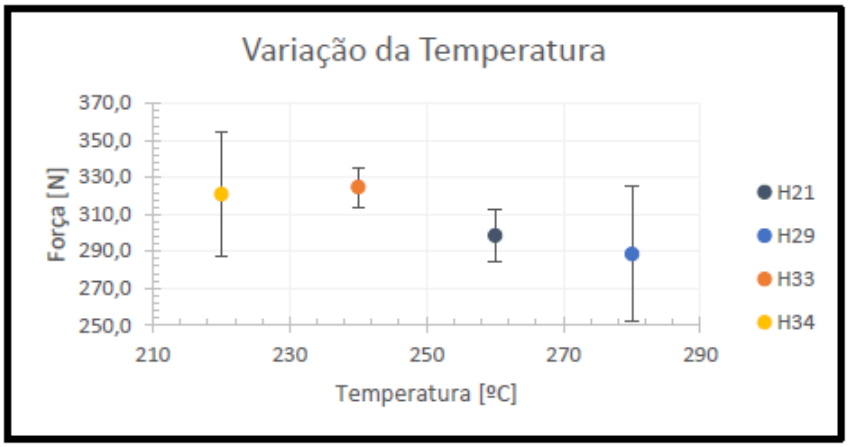


Figura 146 - Gráfico da variação da temperatura da soldadura a laser, com velocidade de 6mm/s e pressão de aperto de 201N (P 21)

Velocidade do Laser

No gráfico da Figura 147 estão apresentados os resultados da média da força dos ensaios H28, H21, H15 e H13 consoante a variação da velocidade entre os 4, 6, 8 e 10 mm/s, respetivamente, mantendo as restantes condições operatórias constantes.

Ao observar o gráfico, verifica-se um efeito positivo no desempenho mecânico da soldadura na com o aumento da velocidade, até ser atingida uma velocidade de 10 mm/s correspondente ao ensaio H15 com um resultado de força de 320,2 N e um desvio padrão de 8,1. Para velocidades superiores à do ensaio H15 observa-se um efeito negativo resultante numa diminuição do desempenho mecânico da soldadura.

Para a configuração P 21, a velocidade de laser mais adequada foi de 8 mm/s conforme apresentado no resultado do ensaio H15.

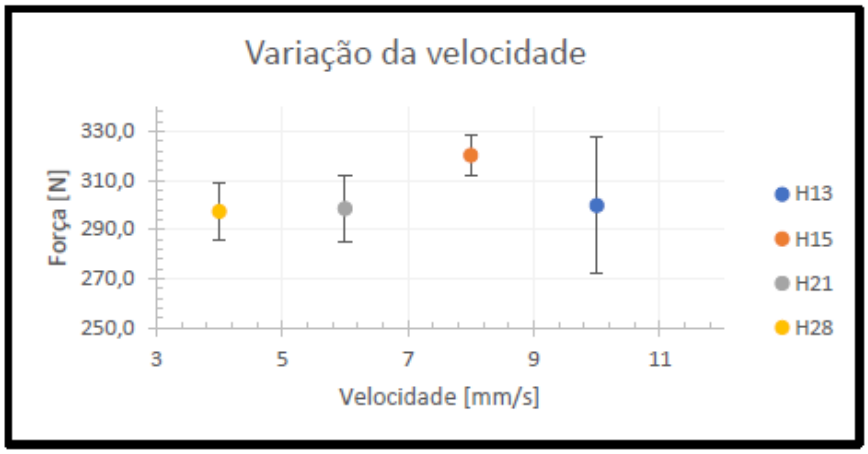


Figura 147 - Gráfico da variação da velocidade da soldadura a laser, com temperatura constante 260°C e pressão de aperto constante 201 N (P 21)

Pressão de Aperto

No gráfico da Figura 148 estão apresentados os resultados da média da força dos ensaios H13 e H14 consoante a variação da pressão entre os 201 e 243 N, respetivamente, mantendo as restantes condições operatórias constantes.

O gráfico mostra que os resultados de força obtidos nos dois ensaios são muito semelhantes, com uma diferença em torno dos 10 N entre os resultados. Neste caso, como o tipo de *rib* apresentado é hermético, este permite um encaixe perfeito entre o provete de PMMA e de PC/ABS a soldar, transitando a pressão de aperto para todo o provete e não apenas na área a soldar. Isso sugere que a variação na pressão de aperto não teve uma influência significativa sobre o desempenho da resistência mecânica na soldadura. Este comportamento assemelha-se ao da configuração P 20, referente à pressão de aperto.

Contudo, o ensaio que exibiu melhor resultado de força máxima foi o H14 com 311,9 N, para uma pressão de aperto de 243 N.

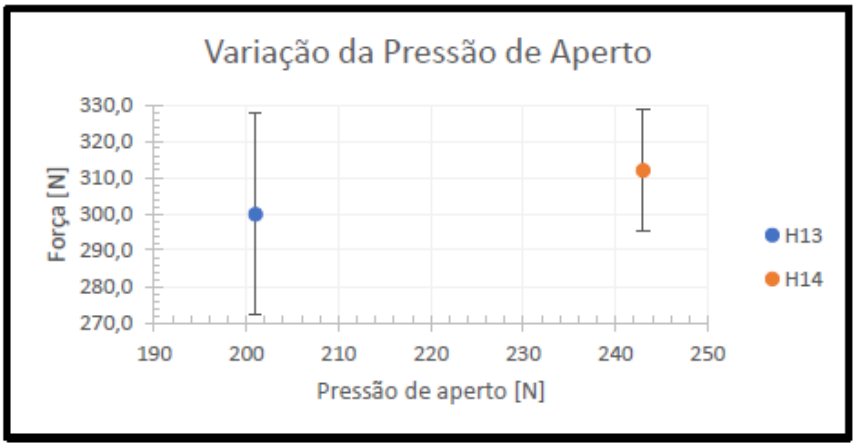


Figura 148 - Gráfico da variação da pressão da soldadura a laser, com velocidade constante 10mm/s e temperatura de laser constante 260°C (P 21)

Por fim, o gráfico da Figura 149 mostra os resultados obtidos da média da força de todos os ensaios e respetivo desvio padrão. Neste caso, todos os ensaios apresentaram bons resultados de força, assim como, um desempenho mecânico pouco discrepante. Isso sugere que essas dimensões de *rib* têm uma influência positiva na resistência mecânica do processo de soldadura a laser por transmissão, tornando-o um processo bastante estável e fidedigno para a sua aplicação e reprodutibilidade numa ampla gama de condições operatórias.

Neste contexto, o ensaio que registou o melhor desempenho mecânico foi o H33, com um resultado de força de 324,7 N e um desvio padrão de 10,7. As condições operatórias deste ensaio foram: uma passagem do laser; abertura do laser de 2 mm; temperatura do laser de 240°C; velocidade do laser de 6 mm/s; e pressão de aperto de 201 N.

Pelo contrário, o ensaio H22 registou o pior desempenho mecânico, atingindo apenas uma força de 287,5 N e um desvio padrão de 16,4. As condições operatórias deste ensaio foram idênticas às do ensaio H33, exceto pela velocidade do laser, que foi de 10 mm/s.

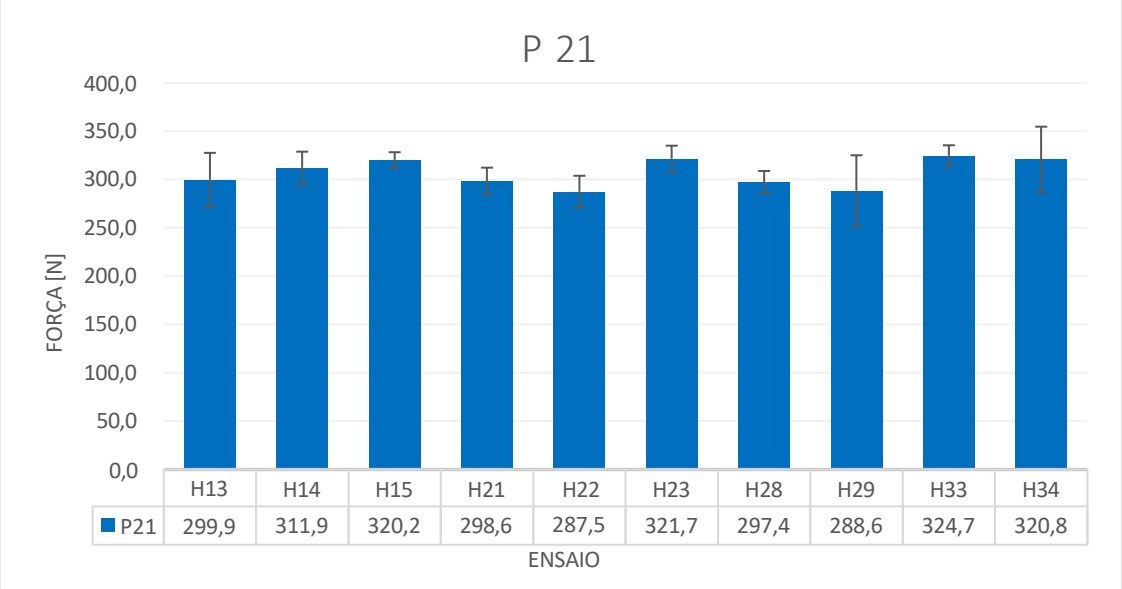


Figura 149 - Gráfico dos resultados de força dos ensaios e respetivos desvios padrão. (P 21)

e) Configuração P22

Na Tabela 50 estão apresentados todos os resultados dos ensaios de tração realizados, estes permitiram avaliar os comportamentos das seguintes condições operatórias individualmente: a temperatura do laser, a velocidade do laser e a pressão de aperto.

Tabela 50 - Resultados dos ensaios de tração dos provetes com a configuração Rib hermética (P 22)

Ensaio	Provetes						Força [N]	Desvio Padrão
	1	2	3	4	5	6		
H17	170,3	267,4	-	192,5	207,7	159,1	199,4	38,0
H18	174,2	222,5	240,1	281,7	181,2	171,5	211,9	40,4
H19	140,6	154,6	-	192,4	136,9	164,1	157,7	19,9
H20	123,6	155,9	139,5	144,5	142,7	131,8	139,7	10,1
H24	238,2	272,8	308,9	385,2	267,5	288,8	293,5	46,2
H25	181,3	205,0	155,5	186,2	224,6	252,0	200,8	31,2
H31	241,1	296,5	292,0	317,9	308,6	257,3	285,6	27,4
H35	313,3	-	-	340,6	331,3	315,7	325,2	11,2

Temperatura do Laser

No gráfico da Figura 150 estão apresentados os resultados da média da força dos ensaios H35, H24, H17 e H20 consoante a variação da temperatura entre os 220, 240, 260 e 280°C, respetivamente, mantendo as restantes condições operatórias constantes.

Ao observar o gráfico, verifica-se um efeito negativo no desempenho mecânico

da soldadura com o aumento da temperatura. O ensaio H35, com a menor temperatura de laser analisada 220°C, apresentou o melhor desempenho mecânico na soldadura com 325,2 N e um desvio padrão de 11,2. Através do aumento da temperatura para valores de 240, 260 e 280°C verificou-se um efeito negativo no desempenho mecânico da soldadura, nos ensaios H24, H17 e H20, com resultados de força inferiores ao ensaio H35. Este comportamento assemelha-se ao da configuração P 15, referente à temperatura do laser.

Portanto para a configuração P 22, a melhor temperatura do laser foi de 220°C como apresentado no resultado de ensaio H35.

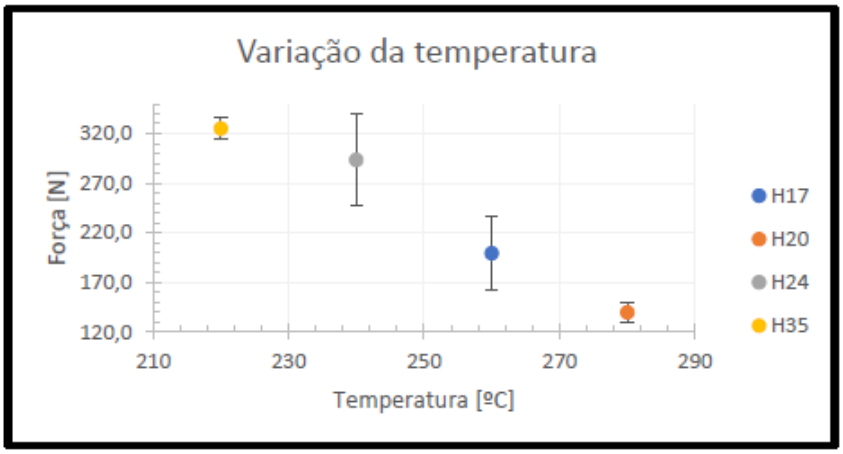


Figura 150 - Gráfico da variação da temperatura da soldadura a laser, com velocidade constante 10 mm/s e pressão de aperto constante 201 N (P 22)

Velocidade do Laser

No gráfico da Figura 151 estão apresentados os resultados da média da força dos ensaios H19, H17, H25 e H31 consoante a variação da velocidade entre os 8, 10, 12 e 14 mm/s, respetivamente, mantendo as restantes condições operatórias constantes.

No gráfico, com o aumento da velocidade verificou-se um efeito positivo no desempenho mecânico da soldadura até à velocidade máxima avaliada de 14 mm/s, referente ao ensaio H31 com o maior resultado de força registado de 285,6 N e um desvio padrão de 27,4. Com velocidades mais reduzidas de 8, 10 e 12 mm/s, nos ensaios H19, H17 e H25, evidenciou-se uma diminuição do desempenho mecânico da soldadura, ao alcançar resultados de força inferiores a H31. Este comportamento assemelha-se ao da configuração P 20, referente à velocidade do laser.

Então para a configuração P 22, a velocidade do laser de 14 mm/s demonstrou ser a mais eficaz, como apresentado pelo resultado do ensaio H31.

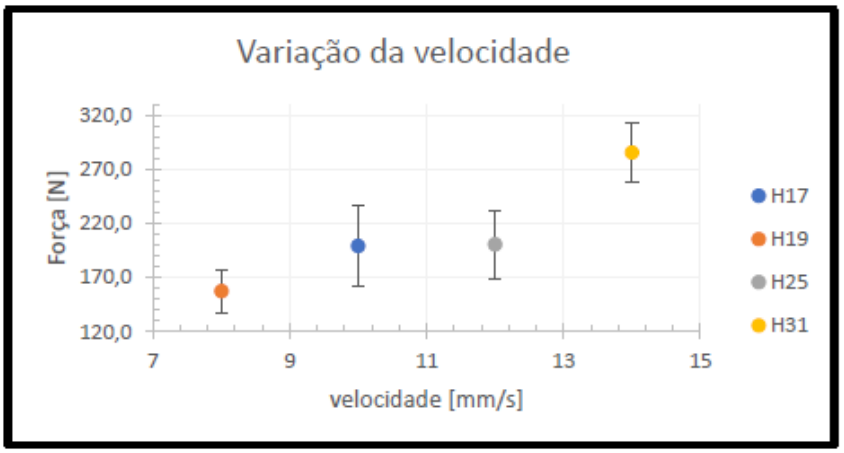


Figura 151 - Gráfico da variação da velocidade da soldadura a laser, com temperatura constante 260 °C e pressão de aperto constante 201 N (P 22)

Pressão de Aperto

No gráfico da Figura 152 estão apresentados os resultados da média da força dos ensaios H17 e H18 consoante a variação da pressão entre os 201 e 243 N, respetivamente, mantendo as restantes condições operatórias constantes.

O gráfico mostra que os resultados de força obtidos nos dois ensaios são muito semelhantes, com uma diferença em torno dos 10 N entre os resultados. Neste caso, como o tipo de *rib* apresentado é hermético, este permite um encaixe perfeito entre o provete de PMMA e de PC/ABS a soldar, transitando a pressão de aperto para todo o provete e não apenas na área a soldar. Isso sugere que a variação na pressão de aperto não teve uma influência significativa sobre o desempenho mecânico da soldadura. Este comportamento assemelha-se ao da configuração P 20, referente à pressão de aperto.

Contudo, o ensaio que exibiu melhor resultado de força máxima foi o H18 com 211,9 N, para uma pressão de aperto de 243 N.

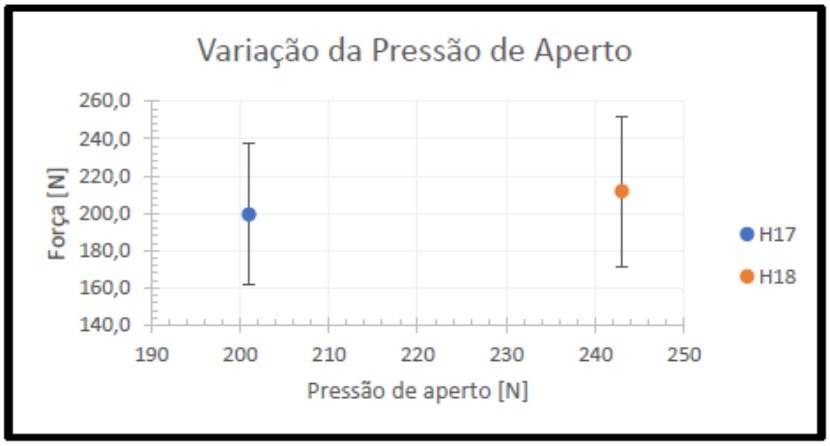


Figura 152 - Gráfico da variação da pressão da soldadura a laser, com velocidade constante 10mm/s e temperatura de laser constante 260°C (P 22)

Por fim, o gráfico da Figura 153 mostra os resultados da média da força de todos os ensaios e respetivos desvio padrão. Nesta configuração os resultados dos ensaios exibem uma variação significativa, destacando-se os ensaios H24 e H35 com os melhores resultados. No entanto, o ensaio que registou o melhor desempenho mecânico o H35, com um resultado de força de 325,2 N e um desvio padrão de 11,2. As condições operatórias deste ensaio foram: uma passagem do laser; abertura do laser de 2 mm; temperatura do laser de 220°C; velocidade do laser de 10 mm/s; e pressão de aperto de 201 N.

Contrariamente, o ensaio H20 registou o pior desempenho mecânico, atingindo apenas uma força de 139,7 N e um desvio padrão de 10,1. As condições operatórias deste ensaio foram idênticas às do ensaio H35, exceto pela temperatura do laser, que foi de 280°C.

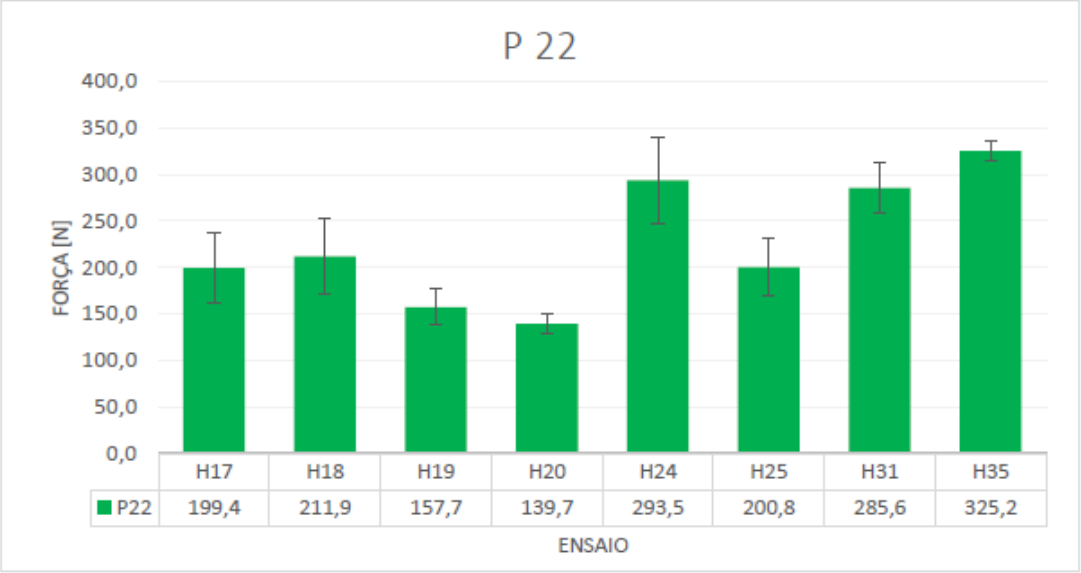


Figura 153 - Gráfico dos resultados de força dos ensaios e respetivos desvios padrão (P 22)

Resumo das Configurações Herméticas

De modo a avaliar a influência das condições operatórias e das dimensões do *rib* hermético no desempenho mecânico da soldadura, analisaram-se as configurações apresentadas na Tabela 51, que inclui os parâmetros maximizantes para cada ensaio. As configurações P 18, P 19, P 20, P 21 e P 22, identificados pelos ensaios H4, H6, H26, H33 e H35, respetivamente, foram selecionados como representativos dos melhores ensaios de cada configuração hermética.

Tabela 51 - Resumo dos parâmetros de soldadura dos melhores ensaios das configurações herméticas

Configuração	Ensaio	Dimensões			Parâmetros de Soldadura					Força [N]
		Largura [mm]	Altura [mm]	Área [mm^2]	T[°C]	V [mm/s]	P [N]	Ab Laser [mm]	Nr Passagens	
P 18	H4	0,9	0,3	0,27	280	10	201	2	1	202,7
P 1G	H6	0,9	0,4	0,36	260	10	243	2	1	235,0
P 20	H26	0,9	0,2	0,18	240	10	201	2	1	317,G
P 21	H33	1	0,3	0,3	240	6	201	2	1	324,7
P 22	H35	1,1	0,3	0,33	220	10	201	2	1	325,2

Ao observar os resultados, do gráfico da Figura 154, nota-se que todas as configurações herméticas estudadas apresentaram desempenhos mecânicos semelhantes, sem que uma configuração se destacasse de forma significativa. No entanto, o ensaio H35 (Configuração P 22), com uma largura de *rib* de 1,1 mm e

altura de 0,3 mm, alcançou o maior valor de força (325,2 N), sendo ligeiramente superior aos outros ensaios. Em contrapartida, o ensaio H4 (Configuração P 18), com um *rib* de 0,9 mm de largura e 0,3 mm de altura, obteve o valor mais baixo de força (202,7 N).

As diferenças entre os valores de força máxima indicam que as dimensões do *rib* influenciam de forma limitada o desempenho mecânico, sendo a temperatura do laser um fator de maior variação. Neste caso, as configurações com temperaturas mais baixas (220 e 240°C) apresentaram os melhores resultados de força, sugerindo que temperaturas mais elevadas podem comprometer a integridade mecânica da soldadura ao exceder o ponto ideal de fusão e possível degradação do material. Em relação à pressão de aperto, como já discutido anteriormente, esta não apresenta uma influência significativa no desempenho mecânico da soldadura, visto esta geometria ser estanque.

Deve se ter em consideração, face às dimensões do *rib* que, as duas melhores configurações (P 22 e P 21) mostram que uma largura de *rib* ligeiramente superior (1,0 a 1,1 mm) parecem favorecer um aumento na força máxima, mesmo que num valor diminuto.

Em resumo, os resultados reforçam que pequenas variações nas dimensões do *rib* e nos parâmetros de soldadura, como temperatura e velocidade, podem impactar o desempenho mecânico da soldadura, embora de forma modesta, como revelado pelos resultados comparáveis. Esta constatação pode ser útil para otimizar o processo, focando-se na alteração de parâmetros como a temperatura e a velocidade do laser para obter resultados consistentes sem grandes ajustes nas dimensões do *rib*. Contudo, a consistência nas forças máximas alcançadas, especialmente nas configurações P 22 e P 21, sugere que estas configurações são mais robustas e podem ser mais adequadas para aplicações que exijam uma maior resistência mecânica.

Quanto à influência da altura e largura do *rib,* esta não foi avaliada devido às diferenças de dimensionamento do *rib* entre as configurações ser tão pouco substancial, cerca de 0,1 mm. Além disso, como os resultados de força apresentados são tão reduzidos e semelhantes entre si, assume-se que essa diferença, acaba por resultar em diferenças não significativas.

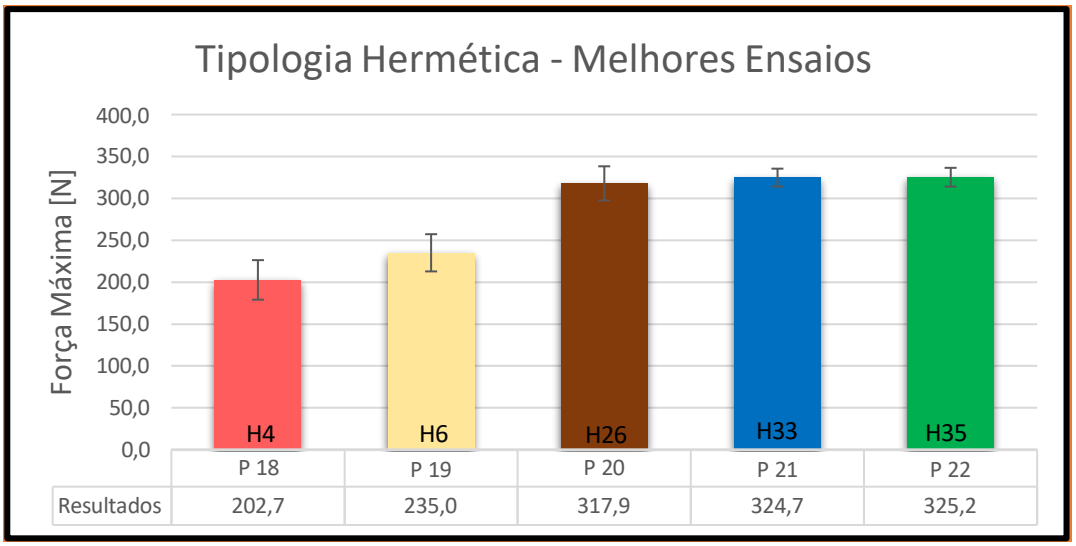


Figura 154 - Gráfico dos melhores ensaios das configurações herméticas, consoante a força máxima atingida.

Tipologia de Rib Trapezoidal

Os resultados do ensaio de tração para a tipologia de *rib* trapezoidal, configuração P 9, consoante as condições operatórias descritas em 3.3.3, encontram-se apresentados na Tabela 52. Os valores apresentam a força máxima atingida em cada ensaio, assim como a respetiva média e desvio padrão correspondentes. Nesta tipologia, cada ensaio compreendeu a análise de seis provetes.

a) Configuração P 9

Na Tabela 52 estão apresentados todos os resultados dos ensaios de tração realizados, estes permitiram avaliar os comportamentos das seguintes condições operatórias individualmente: a temperatura do laser, a velocidade do laser, a pressão de aperto e a abertura do laser.

Tabela 52 - Resultados dos ensaios de tração dos provetes com a configuração Rib trapezoidal (P 9)

Ensaio	Provetes						Força [N]	Desvio Padrão
	1	2	3	4	5	6		
E16	316,9	322,1	297,5	437,3	321,6	305,3	333,4	47,3
E17	204,2	214,3	221,7	340,7	204,0	178,0	227,2	52,5
E26	391,7	356,9	344,5	524,4	384,3	333,4	389,2	63,9
E27	335,0	380,6	333,0	420,6	360,1	327,9	359,5	32,9
E28	344,5	331,4	361,8	443,1	360,8	401,6	373,9	37,7
E2G	325,1	297,5	303,8	387,7	309,3	-	324,7	32,8
E30	333,7	353,3	307,9	434,5	333,6	316,1	346,5	41,9
E31	423,3	379,1	394,1	398,3	410,9	391,3	399,5	14,2
E36	263,9	290,5	283,8	389,4	350,5	368,5	324,4	47,1
E37	-	312,7	-	361,2	377,7	-	350,5	27,6

Abertura do Laser

Na análise da influência da abertura do laser, variou-se a abertura em 1 e 2 mm nos ensaios E16 e E17, respetivamente, mantendo as restantes condições operatórias constantes.

De forma direta, comparando os resultados dos dois ensaios é possível identificar que o resultado do ensaio E16 com uma força de 325,7 N é superior ao resultado do ensaio E17 com uma força de 227,2 N, como ilustrado na Tabela 52.

Embora o aumento da abertura do laser desencadeie uma maior área de ação do laser no *rib*, não é proporcionado um controlo tão eficiente da temperatura e, consequentemente, da energia do laser incidente no *rib*, acabando por resultar em soldaduras com um pior desempenho mecânico na soldadura. Pode-se assim afirmar que o aumento da abertura do laser teve um efeito negativo no desempenho mecânico da soldadura.

Portanto, nos restantes ensaios da configuração P 9, a abertura do laser foi mantida em 1 mm.

Temperatura do Laser

No gráfico da Figura 155 estão apresentados os resultados da média da força dos ensaios E28, E16 e E29 consoante a variação da temperatura entre os 220, 240 e 260°C, respetivamente, mantendo as restantes condições operatórias constantes.

O gráfico mostra que com o aumento da temperatura, o desempenho mecânico da soldadura diminui. O ensaio E28, com a menor temperatura de laser analisada 220°C, apresentou o melhor desempenho mecânico na soldadura com um resultado de força de 373,9 N e um desvio padrão de 37,7. Com o aumento da temperatura para valores de 240 e 260°C verificou-se um efeito negativo no desempenho mecânico da soldadura, nos ensaios E16 e E29.

Para a configuração P 9, a temperatura do laser que mais se adequa é de 220°C, conforme apresentado pelo resultado do ensaio E28.

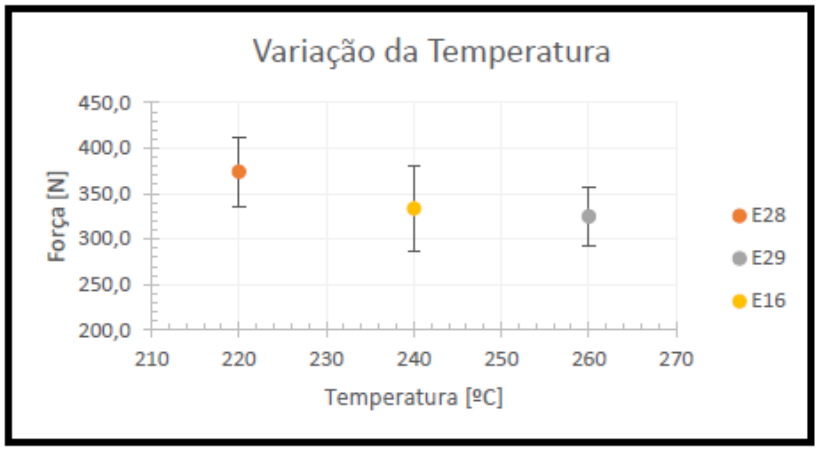


Figura 155 - Gráfico da variação da temperatura da soldadura a laser, com velocidade de 10mm/s, pressão de aperto de 201N e abertura do laser de 1mm (P 9).

Velocidade do Laser

No gráfico da Figura 156 estão apresentados os resultados da média da força dos ensaios E36, E27, E16 e E26 consoante a variação da velocidade entre os 6, 8, 10 e 12 mm/s, respetivamente, mantendo as restantes condições operatórias constantes.

O gráfico apresentado mostra que com o aumento da velocidade a força também aumenta atingindo o valor máximo no ensaio E26 com a maior velocidade estudada de 12 mm/s, alcançando um resultado de força de 389,2 N e um desvio padrão de 63,9. O ensaio E16 encontra-se não condizente com a tendência, e com um desvio padrão bastante elevado em comparação com os restantes ensaios, assumindo que tenha ocorrido uma possível anomalia no procedimento. Com velocidades mais reduzidas de 6, 8 e 10 mm/s, nos ensaios E36, E27 e E16, evidenciou-se uma diminuição do desempenho mecânico da soldadura, comprovado pelos resultados de força inferiores a E26.

Então para a configuração P 9, a velocidade do laser de 12 mm/s demonstrou ser a mais eficaz, como apresentado pelo resultado do ensaio E26.

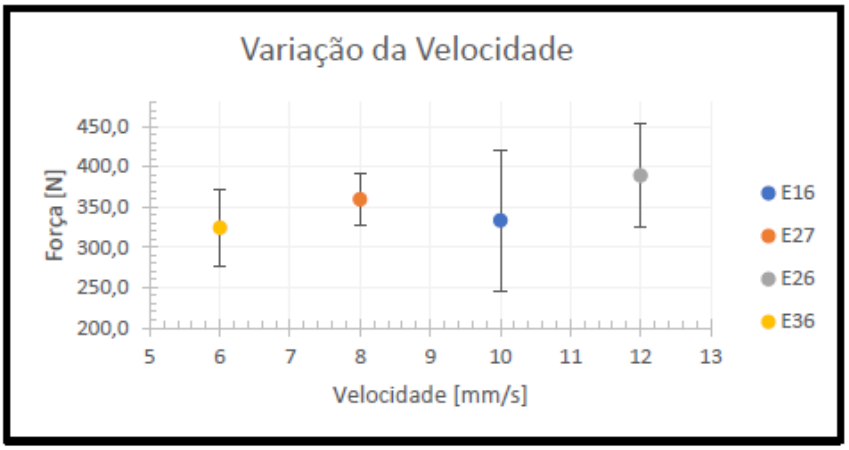


Figura 156 - Gráfico da variação da velocidade da soldadura a laser, com temperatura de 240°C, abertura do laser de 2mm e uma pressão de aperto de 201 N (P 9)

Pressão de Aperto

No gráfico da Figura 157 estão apresentados os resultados da média da força dos ensaios E30, E16 e E31 consoante a variação da pressão entre os 173, 201 e 243 N, respetivamente, mantendo as restantes condições operatórias constantes.

No gráfico, com o aumento da pressão de aperto verificou-se um efeito positivo no desempenho mecânico da soldadura até à pressão máxima avaliada de 243 N, referente ao ensaio E31 com um resultado de força de 399,5 N e um desvio padrão de 14,2. Além disso, com esse aumento também se observou observou-se uma diminuição no desvio padrão, sugerindo uma maior estabilidade e resultados mais fidedignos no processo de soldadura a laser para pressões mais elevadas. Com pressões mais reduzidas de 173 e 201 N, nos ensaios E30 e E16, evidenciou-se uma diminuição do desempenho mecânico da soldadura, ao alcançar resultados de força inferiores a E31.

Portanto para a configuração P 9, a melhor pressão de aperto foi de 243 N como apresentado no resultado de ensaio E31.

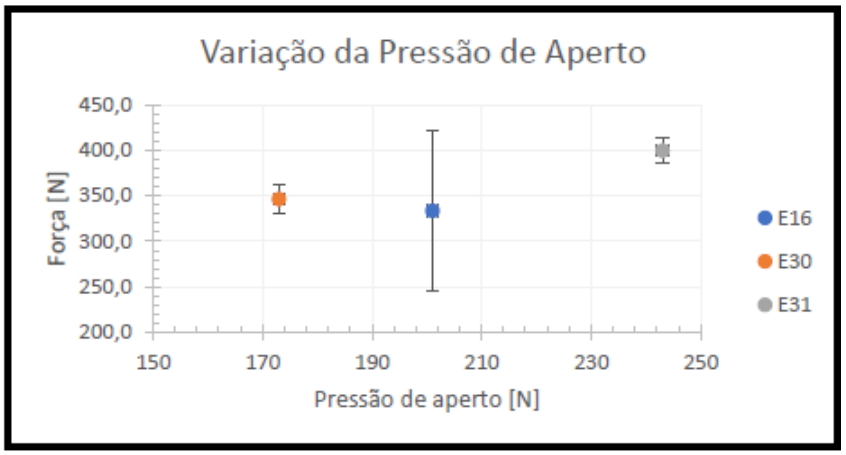


Figura 157 - Gráfico da variação da pressão da soldadura a laser, com velocidade de 10mm/s, abertura do laser de 2mm e temperatura de 240°C (P 9)

Por último, o gráfico da Figura 158 mostra os resultados da média da força de todos os ensaios e respetivos desvio padrão. Nesta configuração, os resultados dos ensaios apresentam uma variação significativa, destacando-se o ensaio E17 com o pior resultado de força.

Portanto, o ensaio que registou o melhor desempenho mecânico foi o E31, com um resultado de força de 399,5 N e um desvio padrão de 14,2. As condições operatórias deste ensaio foram: uma passagem de laser; abertura do laser de 2 mm; temperatura do laser de 240°C; velocidade do laser de 10 mm/s; e pressão de aperto de 243 N.

Por outro lado, o ensaio E17 registou o pior desempenho mecânico, atingindo apenas uma força de 227,2 N e um desvio padrão de 52,5. As condições operatórias deste ensaio foram idênticas às do ensaio T4, exceto pela abertura do laser, que foi de 1 mm, e pela pressão de aperto que foi de 243 N.

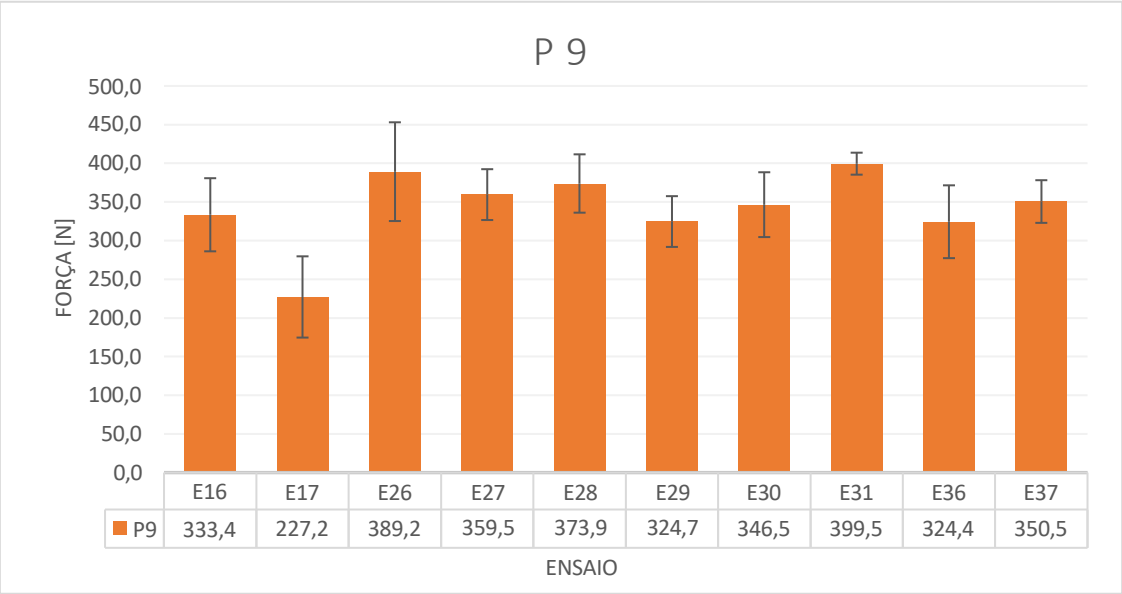


Figura 158 – Gráfico dos resultados de força dos ensaios e respetivos desvios padrão. (P 9)

Sumário – Resumo das Configurações

Em sumário, após terem sido avaliadas as condições operatórias da soldadura e da influência dos dimensionamentos de *rib* tendo em conta os melhores ensaios de todas as configurações, esses ensaios foram agrupados juntamente com os correspondentes dimensionamentos e resultados de força, na Tabela 53. Com o objetivo de compreender qual a tipologia e dimensionamento de *rib* mais eficiente. Isto porque, em projetos de design industrial, especialmente para produção em larga escala, a eficiência estrutural dos componentes é essencial para garantir tanto a durabilidade quanto a viabilidade econômica. Dentro das soluções estruturais utilizadas para aumentar o desempenho mecânico e a rigidez dos provetes, os *ribs* desempenham um papel fundamental. O design dos *ribs*, incluindo a geometria e a área ocupada pelo material, impacta diretamente o desempenho mecânico e o consumo de material, influenciando o custo de produção e o desempenho estrutural do produto final.

Neste contexto, a análise da relação entre a área do *rib* e o desempenho mecânico permite avaliar a eficiência das diferentes configurações de *ribs*. A otimização dessa relação é especialmente relevante para produções em grandes volumes, onde pequenas variações na área de material podem resultar em grandes economias ao longo do ciclo de produção. A eficiência do *rib* pode, então, ser medida pela métrica

Força/Área (N/mm^2), que representa a quantidade de resistência mecânica obtida por unidade de área de *rib*. Neste caso, como não foi possível medir a secção transversal do *rib* sujeita ao esforço mecânico, apenas se vai comparar os resultados de força obtidos, perante a área ocupada pelos *ribs.* Esta metodologia promove assim a comparação entre diferentes configurações, destacando a escolha do design mais eficiente que permitirá não só alcançar altos níveis de resistência estrutural, mas também minimizar o consumo de material, reduzindo custos e promovendo uma abordagem de design mais sustentável.

Tabela 53 - Resultados da força dos Melhores ensaios de cada Configuração

Tipologia	Configuração	Ensaio	Largura [mm]	Altura [mm]	Área [mm^2]	Força [N]
Retangular	P 7	T6	0,8	0,5	0,40	402,0
	P 10	T72	1	0,5	0,50	459,3
	P 11	T73	1,2	0,5	0,60	522,4
	P 14	T4	0,8	0,8	0,64	272,5
	P 15	T80	0,8	1,1	0,88	399,7
Triangular	P 8	T97	0,8	0,5	0,20	425,6
	P 12	T87	1	0,5	0,25	433,1
	P 13	T88	1,2	0,5	0,30	503,0
	P 16	T92	0,8	0,8	0,32	580,3
	P 17	E24	0,8	1,1	0,44	280,6
Hermética	P 18	H4	0,9	0,3	0,27	202,7
	P 19	H6	0,9	0,4	0,36	235,0
	P 20	H26	0,9	0,2	0,18	317,9
	P 21	H33	1	0,3	0,30	324,7
	P 22	H35	1,1	0,3	0,33	325,2
Trapezoidal	P 9	H31	0,8	0,5	0,325	399,5

O gráfico da Figura 159, mostra as quatro tipologias apresentadas - Retangular, Triangular, Hermética e Trapezoidal – estes demonstram resultados variáveis em termos de desempenho mecânico e área de *rib,* consoante cada configuração e correspondente ensaio. Abaixo, vai ser analisada cada tipologia individualmente.

Para a configuração Retangular:

- Melhor Ensaio: O melhor desempenho mecânico foi observado na configuração P 11 (Ensaio T73), com uma força de rutura de 522,4 N e uma área de *rib* de 0,60 mm^2.

- Eficiência de Material: Apesar de apresentar uma força elevada, o ensaio T73 possui uma área de *rib* relativamente grande. A configuração P 10 (Ensaio T72), com

uma área de *rib* de 0,50 mm² e força de 459,3 N, representa uma opção mais eficiente para produção em larga escala, pois oferece um compromisso mais viável entre resistência e consumo de material.

Para a configuração Triangular:

- Melhor Ensaio: O ensaio T92 (P 16) apresenta a maior força de rutura, atingindo 580,3 N, com uma área de *rib* de 0,32 mm². Este é o maior valor de força entre todas as configurações, sugerindo uma excelente resistência.

- Eficiência de Material: A configuração triangular mostra-se a mais eficiente em termos de resistência por área de *rib*. A configuração P 16 (Ensaio T92) consegue atingir alta resistência com uma área reduzida, o que seria altamente vantajoso numa produção de grandes volumes, resultando em menos consumo de material sem comprometer a robustez da soldadura.

Para a configuração Hermética:

- Melhor Ensaio: O ensaio H35 (P 22) alcançou uma força de rutura de 325,2 N com uma área de *rib* de 0,33 mm².

- Eficiência de Material: Embora a resistência mecânica seja considerável, a configuração hermética tem uma eficiência inferior à triangular para grandes produções, devido a valores de força relativamente menores. No entanto, ainda pode ser uma escolha viável onde a resistência absoluta não seja o fator mais preponderante, mas sim a necessidade de uma soldadura estanque.

Para a configuração Trapezoidal:

- Melhor Ensaio: A configuração P 9 (H31) atinge uma força de 399,5 N com uma área de *rib* de 0,325 mm².

- Eficiência de Material: Esta configuração oferece uma resistência relativamente elevada e uma área de *rib* menor do que a configuração retangular, mas ainda inferior à triangular em termos de eficiência.

Para entender melhor a eficiência em termos de consumo de material e resistência, através da metodologia indicada anteriormente. Esta metodologia ajuda a avaliar a eficiência de cada tipologia, assim como, compará-las entre si:

As configurações triangulares (P 8 – T97; P 12 – T87; P 13 – T88 e P 16 – T92) destacam-se como as mais eficientes, com boas relações entre os valores de força e de área do *rib*. Isso indica que estas configurações não só fornecem maiores resistências, mas também requerem menos material para o *rib*, o que é ideal para

produções de larga escala, economizando material enquanto garantem uma soldadura robusta. Somente a configuração (P 17 – E24) não se encontra neste leque de soldaduras robustas devido a apresentar um resultado de força bastante inferior às restantes configurações triangulares, devido ao aumento da altura do *rib* e consequentemente da área.

No caso da configuração trapezoidal (P 9 - H31) e herméticas (P 20 – H26; P 21 – H33 e P 22 - H35) têm eficiências intermediárias, tornando-as opções viáveis onde a configuração triangular não é aplicável ou onde uma geometria específica é necessária para a aplicação. No caso das configurações herméticas (P 18 – H4 e P 19 – H6), estas apresentam eficiências bastante reduzidas quando comparadas com as restantes configurações devido ao baixo resultados de força alcançados.

Por último, para as configurações retangulares (P 7 – T6; P 10 – T72 e P 11 - T73), apesar de fornecerem uma alta resistência, possuem a menor eficiência relativa ao consumo de material, o que pode aumentar os custos de produção em larga escala. Para as restantes configurações retangulares, em termos de eficiência, ainda exibem uma eficiência inferior devido aos resultados de força ainda mais baixos, juntamente com um aumento no material consumido.

Neste caso, como recomendação para produção em larga escala. Com base nos dados de eficiência, as configurações triangulares, há exceção da configuração P 17, são as mais indicadas para uma produção em larga escala onde a economia de material e a resistência mecânica da soldadura são pontos críticos.

Em síntese, esta configuração oferece:

- A maior resistência mecânica entre todas as configurações.
- A menor área de *rib* comparada com outras configurações de alta resistência, resultando em economia de material.
- Alta relação Força/Área, o que indica uma soldadura robusta com uso otimizado de material.

Portanto para produções avultadas, a escolha da configuração triangular pode reduzir significativamente o consumo de material, tornando o processo mais sustentável e economicamente vantajoso.

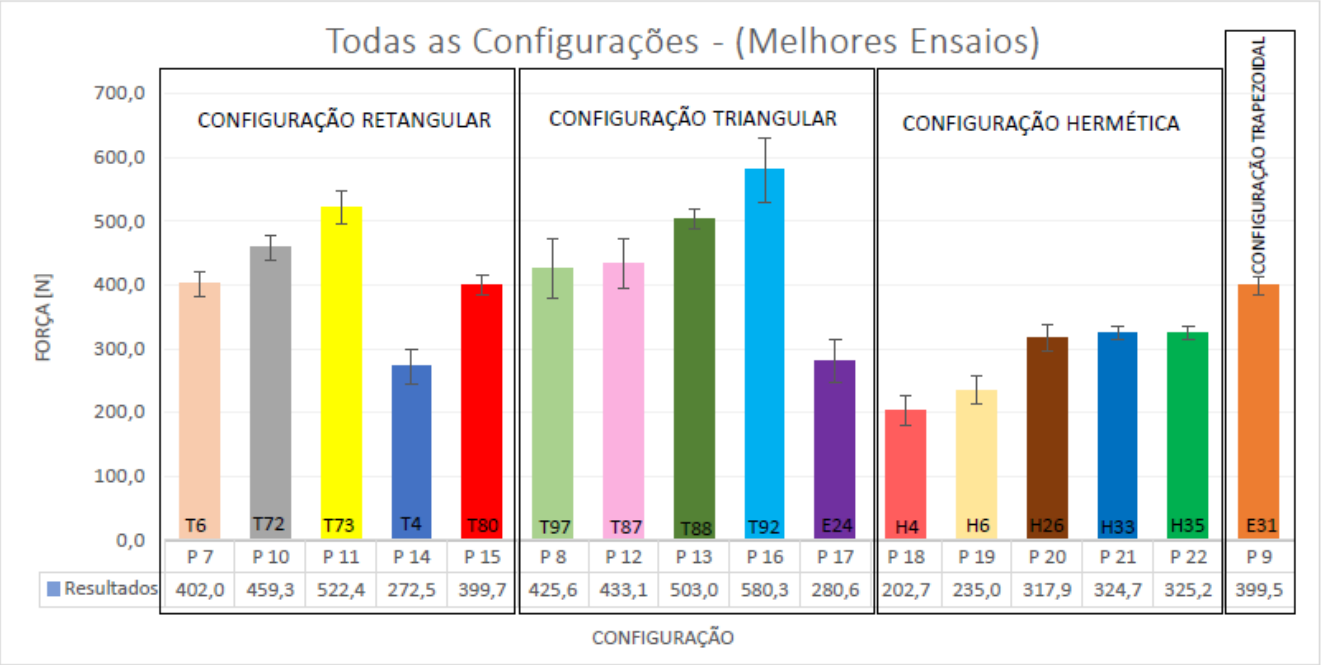


Figura 159 - Gráfico dos resultados da tensão de rotura dos melhores ensaios de todas as Configurações

Ensaios de Microscopia

Em paralelo com os ensaios de tração, foram realizados ensaio óticos de microscopia nos restantes 2 dos 8 provetes obtidos através da moldação por injeção. O objetivo destes ensaios foi avaliar a qualidade da soldadura.

É importante destacar que, como os ensaios microscópicos foram conduzidos simultaneamente com os ensaios de tração, esta análise pode não coincidir exatamente com as observações dos restantes 6 provetes submetidos à tração. Portanto, este ensaio microscópico pode ou não ser um indicador preditivo do comportamento e da qualidade da soldadura nos ensaios de tração.

Ressalva-se ainda que esta parte do estudo foi realizada em parceria com o PIEP. Portanto, os ensaios de microscopia foram realizados por investigadores do PIEP tendo sido somente fornecidos ao autor deste trabalho as imagens microscópicas de alguns ensaios, quer da Configuração P 14, quer da Configuração P 16.

Neste caso, como as configurações apresentam as mesmas dimensões com apenas diferença no formato do *rib,* foi possível comparar o comportamento da qualidade da soldadura tendo em conta o seu formato.

As zonas de soldadura visualizadas através do microscópio estão representadas na Figura 160 e Figura 161. Em ambas as configurações, foram observados alguns pontos e manchas negras, que podem corresponder a resíduos presentes no molde,

provenientes de utilizações anteriores, ou à entrada de resina em áreas vazias na soldadura. Além da região de soldadura, é possível visualizar a presença de resina (representada pela região negra) e as matérias primas utilizadas: PC/ABS a cinza claro e PMMA a cinza escuro.

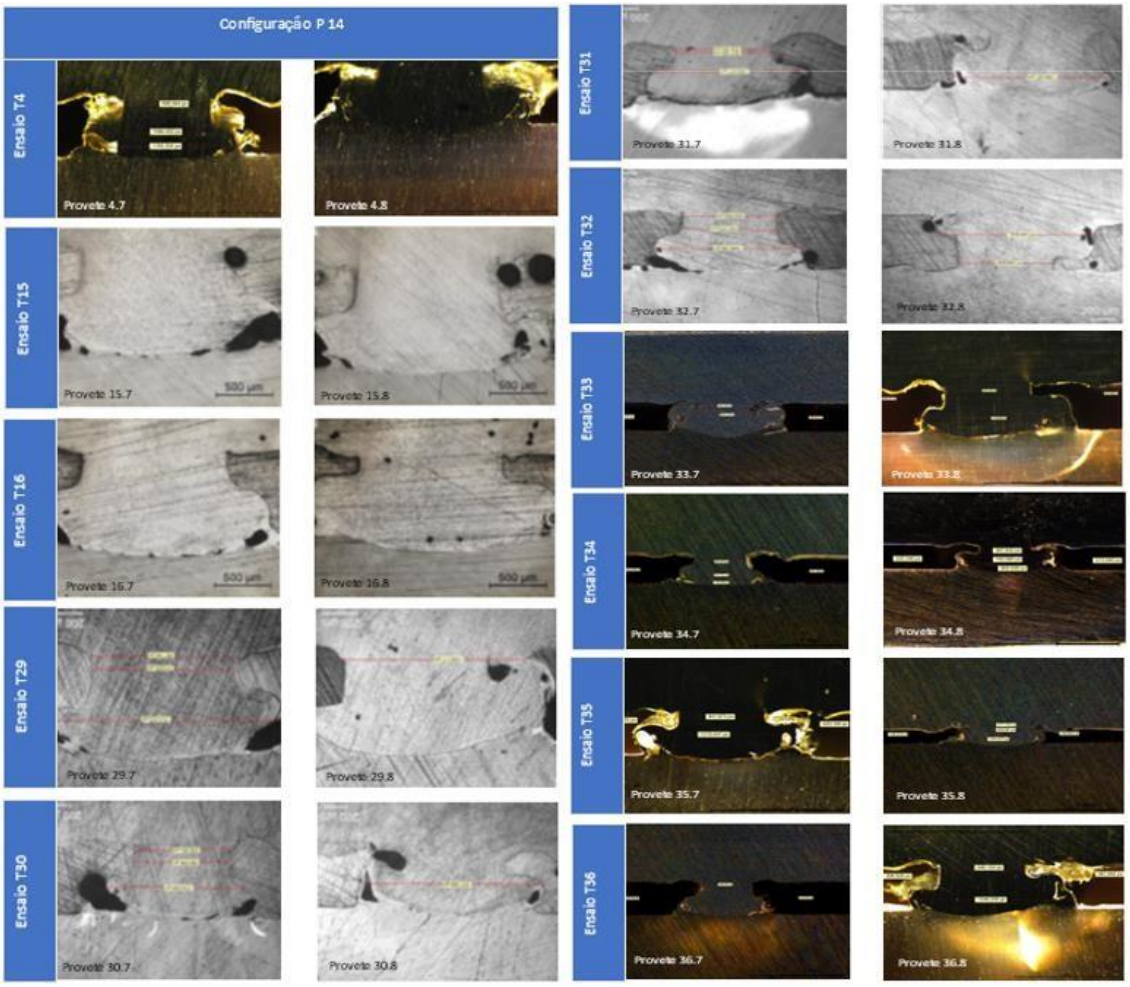


Figura 160 - Imagens de microscopia referente aos provetes 7 e 8 de todos os ensaios da Configuração P 14

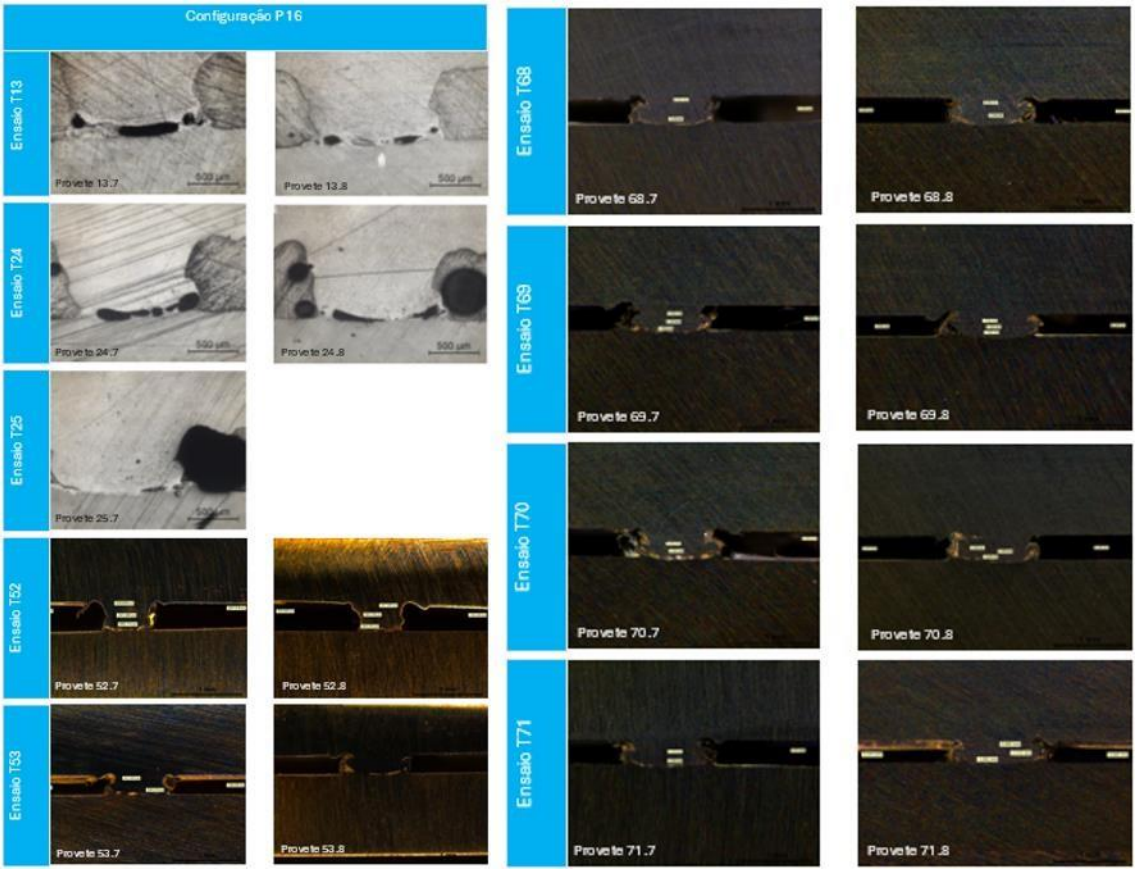


Figura 161 - Imagens de microscopia referente aos provetes 7 e 8 de todos os ensaios da Configuração P 16

Nas imagens, é possível determinar que todos os provetes, em todos os ensaios apresentam uma zona de soldadura bem definida.

No caso da Configuração P 14, na Figura 160, observa-se que o formato do *rib*, após a soldadura, transita numa estrutura semelhante a um "cogumelo", resultante do achatamento provocado pelas condições operatórias aplicadas na fundição do *rib.* Em todos os ensaios, nota-se a presença de pequenos vazios, especialmente nas extremidades da zona de soldadura. Destacam-se os ensaios 15.7, 15.8, 31.7, 32.7 e 35.7 onde se verifica a ocorrência de vazios mais pronunciados na interface da soldadura, indicando uma qualidade inferior de soldadura. No ensaio 16.8 observa-se um maior acúmulo de manchas pretas, possivelmente indicando a presença de pequenos resíduos como poeiras. Os ensaios que apresentam a melhor qualidade na interface da zona de soldadura, foram destacadamente o 4.8, 33.7, 35.8 e 36.7 com a melhor definição na interface dos materiais na linha de soldadura e com menor propensão de vazios e manchas negras na soldadura.

Enquanto na Configuração P 16, na Figura 161, para os ensaios T13, T24, T25 e

T52, embora o formato inicial do *rib* fosse triangular, após a soldadura, o *rib* assume um formato aproximadamente trapezoidal, também devido ao achatamento aquando da fundição do *rib,* condicionado pelas condições operatórias utilizadas. Nos restantes ensaios, após a soldadura, o formato de *rib* começa a assemelhar-se a um "cogumelo" como observado na Configuração P 14.

Assim como na Configuração P 14, também são observados pequenos vazios, especialmente nas extremidades da zona de soldadura, com especial detalhe para os casos dos ensaios 13.7, 13.8, 24.7, 24.8, 25.7, 52.7 e 70.7 onde se verificam a ocorrência de vazios mais pronunciados na interface da soldadura, sugerindo uma qualidade inferior na soldadura. Os ensaios que apresentam a melhor qualidade na interface da zona de soldadura, foram destacadamente o 53.8, 69.8 e 71.8 com a melhor definição na interface dos materiais na linha de soldadura e com menor propensão de vazios e manchas negras na soldadura.

5. Conclusão

O presente estudo explorou em detalhe o impacto da adição de diferentes tipos de pigmentos e corantes, considerando três níveis de concentração, combinados com o aumento da espessura na transmitância do PMMA e o seu efeito na soldadura laser por transmissão. Simultaneamente, a influência das condições operatórias e das geometrias e dimensões de *rib* do PC/ABS foram examinadas, com o intuito de otimizar a resistência mecânica e a qualidade da soldadura, compreendendo a sua eficiência e aplicabilidade em produções de larga escala. Através de uma análise estruturada e dividida em dois casos de estudo, foram obtidos resultados importantes sobre a otimização do processo de soldadura, nomeadamente nos parâmetros dos materiais e nos parâmetros ideais para garantir uma soldadura eficaz e robusta, especialmente em contextos onde se exigem altos padrões de transparência e absorção da radiação laser.

No primeiro caso de estudo, são enfatizadas as características das peças superiores "transparentes" ao laser. Numa primeira fase, a caracterização do PMMA e das suas misturas revelaram diferenças significativas nas propriedades de cor e transmitância em função das concentrações de pigmentos e corantes, e ainda espessuras. Por intermédio da comparação entre as misturas de pigmentos e corantes com a mesma denominação de cor, como dados intrínsecos aos colorantes,

estes indicam que: os corantes apresentam uma luminosidade mais escura em comparação com os pigmentos orgânicos. Assim como, o pigmento orgânico azul 15:1 apresenta uma luminosidade mais escura que o pigmento inorgânico azul 29. Através da análise da transmitância em função do comprimento de onda, verifica-se que o comprimento de onde de 940 nm se sobrepõem ao de 1040 nm permitindo uma melhor transmissão da energia proveniente do laser em todos as misturas de colorantes estudadas.

Consoante a avaliação da transmitância considerando um comprimento de onde de 940 nm, foi observado que os corantes exibem valores de transmitância superiores aos pigmentos orgânicos. E que os pigmentos orgânicos apresentam valores de transmitância superiores aos pigmentos inorgânicos. A única exceção ocorre no caso do pigmento inorgânico azul 29, onde o seu comportamento se assemelha mais aos dos corantes. Notou-se que o aumento da espessura dos provetes de PMMA impacta de forma variável na transmitância, consoante o tipo e a concentração de aditivo. Neste caso, o aumento de espessura e de concentração, apresentam maior influência na adição pigmentos, por sua vez, os corantes são mais influenciados pelas condições operatórias da injeção. Isto confirma a relação significativa entre a transmitância do PMMA e as concentrações dos diferentes aditivos, observando-se que os corantes, particularmente, apresentam uma maior compatibilidade com os requisitos de transparência para a soldadura a laser, sendo preferíveis em relação a pigmentos, especialmente em peças de maior espessura, sendo reforçada a importância da otimização da transparência para facilitar a passagem da radiação laser.

Adicionalmente, perante a inspeção visual da soldadura das misturas, determinou-se que como parte transparente ao processo de soldadura laser por transmissão podem ser empregues na matriz polimérica:

- Todos os corantes, com especial atenção para o vermelho 135 no qual devem ser realizados novos ensaios; Todos os pigmentos orgânicos, com especial atenção para a incorporação do verde 28 para espessuras acima dos 3 mm e uma concentração de 2%; E ainda o pigmento inorgânico dióxido de titânio, azul 29, o óxido de ferro (com 0,5% e 1% até espessuras de 3,5 mm e 2 mm, respetivamente) e o bronze (com 0,5% e 1% até espessuras de 2,5 mm e 1 mm, respetivamente).

Pelo contrário, determina-se que podem ser incorporados na matriz polimérica para parte absorvente ao processo de soldadura laser:

- O óxido de ferro (com 0,5% e 1% até espessuras de 4 mm e 2,5 mm, respetivamente e todas as espessuras para os 2% de concentração). O bronze (com 0,5% e 1% até espessuras de 3 mm e 1,5 mm e todas as espessuras para os 2% de concentração). Ainda o negro de fumo em todas as espessuras e concentrações devido ao seu elevado coeficiente absorvente.

O único caso que não deve ser incorporado em processos de soldadura laser por transmissão é o alumínio devido ao seu coeficiente reflexivo bastante elevado. Por fim, mediante o relacionamento de dados da inspeção visual com os valores obtidos na transmitância verificou-se que, praticamente em todos os casos é estabelecida uma boa relação, com indícios preditivos confiáveis entre a luz transmitida num comprimento de onda de 940 nm e o *output* visual final das peças soldadas, com exceção do corante vermelho 135 e os pigmentos inorgânicos dióxido de titânio e bronze.

No entanto, os resultados sugerem, assim, uma aplicabilidade mais ampla para os corantes na produção de componentes que exijam elevada transmitância sem comprometer a integridade da soldadura.

O segundo caso de estudo foi fundamental para determinar as condições operatórias e geometrias de *rib* que maximizam a resistência da soldadura mantendo uma boa qualidade e eficiência. Neste caso, conclui-se que tanto as condições operatórias do laser como as configurações do *rib* influência na resistência e qualidade de soldadura, sendo necessário uma boa conjugação de parâmetros para a obtenção da otimização do processo de soldadura.

Observou-se que as configurações de *rib* quer sejam retangulares ou triangulares aumentavam os valores de força consoante: o aumento da largura do *rib* devido ao aumento da área de contacto entre os materiais, quer com a diminuição da altura do *rib* devido a menor rotação provocada entre as amarras nos ensaios de tração.

Verificou-se ainda que as geometrias de *rib* com menor área transversal, como as triangulares, resultaram em melhores índices de resistência mecânica por área de material, tornando-se a opção mais eficiente para a produção em larga escala. A análise das diferentes geometrias e dimensões de *rib*, em conjunto com as condições operatórias de soldadura (como temperatura do laser, velocidade, e pressão de aperto), permitiu identificar as configurações triangulares (P 8 e P 16, nos ensaios T97 e T92, respetivamente) como as mais eficientes, com o melhor rácio Força/Área, com resultados de força de 425,6 e 580,3 N e áreas de 0,2 e 0,32 mm^2,

respetivamente. Apesar da geometria retangular ter apresentado uma elevada resistência, a sua eficiência foi inferior, em contrapartida, as geometrias hermética e trapezoidal apresentaram resistências intermediárias, contudo eficiências superiores à geometria retangular e inferior à triangular sendo alternativas viáveis onde as especificações geométricas são limitantes.

Neste caso, a geometria triangular mostrou-se mais vantajosa ao proporcionar maior área de contato com a mínima quantidade de material, destacando-se como preferencial para aplicações industriais de grande volume.

De ressalvar que as condições operatórias do laser também se mostraram cruciais, influenciando diretamente a eficiência do *rib*, particularmente nas variáveis de abertura do laser e número de passagens. Em exemplo, a configuração triangular (P 16, ensaio T92) beneficiou de ajustes na abertura do laser e no número de passagens, alcançando uma soldadura robusta com menor área de *rib* e, portanto, menos material. Esse ajuste mostra o potencial de customização do processo.

Estes achados oferecem um caminho promissor para a indústria, onde a escolha cuidadosa da geometria de *rib* pode reduzir o consumo de material e os custos operacionais sem sacrificar a robustez da soldadura.

Em resumo, este estudo fornece diretrizes claras para a escolha de aditivos e parâmetros operacionais na soldadura laser por transmissão, estabelecendo uma base sólida para futuras investigações e aplicações industriais. Além disso, ressalta-se a importância de ensaios adicionais para validar as tendências observadas e expandir o uso da soldadura a laser em polímeros de diferentes características e aplicações. Esta abordagem integrada permite alinhar as necessidades de produção com práticas de engenharia mais eficientes, sustentáveis e orientadas para a inovação.

Bibliografia

[1] H.-G. Elias, *Macromolecules. Volume 3, Physical structures and properties.*

[2] P. Kah and J. Martikainen, "89 Current trends in welding processes and materials: improve in effectiveness CURRENT TRENDS IN WELDING PROCESSES AND MATERIALS: IMPROVE IN EFFECTIVENESS."

[3] H. Nakamata, "Process for joining different kinds of synthetic resins.," US Patent, 4636609, 1987

[4] B. Acherjee, A. S. Kuar, S. Mitra, and D. Misra, "Selection of process parameters for optimizing the weld strength in laser transmission welding of acrylics," *Proc Inst Mech Eng B J Eng Manuf*, vol. 224, no. 10, pp. 1529–1536, Oct. 2010, doi: 10.1243/09544054JEM1854.

[5] G. v. Moskvitin, A. N. Polyakov, and E. M. Birger, "Laser welding of plastics (review)," *Welding International*, vol. 27, no. 9. pp. 725–734, Sep. 2013. doi: 10.1080/09507116.2012.753282.

[6] M. Chen, G. Zak, and P. J. Bates, "Effect of carbon black on light transmission in laser welding of thermoplastics," *J Mater Process Technol*, vol. 211, no. 1, pp. 43–47, Jan. 2011, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2010.08.017.

[7] M. Ilie, E. Cicala, D. Grevey, S. Mattei, and V. Stoica, "Diode laser welding of ABS: Experiments and process modeling," *Opt Laser Technol*, vol. 41, no. 5, pp. 608–614, 2009, doi: 10.1016/j.optlastec.2008.10.005.

[8] V. Mamuschkin, A. Roesner, and M. Aden, "Laser transmission welding of white thermoplastics with adapted wavelengths," in *Physics Procedia*, Elsevier B.V., 2013, pp. 172–179. doi: 10.1016/j.phpro.2013.03.067.

[9] M. John. Troughton, *Handbook of plastics joining: a practical guide*. William Andrew, 2008.

[10] I. Mingareev, F. Weirauch, A. Olowinsky, L. Shah, P. Kadwani, and M. Richardson, "Welding of polymers using a 2 μm thulium fiber laser," *Opt Laser Technol*, vol. 44, no. 7, pp. 2095–2099, Oct. 2012, doi: 10.1016/j.optlastec.2012.03.020.

[11] A. Boglea, A. Rösner, and A. Olowinsky, "New perspectives for the absorber free laser welding of thermoplastics," in *29th International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics, ICALEO 2010 - Congress Proceedings*, Laser Institute of America, 2010, pp. 567–572. doi: 10.2351/1.5062082.

[12] A. B. Humbe, P. A. Deshmukh, C. P. Jadhav, and & S. R. Wadgane, "REVIEW OF LASER PLASTIC WELDING PROCESS," vol. 2, pp. 191–206, 2014, [Online]. Available: www.impactjournals.us

[13] Fernando Duarte, "Power Point Unidade Curricular Processamento de Polímeros III, Engenharia de Polímeros."

[14] "Laser Plastic Welding Design Guidelines Manual." [Online]. Available: www.lpkfusa.com/lw

[15] C. Hopmann and M. Weber, "New Concepts for Laser Transmission Welding of Dissimilar Thermoplastics," 2012.

[16] "https://www.leister.com/pt/Services/Industrial-Consulting/Consulting-Laser-Technology/Good-to-know-Weldable-Materials."

[17] A. Boglea, A. Rösner, and A. Olowinsky, "New perspectives for the absorber free laser welding of thermoplastics," in *29th International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics, ICALEO 2010 - Congress Proceedings*, Laser Institute of America, 2010, pp. 567–572. doi: 10.2351/1.5062082.

[18] D.M. Bryce, *Plastic Injection Molding: material selection and producto design fundamentals, Volume II, Society of Manufacturing Engineers Dearborn, Michigan,1997.*

[19] J.A. Brydson, *Plastics Materials, seventh Edition, Butterworth Heinemann, Oxford, 1999. ISBN: 0 7506 4132 0*.

[20] E.A. Campo, *The Complete Part Design Handbook For Injection Molding of Thermoplastics, edição10, Hanser Gardner Publications, USA,2006. ISBN: 1-56990-375-1*.

[21] L.A.Utracki, *"Commercial polymer blends," Polym. Blends Handb., pp. 384–388, 1998.*

[22] A. Cunha, *Manual do projectista para moldes de injeção e plástico, Centimfe. 2003.*

[23] S. C. Tjong and Y. Z. Meng, *"Effect of reactive compatibilizers on the mechanical properties of polycarbonate/poly(acrylonitrile-butadiene-styrene) blends," Eur. Polym. J., vol. 36, no. 1, pp. 123–129, 2000.*

[24] R. K. N. A. M. F. and A. E. I. Debbah, *"Effect of SEBS-g-MAH addition on the mechanical, rheological, and morphological properties of polycarbonate/acrylonitrile–butadiene–styrene blends," J. Elastomers Plast., vol. 50, no. 7, pp. 611–633, 2018.*

[25] M. Weber, *"Polymer blends: Materials with versatile properties," Macromol. Symp., vol. 163, pp. 235–250, 2001.*

[26] J. L. D. G. and M. D. S. R. Balart, *"Recycling of ABS and PC from electrical and electronic waste. Effect of miscibility and previous degradation on final performance of industrial blends," Eur. Polym. J., vol. 41, no. 9, pp. 2150–2160, 2005.*

[27] L. F. F. F. Gonçalves, F. M. Duarte, C. I. Martins, and M. C. Paiva, "Laser welding of thermoplastics: An overview on lasers, materials, processes and quality," *Infrared Physics and Technology*, vol. 119. Elsevier B.V., Dec. 01, 2021. doi: 10.1016/j.infrared.2021.103931.

[28] S. Abed, P. Laurens, C. Carrétéro, J. R. Deschamps, and C. Duval, "Diode laser welding of polymers: Microstructures of the welded zones for polypropylene," Laser Institute of America, Oct. 2018, pp. 1499–1507. doi: 10.2351/1.5059820.

[29] B. Acherjee, A. S. Kuar, S. Mitra, and D. Misra, "Selection of process parameters for optimizing the weld strength in laser transmission welding of acrylics," *Proc Inst Mech Eng B J Eng Manuf*, vol. 224, no. 10, pp. 1529–1536, Oct. 2010, doi: 10.1243/09544054JEM1854.

[30] B. Acherjee, D. Misra, D. Bose, and K. Venkadeshwaran, "Prediction of weld strength and seam width for laser transmission welding of thermoplastic using response surface methodology," *Opt Laser Technol*, vol. 41, no. 8, pp. 956–967, Nov. 2009, doi: 10.1016/j.optlastec.2009.04.007.

[31] R. Prabhakaran, M. Kontopoulou, G. Zak, P. J. Bates, and B. K. Baylis, "Contour laser - Laser-transmission welding of glass reinforced nylon 6," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol. 19, no. 4, pp. 427–439, Jul. 2006, doi: 10.1177/0892705706062200.

[32] R. Bhattacharya, N. Kumar, N. Kumar, and A. Bandyopadhyay, "A Study on the Effect of Process Parameters on Weld Width and Heat Affected Zone of Pulsed Laser Welding of Dissimilar Transparent

Thermoplastics Without Filler Materials in Lap Joint Configuration," in *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, 2018, pp. 3674–3681. doi: 10.1016/j.matpr.2017.11.618.

[33] D. M. Douglass and C. Y. Wu, "Laser welding of polyolefin elastomers to thermoplastic polyolefin," in *ICALEO 2003 - 22nd International Congress on Applications of Laser and Electro-Optics, Congress Proceedings*, Laser Institute of America, 2003. doi: 10.2351/1.5060070.

[34] V. Kagan, R. Bray, and A. Chambers, "Forward to better understanding of optical characterization and development of colored polyamides for the infra-red/laser welding: Part I - Efficiency of polyamides for infra-red welding," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 22, no. 6, pp. 533–547, 2003, doi: 10.1106/073168403023283.

[35] A. Jansson, S. Kouvo, and V. Kujanpää, "Preliminary investigations of laser welding of plastics in massproduction (504)," in *ICALEO 2004 - 23rd International Congress on Applications of Laser and Electro-Optics, Congress Proceedings*, 2004. doi: 10.2351/1.5060280.

[36] "Coloring of Plastics Fundamentals-Colorants-Preparations."

[37] "https://www.ctborracha.com/borracha-sintese-historica/materias-primas/pigmentos-corantes/?fbclid=IwAR1S4mc6jiqzCgnY10UpOQRnylgohuN8j7HJ4gIKniii5PH-ZXsd-GOczGg."

[38] "Coloring of Plastics Fundamentals-Colorants-Preparations."

[39] "Serviços e informações adicionais para o Journal of Reinforced Plastics and Composites podem ser encontrados em: O que é isto?" 2002, doi: 10.1106/073168402024286.

[40] E. Haberstroh, W. M. Hoffmann, R. Poprawe, and F. Sari, "3 Laser transmission joining in microtechnology," *Microsystem Technologies*, vol. 12, no. 7, pp. 632–639, 2006, doi: 10.1007/s00542-006-0096-0."073168449901801005".

[41] E. Haberstroh and R. Lützeler, "INFLUENCE OF CARBON BLACK PIGMENTATION ON THE LASER BEAM WELDING OF PLASTICS MICRO PARTS."

[42] K. A. Hubeatir, "Laser transmission welding of PMMA using IR semiconductor laser complemented by the Taguchi method and grey relational analysis," in *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, 2020, pp. 466–473. doi: 10.1016/j.matpr.2019.09.167.

[43] https://www.xrite.com/pt-pt/blog/tolerancing-part-3.

[44] https://www.passeidireto.com/arquivo/111859297/aula-2-principios-das-tecnicas-analiticas-fotometria-espectrometria-eletroforese.

[45] https://pt.wikipedia.org/wiki/Acrílico

Anexos

PLEXIGLAS®

Product Information

PLEXIGLAS® 8N

Product Profile:

PLEXIGLAS® 8N is an amorphous thermoplastic molding compound (PMMA).

Typical properties of PLEXIGLAS® molding compounds are:
- good flow
- high mechanical strength, surface hardness and abrasion resistance
- high light transmission
- very good weather resistance
- free colorability due to crystal clarity

Special properties of PLEXIGLAS® 8N are:
- optimum mechanical properties
- maximum heat deflection temperature
- good flow / melt viscosity
- AMECA listing.

Application:

Used for injection molding optical and technical items.

Examples:

optical waveguides, luminaire covers, automotive lighting, instrument cluster covers, optical lenses, displays, etc.

Processing:

PLEXIGLAS® 8N can be processed on injection molding machines with 3-zone general purpose screws for engineering thermoplastics.

Physical Form / Packaging:

PLEXIGLAS® molding compounds are supplied as pellets of uniform size, packaged in 25kg polyethylene bags or in 500kg boxes with PE lining; other packaging on request.

For more information:

For more information, e.g. Charts or lists of resistance are in the database CAMPUS ® (http://www.campusplastics.com) free of charge.

Properties:

	Parameter	Unit	Standard	PLEXIGLAS® 8N
Mechanical Properties				
Tensile Modulus	1 mm/min	MPa	ISO 527	3300
Stress @ Break	5 mm/min	MPa	ISO 527	77
Strain @ Break	5 mm/min	%	ISO 527	5.5
Charpy Impact Strength	23°C	kJ/m²	ISO 179/1eU	20
Thermal Properties				
Vicat Softening Temperature	B / 50	°C	ISO 306	108
Glass Transition Temperature		°C	ISO 11357	117
Temp. of Deflection under Load	0.45 MPa	°C	ISO 75	103
Temp. of Deflection under Load	1.8 MPa	°C	ISO 75	98
Coeff. of Linear Therm. Expansion	0 – 50°C	E-5 /°K	ISO 11359	8
Fire Rating			DIN 4102	B2
Flammability UL 94	1.6 mm	Class	IEC 707	HB
Rheological Properties				
Melt Volume Rate, MVR	230°C / 3.8kg	cm³/10min	ISO 1133	3
Optical Properties	d=3 mm			
Luminous transmittance	D65	%	ISO 13468-2	92
Haze			ASTM D1003	< 0.5
Refractive Index			ISO 489	1.49
Other Properties				
Density		g/cm³	ISO 1183	1.19
Recommended Processing Conditions				
Predrying Temperature		°C		max. 98
Predrying Time in Desiccant-Type Drier		h		2 – 3
Melt Temperature		°C		220 – 260
Mold Temperature (Injection Molding)		°C		60 – 90

All listed technical data are typical values intended for your guidance. They are given without obligation and do not constitute a materials specification.

CYCOLOY™ RESIN C1200HF

REGION EUROPE

DESCRIPTION

PC+ABS, excellent flow/impact/high heat resistance. Low temperature ductility.

TYPICAL PROPERTY VALUES

Revision 20190814

PROPERTIES	TYPICAL VALUES	UNITS	TEST METHODS
MECHANICAL			
Taber Abrasion, CS-17, 1 kg	63	mg/1000cy	SABIC method
Tensile Stress, yield, 5 mm/min	55	MPa	ISO 527
Tensile Stress, break, 5 mm/min	45	MPa	ISO 527
Tensile Stress, yield, 50 mm/min	55	MPa	ISO 527
Tensile Stress, break, 50 mm/min	45	MPa	ISO 527
Tensile Strain, yield, 5 mm/min	5	%	ISO 527
Tensile Strain, break, 5 mm/min	100	%	ISO 527
Tensile Strain, yield, 50 mm/min	4	%	ISO 527
Tensile Strain, break, 50 mm/min	>50	%	ISO 527
Tensile Modulus, 1 mm/min	2400	MPa	ISO 527
Flexural Stress, yield, 2 mm/min	80	MPa	ISO 178
Flexural Modulus, 2 mm/min	2300	MPa	ISO 178
Ball Indentation Hardness, H358/30	96	MPa	ISO 2039-1
Hardness, Rockwell R	115	-	ISO 2039-2
IMPACT			
Izod Impact, unnotched 80*10*3 +23°C	NB	kJ/m²	ISO 180/1U
Izod Impact, unnotched 80*10*3 -30°C	NB	kJ/m²	ISO 180/1U
Izod Impact, notched 80*10*3 +23°C	50	kJ/m²	ISO 180/1A
Izod Impact, notched 80*10*3 -30°C	30	kJ/m²	ISO 180/1A
Izod Impact, unnotched 80*10*4 +23°C	NB	kJ/m²	ISO 180/1U
Izod Impact, unnotched 80*10*4 -30°C	NB	kJ/m²	ISO 180/1U
Izod Impact, notched 80*10*4 +23°C	40	kJ/m²	ISO 180/1A
Izod Impact, notched 80*10*4 -30°C	20	kJ/m²	ISO 180/1A
Charpy 23°C, V-notch Edgew 80*10*3 sp=62mm	50	kJ/m²	ISO 179/1eA
Charpy -30°C, V-notch Edgew 80*10*3 sp=62mm	30	kJ/m²	ISO 179/1eA
Charpy 23°C, Unnotch Edgew 80*10*3 sp=62mm	NB	kJ/m²	ISO 179/1eU
Charpy -30°C, Unnotch Edgew 80*10*3 sp=62mm	NB	kJ/m²	ISO 179/1eU
Charpy 23°C, V-notch Edgew 80*10*4 sp=62mm	45	kJ/m²	ISO 179/1eA
Charpy -30°C, V-notch Edgew 80*10*4 sp=62mm	18	kJ/m²	ISO 179/1eA
Charpy 23°C, Unnotch Edgew 80*10*4 sp=62mm	NB	kJ/m²	ISO 179/1eU
Charpy -30°C, Unnotch Edgew 80*10*4 sp=62mm	NB	kJ/m²	ISO 179/1eU
THERMAL			
Thermal Conductivity	0.2	W/m·°C	ISO 8302
CTE, -40°C to 40°C, flow	8.E-05	1/°C	ISO 11359-2
CTE, -40°C to 40°C, xflow	8.E-05	1/°C	ISO 11359-2

© 2023 Copyright by SABIC. All rights reserved

CHEMISTRY THAT MATTERS™

PROPERTIES	TYPICAL VALUES	UNITS	TEST METHODS
Ball Pressure Test, 125°C +/- 2°C	PASSES	-	IEC 60695-10-2
Vicat Softening Temp, Rate B/50	130	°C	ISO 306
Vicat Softening Temp, Rate B/120	134	°C	ISO 306
HDT/Be, 0.45MPa Edgew 120*10*4 sp=100mm	128	°C	ISO 75/Be
HDT/Ae, 1.8 MPa Edgew 120*10*4 sp=100mm	108	°C	ISO 75/Ae
Relative Temp Index, Elec	105	°C	UL 746B
Relative Temp Index, Mech w/impact	80	°C	UL 746B
Relative Temp Index, Mech w/o impact	105	°C	UL 746B
PHYSICAL			
Mold Shrinkage on Tensile Bar, flow	0.5 – 0.7	%	SABIC method
Density	1.15	g/cm³	ISO 1183
Water Absorption, (23°C/saturated)	0.6	%	ISO 62-1
Moisture Absorption (23°C / 50% RH)	0.2	%	ISO 62
Melt Volume Rate, MVR at 260°C/2.16 kg	8	cm³/10 min	ISO 1133
Melt Volume Rate, MVR at 260°C/5.0 kg	22	cm³/10 min	ISO 1133
ELECTRICAL			
Comparative Tracking Index (UL) (PLC)	2	PLC Code	UL 746A
Volume Resistivity	>1.E+15	Ω.cm	IEC 60093
Surface Resistivity, ROA	>1.E+15	Ω	IEC 60093
Dielectric Strength, in oil, 0.8 mm	35	kV/mm	IEC 60243-1
Dielectric Strength, in oil, 1.6 mm	25	kV/mm	IEC 60243-1
Dielectric Strength, in oil, 3.2 mm	17	kV/mm	IEC 60243-1
Relative Permittivity, 1 MHz	2.7	-	IEC 60250
Dissipation Factor, 50/60 Hz	0.002	-	IEC 60250
Dissipation Factor, 1 MHz	0.007	-	IEC 60250
Comparative Tracking Index	250	V	IEC 60112
Relative Permittivity, 50/60 Hz	2.8	-	IEC 60250
FLAME CHARACTERISTICS			
UL Yellow Card Link	E45329-236710	-	-
UL Recognized, 94HB Flame Class Rating	1.2	mm	UL 94
UL Recognized, 94HB Flame Class Rating 2nd value	3	mm	UL 94
Glow Wire Flammability Index 650°C, passes at	1	mm	IEC 60695-2-12
Oxygen Index (LOI)	23	%	ISO 4589
INJECTION MOLDING			
Drying Temperature	100 – 110	°C	
Drying Time	3 – 4	Hrs	
Drying Time (Cumulative)	8	Hrs	
Maximum Moisture Content	0.02	%	
Melt Temperature	275 – 300	°C	
Nozzle Temperature	275 – 300	°C	
Front - Zone 3 Temperature	260 – 300	°C	
Middle - Zone 2 Temperature	255 – 295	°C	
Rear - Zone 1 Temperature	250 – 290	°C	
Hopper Temperature	60 – 80	°C	
Mold Temperature	60 – 90	°C	

© 2023 Copyright by SABIC. All rights reserved

CHEMISTRY THAT MATTERS™

PROPERTIES	TYPICAL VALUES	UNITS	TEST METHODS
Back Pressure	0.3 – 0.7	MPa	
Screw Speed	40 – 70	rpm	
Shot to Cylinder Size	30 – 80	%	
Vent Depth	0.038 – 0.076	mm	

DISCLAIMER
Any sale by SABIC, its subsidiaries and affiliates (each a "seller"), is made exclusively under seller's standard conditions of sale (available upon request) unless agreed otherwise in writing and signed on behalf of the seller. While the information contained herein is given in good faith, SELLER MAKES NO WARRANTY, EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING MERCHANTABILITY AND NONINFRINGEMENT OF INTELLECTUAL PROPERTY, NOR ASSUMES ANY LIABILITY, DIRECT OR INDIRECT, WITH RESPECT TO THE PERFORMANCE, SUITABILITY OR FITNESS FOR INTENDED USE OR PURPOSE OF THESE PRODUCTS IN ANY APPLICATION. Each customer must determine the suitability of seller materials for the customer's particular use through appropriate testing and analysis. No statement by seller concerning a possible use of any product, service or design is intended, or should be construed, to grant any license under any patent or other intellectual property right.

Anexo 3 – Provetes de PMMA e Misturas com Pigmentos e Corantes

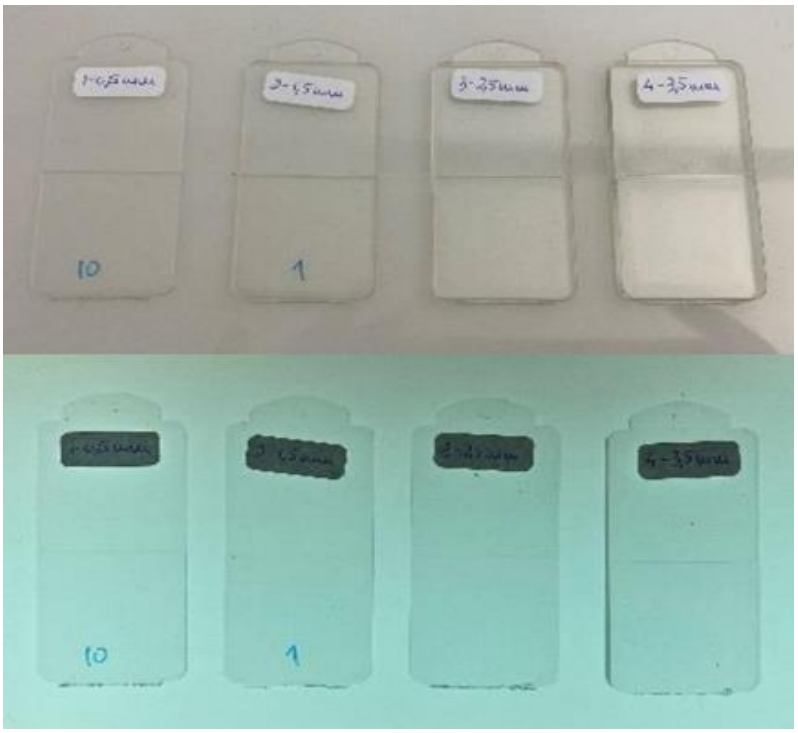


Figura 162 - Em cima, provetes em PMMA, transparentes.
Em baixo, provetes em PMMA, transparentes com luz.

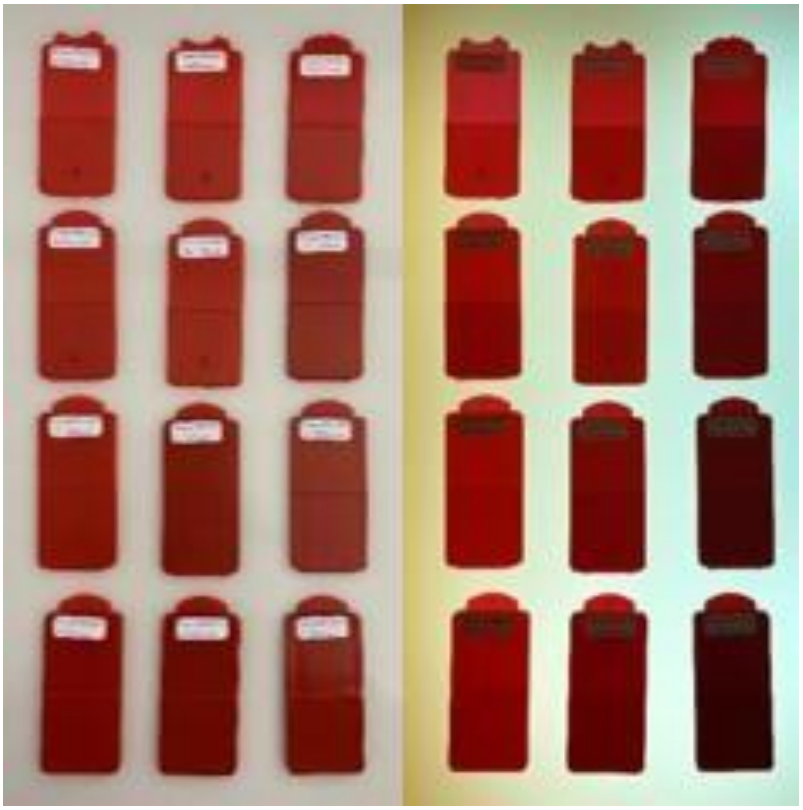


Figura 163 - Provetes em PMMA com 0.5%,1% e 2% de Pigmento Vermelho 144, (à direita com luz).

Figura 164 - Provetes em PMMA com 0.5%,1% e 2% de Pigmento Azul 15:1, (à direita com luz).

Figura 165 - Provetes em PMMA com 0.5%,1% e 2% de Pigmento Verde 7, (à direita com luz).

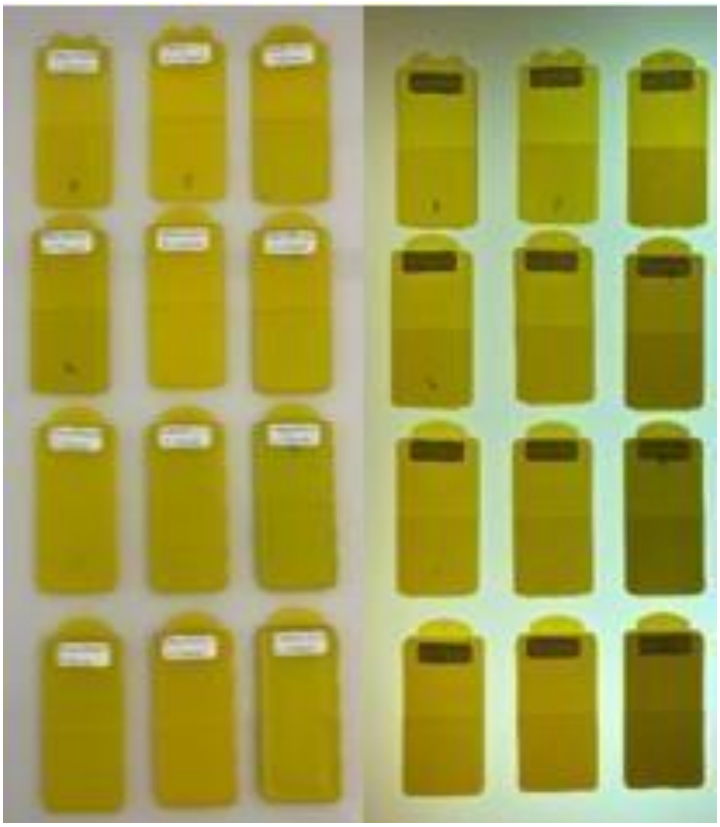


Figura 166 - Provetes em PMMA com 0.5%,1% e 2% de Pigmento Amarelo 191, (à direita com luz).

Figura 167 - Provetes em PMMA com 0.5%,1% e 2% de Pigmento Azul 29, (à direita com luz).

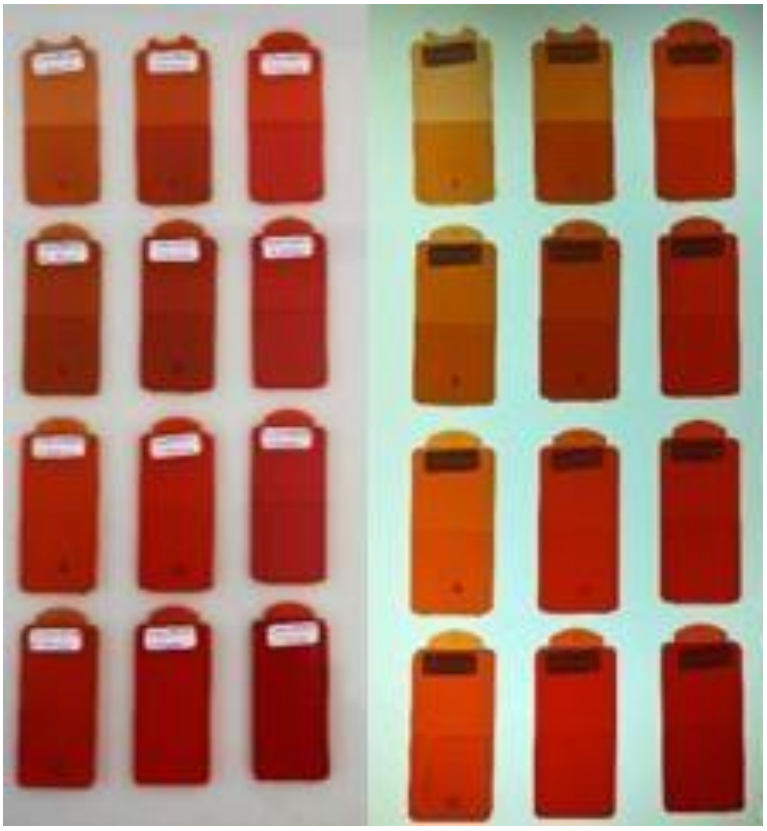


Figura 168 - Provetes em PMMA com 0.5%,1% e 2% de Solvente Vermelho 135, (à direita com luz).

Figura 169 - Provetes em PMMA com 0.5%,1% e 2% de Solvente Amarelo 114, (à direita com luz).

Figura 170 - Provetes em PMMA com 0.5%,1% e 2% de Solvente Azul 104, (à direita com luz).

Figura 171 - Provetes em PMMA com 0.5%,1% e 2% de Solvente Verde 28, (à direita com luz).

Figura 172 - Provetes em PMMA com 0.5%,1% e 2% de Pigmento Inorgânico Óxido de Ferro, (à direita com luz).

Figura 173 - Provetes em PMMA com 0.5%,1% e 2% de Pigmento Inorgânico Dióxido de Titânio, (à direita com luz).

Figura 174 - Provetes em PMMA com 0.5%,1% e 2% de Pigmento Inorgânico Negro de Fumo, (à direita com luz).

Figura 175 - Provetes em PMMA com 0.5%,1% e 2% de Pigmento Metálico Alumínio, (à direita com luz).

Figura 176 - Provetes em PMMA com 0.5%,1% e 2% de Pigmento Metálico Bronze, (à direita com luz).

Anexo 4 – Condições Operatórias Moldação por Injeção

Tabela 54 - Condições operatórias usadas para a injeção do PMMA com a placa de menor espessura

Temperaturas do fuso	255/250/245/240/235 °C
Força de fecho	210kN
Velocidade de injeção	120 mm/s
Pressão de injeção	120 bar
2ª pressão	30 bar
Tempo 2ª pressão	7 segundos
Contra Pressão	5 bar
Dosagem	38 mm
Tempo de arrefecimento	25 segundos
Tempo total de ciclo	52.92 segundos
Temperatura do termorregulador a água	80°C
Temperatura da estufa	90°C
Tempo dentro da estufa	2-3 horas

Tabela 55 - Condições operatórias usadas para a injeção do PMMA com a placa de maior espessura

Temperaturas do fuso	255/250/245/240/235 °C
Força de fecho	210kN
Velocidade de injeção	120 mm/s
Pressão de injeção	120 bar
2ª pressão	30 bar
Tempo 2ª pressão	7 segundos
Contra Pressão	5 bar
Dosagem	76 mm
Tempo de arrefecimento	25 segundos
Tempo total de ciclo	53.48 segundos
Temperatura do termorregulador a água	80°C
Temperatura da estufa	90°C
Tempo dentro da estufa	2-3 horas

Designation: D 1003 – 00

Standard Test Method for Haze and Luminous Transmittance of Transparent Plastics[1]

This standard is issued under the fixed designation D 1003; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ε) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This test method has been approved for use by agencies of the Department of Defense to replace Method 3022 of Federal Test Method Standard 406.

1. Scope

1.1 This test method covers the evaluation of specific light-transmitting and wide-angle-light-scattering properties of planar sections of materials such as essentially transparent plastic. Two procedures are provided for the measurement of luminous transmittance and haze. Procedure A uses a hazemeter as described in Section 5 and Procedure B uses a spectrophotometer as described in Section 8. Material having a haze value greater than 30 % is considered diffusing and should be tested in accordance with Practice E 167.

1.2 The values stated in SI units are to be regarded as the standard.

NOTE 1—For greater discrimination among materials that scatter a high percent of light within a narrow forward angle, such as is the case with abraded transparent plastics, adjust the hazemeter and perform measurements in accordance with Test Method D 1044.

1.3 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

NOTE 2—This test method is not equivalent to ISO 13468–1 and ISO/DIS 14782.

2. Referenced Documents

2.1 *ASTM Standards:*

D 618 Practice for Conditioning Plastics and Electrical Insulating Materials for Testing[2]

D 883 Terminology Relating to Plastics[2]

D 1044 Test Method for Resistance of Transparent Plastics to Surface Abrasion[2]

D 1898 Practice for Sampling of Plastics[2]

E 167 Practice for Goniophotometry of Objects and Materials[3]

E 259 Practice for Preparation of Reference White Reflectance Standards[3]

E 284 Terminology of Appearance[3]

E 691 Practice for Conducting an Interlaboratory Test Program to Determine the Precision of a Test Method[4]

2.2 *ISO Standards:*[5]

ISO 13468–1 Plastics—Determination of the Total Luminous Transmittance of Transparent Materials

ISO/DIS 14782 Plastics—Determination of Haze of Transparent Materials

3. Terminology

3.1 *Definitions*—Terms applicable to this test method are defined in Terminologies D 883 and E 284.

3.2 *Definitions of Terms Specific to This Standard:*

3.2.1 *haze, n*—in transmission, the scattering of light by a specimen responsible for the reduction in contrast of objects viewed through it. The percent of transmitted light that is scattered so that its direction deviates more than a specified angle from the direction of the incident beam.

3.2.1.1 *Discussion*—In this test method, the specified angle is 0.044 rad (2.5°).

3.2.2 *luminous, adj*—weighted according to the spectral luminous efficiency function V() of the CIE (1987).

3.2.3 *luminous transmittance, n*—the ratio of the luminous flux transmitted by a body to the flux incident upon it.

4. Significance and Use

4.1 Light that is scattered upon passing through a film or sheet of a material can produce a hazy or smoky field when objects are viewed through the material. Another effect can be veiling glare, as occurs in an automobile windshield when driving into the sun.

4.2 Although haze measurements are made most commonly by the use of a hazemeter, a spectrophotometer may be used, provided that it meets the geometric and spectral requirements of Section 5. The use of a spectrophotometer for haze measurement of plastics can provide valuable diagnostic data on

[1] This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D20 on Plastics and is the direct responsibility of Subcommittee D20.40 on Optical Properties.

Current edition approved June 10, 2000. Published July 2000. Originally published as D 1003 – 49 T. Last previous edition D 1003 – 97[ε1].

[2] *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 08.01.

[3] *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 06.01.

[4] *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 14.02.

[5] Available from American National Standards Institute, 11 W. 42nd St., 13th Floor, New York, NY 10036.

Copyright © ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.

the origin of the haze,[6] and Procedure B is devoted to the use of a spectrophotometer.

4.2.1 Procedure A (hazemeter) test values are normally slightly higher and less variable than Procedure B (spectrophotometer) test values.

4.3 Regular luminous transmittance is obtained by placing a clear specimen at some distance from the entrance port of the integrating sphere. However, when the specimen is hazy, the total hemispherical luminous transmittance must be measured by placing the specimen at the entrance port of the sphere. The measured total hemispherical luminous transmittance will be greater than the regular luminous transmittance, depending on the optical properties of the sample. With this test method, the specimen is necessarily placed at the entrance port of the sphere in order to measure haze and total hemispherical luminous transmittance.

4.4 Haze data representative of the material may be obtained by avoiding heterogeneous surface or internal defects not characteristic of the material.

4.5 Haze and luminous-transmittance data are especially useful for quality control and specification purposes.

4.6 Before proceeding with this test method, reference should be made to the specification of the material being tested. Any test specimen preparation, conditioning, dimensions, or testing parameters, or combination thereof, covered in the materials specification shall take precedence over those mentioned in this test method. If there are no material specifications, then the default conditions apply.

5. Test Specimens

5.1 Sample the material in accordance with Practice D 1898. Obtain specimens that are free of defects not characteristic of the material unless such defects constitute variables under study.

5.2 Cut each test specimen to a size large enough to cover the entrance port of the sphere. A disk 50 mm (2 in.) in diameter, or a square with sides of the same dimensions, is suggested. The specimen shall have substantially plane-parallel surfaces free of dust, grease, scratches, and blemishes, and it shall be free of visibly distinct internal voids and particles, unless it is specifically desired to measure the contribution to haze due to these imperfections.

5.3 Prepare three specimens to test each sample of a given material unless specified otherwise in the applicable material specification.

6. Conditioning

6.1 *Conditioning*—Unless otherwise required in the appropriate materials specification or agreed between customer/supplier, condition the test specimens at 23 ± 2°C (73.4 ± 3.6°F) and 50 ± 5 % relative humidity for not less than 40 h prior to test, in accordance with Procedure A of Practice D 618. In case of disagreements, the tolerances shall be ±1°C (1.8°F) and ±2 % relative humidity.

6.2 *Test Conditions*—Set up the test apparatus in an atmosphere maintained at 23 ± 2°C (73.4 ± 3.6°F) and 50 ± 5 % relative humidity.

7. Procedure A—Hazemeter

7.1 *Apparatus*:

7.1.1 The instrument used for measurement shall meet the geometric and spectral requirements of this section.[7]

7.1.2 A light source and a photodetector shall be supplied, and the combination shall be filtered to provide an output corresponding to the luminosity response of the 1931 CIE Standard Colorimetric Observer with CIE Standard Illuminant C or, alternatively, Illuminant A. The output shall be proportional to within 1 % to the incident flux over the range of flux used. The photometric stability for source and detector must be constant throughout the test of each specimen.

7.1.3 Use an integrating sphere to collect transmitted flux; the sphere may be of any diameter as long as the total port areas do not exceed 4.0 % of the internal reflecting area of the sphere. The entrance and exit ports shall be centered on the same great circle of the sphere, and there shall be at least 2.97 rad (170°) of arc between centers. The exit port shall subtend an angle of 0.14 rad (8°) at the center of the entrance port. With the light trap in position, without the specimen, the axis of the irradiating beam shall pass through the centers of the entrance and exit ports. For a hazemeter, position the photocell or photocells on the sphere 1.57 ± 0.17 rad (90 ± 10°) from the entrance port and baffle it from direct exposure to the entrance port. In the pivotable modification where the interior wall adjacent to the exit port is used as the reflectance reference, the angle of rotation of the sphere shall be 0.140 ± 0.008 rad (8.0 ± 0.5°).

7.1.4 Illuminate the specimen by a substantially unidirectional beam; the maximum angle that any ray of this beam may make with the beam axis shall not exceed 0.05 rad (3°). This beam shall not be vignetted at either port of the sphere.

7.1.5 When the specimen is placed against the entrance port of the integrating sphere, the angle between the perpendicular to the specimen and a line connecting the centers of entrance and exit ports shall not exceed 0.14 rad (8°).

7.1.6 When the beam is unobstructed by a specimen, its cross section at the exit port shall be approximately circular, sharply defined, and concentric within the exit port, leaving an annulus of 0.023 ± 0.002 rad (1.3 ± 0.1°) subtended at the entrance port.

NOTE 3—It is important to verify whether the unobstructed beam diameter and centering at the exit port are maintained, especially if the source aperture and focus are changed.

NOTE 4—The tolerance stated on the annulus of 0.002 rad (0.1°) corresponds to an uncertainty of ±0.6 % in a haze reading.[8] This is relevant for assessing the precision and bias of this test method.

[6] Billmeyer, F. W., Jr., and Chen, Y., "On the Measurement of Haze," *Color Research and Application*, Vol 10, 1985, pp. 219–224.

[7] Hazemeters made by BYK-Gardner, Inc., 2435 Linden Lane, Silver Spring, MD 20910, meet these requirements. Other manufacturers of this equipment, which meet the requirements, may exist but have not been identified.

[8] Weidner, V. R., and Hsia, J. J., "NBS Reference Hazemeter: Its Development and Testing," *Applied Optics*, Vol 18, 1979, pp. 1619–1626.

7.1.7 The surfaces of the interior of the integrating sphere, baffles, and reflectance standard, if used, shall be of equal reflectance, matte, and highly reflecting throughout the visible spectrum.[9]

7.1.8 A light trap shall be provided that will absorb the beam completely when no specimen is present, or the instrument design shall obviate the need for a light trap.

7.1.9 A schematic drawing of the optics of a hazemeter with unidirectional illumination and diffuse viewing is shown in Fig. 1.

7.1.10 A series of calibrated haze standards is required for periodic verification of the accuracy of instrumental response. Ideally, if the haze of narrow-angle-scattering specimens (such as plastic films) is to be measured, narrow-angle-scattering glass standards should be used;[7,8] however, these are not known to be commercially available. In their absence, wide-angle-plastic standards[10] may be used, but these are less sensitive to the size and centering of the annulus described by Billmeyer and Chen[6] and Weidner and Hsia,[9] and particular attention should be paid to Note 1 when only plastic haze standards are used.

7.2 *Procedure*:

7.2.1 Determine the following four readings:

Reading Designation	Specimen in Position	Light Trap in Position	Reflectance Standard in Position	Quantity Represented
T_1	no	no	yes	incident light
T_2	yes	no	yes	total light transmitted by specimen
T_3	no	yes	no	light scattered by instrument
T_4	yes	yes	no	light scattered by instrument and specimen

7.2.2 Repeat readings for T_1, T_2, T_3, and T_4 with additional specified positions of the specimen to determine uniformity.

7.3 *Calculation*[11]:

7.3.1 Calculate total transmittance, T_t (Note 5), equal to T_2/T_1.

7.3.2 Calculate diffuse transmittance, T_d (Note 5), as follows:

$$T_d = [T_4 - T_3(T_2/T_1)]/T_1 \quad (1)$$

7.3.3 Calculate percent haze as follows:

$$\text{haze} = T_d/T_t \times 100 \quad (2)$$

NOTE 5—To obtain the greatest accuracy in luminous transmittance measurement when using a single beam instrument, it is necessary to use a standard, calibrated with a double beam instrument, because insertion of the sample in the single beam instrument changes the efficiency of the sphere. This change may result in spuriously high readings for clear, colorless samples and significant errors for dark or highly saturated colors. In these cases, the photometer should be used as a comparison instrument with a standard of known transmittance similar to that of the specimen. For greatest accuracy of luminous transmittance measurement, compare the transmittance of the specimen with that of a calibrated standard of similar luminous transmittance.

7.4 *Report*:

7.4.1 Report the following data:

7.4.1.1 Source and identity of specimen,

7.4.1.2 Nominal thickness of specimen to the nearest 0.025 mm,

7.4.1.3 Total luminous transmittance, T_t, to the nearest 0.1 % (indicate the average when reporting average values and specify whether CIE Illuminant C or A is used),

7.4.1.4 Diffuse luminous transmittance, T_d, to the nearest 0.1 % (indicate the average when reporting average values), and

7.4.1.5 Percent haze, to the nearest 0.1 % (indicate the average when reporting average values).

7.5 *Precision and Bias—Hazemeter*:

7.5.1 *Precision*:

7.5.1.1 Table 1 and Table 2 are based on a round robin conducted in 1985, in accordance with Practice E 691, involving six film materials tested by 11 laboratories. In the round robin, each laboratory that measured a property made eight replicate measurements of the property for each of the six materials listed as 1 to 6 in Table 1 and Table 2.

7.5.1.2 Table 3 is based on a round robin conducted in 1991 involving eight materials and six laboratories. This table can be directly compared to Table 4 (Spectrophotometer).

NOTE 6—**Caution:** The following explanations of r and R (7.5.1.3–7.5.1.7) are intended to present only a meaningful way of considering the approximate precision of this test method. The data in Tables 1–3 should not be applied rigorously to acceptance or rejection of material, as those data are specific to the round robin and may not be representative of other

[9] Highly reflective matte barium sulfate paint or pressed polytetrafluoroethylene powder are excellent for this purpose. See Practice E 259.

[10] Calibrated plastic haze standards are available from BYK-Gardner, Inc., 2435 Linden Lane, Silver Spring, MD 20910.

[11] See Appendix X1 for derivation of formulas.

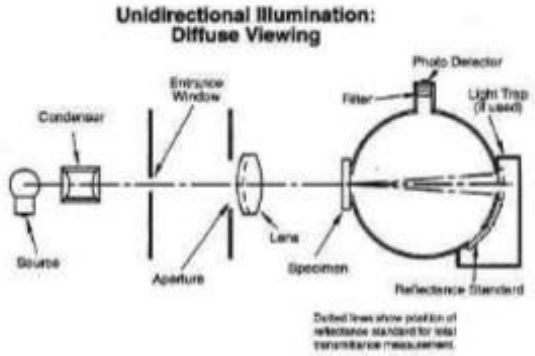


FIG. 1 Schematic of Hazemeter

TABLE 1 Summary of 1985 Procedure A (Hazemeter) Total Haze Round Robin Involving Eleven Laboratories

Material	Average	S(r)	S(R)	r	R
3	3.8	0.10	0.33	0.28	0.94
1	8.7	0.18	0.42	0.50	1.18
2	13.5	0.08	0.40	0.23	1.12
4	18.0	0.27	0.61	0.76	1.72
5	21.0	0.41	1.68	1.16	4.74
6	26.5	0.35	1.13	0.98	3.19

TABLE 2 Summary of 1985 Procedure A (Hazemeter) Luminous Transmittance Round Robin Involving Eleven Laboratories

Material	Average	S(r)	S(R)	r	R
2	83.6	0.25	1.21	0.69	3.42
4	84.8	0.15	1.06	0.42	3.02
1	86.4	0.08	1.08	0.22	3.06
3	87.5	0.20	1.07	0.57	3.02
6	88.5	0.14	2.10	0.38	5.93
5	88.6	0.35	2.23	0.99	6.32

TABLE 3 Summary of 1991 Procedure A (Hazemeter) Total Haze Round Robin Involving Six Laboratories

Material	Average	S(r)	S(R)	r	R
LDPE					
A	0.58	0.031	0.133	0.086	0.372
B	1.89	0.029	0.216	0.080	0.604
C	2.08	0.021	0.200	0.058	0.568
PET					
D	2.69	0.042	0.313	0.117	0.075
E	5.74	0.031	0.395	0.086	1.106
F	8.06	0.049	0.566	0.137	1.584
G	12.68	0.050	0.490	0.140	1.372
H	28.57	0.091	1.042	0.256	2.9918

TABLE 4 Summary of 1991 Procedure B (Spectrophotometer) Total Haze Round Robin Involving Seven Laboratories

Material	Average	$S(r)^A$	$S(R)^B$	r^C	R^D
LDPE					
A	0.55	0.076	0.186	0.213	0.522
B	1.77	0.087	0.658	0.244	1.019
C	1.01	0.042	0.397	0.175	1.112
PET					
D	2.51	0.115	0.331	0.323	0.927
E	5.05	0.081	0.596	0.227	1.669
F	6.55	0.189	1.138	0.305	3.186
G	11.35	0.137	1.289	0.385	3.610
H	25.45	0.158	3.020	0.443	8.455

[A] S_r is the within laboratory standard deviation for the indicated material. It is obtained by pooling the within laboratory standard deviations of the test results from all of the participating laboratories:

$$S_r = [(s_1)^2 + (s_2)^2 \ldots + (s_n)^2]/n]^{1/2}$$

[B] S_R is the between laboratories reproducibility, expressed as standard deviation:

$$S_R = [s_L^2 + s_r^2]^{1/2}$$

where: s_L = standard deviation of laboratory means.

[C] r is the within laboratory critical interval between two test results = 2.8 × S_r.

[D] R is the between laboratories critical interval between two test results = 2.8 × S_R.

lots, conditions, materials, or laboratories. Users of this test method should apply the principles outlined in Practice E 691 to generate data specific to their laboratory and materials, or between specific laboratories. The principles of 7.5.1.3–7.5.1.7 would then be valid for such data.

7.5.1.3 For the purpose of compiling summary statistics, a test result has been defined to be the average of three replicate measurements of a property for a material in a laboratory, as specified in this test method. Summary statistics are given in Tables 1-3. In each table, for the material indicated, $S(r)$ is the pooled within-laboratory standard deviation of a test result, $S(R)$ is the between-laboratory standard deviation of a test result, $r = 2.83 \times S(r)$ (see 7.5.1.4), and $R = 2.83 \times S(R)$ (see 7.5.1.5).

7.5.1.4 *Repeatability*—Two test results obtained within one laboratory shall be judged not equivalent if they differ by more than the "r" value for that material. "r" is the interval representing the critical difference between two test results for the same material, obtained by the same operator using the same equipment on the same day in the same laboratory.

7.5.1.5 *Reproducibility*—Two test results obtained by different laboratories shall be judged not equivalent if they differ by more than the "R" value for that material. "R" is the interval representing the critical difference between two test results for the same material, obtained by different operators using different equipment in different laboratories.

7.5.1.6 Judgments made as described in 7.5.1.3 and 7.5.1.4 will be correct in approximately 95 % of such comparisons.

7.5.1.7 For further information, see Practice E 691.

7.5.2 *Bias*—Measurement biases cannot be determined since there are no accepted referee methods for determining these properties.

8. Procedure B (Spectrophotometer)

8.1 *Apparatus*:

8.1.1 The instruments used for measurement shall meet the geometric and spectral requirement of this section.

8.1.2 The instrument shall be capable of computing from the spectral data the 1931 CIE tristimulus values and related color coordinates for CIE standard Illuminant C or alternatively Illuminant A.

8.1.3 The instrument shall utilize a hemispherical optical measuring system, with an integrating sphere, in which the specimen can be placed flush against the sphere port. The surfaces of the interior of the integrating sphere, baffles, and reflectance standards shall be matte, of substantially equal reflectance and highly reflecting throughout the visible wavelengths.

8.1.4 Two geometries can be used: unidirectional illumination with diffuse viewing and diffuse illumination with unidirectional viewing. Using Geometry B the following apply:

8.1.4.1 Use an integrating sphere to illuminate the specimen diffusely; the sphere may be of any diameter as long as the total port areas do not exceed 4.0 % of the internal reflecting area of the sphere. The specimen and light trap ports of the sphere shall be centered on the same great circle of the sphere, and there shall be at least 2.97 rad (170°) of arc between their centers. The light trap port shall subtend an angle of 0.14 rad (8°) at the center of the specimen port along the wowing beam. With the light trap in position, without specimen the axis of the viewing beam shall pass through the centers of the specimen and light trap ports.

8.1.4.2 View the specimen along an axis defined by a substantially unidirectional beam; the maximum angle that any ray of this beam may make with the beam axis shall not exceed 0.05 rad (3°). This beam shall not be vignetted at either port of the sphere.

8.1.4.3 When the specimen is in place, the angle between the specimen normal and the line connecting the centers of the specimen and the light trap ports shall not exceed 0.14 rad (8°).

8.1.4.4 With no specimen in place, the viewed area at the exit port shall be approximately circular, sharply defined concentric within the light trap port, leaving an annulus of 0.023 ± 0.002 rad (1.3 ± 0.01°) subtended at the specimen port.

NOTE 7—Note 3 and Note 4 apply. It should be noted that it may be difficult, but is critical, to meet this requirement.

8.1.5 A light trap shall be provided that will completely absorb the beam when no specimen is present, or the instrument design shall obviate the need for a light trap.

8.1.6 A schematic drawing of a spectrophotometer with unidirectional illumination and diffuse viewing is shown in Fig. 2.

NOTE 8—It is strongly recommended that conformance to the intent of this test method be confirmed through use of properly calibrated haze standards due to the difficulty of confirming conformance to this test method when using a drill spectrophotometer.

8.2 *Procedure*—Follow the manufacturer's instructions for the measurement of haze, and if none available, use Section 8.

8.3 *Calculation*—Most spectrophotometers are computer driven and values for luminous transmission and haze are automatically calculated. If values are not computed use calculation method in Section 9.

8.4 *Report*:

8.4.1 Report the following data:

8.4.1.1 Source and identity of specimen,

8.4.1.2 Nominal thickness of specimen,

8.4.1.3 Percent haze, to the nearest 0.1 % (indicate the average when reporting average values),

8.4.1.4 Total luminous transmittance, T_t, to the nearest 0.1 % (indicate the average when reporting average values and specify whether CIE Illuminant C or A is used) when specifically requested, and

8.4.1.5 Diffuse luminous transmittance, T_d, to the nearest 0.1 % (indicate the average when reporting average values) when specifically requested.

8.5 *Precision and Bias*:

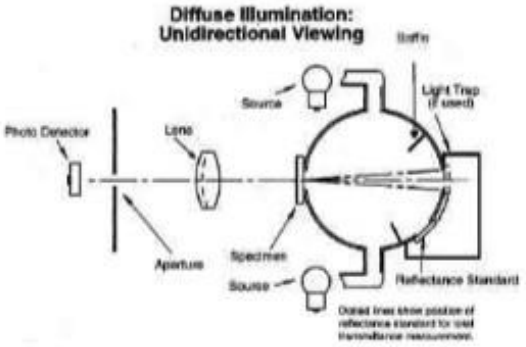


FIG. 2 Spectrophotometer With Diffuse Illumination

8.5.1 *Precision*:

8.5.1.1 Precision data in Table 4 is based on a round robin conducted in 1991 involving eight materials and seven laboratories. For comparison purposes the same materials were measured on six regular hazemeters during the same round robin. The data from the regular hazemeter round robin is included in Table 3.

NOTE 9—**Caution:** The following explanations of r and R (8.5.1.2–8.5.1.6) are intended to present only a meaningful way of considering the approximate precision of this test method. The data in Tables 1-4 should not be applied rigorously to acceptance or rejection of material, as those data are specific to the round robin and may not be representative of other lots, conditions, materials, or laboratories. Users of this test method should apply the principles outlined in Practice E 691 to generate data specific to their laboratory and materials, or between specific laboratories. The principles of 8.5.1.2–8.5.1.6 would then be valid for such data.

8.5.1.2 For the purpose of compiling summary statistics, a test result has been defined to be the average of three replicate measurements of a property for a material in a laboratory, as specified in this test method. Summary statistics are given in Table 4. In each table, for the material indicated, $S(r)$ is the pooled within-laboratory standard deviation of a test result, $S(R)$ is the between-laboratory standard deviation of a test result, $r = 2.83 \times S(r)$ (see 8.5.1.3), and $R = 2.83 \times S(R)$ (see 8.5.1.4).

8.5.1.3 *Repeatability*—In comparing two mean values of the same material, obtained by the same operator using the same equipment on the same day, the means should be judged not equivalent if they differ by more than the r value for that material.

8.5.1.4 *Reproducibility*—In comparing two mean values for the same material obtained by different operators using different equipment on different days, either in the same laboratory or in different laboratories, the means should be judged not equivalent if they differ by more than the R value for that material.

8.5.1.5 Judgments made as described in 8.5.1.3 and 8.5.1.4 will be correct in approximately 95 % of such comparisons.

8.5.1.6 For further information, see Practice E 691.

8.5.2 *Bias*—Measurement biases cannot be determined since there are no accepted referee methods for determining these properties.

9. Referee Procedure

9.1 In case of dispute, Procedure A—Hazemeter will be the referee procedure measured with a standard hazemeter.

10. Keywords

10.1 haze; luminous transmittance; regular transmittance; transparent plastics

Anexo 6 – Gráficos da Influência do comprimento de ondas na transmitância dos provetes com mistura de 1 e 2% e espessuras de 0,5 a 4 mm

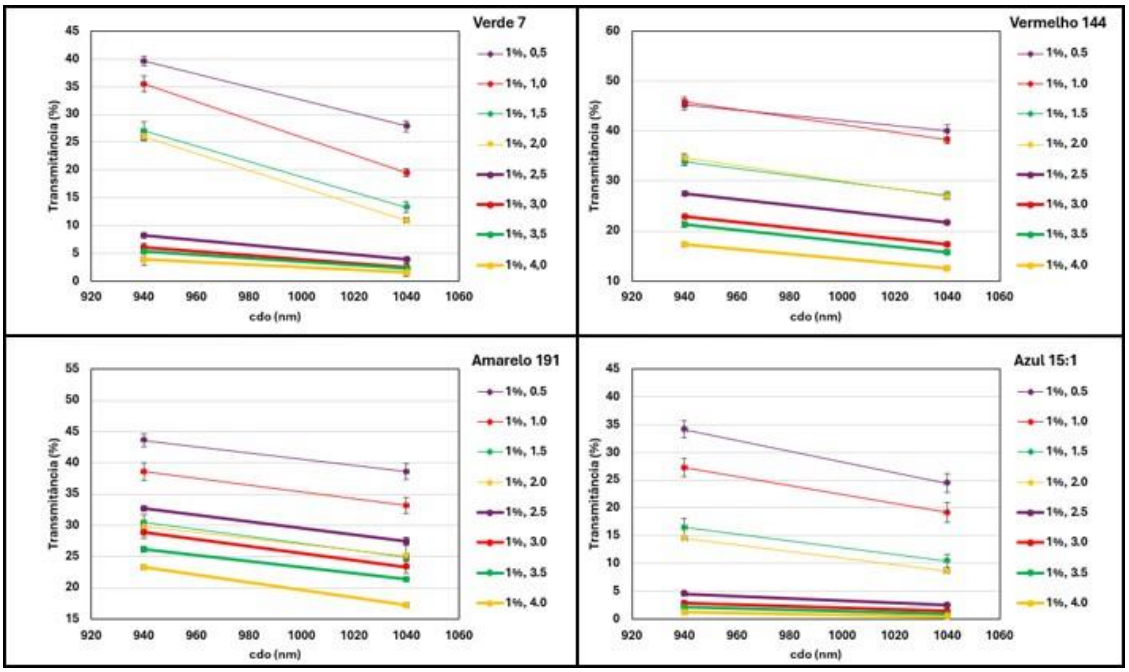


Figura 177 - Transmitância da mistura com 1% de concentração nos Pigmentos Orgânicos em função dos comprimentos de onda de 940 e 1040 nm

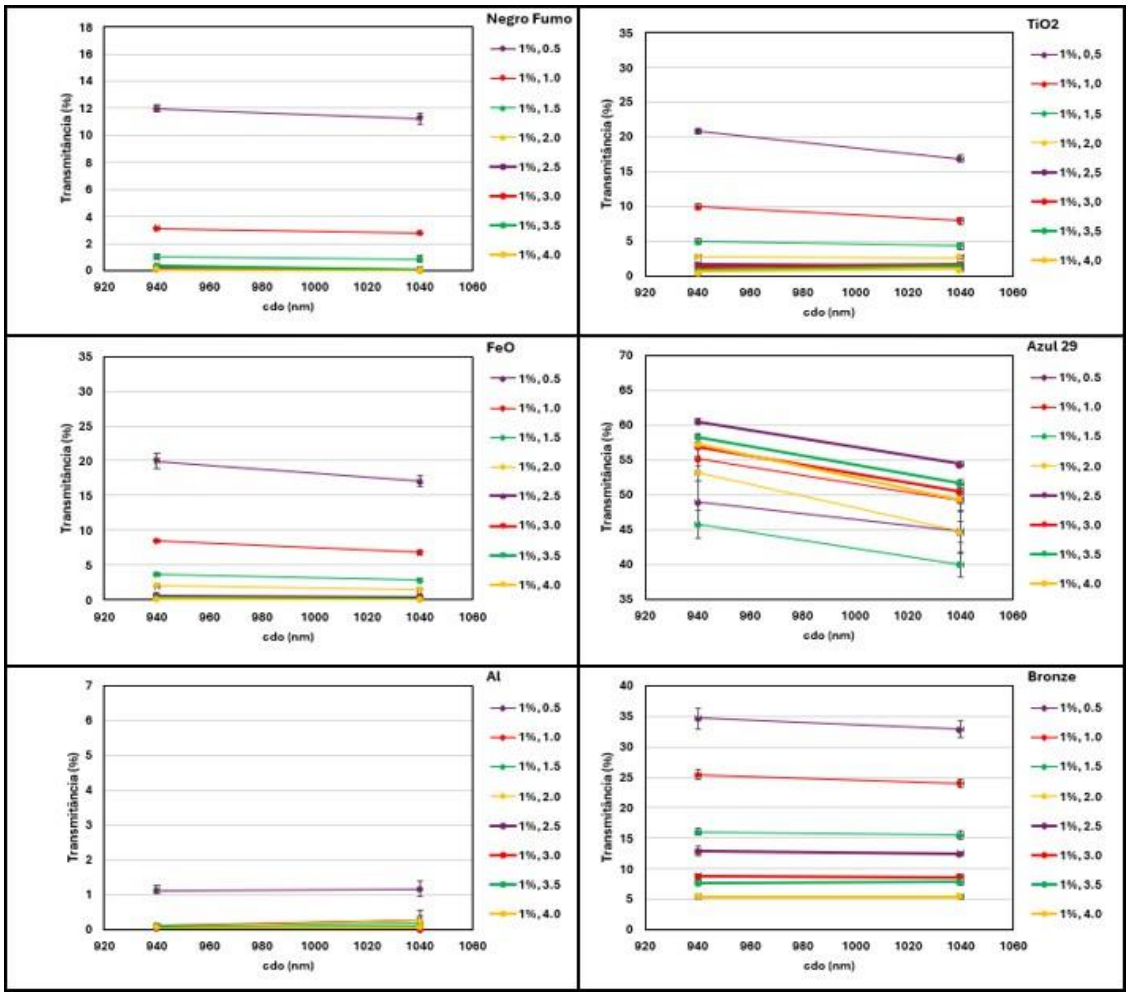


Figura 178 - Transmitância da mistura com 1% de concentração nos Pigmentos Inorgânicos em função dos comprimentos de onda de 940 e 1040 nm

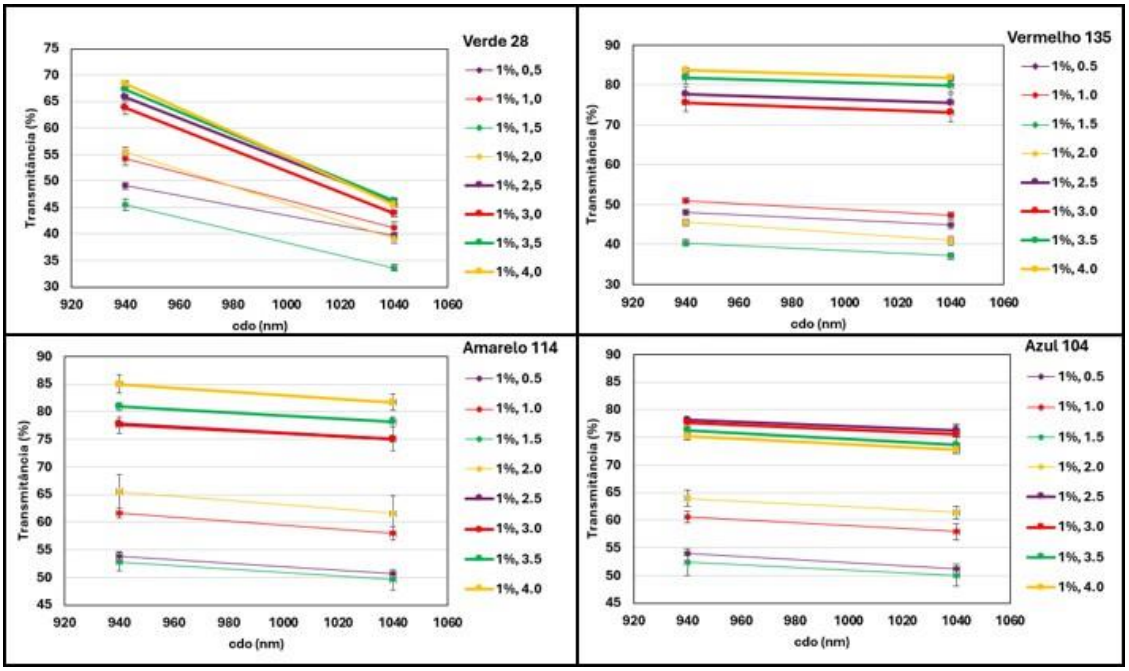


Figura 179 - Transmitância da mistura com 1% de concentração nos Corantes em função dos comprimentos de onda de 940 e 1040 nm

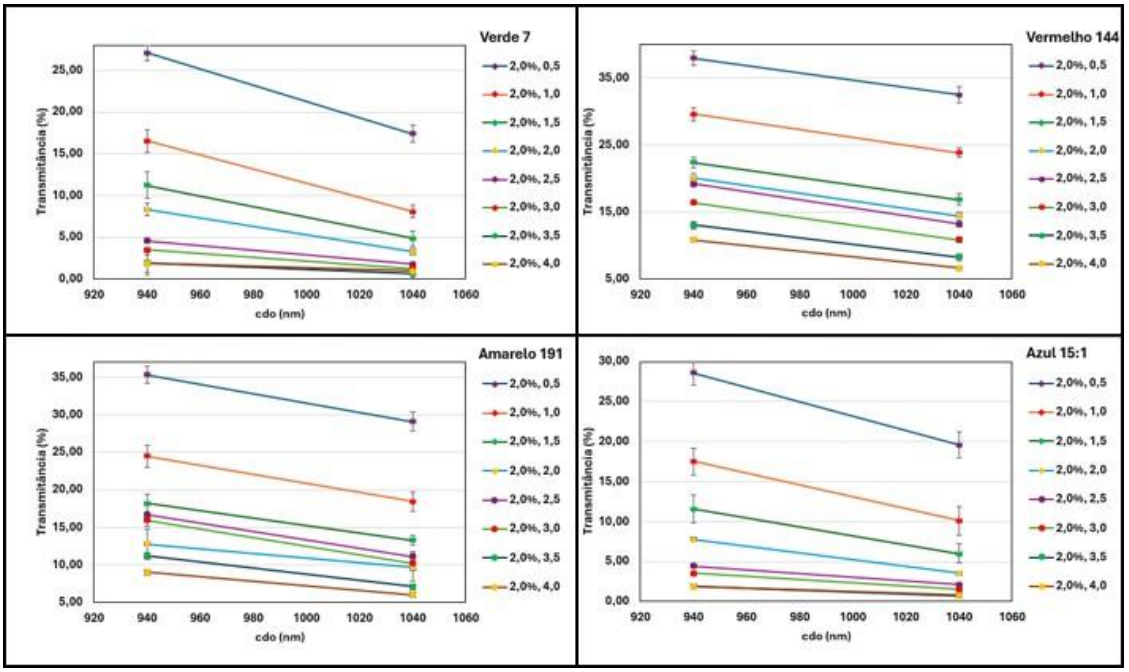


Figura 180 - Transmitância da mistura com 2% de concentração nos Pigmentos Orgânicos em função dos comprimentos de onda de 940 e 1040 nm

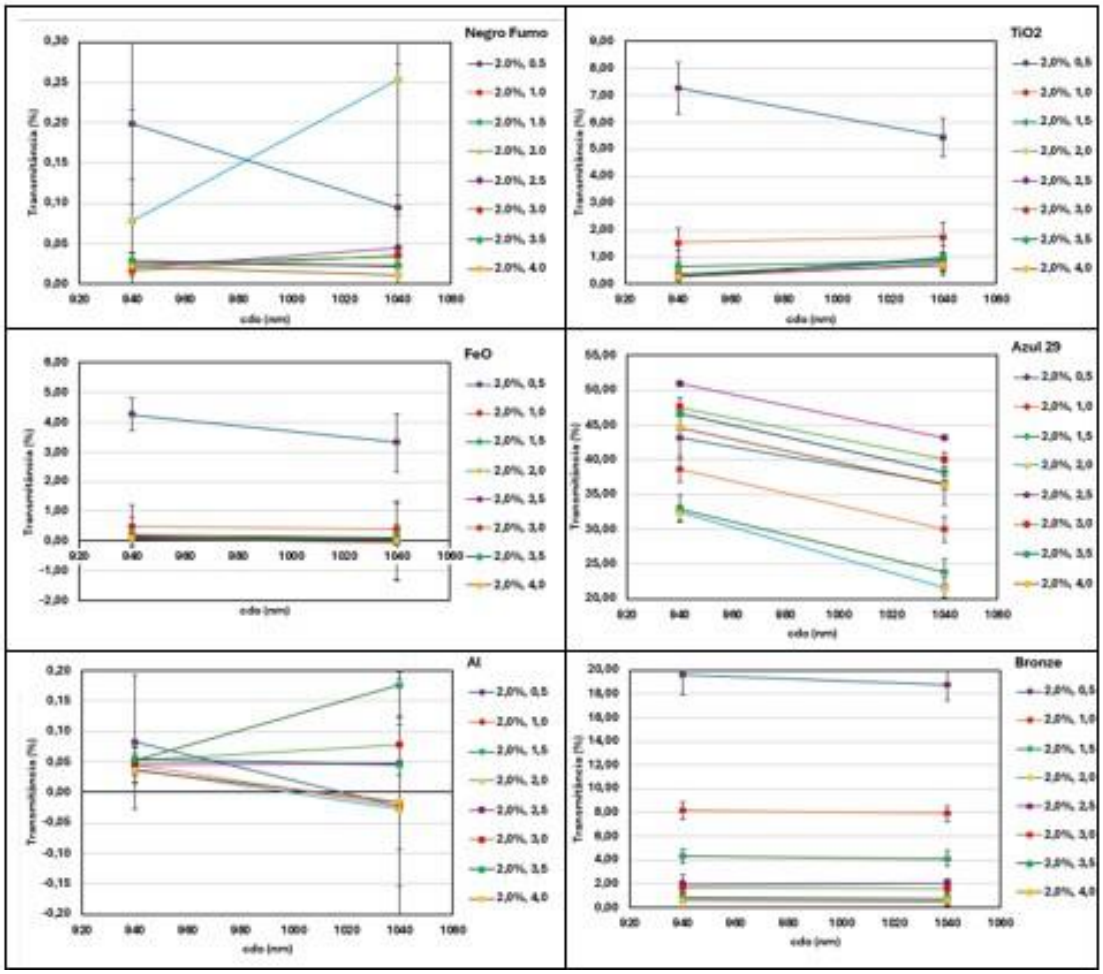


Figura 181 - Transmitância da mistura com 2% de concentração nos Pigmentos Inorgânicos em função dos comprimentos de onda de 940 e 1040 nm

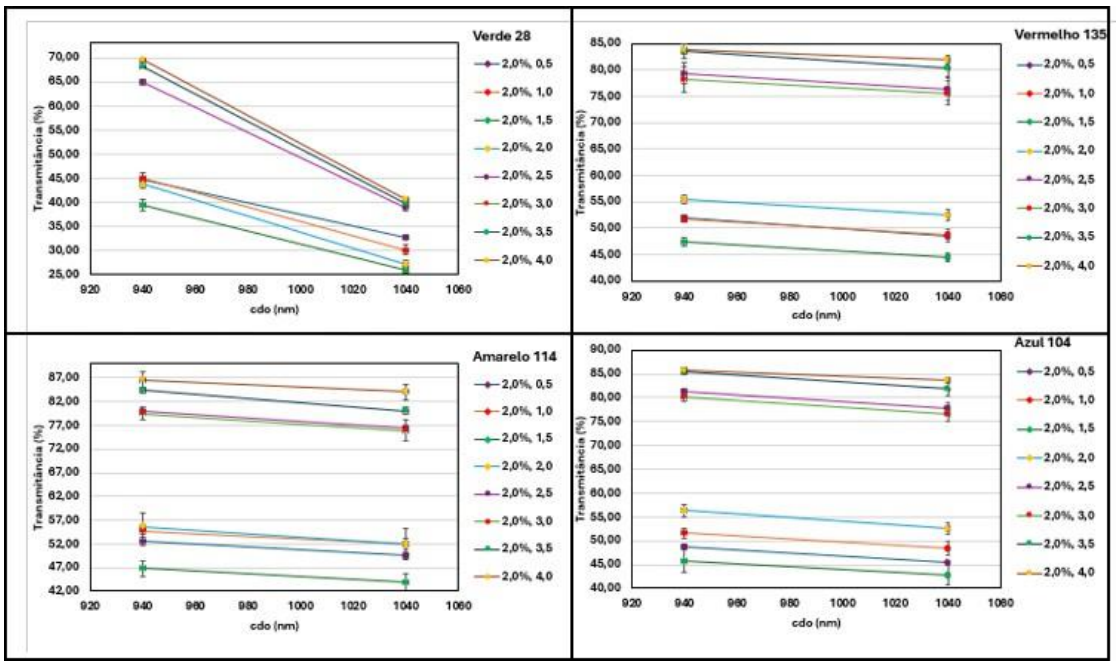


Figura 182 - Transmitância da mistura com 2% de concentração nos Corantes em função dos comprimentos de onda de 940 e 1040 nm