



Universidade de Aveiro
2023

João Carlos Nunes
Matos

Fadiga em juntas de termoplásticos soldados por
laser



**João Carlos Nunes
Matos**

Fadiga em juntas de termoplásticos soldados por laser

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

O presente trabalho foi realizado ao abrigo do Projeto “AM2R – Agenda Mobilizadora para a inovação empresarial do setor das Duas Rodas” [C644866475-00000012 – Projeto nº 15 - MHSi]], financiado pelo PRR - Programa de Recuperação e Resiliência, no âmbito do Next Generation EU da União Europeia, e contou com apoio laboratorial do Centro de Tecnologia Mecânica e Automação (TEMA), projetos UIDB/00481/2020 e UIDP/00481/2020.

O júri

Presidente

Prof. Doutora Gabriela Tamara Vincze

Professora Auxiliar da Universidade de Aveiro

Arguente

Prof. Doutora Rita de Cássia Mendonça Sales Contini

Professora de Ensino Superior Nível III-G da *Faculdade de Tecnologia de São José dos Campos - Prof. Jessen Vidal - Centro Paula Souza - Brasil*

Orientador

Prof. Doutor António Manuel de Bastos Pereira

Professor Associado c/ Agregação da Universidade de Aveiro (orientador)

Agradecimentos

Dedico estas palavras a todos os que contribuíram para o sucesso do meu percurso académico, desde o básico, passando pelo liceu e por fim na faculdade.

Ao meu Orientador, Professor António Bastos, pela disponibilidade sempre imediata e pelas indicações dadas.

Ao Engenheiro António Festas e Engenheiro Ricardo Beja por toda a ajuda prestada.

Aos meus pais e irmãos por todo o esforço e motivação em todos os momentos da minha formação, académica e pessoal, e por todos os valores que me foram transmitidos.

Aos meus padrinhos e primos, por estarem sempre presentes na minha vida e apoiarem-me incondicionalmente.

À minha avó, pelas suas palavras aconchegantes e apoio inabalável. E por todos os mimos extra que ajudaram na minha jornada.

À minha namorada Beatriz, por todo o apoio, paciência e incentivo.

A todos os meus amigos e colegas de curso, à malta do Fnd, do 56, do 3Y, por todos os momentos dentro e fora da melhor academia e por toda a amizade.

Palavras-chave

Fadiga, ensaios de fadiga à flexão, soldadura, soldadura laser, termoplásticos, polietileno (PE)

Resumo

No decorrer dos últimos anos tem surgido uma crescente procura por materiais leves e de elevada resistência mecânica com o propósito de substituir os metálicos. Posto isto, a soldadura de termoplásticos é um processo que tem vindo a ser tema de cada vez maior interesse, mas que ainda não está completamente dominado. A resistência destes plásticos a solicitações a longo prazo, isto é, à fadiga, é ainda desconhecida. Estes valores encontram-se tabelados para materiais mais vulgarmente usados nas indústrias, mas não entre os termoplásticos. Os ensaios de fadiga procuram determinar a vida útil dos materiais quando sujeitos a cargas ou deformações cíclicas.

Esta dissertação analisa a resistência à fadiga de juntas de termoplástico soldadas a laser, mais concretamente de polietileno de alta densidade. Para a soldadura das juntas recorreu-se a uma máquina laser ND:Yag (SISMA SWA300), tendo sido feita por transmissão numa configuração de junta sobreposta. A qualidade da soldadura foi validada através de ensaios à tração e à flexão, agregados a otimizações dos parâmetros de soldadura laser.

O presente trabalho revelou que a curva S-N obtida após os ensaios à fadiga é de formato desejável (com um coeficiente R^2 acima dos 0.95) e registaram-se tensões de cedência à flexão superiores a 30 MPa.

Keywords

Fatigue, bending fatigue test, welding, laser welding, thermoplastics, polyethylene (PE)

Abstract

Over the last few years, there has been a growing demand for lightweight materials with high mechanical strength in order to replace metallic ones. That said, the welding of thermoplastics is a process that has been a subject of increasing interest, but which is not yet fully mastered. Also, the resistance of these plastics to long-term stresses is still unknown. These values are tabulated for materials most commonly used in industries, but not for thermoplastics. Fatigue tests look forward to determining the life span of materials when subjected to cyclic loads or deformations.

This thesis analyses the fatigue resistance of laser-welded thermoplastic joints, specifically high-density polyethylene (HDPE). The joints were welded using an ND:Yag laser machine (SISMA SWA300), using transmission in an overlapping joint configuration. The quality of the welding was validated through tensile and flexural tests, together with optimisations of the laser welding parameters.

This work revealed that the S-N curve obtained after the fatigue tests is of a desirable shape (with a R^2 coefficient above 0.95) and flexural yield strengths of more than 30 MPa were recorded.

Índice

I	Enquadramento teórico	1
1	Introdução	3
1.1	Enquadramento	3
1.2	Objetivos	3
2	Estado de arte	5
2.1	Termoplásticos	5
2.1.1	Aplicações termoplásticos	5
2.2	Soldadura laser	6
2.2.1	Breve introdução ao laser	6
2.2.2	Características da soldadura laser	7
2.2.3	Tipos de laser	8
2.2.3.1	Laser Nd:Yag	8
2.3	Soldadura termoplásticos	9
2.3.1	Processos de soldadura laser de termoplásticos	10
2.3.1.1	Soldadura laser direta	10
2.3.1.2	Soldadura laser por transmissão - LTW	10
2.3.1.3	Outros processos de soldadura laser	11
2.3.2	Técnicas de soldadura por transmissão	12
2.3.2.1	Soldadura por contorno	12
2.3.2.2	Soldadura simultânea	12
2.3.2.3	Soldadura quase simultânea	12
2.3.3	Características da soldadura laser de termoplásticos	13
2.3.3.1	Propriedades importantes	13
2.3.3.2	Compatibilidade plásticos	14
2.3.3.3	Geometria das juntas	15
2.3.3.4	Parâmetros de controlo soldadura termoplásticos	15
2.4	Fadiga	16
2.4.1	Fadiga nos polímeros	16
2.4.2	Fadiga em juntas soldadas	17
2.4.3	Caracterização ensaios fadiga	17
2.4.4	Curva S-N	18
2.4.5	Fadiga à flexão vs Fadiga à tração	18
2.4.6	Flexão 3 pontos vs Flexão 4 pontos	19

II	Procedimento experimental	21
3	Procedimento experimental	23
3.1	Material e amostras	23
3.1.1	Polietileno de alta densidade (HDPE)	23
3.2	Maquinagem de provetes	24
3.2.1	Norma ISO 178:2019	24
3.2.2	Máquina de maquinagem	24
3.3	Polimento/desbaste	26
3.3.1	Estação de trabalho	26
3.4	Soldadura laser	27
3.4.1	Estação de trabalho	27
3.4.2	Parâmetros de soldadura	27
3.4.3	Dispositivo de fixação	28
3.5	Ensaio à tração	28
3.5.1	Estação de trabalho	29
3.6	Ensaio à flexão	29
3.6.1	Normas de flexão	30
3.6.2	Estação de trabalho	31
3.7	Ensaio de fadiga à flexão	31
3.7.1	Normas de fadiga à flexão	32
3.7.2	Estação de trabalho	33
3.7.3	Parâmetros do ensaio à fadiga	35
III	Resultados e discussão	37
4	Resultados e discussão	39
4.1	Resultados dos ensaios de tração	39
4.2	Resultados dos ensaios de flexão	41
4.2.1	Provetes de HDPE (material de base)	41
4.2.2	Provetes soldados (p58, p61, p62)	42
4.3	Resultados dos ensaios de fadiga à flexão	43
4.3.1	Provetes de HDPE (material base)	44
4.3.2	Provetes soldados (p61 e p62)	44
4.3.3	Curvas S-N (após ensaios de fadiga à flexão)	47
4.4	Discussão	48
IV	Conclusões e trabalhos futuros	51
5	Conclusões e trabalhos futuros	53
5.1	Conclusões	53
5.2	Trabalhos futuros	54
A	Anexos	55

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Lista de Tabelas

2.1	Principais parâmetros de controlo da soldadura laser.	8
2.2	Tipos e características de laser para soldadura.	9
2.3	Efeitos dos parâmetros de soldadura de plásticos.	13
2.4	Propriedades importantes dos polímeros.	13
2.5	Parâmetros referência para soldadura laser de termoplásticos.	16
3.1	Propriedades HDPE	24
3.2	Características da SISMA SWA300 do Laboratório de Soldadura do DEM	27
3.3	Parâmetros para soldadura laser de termoplásticos.	28
3.4	Parâmetros de soldadura das combinações (p58, p61 e p62) com resultados satisfatórios	29
4.1	Parâmetros de soldadura (iniciais e finais) após ensaios à tração e respetivas tensões de cedência	39
4.2	Cálculo da velocidade de ensaio a 3 Hz tendo como base o deslocamento até à tensão de cedência	41
4.3	Síntese dos resultados dos ensaios à tração	48
4.4	Síntese dos resultados dos ensaios à flexão	48
4.5	Síntese dos resultados dos ensaios à fadiga para os provetes soldados (p61 e p62)	48

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Lista de Figuras

2.1	Quotas de mercado dos oito principais setores de aplicação de termoplásticos.	6
2.2	Exemplos de aplicações de termoplásticos	6
2.3	Densidades de potência para fontes de calor de soldadura típicas, e geometria dos cordões de soldadura obtidos com as respectivas densidades. . .	7
2.4	Ilustração esquemática de um laser Nd:YAG.	9
2.5	Processos de soldadura laser.	11
2.6	Outros processos de soldadura laser.	11
2.7	Representação esquemática das técnicas de soldadura por transmissão. a) Soldadura por contorno. b) Soldadura simultânea. c) Soldadura quase simultânea.	12
2.8	Quadro resumo da compatibilidade entre termoplásticos na soldadura laser de termoplásticos semelhantes e dissimilares.	14
2.9	Configurações típicas de juntas soldadas por transmissão.	15
2.10	Curvas S-N típicas para vários plásticos	17
2.11	Tipologia de ensaios à flexão	19
3.1	Exemplo folhas de HDPE.	23
3.2	Desenho ilustrativo do pretendido para as juntas após soldadura laser . .	25
3.3	Imagens representativas do aspeto visual das amostras, e provetes, após maquinados, segundo dimensões indicadas pela Norma ISO 178:2019: a) Provetes (cor natural e preta) 80(C) x 25(L) x 3(E); b) Amostras (cor natural e preta) 43(C) x 25(L) x 3(E); c) Proвете final (após soldadura). . .	25
3.4	Centro de maquinagem (DEM-UA) MIKRON VCE 500	25
3.5	Esmeril do Laboratório de Soldadura do DEM	26
3.6	a) Estado dos provetes antes do desbaste; b) Estado dos provetes após o desbaste.	26
3.7	SISMA SWA300	27
3.8	Mola e Sistema fixação utilizados	28
3.9	a) Shimadzu AGS-X-10kN; b) Amarras de cunhas com calços de 3 mm. . .	30
3.10	Posição da amostra de ensaio no início do ensaio	32
3.11	a) Apoios ensaio flexão com calço 3 mm; b) Ensaio à flexão segundo a norma ISO 178-2019.	32
3.12	Valores referência para o número de ciclos até à falha de uma amostra de HDPE (0.5 in) num ensaio de fadiga à flexão segundo a norma ASTM D7774-12.	33
3.13	Shimadzu MMT-101N	33
3.14	Dispositivo para fixação de provetes em ensaio de fadiga à flexão de 3 apoios	34

3.15	a) Dispositivo fixação para ensaio de fadiga à flexão de 3 pontos; b) Punção adicionado à máquina Shimadzu MMT-101N para viabilizar o ensaio de fadiga à flexão.	34
3.16	Imagem do painel controle do software da máquina Shimadzu MMT-101N usada para realizar os ensaios de fadiga	35
4.1	Evolução das curvas Tensão vs Deslocamento das juntas soldadas	40
4.2	a) Aspetto da soldadura nas amostras iniciais (sinais de explosão de material e irregularidades); b) Aspetto da soldadura após otimização de parâmetros (soldadura uniforme e nítida).	40
4.3	Curvas Tensão vs Deslocamento das amostras de material de base HDPE branco e preto (ensaio flexão a 1 mm/min)	41
4.4	Curvas Tensão vs Deslocamento das amostras de material base HDPE branco e preto (ensaio flexão a 1000 mm/min)	42
4.5	Curvas Tensão vs Deslocamento para os provetes soldados (ensaio flexão 1 mm/min)	43
4.6	Curvas Tensão vs Deslocamento para os provetes soldados (ensaio flexão 1000 mm/min)	43
4.7	Evolução do deslocamento do provete ao longo do ensaio de fadiga à flexão com provetes de material base (3Hz)	44
4.8	Evolução do deslocamento do provete ao longo do ensaio de fadiga à flexão a 50 % tensão de cedência com 3 Hz vs 30 Hz frequência para o provete soldado p61.	45
4.9	Evolução do deslocamento do provete ao longo do ensaio de fadiga à flexão a 50 % tensão de cedência com 3 Hz vs 30 Hz frequência para o provete soldado p62.	45
4.10	Evolução do deslocamento médio do provete ao longo do ensaio de fadiga à flexão a 50 % tensão de cedência (3 Hz vs 30 Hz) para o provete soldado p61	46
4.11	Evolução do deslocamento médio do provete ao longo do ensaio de fadiga à flexão a 50 % tensão de cedência (3 Hz vs 30 Hz) para o provete soldado p62	46
4.12	Curva S-N para provetes soldados p61 e p62 (30 Hz)	47
A.1	Características e propriedades do HDPE segundo a ficha técnica do fabricante PolyLanema	55
A.2	Comparativo Curvas Tensão vs Deslocamento de provetes material base a provetes soldados em ensaio à flexão a 1 mm/min	56
A.3	Comparativo Curvas Tensão vs Deslocamento de provetes material base a provetes soldados em ensaio à flexão a 1000 mm/min	56
A.4	Comparativo Curvas SN para provetes soldados p61 e p62 (30 Hz)	57

Parte I

Enquadramento teórico

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento

Existem inúmeras aplicações industriais para a qual a junção de materiais é fundamental. Apesar de inicialmente ter sido fortemente aplicada em materiais metálicos, nos dias que correm a soldadura laser evoluiu e ampliou a sua área de aplicação, estando o seu uso também associado a polímeros. É nos setores automóvel, médico, eletrónico e aeroespacial que existe maior utilidade e aproveitamento desta tecnologia dado o seu vasto potencial para as mais diversas aplicações. As constantes variações de cargas e de condições a que são expostas as soldaduras fazem com que fatores como a durabilidade e fiabilidade sejam fortemente estudados e procura-se cada vez mais compreender a resistência mecânica deste tipo de junção [1].

A grande evolução desta tecnologia resultou numa maior competitividade em relação a outros métodos tradicionais. Algumas das vantagens associadas à utilização deste processo são o relevo de solda mínimo, danos térmicos insignificantes devido ao aquecimento localizado e também a inexistência de desgaste de ferramentas. A possibilidade de grande automatização é um forte fator diferenciador, uma vez que garante grande precisão, cadência de produção elevada e qualidade de união. Os parâmetros desta tecnologia devem ser ajustados consoante as especificações do material e propósito de utilização da peça. Variáveis como a potência e velocidade do laser, pressão e a temperatura são alguns dos fatores manipuláveis de forma a garantir uma qualidade de soldadura desejável [1].

Para compreender a utilidade da soldadura a laser de polímeros na indústria em geral é necessário analisar vários critérios como os parâmetros do feixe escolhidos e os tipos de juntas que influenciam as características mecânicas da solda, é nesta análise que os ensaios de fadiga demonstram grande relevância e importância no desenvolvimento de perfis de juntas que não comprometam o comportamento mecânico do material e da solda quando se usufrui desta tecnologia nas mais variadas aplicações [1].

1.2 Objetivos

Esta dissertação tem como principal objetivo a análise da vida à fadiga de termoplásticos, especificamente do polietileno de alta densidade (HDPE). Com vista a alcançar-se com sucesso esse objetivo principal existem passos intermédios que são essenciais para um correto entendimento do trabalho desenvolvido. Em seguida enumeram-se os objetivos:

- Estudar a tensão máxima de cedência de juntas de termoplástico sujeitas a forças de flexão.
- Otimizar os parâmetros de soldadura laser em termoplásticos.
- Estudar o comportamento à fadiga (ciclos de baixa e alta frequência) de juntas de termoplástico.
- Determinar a curva S-N de juntas de termoplástico.

Capítulo 2

Estado de arte

2.1 Termoplásticos

A indústria dos plásticos tem crescido continuamente, de forma consistente, nos últimos 50 anos. A produção mundial aumentou desde os 1.5 milhões de toneladas (1950) para as 290 milhões de toneladas registadas em 2014. Este expressivo crescimento do uso de plásticos deve-se, em grande parte, à boa relação resistência/peso do material, facilidade de fabricação de formas complexas, baixo custo associado e há possibilidade de reciclagem [2, 3].

São estas características que tornam os plásticos tão apelativos e que fazem com que globalmente todas as indústrias os estejam a usar, principalmente nos setores automóvel, eletrónico, aeroespacial e de construção. O desenvolvimento e evolução do uso deste material tende a seguir as necessidades económicas que surgem, procurando-se usar designs de parede fina, ciclos de produção rápidos, melhores relações força-peso em comparação com os aços, alumínio e outros metais ou até mesmo como alternativa ao vidro.

Atualmente a investigação segue a tendência da procura por mais conhecimento acerca de polímeros condutores de electricidade, misturas e ligas, compósitos e nanocompósitos, reciclabilidade e sustentabilidade, plásticos biodegradáveis e ainda plásticos de alta temperatura [4].

2.1.1 Aplicações termoplásticos

Já foi referida a grande aplicabilidade de materiais plásticos nos mais variados setores e indústrias. Dentro desta família dos plásticos, estes são divididos em sub-grupos segundo características próprias que os diferenciam. Esta dissertação aborda e trabalha com os termoplásticos, o maior sub-grupo de todos. Para se ter noção do volume deste mercado que são os termoplásticos, em 2000 representavam cerca de 83.3% do consumo plásticos. Os termoplásticos mundialmente mais consumidos são: o Polietileno (PE) (38%), o Polipropileno (PP) (18.5%), o Policloreto de vinila (PVC) (15%) e o Poliestireno (PS) (6%), sendo que só estes quatro representaram por si só 72% dos plásticos consumidos a nível mundial. Os principais setores de aplicação de termoplásticos são o embalamento, produtos domésticos, construção civil, transporte, mobiliário e eletrónica, abaixo é ilustrado a distribuição percentual do mercado dos setores de aplicação assim como exemplos destas aplicações nas Figuras 2.1 e 2.2, respetivamente. Para juntas de termoplásticos em específico, algumas das aplicabilidades atuais são no fabrico de bancos e encostos,

painéis de instrumentos e componentes estruturais leves.

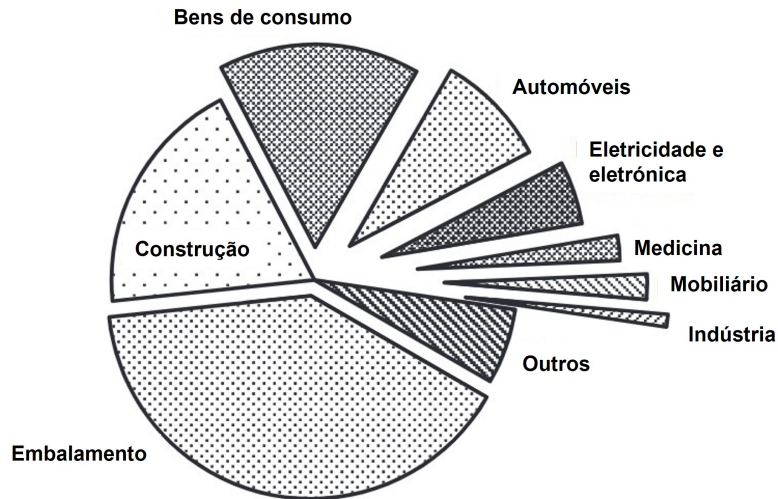


Figura 2.1: Quotas de mercado dos oito principais setores de aplicação de termoplásticos. Adaptado de [2]



Figura 2.2: Exemplos de aplicações de termoplásticos

2.2 Soldadura laser

2.2.1 Breve introdução ao laser

O laser é uma das tecnologias permanentemente associada às invenções mais marcantes do século XX. Esta tecnologia desenvolveu-se e evoluiu rapidamente após o fim da Segunda Guerra Mundial, sustentada pelos grandes investimentos governamentais na pesquisa física, naquela época, em conjunto com o conseqüente rápido crescimento do número

de físicos e engenheiros. Apesar de ser uma época de amplo progresso tecnológico, nos primeiros tempos a tecnologia laser não apresentou o seu potencial de forma clara e óbvia como nos dias de hoje, inicialmente o laser era apenas visto como um transmissor para comunicações atmosféricas de alta frequência. Com o tempo, a evolução permitiu que os investigadores tornassem as aplicabilidades do laser mais práticas, tendo evoluído consoante as necessidades económicas [5].

2.2.2 Características da soldadura laser

A soldadura é o processo de união mais versátil e multifacetado que é aplicável em todas as indústrias. Um laser é uma fonte de calor de alta densidade, e por essa razão a soldadura a laser é conhecida por ser um processo de união de materiais de alta densidade energética.

Existem outros métodos de soldadura além do laser, cada método apresenta perfis de densidade de potência diferentes, assim como geometrias do cordão de solda próprios. A potência de um laser, que é equivalente à de um feixe de eletrões, é muito superior à de arco ou plasma, resultando em cordões de soldadura que penetram eficazmente de forma mais profunda e estreita.

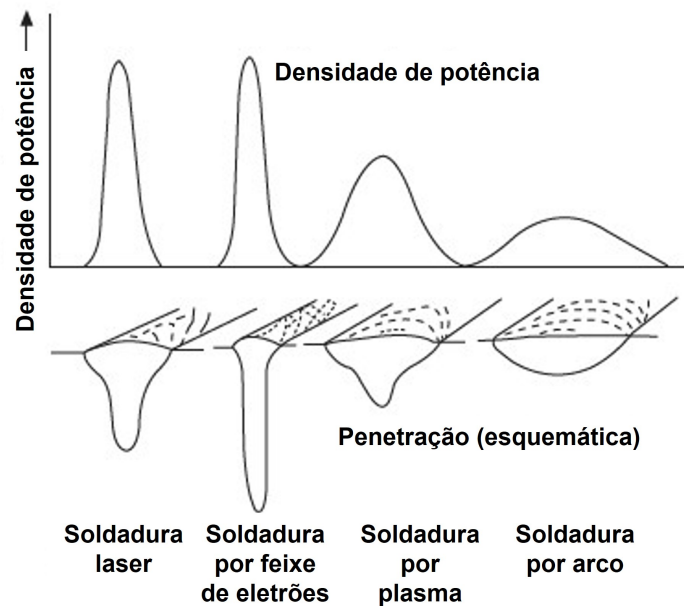


Figura 2.3: Densidades de potência para fontes de calor de soldadura típicas, e geometria dos cordões de soldadura obtidos com as respectivas densidades. Adaptado de [6]

A soldadura laser, na vasta maioria dos contextos, apresenta-se como o método mais vantajoso em relação aos demais. Entre todos os processos, o laser é o que pode produzir maior variedade de juntas metálicas ou plásticas (desde 0.01 até aos 50 mm espessura), garantindo alta qualidade, alta precisão, alto desempenho, alta velocidade, flexibilidade e baixa distorção. Complementando a isso há ainda a possibilidade de robotização, reduzindo a mão de obra, e automação completa em linhas de produção.

As aplicações da soldadura laser e a qualidade das mesmas dependem do correto conhecimento de especificações como a capacidade dos aparelhos laser, fatores que afetam a penetração da solda e outros defeitos da soldadura, soldabilidade dos materiais e propriedades mecânicas das juntas soldadas [6–8]. Os parâmetros que controlam a soldadura laser podem ser classificados como primários ou secundários, como se mostra abaixo na Tabela 2.1. O que caracteriza os primários é que o tipo de relação entre potência do laser, velocidade de soldadura e espessura do material é comum à maioria dos materiais. As variáveis secundárias têm um comportamento mais complexo de analisar, apesar dos esforços em relacionar melhor estes parâmetros ainda não é clara a relação entre estes e a eficiência do processo.

Tabela 2.1: Principais parâmetros de controlo da soldadura laser. Adaptado de [9]

Variáveis principais	Variáveis secundárias
Potência do laser	Tempo de pulso
Velocidade soldadura	Controlo plasma
Diâmetro ponto (e posição)	Gases de proteção
Modo de operação (contínuo ou pulsado)	

2.2.3 Tipos de laser

Em síntese, o LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) é um feixe de luz que se caracteriza por ser monocromático, coerente e direcional. Sendo esta última característica a mais relevante, uma vez que é a que diferencia o laser pela sua capacidade de compactar um feixe de luz com alta densidade de potência, através de longas distâncias com diâmetro muito reduzido. É composto por três componentes fundamentais, o meio ativo, a fonte de excitação e uma cavidade ressonante. [10]

Na indústria vemos a serem usados com maior regularidade os lasers Nd:YAG e CO_2 , as características destes encontram-se descritas abaixo, de forma sucinta, na tabela 2.2.

O laser CO_2 é muito utilizado na soldadura de aços, indústria automóvel, aeronáutica e naval. Apesar da sua utilidade, apresenta desvantagens, as altas potências neste tipo de laser são apenas possíveis através de espelhos mas não de fibra, também é comum ocorrer uma redução da profundidade da solda quando se usa gás de proteção argon (que é o tipo de gás mais usual devido ao seu custo benefício).

O laser Nd:Yag tem a vantagem de poder ser operado através de fibra e ainda pode ser operado em modo pulsado ou contínuo. A possibilidade de escolha entre modos torna a sua utilização mais versátil pois tanto se adequa a soldagens em peças pequenas (modo pulsado) como em trabalhos maiores onde o modo contínuo e as potências maiores têm melhor aplicabilidade. A maior desvantagem associada a este tipo de laser é a baixa eficiência elétrica na razão entre potência de entrada elétrica e potência de saída do laser [6, 7].

2.2.3.1 Laser Nd:Yag

Neste trabalho é exclusivamente utilizado o laser Nd:Yag, que se caracteriza por ser um laser de estado sólido. A denominação deste laser deve-se ao meio cristalino *Yttrium Aluminium Garnet* (Yag) que está presente na cavidade ressonante [11].

Tabela 2.2: Tipos e características de laser para soldadura. Adaptado de [6]

Tipo de laser	Características
CO_2	Comprimento de onda: $10.6 \mu m$ Potência média [CW]: 50 kW (Máximo) e 1–15 kW (Normal)
Nd:YAG	Comprimento de onda: $1.06 \mu m$ Potência média [CW]: 10 kW (Máximo) e 0.05–7 kW (Normal)

Este tipo de laser é comercializado há mais de 30 anos, sendo uma das fontes laser mais versáteis usadas no processamento de materiais, em grande parte graças ao seu formato robusto e compacto, aliado a um comprimento de onda de $1.06 \mu m$ que permite que o feixe seja transmitido por meio de fibras. Apesar da sua baixa eficiência, hoje em dia já existem Nd:Yags de alta potência capazes de operar a 10 kW. Em modo pulsado, se a temperatura da superfície se mantiver abaixo do ponto de ebulição, a transferência de calor é maioritariamente feita por condução, e a soldadura é produzida por essa condução limitada. Quando as temperaturas atingem valores acima da fusão, para uma certa velocidade, é formada uma soldadura de penetração [12].

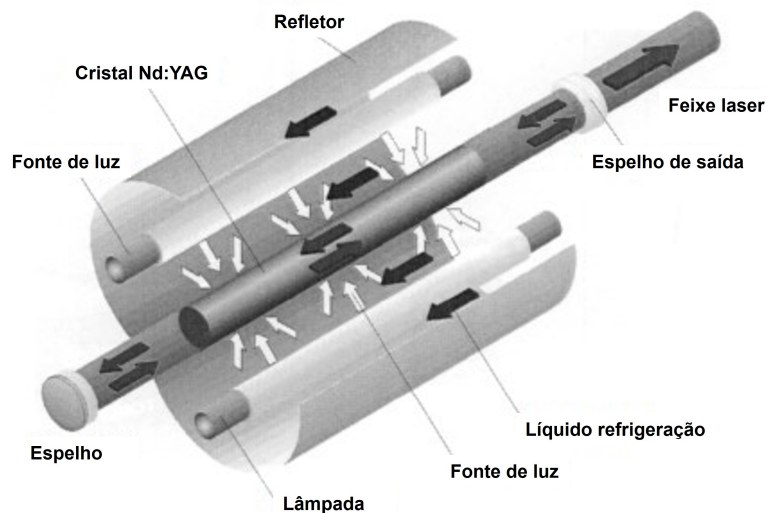


Figura 2.4: Ilustração esquemática de um laser Nd:YAG. Adaptado de [11]

2.3 Soldadura termoplásticos

A soldadura de plásticos é um processo cujos tempos primórdios remontam os anos 70. Surge primeiro através de aplicação laser direta quando os primeiros materiais plásticos começaram a ser soldados usando-se um laser CO_2 , e só mais tarde, aparece o processo que atualmente se usa mais recorrentemente, a soldadura por transmissão. Estes processos serão em seguida explicados com maior detalhe [13].

Em termos práticos, a soldadura de plásticos é um processo de franca importância na indústria médica e automóvel, e mais recentemente apresenta desenvolvimentos de grande relevância em estudos que procuram a otimização da união de plásticos a outros materiais como textéis, metais e cerâmicos [13].

2.3.1 Processos de soldadura laser de termoplásticos

Os processos de soldadura laser de plásticos separam-se em dois princípios básicos. Soldadura laser direta e soldadura laser por transmissão (LTW - *Laser Transmission Welding*), representados na Figura 2.5. Atualmente, o processo mais usado em aplicações industriais de soldadura laser de componentes plásticos é o LTW. No entanto é expectável que desenvolvimentos futuros permitam trabalhar com comprimentos de onda superiores a 1200 nm possibilitando a expansão do potencial do processo de soldadura laser direta para novas aplicações [13].

2.3.1.1 Soldadura laser direta

O princípio por detrás do processo de soldadura direta é unir superfícies paralelas de dois componentes, como representado na Figura 2.5a. O feixe laser atinge os dois componentes na interface conjunta, sendo que a absorção da energia vai depender do comprimento de onda da radiação do laser e das propriedades do material.

A absorção de superfície ocorre quando a energia do laser é transferida por condução ao longo do material e derrete-o para possibilitar a junção. Esta tipologia não é recomendada para grandes espessuras, dada a baixa condutividade térmica dos termoplásticos.

A absorção de volume ocorre quando a penetração ótica do laser está de acordo com a espessura do material. Os termoplásticos, na sua forma natural, são transparentes à radiação laser, pelo que ajustando-se as características do feixe face à necessidade, aplicando-se em simultâneo uma pressão de fixação adequada, permite gerar uma junta soldada ao longo de toda a espessura do material [13].

2.3.1.2 Soldadura laser por transmissão - LTW

Neste processo o princípio fundamental é que exista um componente transparente à radiação do laser e outro que a absorva, e com isto formar uma junta, como representado na Figura 2.5b. O feixe laser atinge a superfície absorvente e esta vai converter a energia do laser em calor, fazendo com que o termoplástico derreta. Esta absorção e conversão de energia para calor ocorre na região da interface entre os dois componentes. O aquecimento e fundição por condução de calor é possível devido ao contacto direto das superfícies dos dois componentes em conjunto com a aplicação simultânea de uma pressão de fixação, dessa forma a fusão e solidificação gera uma junta estável entre os componentes. No projeto que compõe esta dissertação foi esta a tipologia de processo de soldadura usada [13].

Dentro do processo LTW, existem 3 técnicas básicas, sendo elas a soldadura por contorno, a soldadura quase simultânea e a soldadura simultânea. Estas três técnicas serão apresentadas com maior detalhe a seguir.

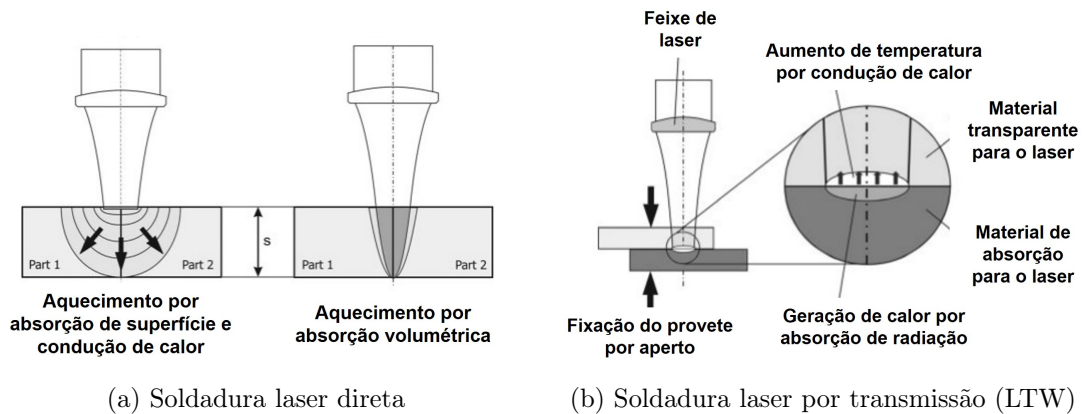


Figura 2.5: Processos de soldadura laser. Adaptado de [13].

2.3.1.3 Outros processos de soldadura laser

Tendo como base as técnicas anteriormente referidas, existem ainda outros subtipos que podem ser encontrados em desenvolvimento e/ou já implementados em aplicações industriais. Alguns destes subtipos encontram-se representados na Figura 2.6 mas não serão aprofundados neste estado de arte [13].

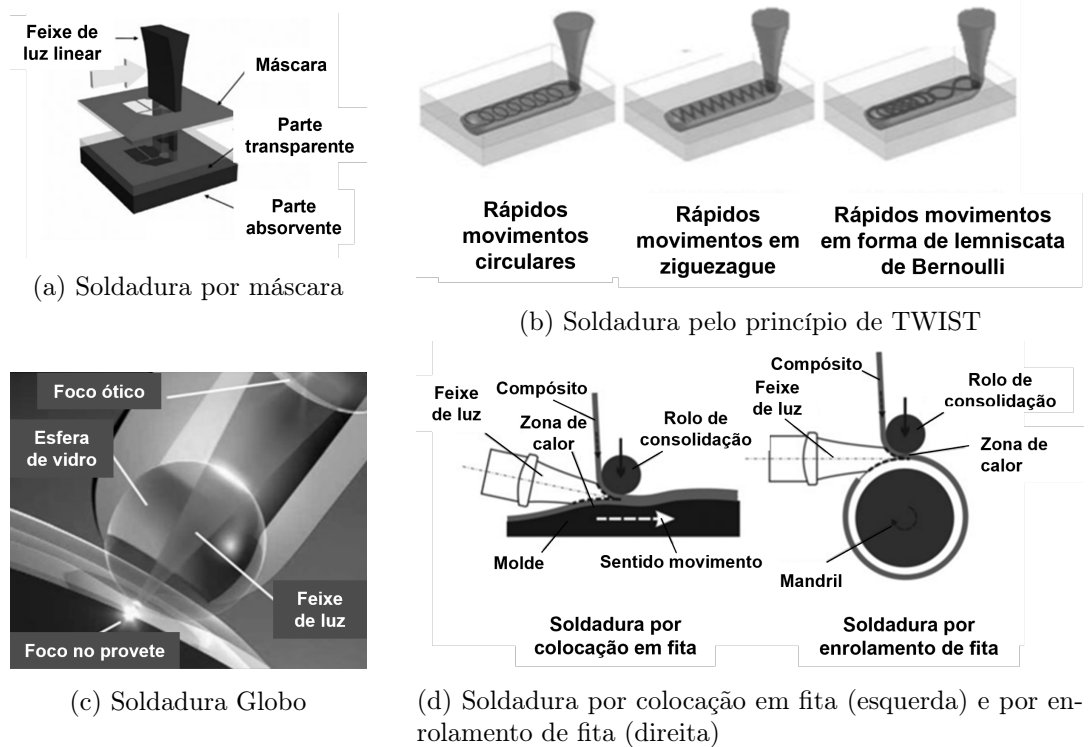


Figura 2.6: Outros processos de soldadura laser. Adaptado de [13].

2.3.2 Técnicas de soldadura por transmissão

2.3.2.1 Soldadura por contorno

Nesta técnica, representada na Figura 2.7a, é gerada uma junta soldada por laser recorrendo-se a um único feixe laser que é movido ao longo da zona que se pretende soldar. Este movimento é normalmente feito por um braço robótico, que garante maior flexibilidade e apropriado para grandes peças tridimensionais. Esta é a técnica de soldadura por transmissão usada neste estudo [13].

2.3.2.2 Soldadura simultânea

A soldadura simultânea, representada na Figura 2.7b, adequa-se a situações de trabalho de maior cadência de soldaduras semelhantes. Nesta técnica toda a zona que se pretende irradiar pelo feixe laser é feita simultaneamente, recorrendo-se a grupos de lasers que operam em síncrono. Desta forma consegue-se maior fluxo de trabalho e evita-se questões de início/fim de sequências de contorno, porém com custos de manutenção e de equipamento maior [13].

2.3.2.3 Soldadura quase simultânea

Nesta técnica, representada na Figura 2.7c, tal como no contorno, existe um único feixe laser a operar. A diferença é que neste caso o feixe é movido a alta velocidade ao longo do percurso pretendido, com o intuito de a cada passagem a temperatura de interface da junta aumentar até o ponto de fusão ser atingido. Ciclos de 5 a 20 repetições são considerados convencionais, acima das 40 repetições a soldadura quase simultânea é denominada de alta velocidade. Esta é a técnica que possibilita maior flexibilidade, tempos de ciclo mais curtos e maior aptidão para trabalhar em grandes séries de trabalho [13].

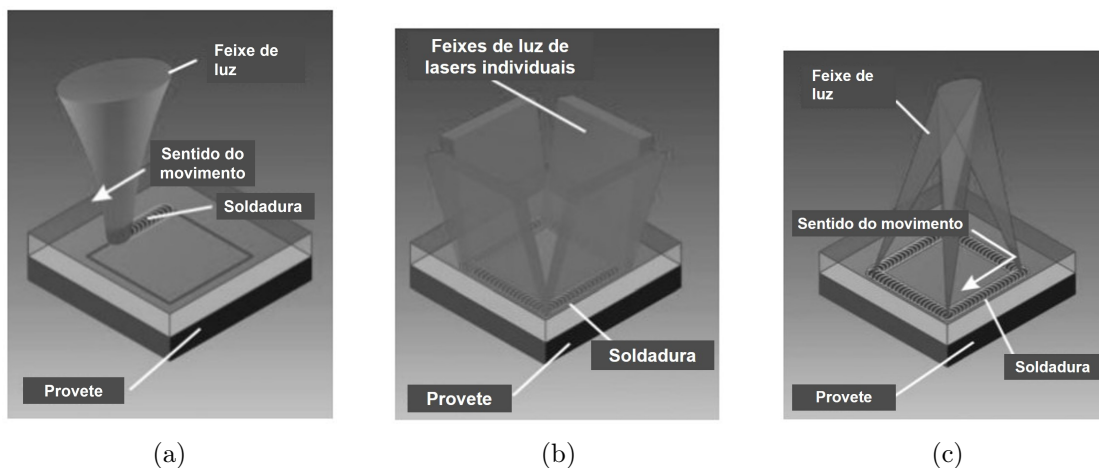


Figura 2.7: Representação esquemática das técnicas de soldadura por transmissão. a) Soldadura por contorno. b) Soldadura simultânea. c) Soldadura quase simultânea. Adaptado de [13].

2.3.3 Características da soldadura laser de termoplásticos

2.3.3.1 Propriedades importantes

Já se sabe que uma soldadura entre plásticos é garantida, teoricamente, quando as superfícies de duas peças, acima do seu ponto de fusão, são unidas por um período de tempo e sob pressão suficiente de forma a garantir um contacto ótimo na zona de interface da junta. No entanto, esta garantia não é absoluta, há uma panóplia de parâmetros e características específicas a ter previamente em conta em cada trabalho de soldagem que se pretenda desenvolver.

Do ponto de vista prático, há parâmetros que afetam de forma direta o desempenho da soldadura. A forma como se relaciona o desempenho da soldadura com determinados parâmetros encontra-se sumarizado na Tabela 2.3.

Tabela 2.3: Efeitos dos parâmetros de soldadura de plásticos. Adaptado de [6].

Parâmetros/Usos	Excesso	Carência
Temperatura	Soldadura rápida Degradação térmica	Soldadura lenta ou não soldadura
Pressão	Inibição da difusão em cadeia	Humedecimento insuficiente da superfície
Tempo soldadura	Degradação oxidativa	Difusão insuficiente
Peso molecular	Tempos de soldadura muito longos Altas pressões necessárias	Tempos de soldadura rápidos Baixas pressões necessárias

Além dos parâmetros mais evidentes, a soldadura laser de termoplásticos exige também que se tenha em conta as características dos materiais a serem soldados. A envolve absorção de luz, geração de calor, condução de calor, fusão, mistura e resolidificação, e por essa razão é crucial que se avalie adequadamente as propriedades dos plásticos a serem soldados de forma a garantir uma maior funcionalidade, tais como as propriedades óticas e físicas do material. A Tabela 2.4 sumariza as propriedades mais importantes do material que devem ser avaliadas [14].

Tabela 2.4: Propriedades importantes dos polímeros. Adaptado de [14].

Propriedades óticas:	Propriedades termofísicas:	Propriedades mecânicas:
- Transmissividade	- Condutividade térmica	- Resistência máxima
- Absortividade	- Capacidade específica	- Escoamento
- Índices de refração	- Coef. expansão térmica	
	- Densidade	
	- Ponto fusão	
	- Temp. cristalização polímeros	
	- Tipo de microestrutura	
	- Temp. decomposição polímero	

2.3.3.2 Compatibilidade plásticos

Praticamente todos os polímeros termoplásticos, até os reforçados, podem ser soldados por laser, desde ABS, PA, PC, PP, PMMA, PE, PVC, POM, PET, PEEK, etc. A resistência das juntas soldadas termoplásticas apresentam valores comparáveis com o nível de resistência do material base. Dentro da grande variedade de termoplásticos que existe, a compatibilidade de soldadura laser viável entre polímeros já testados está resumida na Figura 2.8, sendo que se tem de realçar que estas compatibilidades mencionadas não são possíveis por métodos não convencionais. A soldadura é assegurada quando existe compatibilidade química entre polímeros, isto é, estruturas moleculares e viscosidades idênticas. Outros critérios que afetam a combinação entre termoplásticos são o seu índice de fusão, temperatura de fusão, grau de cristalinidade, transição vítrea, etc. Esta dependência neste tipo de características leva a que tipicamente a compatibilidade perfeita (solda mais forte) ocorra maioritariamente em juntas compostas pelo mesmo material [14].

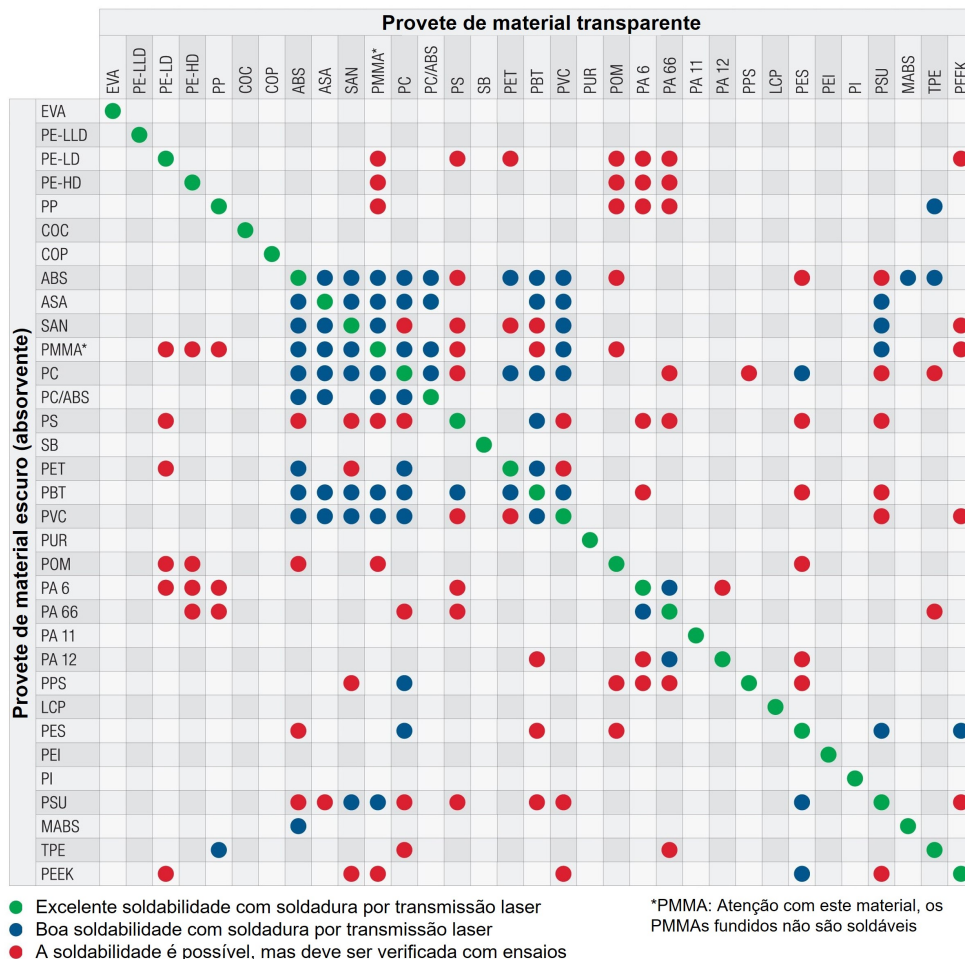


Figura 2.8: Quadro resumo da compatibilidade entre termoplásticos na soldadura laser de termoplásticos semelhantes e dissimilares. Adaptado de [14].

2.3.3.3 Geometria das juntas

As possibilidades de configuração para juntas são vastas, mas todas se abraçam à mesma filosofia. A geometria escolhida tem de garantir a otimização da entrada de energia do laser na interface da junta, e de forma a que haja uma região adequada para aplicação de pressão. As configurações de junta sobreposta e junta em T são as mais comuns em LTW. Juntas topo a topo tendem a ser difíceis de obter, uma vez que requerem profundidade de penetração ótica alta no polímero transparente, além da dificuldade de aplicar pressão corretamente. Outros cuidados a ter em conta são a necessidade de acabamento liso nas superfícies de contacto, de forma a minimizar o ar na interface. A Figura 2.9 mostra as várias geometrias mais usadas e com maior potencial para LTW [14].

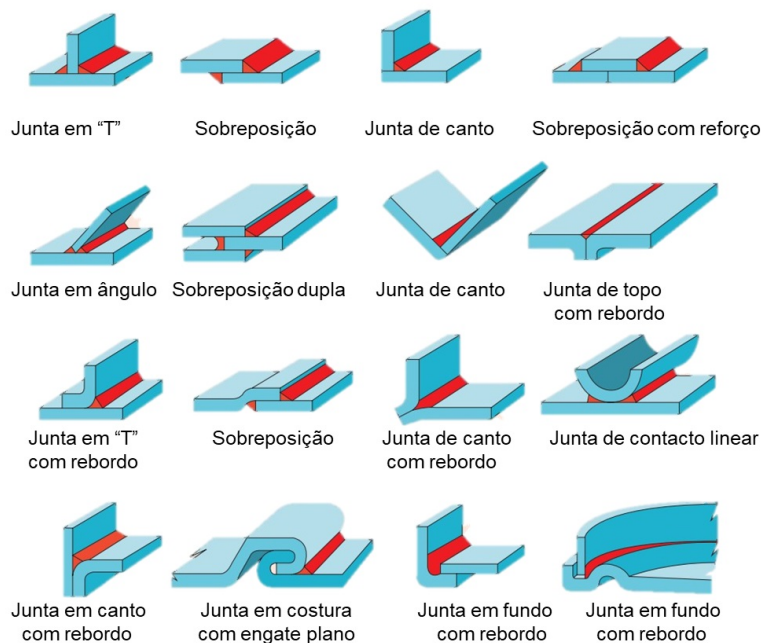


Figura 2.9: Configurações típicas de juntas soldadas por transmissão. Adaptado de [15].

2.3.3.4 Parâmetros de controlo soldadura termoplásticos

Em termos teóricos, o processo de soldadura de termoplásticos já foi explicado em detalhe, com especial ênfase para o que foi usado neste trabalho (LTW). Porém, em termos práticos, falta ainda saber quais os parâmetros de controlo a usar pelo operador. A literatura apresenta parca informação sobre a temática, e a pouca que existe não se adequa a este estudo, seja em termos de material, características da máquina laser, de dimensões ou de parâmetros monitorizados e/ou otimizados. Posto isto o foco da pesquisa seguiu unicamente trabalhos, projetos e dissertações de colegas e antigos alunos do DEM-UA, uma vez que estes trabalharam em condições semelhantes às também disponíveis para este trabalho.

A Tabela 2.5 apresenta os valores utilizados por Quintão [10], num trabalho que

abordava a soldadura laser de termoplásticos. Foram estes os valores referência que serviram de ponto de partida para o estudo desta dissertação.

Tabela 2.5: Parâmetros referência para soldadura laser de termoplásticos. Adaptado de [10].

Potência de pico	Duração de pulso	Sobreposição do ponto	Diâmetro do ponto	Velocidade soldadura
3 %	10 ms	65 %	2 mm	5 mm/s

2.4 Fadiga

O processo através do qual um material enfraquece após ser repetidamente submetido a tensões e deformações é conhecido como fadiga. É sabido que quando é exercida uma tensão sobre um material este deforma, sendo que quando esta tensão é removida o material volta à sua forma original (se a tensão não sair do regime elástico). Porém, quando o mesmo material é sujeito a esta mesma tensão mas de forma cíclica, há deformações que se acumulam ao longo do tempo, levando a que o material a cada ciclo perca propriedades, tornando-se menos capaz de voltar ao seu formato original [16].

São diversos os casos de acidentes que a história guarda em que se sabe que foi devido a este fenómeno da fadiga que as falhas ocorreram. Estes acidentes levaram a que se torna-se cada vez mais importante investigar todas as falhas, por mais insignificante que pareça. Hoje em dia, os mais recentes desenvolvimentos de software informático são capazes de estudar analiticamente a integridade estrutural de componentes, e com isso, permitem fazer-se previsões de vida com muito maior rigor.

Já desde 1800 que se procura compreender este fenómeno, que se caracteriza por ser um processo muito complexo e que ainda hoje não é totalmente compreendido. Atualmente é geralmente aceite que ocorrem quatro fases distintas de fadiga:

1. Nucleação (Iniciação da fenda)
2. Propagação da fenda
3. Propagação de fissuras
4. Instabilidade e falha final

2.4.1 Fadiga nos polímeros

Os métodos tradicionais de análise de fadiga usados para os metais, podem também ser aplicados aos polímeros. Contudo, os polímeros apresentam complicações em termos de aquecimento por histerese e conseqüente amolecimento, isto porque a temperatura de um polímero aumenta ao longo dos ciclos de fadiga, fazendo destes bastante suscetíveis aos efeitos da frequência de ciclos. Em síntese, quanto maior a frequência de carga, menor a resistência à fadiga.

O aumento da temperatura por histerese é a razão pela qual praticamente todos os polímeros apresentarem um "amolecimento" nas curvas de tensão-deformação cíclicas, independentemente da sua estrutura química. Na Figura 2.10, que resume curvas S-N

típicas para vários plásticos, verifica-se que os polímeros podem apresentar, ou não, um limite de resistência à fadiga, tal como os metais [17].

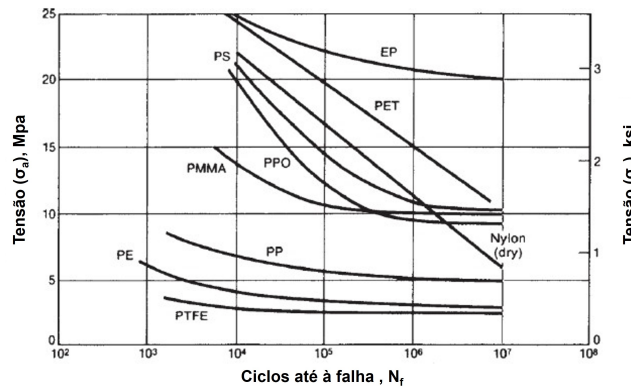


Figura 2.10: Curvas S-N típicas para vários plásticos. Adaptado de [17].

2.4.2 Fadiga em juntas soldadas

Anteriormente já foi referido o quão complexo pode ser a compreensão no seu todo do que é a fadiga, ao ponto de ainda hoje não ser uma temática totalmente compreendida. Existem enúmeros fatores que complicam e influenciam o estudo da fadiga sendo a fadiga em juntas ainda mais árdua de interpretar.

A soldadura que é realizada para se criar a junta afeta propriedades do material de forma direta pelo aquecimento e posterior arrefecimento, além de que a fusão resulta em material não homogêneo e diferente do original. A soldadura por si só, apesar de ser um processo profundamente estudado e sabido, sabe-se que dificilmente é executada na perfeição, podendo sempre existir defeitos como distorções e encurvaduras, escassa penetração, cordões de soldadura assimétricos, salpicos, inclusões de escória, porosidades, fissurações, entre outros. Estes defeitos, aliados a lacunas das partes não soldadas, criam altas concentrações de tensões, que claro afetam o comportamento à fadiga de juntas soldadas [18, 19].

2.4.3 Caracterização ensaios fadiga

Para avaliar a capacidade de um material, ou estrutura, suportar cargas repetidas, são utilizados testes de fadiga. Neste tipo de teste, uma amostra é tipicamente sujeita a uma tensão cíclica até à falha, seja por torção, compressão e/ou tensão. O ensaio pode ainda ser realizado sob uma série de condições, tais como ambientes corrosivos, quentes, ou à temperatura ambiente.

Os resultados do teste são utilizados para estabelecer o limite de fadiga, ou a tensão mais elevada que um material pode suportar antes de falhar. Durante o teste, podem ser recolhidos dados para acompanhar uma variedade de características, como a deformação, desenvolvimento de fratura, alterações microestruturais, entre outros, que podem ser utilizadas para compreender o comportamento do material sob circunstâncias de carga cíclica [17].

2.4.4 Curva S-N

A ligação entre a amplitude de uma tensão cíclica e o número de ciclos até à rutura de um material é representada graficamente pela curva S-N. É frequentemente utilizada para prever a vida de fadiga de um material sob circunstâncias particulares de carga. À medida que a amplitude da tensão aumenta, a curva indica uma redução no número de ciclos antes da falha. A gama de tensões de funcionamento seguro de um material quando sujeito a uma carga cíclica pode ser verificada utilizando a curva S-N, sendo também possível concluir quais variáveis (temperatura, ambiente, qualidade da superfície, carga, etc.) afetam diretamente a fadiga do material [17].

Algumas das propriedades essenciais para melhor se compreender a curva S-N são:

1. O número de ciclos até à falha normalmente diminui à medida que a amplitude da tensão aumenta, tornando a curva S-N tipicamente uma curva decrescente.
2. O limite de fadiga, que é o nível de tensão abaixo do qual um material pode resistir a um número ilimitado de ciclos sem falhar, é representado por uma linha horizontal no gráfico da curva S-N.
3. Os valores que indicam as qualidades de fadiga do material são o coeficiente de resistência à fadiga e o limite de resistência à fadiga.
4. Cada material tem uma curva S-N distinta. Os diferentes materiais terão várias curvas S-N devido às suas diversas características de fadiga.

Relativamente aos polímeros, sabe-se que as curvas S-N não são as mesmas que para os metais. A rigidez e resistência mecânica menores resultam em limites de fadiga inferiores aos dos metais. Em termos práticos significa que nos polímeros, aplicando a mesma amplitude de tensão, o número de ciclos até à falha é significativamente mais baixo do que para metais. Além disso, os polímeros revelam na maioria dos casos níveis de viscoelasticidade maiores do que os metais, sendo esse o pretexto para uma maior suscetibilidade das suas propriedades mecânicas a variações de temperatura e/ou de carga.

Outra característica dos polímeros é que, dependendo do tipo de polímero, das circunstâncias de produção e do ambiente, as suas características de fadiga podem diferir significativamente. Em contraste com os que são protegidos, os polímeros que são expostos a temperaturas elevadas, ou outras condições adversas, podem ter uma vida de fadiga mais baixa, que afeta diretamente a curva S-N dos mesmos [17].

Em suma, as curvas S-N dos polímeros diferem das dos metais e são mais difíceis de prever devido ao seu comportamento não-linear e às influências ambientais.

2.4.5 Fadiga à flexão vs Fadiga à tração

A durabilidade e longevidade dos materiais sujeitos a tensão cíclica são avaliadas utilizando duas formas diferentes de testes de fadiga: a fadiga à flexão e a fadiga à tração. Em ambos os testes, como já foi referido anteriormente, a amostra é carregada e depois libertada repetidamente até falhar.

Em aplicações estruturais onde o material é submetido a tensões de flexão, tais como pontes e edifícios, os ensaios de fadiga à flexão são frequentemente utilizados para avaliar o desempenho do material. Por outro lado, nas indústrias automóvel, aeroespacial entre outras, onde o material é submetido a tensões de tração, é frequentemente avaliado utilizando testes de fadiga à tração.

Ambos os testes de fadiga são cruciais para descobrir como os materiais reagem a cargas cíclicas e podem ser utilizados para prever quanto tempo um material durará em serviço.

Uma vez que envolve equipamento menos complicado e pode ser completado com uma configuração simples como uma máquina de ensaio universal, os ensaios de tração são frequentemente considerados mais simples de realizar do que os ensaios de flexão.

Ao contrário, os testes de flexão necessitam de ferramentas mais sofisticadas como uma máquina de testes de flexão e um dispositivo de flexão de três ou quatro pontos.

As qualidades particulares do material que estão a ser avaliadas, bem como a aplicação planeada, devem, em última análise, orientar a seleção do método de teste. Para garantir a aplicação da técnica de teste adequada, é crucial rever normas e recomendações pertinentes [20,21].

2.4.6 Flexão 3 pontos vs Flexão 4 pontos

Em ensaios de flexão, dependendo da sua tipologia, as regiões de maior concentração de tensões diferem. Nos testes de três pontos de flexão esta região está localizada precisamente no ponto de contacto onde é aplicada a carga, enquanto que nos testes de quatro pontos de flexão as tensões encontram-se dispersas por uma região maior entre pontos de contacto da carga.

O material que se vai testar e a complexidade dos ensaios são fatores determinantes na escolha do tipo de ensaio que se quer realizar. Quando o material a ser testado é homogéneo, como é o caso dos plásticos, a flexão de três pontos funciona bem e é aconselhável, já em materiais não homogéneos, como compósitos ou madeira, os quatro pontos são a melhor opção. É de realçar que o facto da flexão de três pontos ser teste padrão para uma ampla variedade de materiais, torna mais simples a comparação com resultados de diferentes investigações. Em relação à complexidade, o ensaio de três pontos é mais simples ao nível de tecnologia dos sensores de aquisição de dados e ainda na montagem e setup do ensaio [20,21].



(a) Flexão de 3 pontos



(b) Flexão de 4 pontos

Figura 2.11: Tipologia de ensaios à flexão

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Parte II

Procedimento experimental

Capítulo 3

Procedimento experimental

3.1 Material e amostras

Na investigação desenvolvida nesta dissertação, escolheu-se trabalhar com o Polietileno de alta densidade (HDPE), especificamente o polietileno fornecido em placa de 3mm pela empresa POLYLANEMA sobre a designação "PE-HD/E SHEET 3 MM 1000X2000 NATURAL/BLACK". A necessidade de material em cor natural e escura para se obter uma soldadura eficiente é de extrema relevância, tendo sido usadas precisamente essas pigmentações neste estudo.

A Figura 3.1 ilustra exemplos de folhas HDPE semelhantes às usadas. Em anexo (Anexo A.1) encontra-se uma lista de especificações do HDPE, segundo dados do fornecedor, que inclui características do material, entre elas, resistência à tração e flexão, tensão de cedência e de rutura, etc.

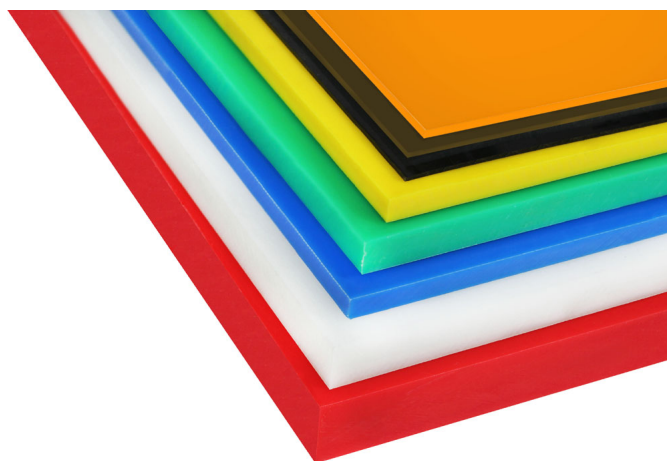


Figura 3.1: Exemplo folhas de HDPE. Adaptado de [22].

3.1.1 Polietileno de alta densidade (HDPE)

Para efeitos comparativos e validação das folhas de HDPE fornecidas, foi feita uma pesquisa numa biblioteca internacional de propriedades de materiais (Software GRANTA EduPack 2020), para que se comparasse valores teóricos com os indicados pelo fornecedor.

Apresentam-se em seguida na Tabela 3.1 alguns valores, sendo que em anexo se pode consultar com maior detalhe outras propriedades.

Tabela 3.1: Propriedades HDPE

	Densidade (ρ)	Módulo de Young (GPa)	Resistência à tração (MPa)	Temperatura de de fusão ($^{\circ}\text{C}$)	Condutividade térmica (W/m. $^{\circ}\text{C}$)
Polylanema	960	1.3	28	135	0.40
Valores tabelados	952 - 965	1.07 - 1.09	26 - 31	130 - 137	0.461 - 0.502

3.2 Maquinagem de provetes

As amostras utilizadas em toda a investigação foram maquinadas nas mesmas dimensões de forma a garantir homogeneidade entre ensaios realizados. A escolha das dimensões foi de acordo com os parâmetros de uma norma internacional, intitulada Plásticos - Determinação das propriedades de flexão (ISO 178:2019) [23].

3.2.1 Norma ISO 178:2019

Consultando a norma, no ponto 6, é indicado que a forma e dimensões preferíveis, em milímetros, do provete de ensaio são as seguintes:

- comprimento (mm), C: 80 ± 2
- largura (mm), L: $10,0 \pm 0,2$
- espessura (mm), E: $4,0 \pm 0,2$

Uma vez que a folha fornecida é de 3 mm, optou-se por manter essa mesma espessura. O ponto 6.1.3 da norma indica que para esta espessura o valor da largura deverá ser de 25,0 mm.

Posto isto, as dimensões escolhidas para cada provete foram 80(C) x 25(L) x 3(E). Para provetes soldados arbitrou-se 3 mm de sobreposição, e com isto a dimensão de cada metade que constitui o provete final ficou definida em 43(C) x 25(L) x 3(E). A Figura 3.2 ilustra um desenho do aspeto final pretendido após soldadura e a Figura 3.15 demonstra o aspeto obtido dos provetes após maquinação e após a soldadura por sobreposição.

3.2.2 Máquina de maquinagem

A maquinagem dos provetes foi realizada seguindo a Norma ISO 178:2019. Para isso recorreu-se ao centro de maquinagem da oficina do DEM, MIKRON VCE 500 do fabricante Haas (Figura 3.4).

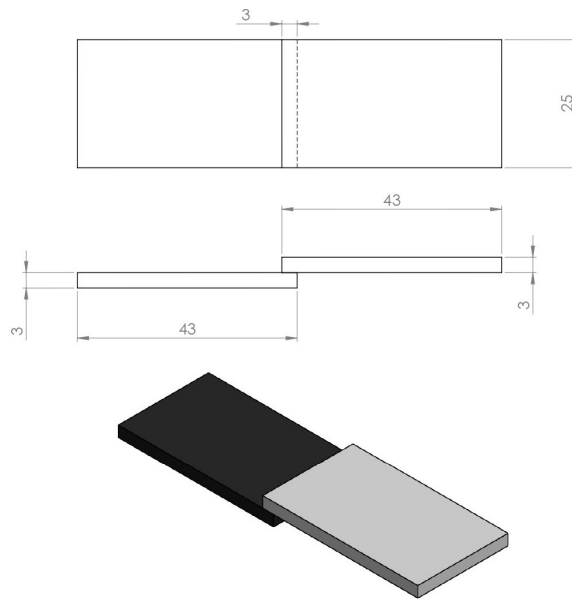


Figura 3.2: Desenho ilustrativo do pretendido para as juntas após soldadura laser

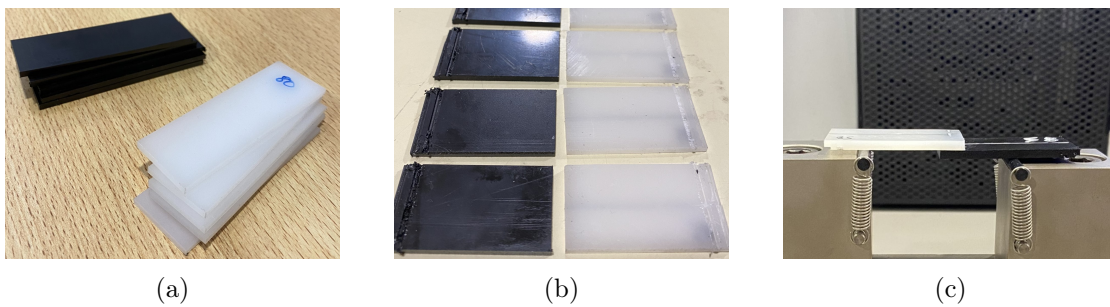


Figura 3.3: Imagens representativas do aspeto visual das amostras, e provetes, após maquinados, segundo dimensões indicadas pela Norma ISO 178:2019: a) Provetes (cor natural e preta) 80(C) x 25(L) x 3(E); b) Amostras (cor natural e preta) 43(C) x 25(L) x 3(E); c) Provete final (após soldadura).



Figura 3.4: Centro de maquinagem (DEM-UA) MIKRON VCE 500

3.3 Polimento/desbaste

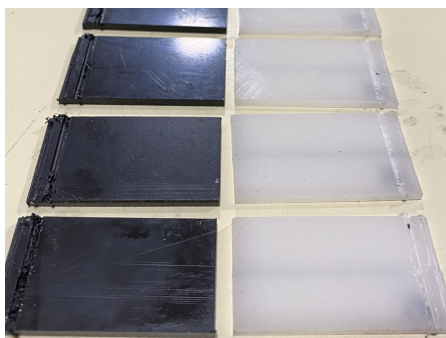
Inicialmente todas as amostras eram soldadas diretamente face a face no estado após maquinagem, porém, após resultados insatisfatórios, optou-se por remover a camada superficial dos provetes com um desbaste ligeiro recorrendo-se a um esmeril. Por consequente, a soldadura passou a ser feita entre contacto direto de HDPE puro, e não entre a camada isoladora/protetora/brilhante que revestia as folhas de HDPE. Este desbaste superficial aumenta a rugosidade da zona de interface da junta, e com isso melhora a penetração da solda garantindo-se uma união mais profunda entre as peças. Esta capacidade de superfícies de dois componentes se encaixarem de maneira precisa e eficaz é conhecido por intertravamento mecânico [24].

3.3.1 Estação de trabalho

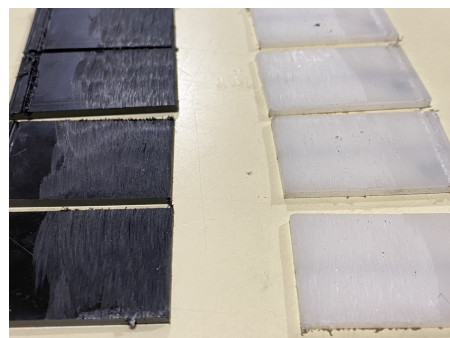
O desbaste foi feito no Laboratório de Soldadura do DEM, recorrendo a um esmeril (Figura 3.5). Seguem-se imagens do antes (Figura 3.6a) e após (Figura 3.6b) polimento das faces dos provetes.



Figura 3.5: Esmeril do Laboratório de Soldadura do DEM



(a)



(b)

Figura 3.6: a) Estado dos provetes antes do desbaste; b) Estado dos provetes após o desbaste.

3.4 Soldadura laser

3.4.1 Estação de trabalho

No que diz respeito à soldadura do HDPE, foi utilizada uma máquina de soldadura pulsada laser presente no Laboratório de Soldadura do DEM. Este equipamento é denominado de SISMA SWA300, representado na Figura 3.7. Esta máquina de soldadura laser apresenta uma panóplia de variáveis e parâmetros possíveis de se manipular de forma a otimizar e aperfeiçoar a soldadura das juntas até ao estado desejado. Estes parâmetros vão ser abordados de seguida. A Tabela 3.2 resume algumas características principais desta máquina.



Figura 3.7: SISMA SWA300

Tabela 3.2: Características da SISMA SWA300 do Laboratório de Soldadura do DEM

Tipo de laser	Nd:YAG
Potência média	300 W
Potência de pico	12 kW
Energia máxima do pulso	100 J
Duração do pulso	0.2 - 25 ms
Diâmetro do feixe laser	0.6 - 2 mm
Refrigeração	Ar
Ótica de foco	120 mm
Dimensões	2100 x 1200 x 1610 mm
Peso	310 Kg

3.4.2 Parâmetros de soldadura

Neste trabalho foram utilizados os parâmetros de soldadura da Tabela 3.3, partindo de valores iniciais segundo Quintão [10].

Tabela 3.3: Parâmetros para soldadura laser de termoplásticos. Adaptado de [10].

Potência de pico	Duração de pulso	Sobreposição do ponto	Diâmetro do ponto	Velocidade soldadura
3 %	10 ms	65 %	2 mm	5 mm/s

3.4.3 Dispositivo de fixação

Anteriormente, no estado de arte, foi abordada a importância do contacto entre faces superior e inferior (HDPE escuro e claro) como condição primordial para se atingir uma melhor soldadura. Apesar do DEM já ter dispositivos de fixação, estes não eram adequados para este trabalho dado que não garantiam o correto contacto entre faces como pretendido. Para se conseguir um melhor contacto usou-se um sistema de aperto simples através de molas metálicas para papel, como ilustrado na Figura 3.8. Dado o grande número de ensaios que a investigação exigia procurou-se uma boa relação entre a praticabilidade do sistema de aperto e a força de aperto necessária.



Figura 3.8: Mola e Sistema fixação utilizados

3.5 Ensaios à tração

Dada a pouca informação disponível sobre parâmetros otimizados de soldadura para as características deste trabalho, houve a necessidade de testar vários provetes soldados até se encontrar um conjunto de parâmetros que garantisse uma solda eficiente, tendo-se recorrido aos ensaios de tração para validar a qualidade da soldadura laser.

Optou-se por este tipo de ensaio por ser relativamente rápido e simples de executar, uma vez que havia a necessidade de executar de forma repetitiva vários ensaios até se encontrar o conjunto ótimo de parâmetros.

Dos parâmetros de soldadura mencionados anteriormente, e partindo da referência dada por Quintão [10], apenas os valores de velocidade de soldadura não foram alterados ao longo dos vários ensaios até se conseguir uma soldadura válida.

Após aquisição dos dados, foi feito um tratamento de dados simples para se obter a tensão de cedência, recorrendo-se ao método do offset de 0.2% usando a Equação 3.1, para se distinguir o ponto de transição elástico-plástico.

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (3.1)$$

sendo

σ a tensão, em MPa;

F a força aplicada, em Newton;

A_0 a área de secção, em mm^2 ;

Através deste ponto sabe-se a tensão de cedência e o respetivo deslocamento para a atingir. Foi determinado que 30 MPa seria um valor de tensão aceitável para validar o conjunto de parâmetros de soldadura laser.

A primeira junta soldada a ser testada à tração seguiu na íntegra os valores dos parâmetros dados por [10], e atribui-se a nomenclatura p0 a este provete. Para todos os ensaios que se seguiram a nomenclatura foi atribuída de forma incremental, para cada nova combinação de parâmetros atribuiu-se um novo número. Recorrendo-se aos ensaios de tração foram testadas mais de 70 combinações, tendo-se testado 3 provetes para cada combinação de parâmetros, sendo que foram os parâmetros de nomenclatura p58, p61 e p62 os únicos que apresentaram resultados consecutivos satisfatórios acima dos 30 MPa de valor de tensão de cedência. Na Tabela 3.4 pode-se consultar estas combinações de parâmetros com resultados de tensão de cedência à tração acima dos 30 MPa.

Tabela 3.4: Parâmetros de soldadura das combinações (p58, p61 e p62) com resultados satisfatórios

Provete	Potência (%)	Nº passes	t pulso (ms)	Sobreposição (%)	ϕ_{ponto} (mm)	V soldadura (mm/s)	σ_y (MPa)
p58	5	12	5	70	1	5	30.0
p61	8	8	5	70	1	5	31.8
p62	10	4	5	70	1	5	30.6

3.5.1 Estação de trabalho

Todos os ensaios foram realizados na máquina de ensaios mecânicos Shimadzu AGS-X-10kN (Figura 3.9a), que é utilizada para testes mecânicos para plásticos e materias de resistência inferior, que está presente no DEM. Para fixação dos provetes, foram usadas amarras de cunhas em junção com calços de 3mm para colmatar o desnível resultante da soldadura por sobreposição. (Figura 3.9b).

3.6 Ensaio à flexão

Após a conclusão de todos os ensaios de tração, que permitiu reduzir o espetro de combinações de parâmetros para três (p58, p61 e p62), seguiram-se os ensaios de flexão.

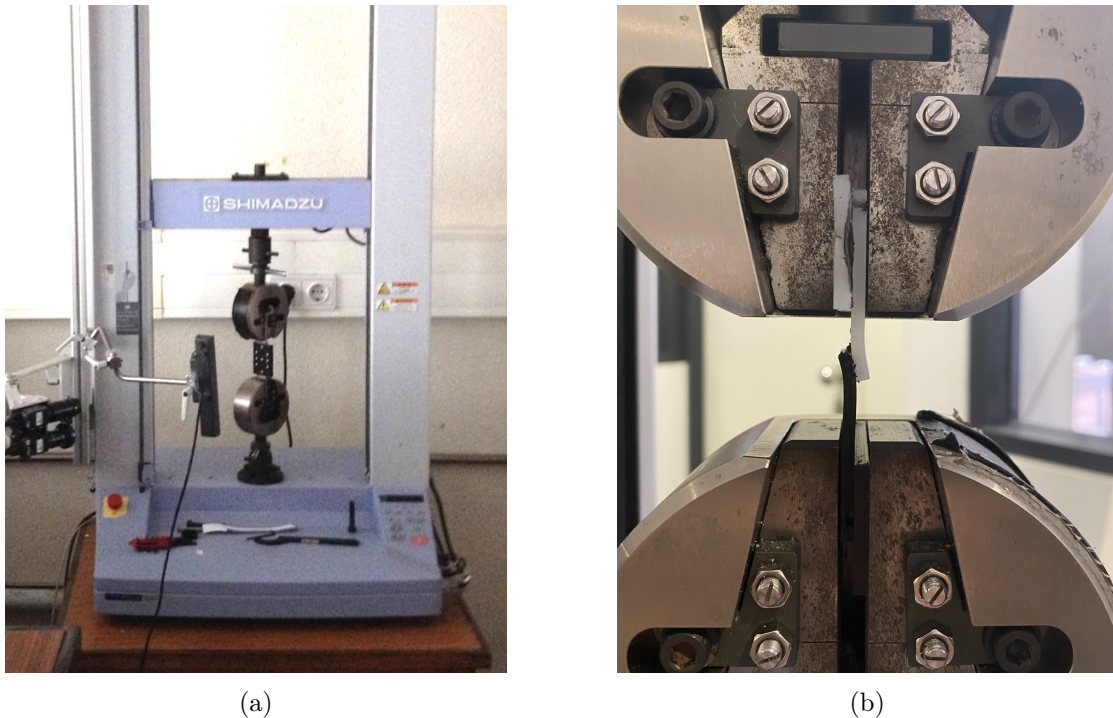


Figura 3.9: a) Shimadzu AGS-X-10kN; b) Amarras de cunhas com calços de 3 mm.

O objetivo principal passou por manter a busca pela combinação perfeita de parâmetros de soldadura, tendo como ponto de partida as 3 tipologias resultantes dos ensaios de tração.

A escolha por este tipo de ensaio deveu-se ao facto de os ensaios de fadiga a serem feitos posteriormente serem também neste formato à flexão. Desta forma foi possível consolidar e melhor compreender o comportamento do provete soldado quando submetido a estes tipos de tensão.

Com isto, conseguiu-se reduzir de três para duas combinações que apresentaram resultados mais consistentes. Além de resultados de tensão de cedência mais interessantes, também o número de passes menor foi fator diferenciador, uma vez que significa menos tempo despendido em cada soldadura. Foram os conjuntos p61 e p62 que seguiram para os ensaios de fadiga.

Os valores que resultaram de todos os ensaios, de tração e flexão, serão analisados e discutidos em detalhe no capítulo seguinte.

3.6.1 Normas de flexão

Para os ensaios à flexão foi novamente o protocolo da norma ISO 179:2018 que serviu de base para se determinar as condições e as características a serem usadas. Os pontos 5, 8 e 9 da norma indicam-nos toda a informação acerca do equipamento adequado, procedimento e cálculos necessários.

A Expressão 3.2 indica a medida de referência para o espaçamento (L) entre apoios do dispositivo de flexão de 3 pontos, consoante as espessura do provete. Já as expressões 3.3 e 3.4 foram usadas para tratamento de dados após os ensaios, para se calcular a tensão de

flexão (σ_f) e a deformação (ε_t). O ponto 5 do protocolo dá ainda informação acerca do correto posicionamento do provete no dispositivo de flexão através de uma representação esquemática (Figura 3.10).

$$L = (16 \pm 1)h \quad (3.2)$$

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (3.3)$$

sendo

F a força aplicada, em Newton;

L o espaçamento, em milímetros;

b a largura, em milímetros, do provete;

h a espessura, em milímetros, do provete;

$$\varepsilon_t = \frac{6sh}{L^2} \quad (3.4)$$

sendo

s o deslocamento;

3.6.2 Estação de trabalho

Tal como para à tração, a máquina usada para realizar os ensaios à flexão, foi a Shimadzu AGS-X-10kN presente no DEM. Em vez das garras, usou-se um dispositivo de teste de flexão de 3 pontos, sendo que foi colocado um calço de 3mm para uma vez mais compensar a sobreposição da soldadura, como se pode ver na Figura 3.11a. Assim garantiu-se um correto alinhamento do provete para execução do ensaio à flexão (Figura 3.11b).

3.7 Ensaios de fadiga à flexão

São os ensaios de fadiga à flexão que permitem que se cumpra o propósito desta investigação de estudar o comportamento de juntas soldadas quando sujeitas à fadiga. Foram feitos ensaios, até à rutura, suficientes para se garantir pelo menos três resultados similares, sendo que se realizaram ensaios nos provetes soldados para diferentes tensões, num intervalo 50% a 90% da tensão de cedência de 30 MPa. Arbitrou-se ensaiar para 50%, 60%, 70%, 80% e 90% da tensão de cedência, e assim garantir informação suficiente para posteriormente se obter uma curva S-N satisfatória.

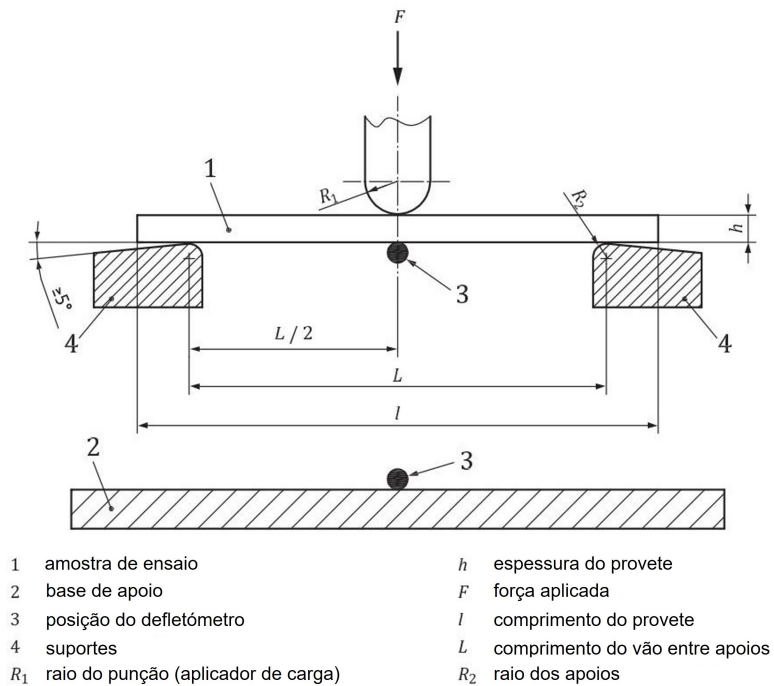
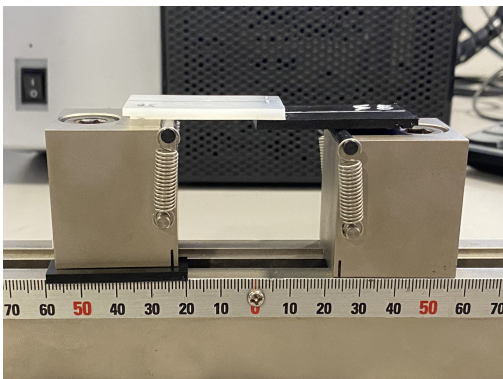
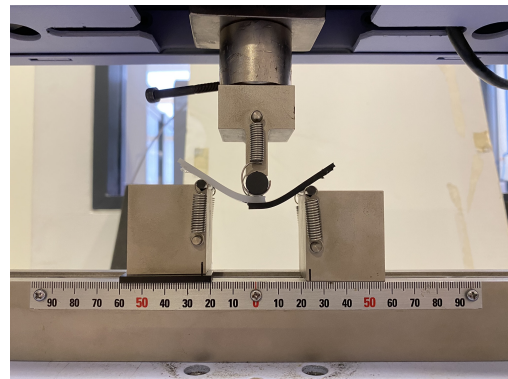


Figura 3.10: Posição da amostra de ensaio no início do ensaio



(a)



(b)

Figura 3.11: a) Apoios ensaio flexão com calço 3 mm; b) Ensaio à flexão segundo a norma ISO 178-2019.

3.7.1 Normas de fadiga à flexão

Uma vez que a norma ISO 178:2019 serviu de base para determinar as dimensões das amostras e para formar o protocolo dos ensaio de flexão, e dado que os ensaios de fadiga são do mesmo tipo, usou-se o mesmo cálculo dado por esta norma (Equação 3.2) para determinar o espaçamento dos apoios.

Além desta, recorreu-se também à norma americana, intitulada "Método de ensaio padrão para propriedades de fadiga por flexão de plásticos" [21], para consultar protocolos relacionados com ensaios que determinam propriedades de fadiga por flexão de

plásticos. No procedimento é indicado que a frequência dos ciclos pode ser de de 1 a 25 Hz, sendo recomendado 5 Hz ou menos, e é também mencionado que para cada nível de tensão devem ser realizados no mínimo 3 testes. O documento apresenta ainda valores de referência para o número de ciclos até à falha de um procedimento experimental de ensaio de fadiga à flexão, feito a 3 Hz, para uma amostra de HDPE com 0.5 in (12.7 mm) de espessura e um espaçamento dos apoios de 8 in (203.2 mm). Valores esses que podem ser consultados na Figura 3.12.

TABELA 1 Número de ciclos até à falha - Dados de repetibilidade para um laboratório e dois materiais HDPE sem enchimento

Materiais	Média	S_r	r
HDPE #1	469389	99535	281684
HDPE #2	488101	42540	120388

Figura 3.12: Valores referência para o número de ciclos até à falha de uma amostra de HDPE (0.5 in) num ensaio de fadiga à flexão segundo a norma ASTM D7774-12.

3.7.2 Estação de trabalho

A estação de trabalho usada nestes ensaios foi uma máquina Shimadzu MMT-101N (Figura 3.13) que se encontra no departamento 3 da UA, no laboratório TEMA. Esta máquina é usada para se realizarem testes dinâmicos com extensor de vídeo e com sistema magnético de micro teste, com garantia de medições precisas de micro cargas e micro deslocamentos em ensaios de alta frequência até 100 Hz.

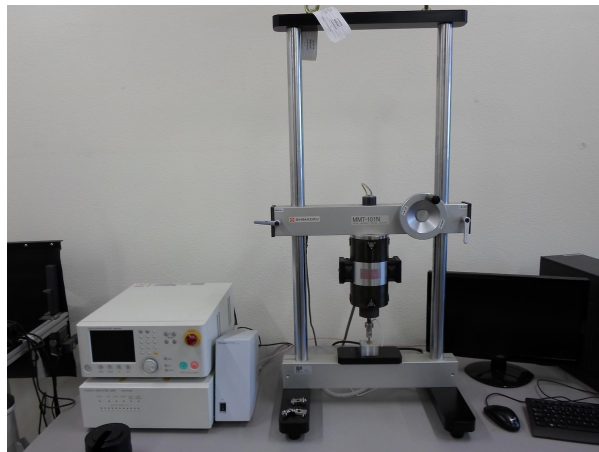


Figura 3.13: Shimadzu MMT-101N

Para esta investigação, a máquina teve de sofrer pequenas adaptações de forma a tornar viável os ensaios. Uma das adaptações foi a necessidade de adicionar à máquina um dispositivo de ensaios de flexão com sistema de 3 apoios que fosse apto para ensaios de fadiga. O funcionamento deste sistema é simples, é através de batentes que é garantido o correto posicionamento do provete a ser testado ao longo dos movimentos cíclicos do ensaio de fadiga, como representado na Figura 3.14.

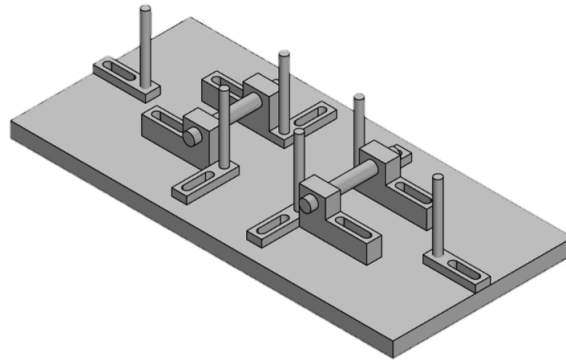
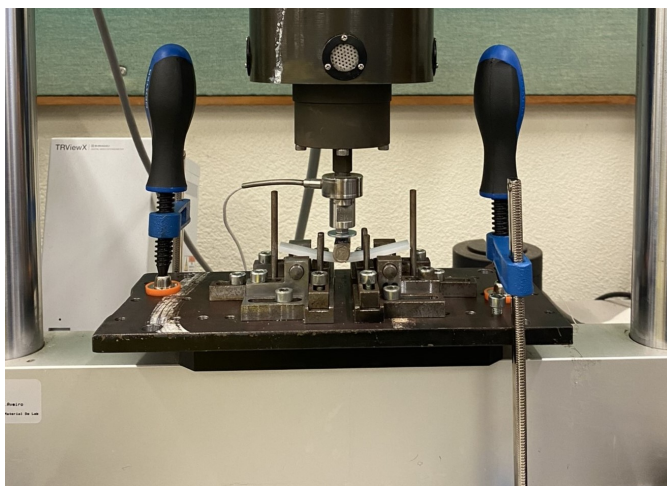


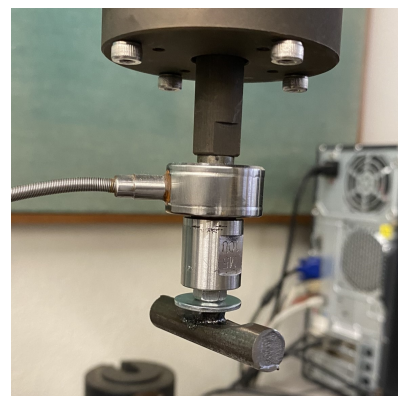
Figura 3.14: Dispositivo para fixação de provetes em ensaio de fadiga à flexão de 3 apoios

Este dispositivo teve de ser adaptado na altura dos apoios. O dispositivo tinha apoios alinhados horizontalmente, porém, dada a sobreposição resultante da soldadura, quando fosse ensaiado um provete soldado havia a necessidade de compensar esses 3mm da espessura. Por essa razão foi feito um apoio com 3 mm de diferença para que após colocação dos provetes estes estivessem perfeitamente alinhados horizontalmente com o punção que faz o movimento cíclico. Na Figura 3.15a, pode observar-se este dispositivo fixo à máquina.

Outra adaptação, foi feita no punção em si, uma vez que a máquina originalmente não possuía um punção cilíndrico que cumprisse com a norma ISO 178:2019, e por essa razão desenvolveu-se um sistema simples de parafuso-varão para fácil acoplação à máquina (Figura 3.15b).



(a)



(b)

Figura 3.15: a) Dispositivo fixação para ensaio de fadiga à flexão de 3 pontos; b) Punção adicionado à máquina Shimadzu MMT-101N para viabliziar o ensaio de fadiga à flexão.

3.7.3 Parâmetros do ensaio à fadiga

A grande maioria dos parâmetros usados foram os recomendados por defeito pelo software da máquina de ensaios, apenas foi configurado o movimento cíclico para onda sinusoidal, determinou-se um mínimo de 5 N de força a ser aplicado pelo punção para garantir que o provete nunca "descola" do punção e com isso evitar-se que saísse de posição, e escolheu-se o método de paragem do ensaio.

Limites máximos e mínimos, tanto de força como de deslocamento foram estabelecidos como forma de prevenção, assim foi garantido que em caso de ocorrer um comportamento anormal ao longo do ensaio a paragem de emergência seria acionada.

Importante referir que o software usado apresenta uma limitação relacionada com a obtenção e gravação de dados, e por isso teve também de ser pré-definido os ciclos e número de pontos a ser gravados. Com base na lógica e no bom senso, para os ensaios mais lentos e de previsível maior número de ciclos fez-se o registo da onda sinusoidal a cada 1000 ciclos, até 1 milhão de ciclos. Para os ensaios rápidos, de menor duração e menor número de ciclos optou-se por registar a cada 100 ciclos, até ao máximo de 100.000 ciclos.

A Figura 3.16 ilustra o aspeto do painel de controlo do software enquanto um ensaio decorria, sendo possível consultar em tempo real alguns dados, como por exemplo, posição mínima e máxima do punção a cada ciclo, a força mínima e máxima aplicada a cada ciclo, gráfico da curva sinusoidal do movimento cíclico e ainda o grafismo da curva S-N.

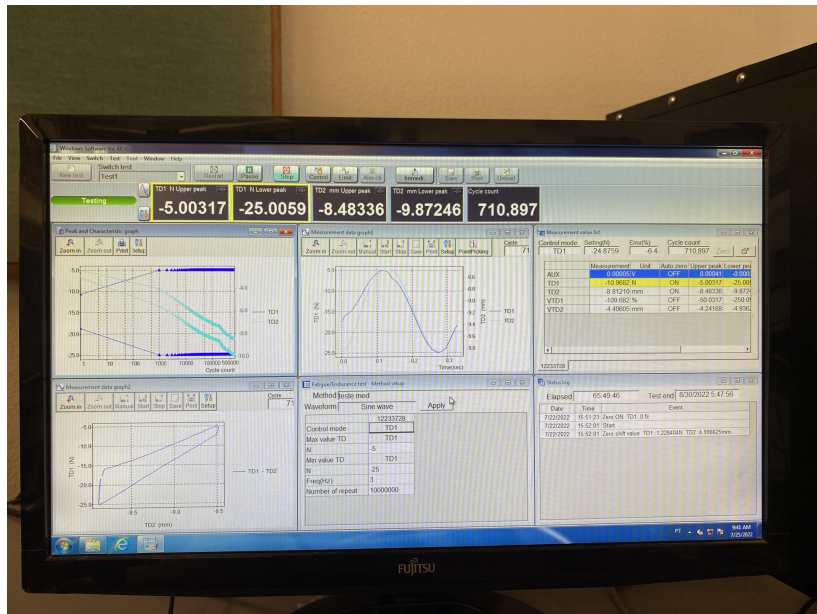


Figura 3.16: Imagem do painel controlo do software da máquina Shimadzu MMT-101N usada para realizar os ensaios de fadiga

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Parte III

Resultados e discussão

Capítulo 4

Resultados e discussão

4.1 Resultados dos ensaios de tração

Para se validar a soldadura laser, e respectivos parâmetros que se iriam usar em toda a investigação, foram feitas otimizações ao processo de soldadura recorrendo-se a ensaios de tração. Após mais de 70 combinações conseguiu-se chegar a valores de tensão de cedência satisfatórios. A Tabela 4.1 apresenta a evolução do conjunto de parâmetros desde a primeira amostra testada (p0), até às que apresentaram melhores resultados de tensão de cedência à tração (p58, p61 e p62).

Tabela 4.1: Parâmetros de soldadura (iniciais e finais) após ensaios à tração e respetivas tensões de cedência

Provete	Potência (%)	N ^o passes	t pulso (ms)	Sobreposição (%)	ϕ_{ponto} (mm)	V soldadura (mm/s)	σ_y (MPa)
p0	3	-	10	65	2	5	9.5
p58	5	12	5	70	1	5	30.0
p61	8	8	5	70	1	5	31.8
p62	10	4	5	70	1	5	30.6

O provete p0 representa a amostra inicial que foi primeiramente testada, uma vez que seguiu os valores de referência dados por [10]. Os provetes p58, p61 e p62 são resultantes das otimizações feitas ao longo da investigação e que se destacaram por apresentarem de forma constante resultados acima dos 30 MPa de tensão de cedência.

Na Figura 4.1, pode-se observar graficamente a evolução da relação tensão-deslocamento das amostras, sendo notória a evolução da tensão de cedência conseguida através da otimização da combinação de parâmetros usados na soldadura laser.

A otimização dos parâmetros de soldadura é visível na Figura 4.2. Este registo fotográfico efetuou-se no final dos ensaios de tração, após rutura das juntas soldadas.

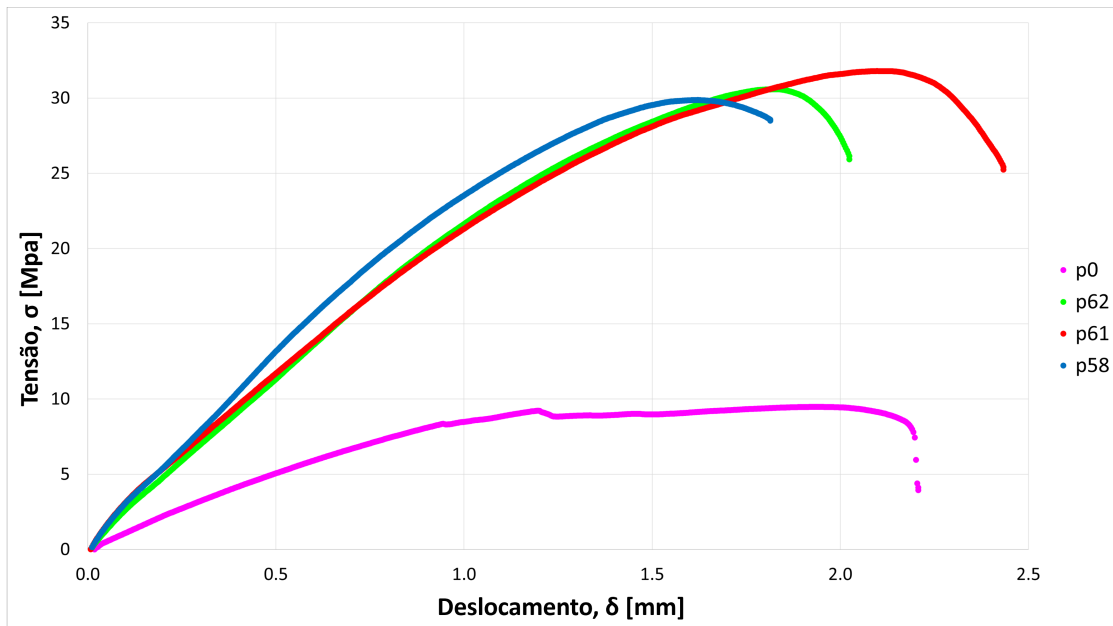


Figura 4.1: Evolução das curvas Tensão vs Deslocamento das juntas soldadas

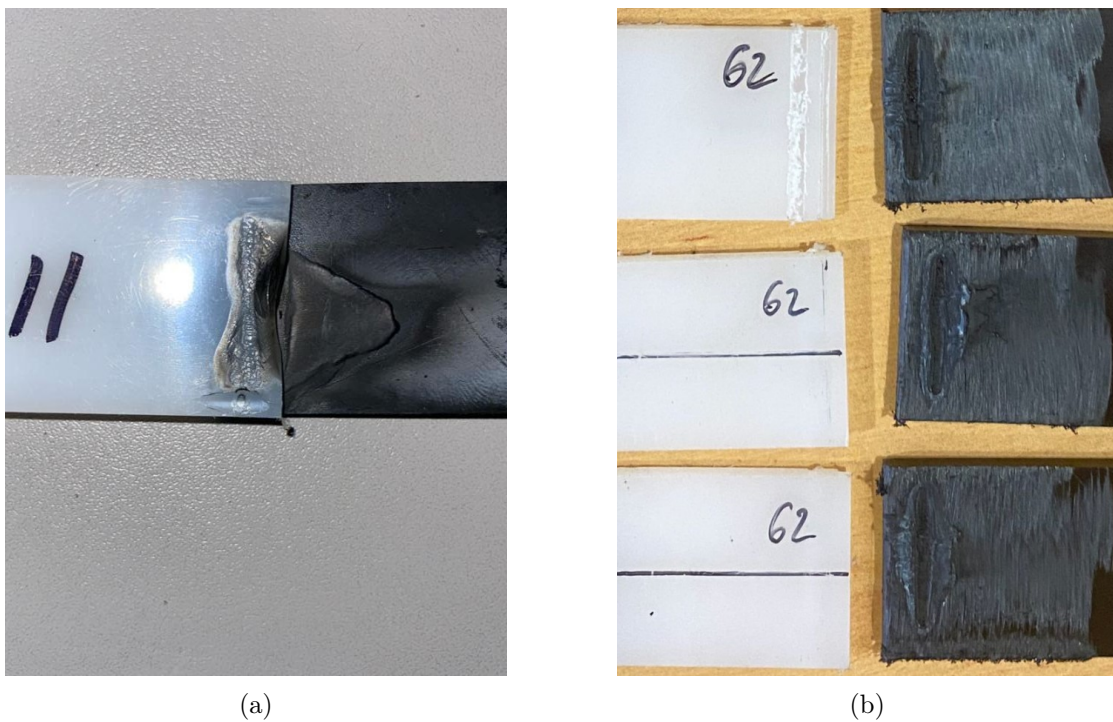


Figura 4.2: a) Aspecto da soldadura nas amostras iniciais (sinais de explosão de material e irregularidades); b) Aspecto da soldadura após otimização de parâmetros (soldadura uniforme e nítida).

4.2 Resultados dos ensaios de flexão

Após conseguir-se obter uma solda satisfatória, passou-se para os ensaios de flexão, sendo que se fizeram ensaios a 1 mm/min, seguindo a recomendação da norma ISO178:2019.

4.2.1 Provetes de HDPE (material de base)

A Figura 4.3 apresenta graficamente as curvas tensão-deformação para provetes de material usado na investigação no seu estado bruto (HDPE branco e preto), após as amostras serem submetidas a ensaio à flexão a 1 mm/min.

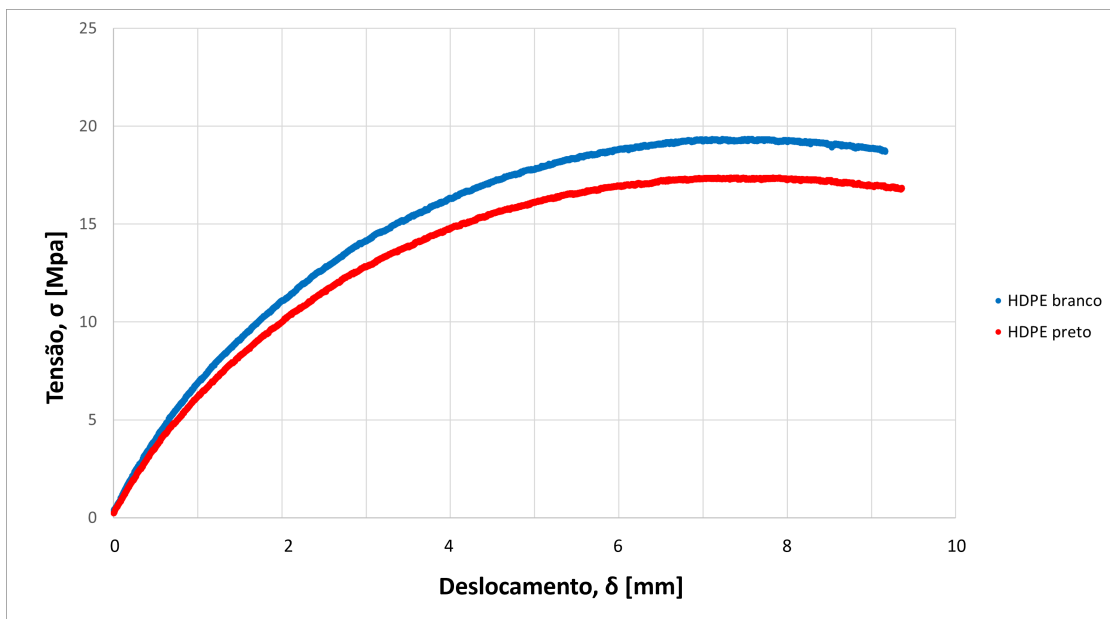


Figura 4.3: Curvas Tensão vs Deslocamento das amostras de material de base HDPE branco e preto (ensaio flexão a 1 mm/min)

Foi referido anteriormente que os valores padrão da norma ASTM D7774-12 resultam de um ensaio a uma frequência de 3 Hz. Visto que são os valores padrão disponíveis, e de forma a aproximar cada ensaio desta investigação o mais próximo possível das condições da norma, optou-se por também ensaiar à flexão as amostras de material base e provetes soldados a uma frequência de 3 Hz. Para isso encontrou-se o ponto de transição elástico-plástico do ensaio a 1 mm/min e usou-se o deslocamento associado para calcular a velocidade pretendida. A Tabela 4.2 resume o cálculo feito.

	x_y (mm)	σ_y (MPa)	f (Hz)	x (mm) (p/ ciclo)	v (mm/min)
HDPE branco	2.8766	17.05	3	$=2*2.8766 = 5.7532$	1035.6
HDPE preto	2.8657	15.57	3	$=2*2.8657 = 5.7314$	1031.6

Tabela 4.2: Cálculo da velocidade de ensaio a 3 Hz tendo como base o deslocamento até à tensão de cedência

Após os cálculos, arbitrou-se que 1000 mm/min seria a velocidade de ensaio a ser também testada. A Figura 4.4 apresenta graficamente as curvas tensão-deformação para o material usado na investigação no seu estado bruto (HDPE branco e preto), após as amostras serem submetidas a ensaio à flexão a 1000 mm/min.

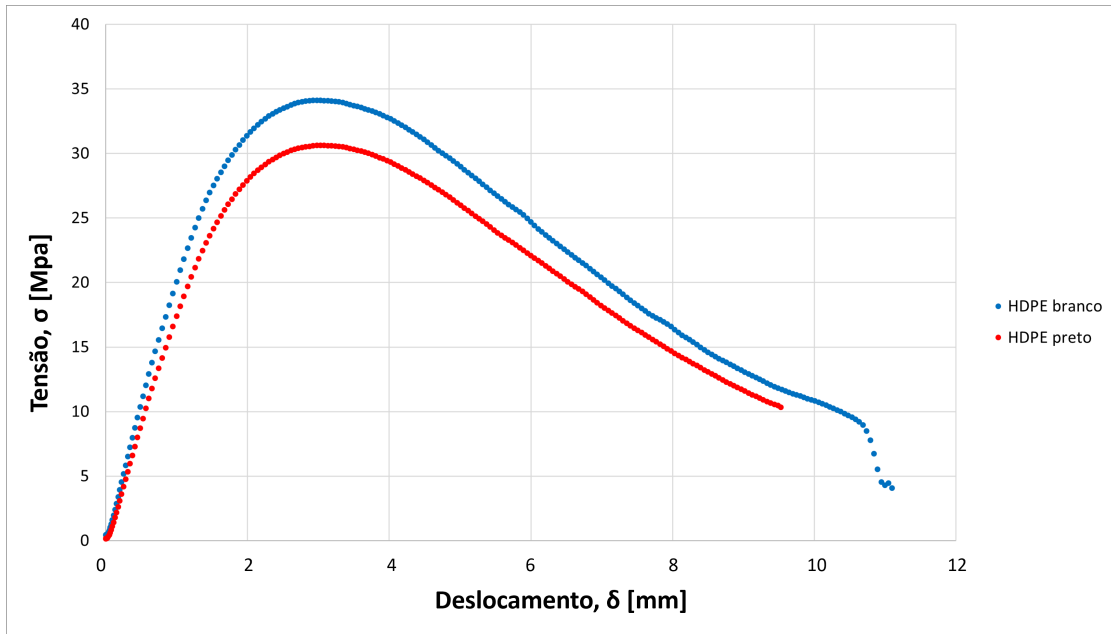


Figura 4.4: Curvas Tensão vs Deslocamento das amostras de material base HDPE branco e preto (ensaio flexão a 1000 mm/min)

4.2.2 Provetes soldados (p58, p61, p62)

A Figura 4.5 apresenta graficamente as curvas tensão-deformação para os provetes soldados após serem submetidos a ensaio à flexão a 1 mm/min, de acordo com a norma ISO178:2019.

A Figura 4.6 apresenta graficamente as curvas tensão-deformação para os provetes soldados após serem submetidos a ensaio à flexão a 1000 mm/min.

As diferenças de resistência mecânica do material, visíveis nas Figuras 4.5 e 4.6, estão relacionadas com o fenômeno de endurecimento dinâmico. Num ensaio mecânico o material reage de forma diferente a taxas de deformação rápidas uma vez que as falhas cristalinas que causam as deformações têm menos tempo para se reorganizar, resultando numa maior resistência à deformação [25].

Em anexo encontram-se as Figuras A.2 e A.3 que mostram graficamente o comparativo entre as os provetes de material base e os provetes soldados nos ensaios à flexão a 1 mm/min e 1000 mm/min.

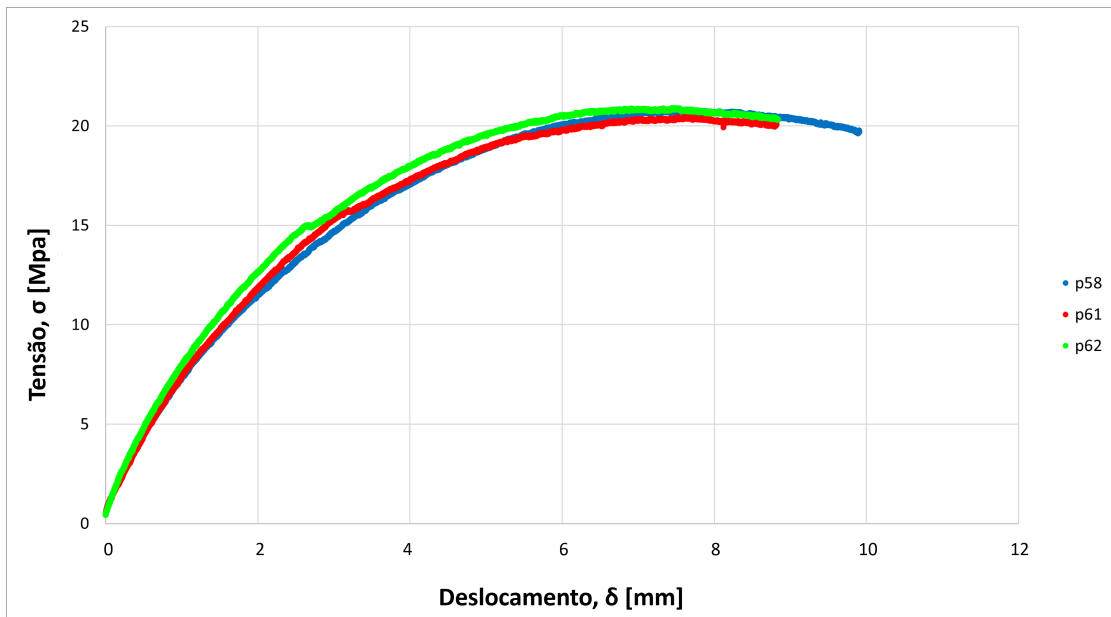


Figura 4.5: Curvas Tensão vs Deslocamento para os provetes soldados (ensaio flexão 1 mm/min)

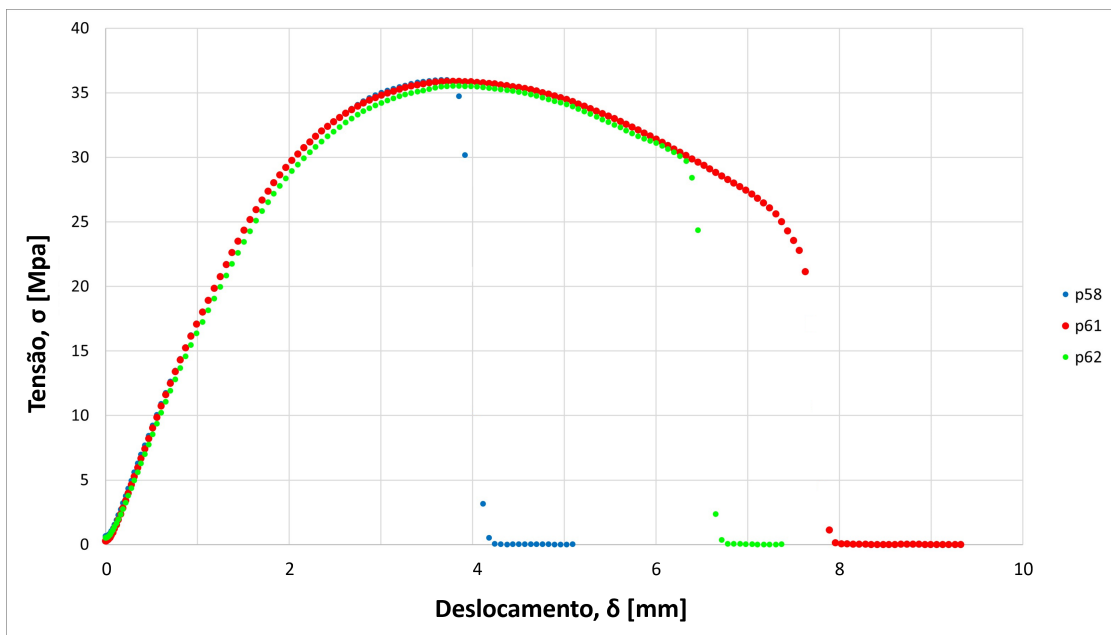


Figura 4.6: Curvas Tensão vs Deslocamento para os provetes soldados (ensaio flexão 1000 mm/min)

4.3 Resultados dos ensaios de fadiga à flexão

Nos ensaios de fadiga optou-se por apenas se ensaiar os p61 e p62, além do material base HDPE. Isto porque nos ensaios de flexão as curvas mostraram-se sempre muito

similares tanto para 1 mm/min como 1000 mm/min. O fator diferenciador pendeu pelo facto de a combinação p58 ser de 12 passes, em vez dos 8 passes na p61 e dos 4 passes na p62, tornando o p58 muito mais dispendioso em termos de tempo de soldadura sem recompensa de resultados.

4.3.1 Provetes de HDPE (material base)

Para os provetes de material base, foi testada a fadiga à flexão unicamente com a condição de 3 Hz e 50% de tensão de cedência aplicada. Isto porque o objetivo do trabalho não focava o estudo da fadiga do material HDPE, mas sim de juntas de HDPE. Esta análise ao material base teve exclusivamente a intenção de concluir se a pigmentação preta aplicada ao material influenciava a sua resistência à fadiga, quando comparado com o material natural.

A Figura 4.7 apresenta a evolução do deslocamento do material base ao longo dos ciclos do ensaio de fadiga à flexão (50 % tensão de cedência e 3 Hz frequência) para o HDPE branco e preto.

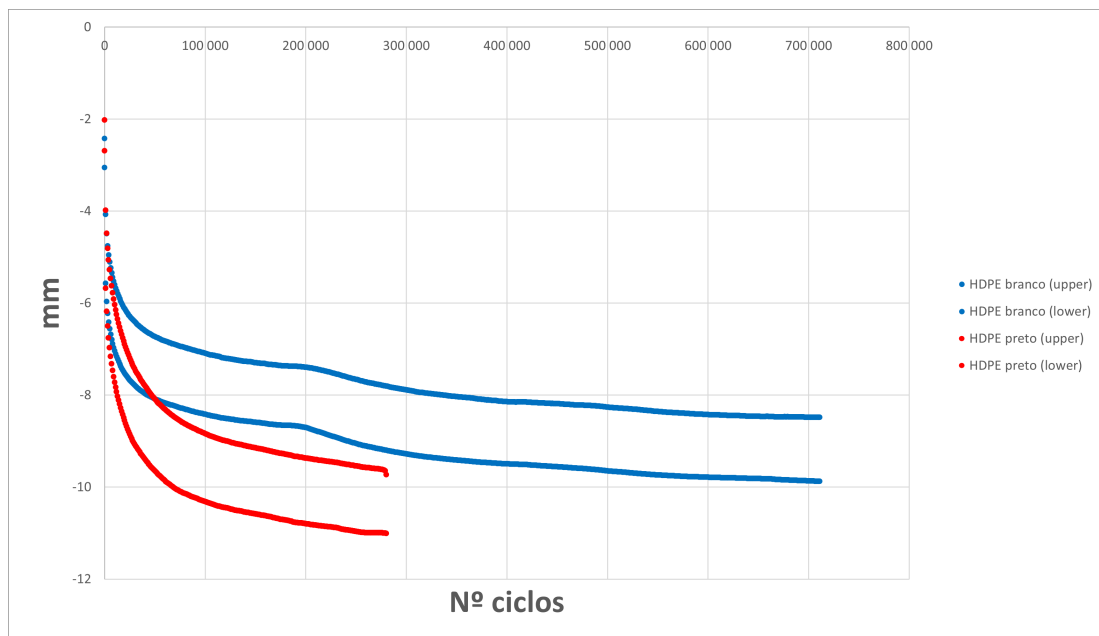


Figura 4.7: Evolução do deslocamento do provete ao longo do ensaio de fadiga à flexão com provetes de material base (3Hz)

4.3.2 Provetes soldados (p61 e p62)

Dado o propósito desta dissertação, e contrariamente aos provetes base, para os soldados o estudo da fadiga foi largamente aprofundado, tendo-se variado a % de tensão de cedência aplicada assim como a frequência cíclica da aplicação de carga.

A Figura 4.8 apresenta a evolução do deslocamento do provete ao longo dos ciclos do ensaio de fadiga à flexão a 50 % tensão de cedência com 3 Hz vs 30 Hz frequência para o provete soldado p61.

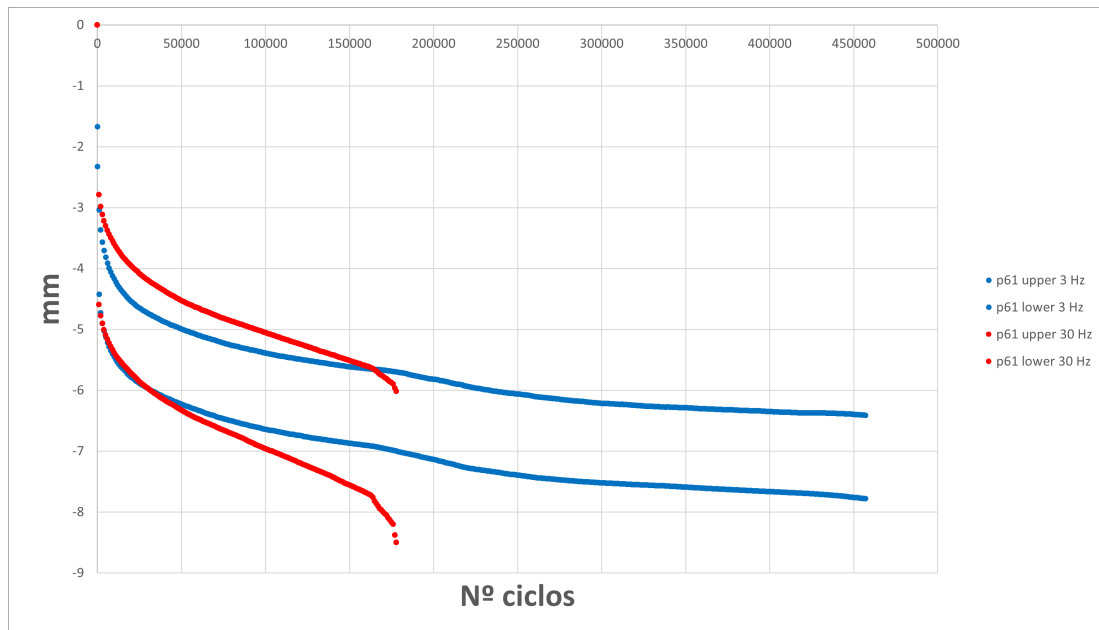


Figura 4.8: Evolução do deslocamento do provete ao longo do ensaio de fadiga à flexão a 50 % tensão de cedência com 3 Hz vs 30 Hz frequência para o provete soldado p61.

A Figura 4.9 apresenta a evolução do deslocamento do provete ao longo dos ciclos do ensaio de fadiga à flexão a 50 % tensão de cedência com 3 Hz vs 30 Hz frequência para o provete soldado p62.

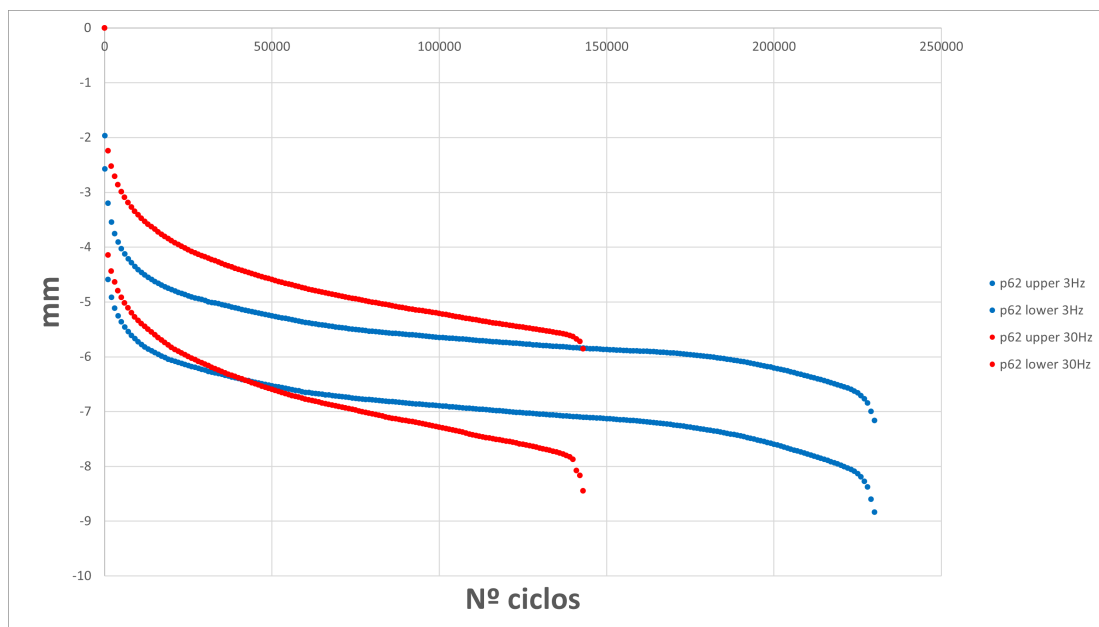


Figura 4.9: Evolução do deslocamento do provete ao longo do ensaio de fadiga à flexão a 50 % tensão de cedência com 3 Hz vs 30 Hz frequência para o provete soldado p62.

Numa estratégia de análise diferente, as Figuras 4.10 e 4.11 apresentam a mesma

evolução do deslocamento dos provetes p61 e p62 (50% tensão e 3 vs 30 Hz), mas optando por uma estratégia de deslocamento médio em cada ciclo.

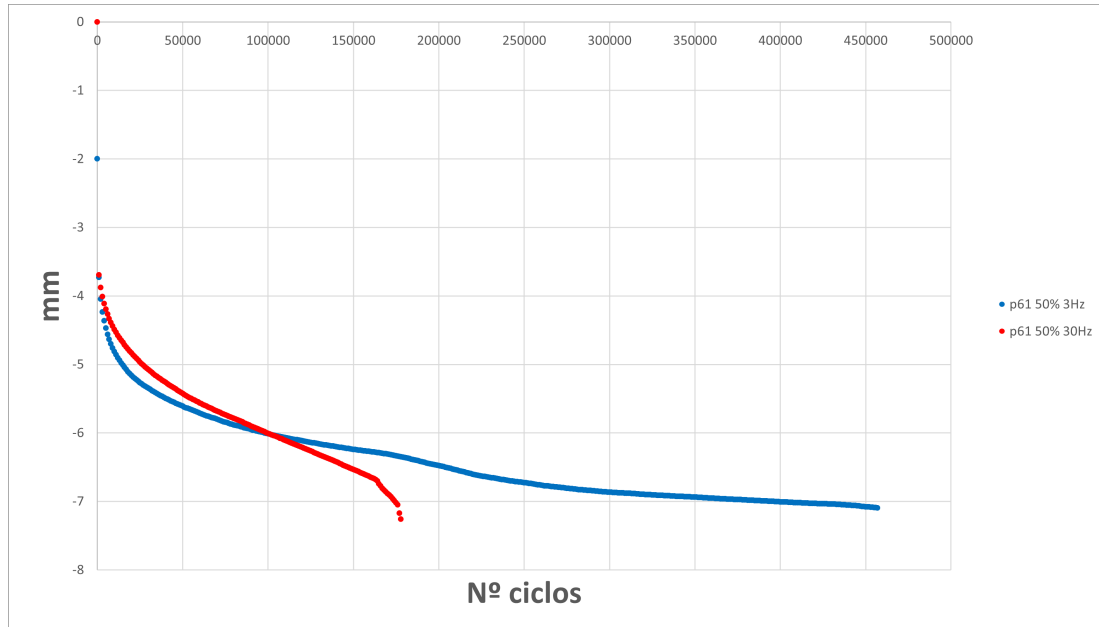


Figura 4.10: Evolução do deslocamento médio do provete ao longo do ensaio de fadiga à flexão a 50 % tensão de cedência (3 Hz vs 30 Hz) para o provete soldado p61

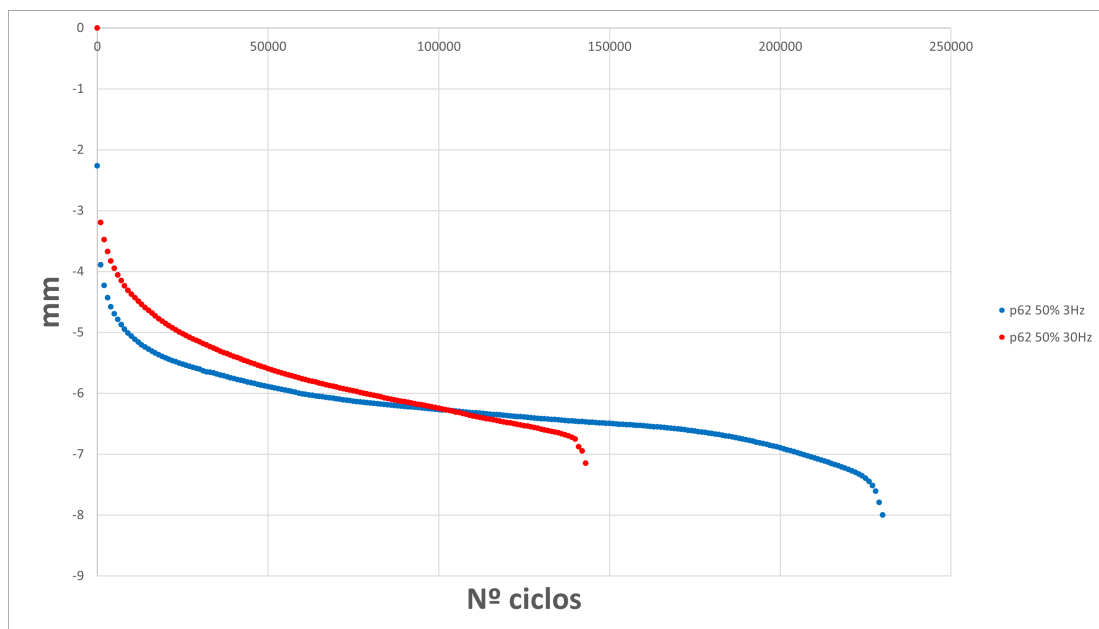


Figura 4.11: Evolução do deslocamento médio do provete ao longo do ensaio de fadiga à flexão a 50 % tensão de cedência (3 Hz vs 30 Hz) para o provete soldado p62

Em anexo encontram-se outros grafismos da evolução do deslocamento dos provetes

soldados (p61 e p62), para ensaios de fadiga à flexão com cargas aplicadas correspondentes a 60, 70, 80 e 90% da tensão de cedência, com 30 Hz de frequência cíclica.

Os ensaios a 3Hz não foram tão explorados por complicações relacionadas com o tempo excessivo despendido em cada ensaio. Dada a extensão temporal de cada ensaio (muitas vezes superiores a 40 horas), tornou-se hábito fatores alheios interferirem, pelo que após algumas tentativas optou-se por continuar a investigação exclusivamente com os 30 Hz.

4.3.3 Curvas S-N (após ensaios de fadiga à flexão)

Após realizados todos os ensaios de fadiga necessários, compilaram-se dados, e chegou-se à curva S-N para as juntas de HDPE soldadas por laser. A Figura 4.12 apresenta as curvas S-N para a amostra p61 e p62.

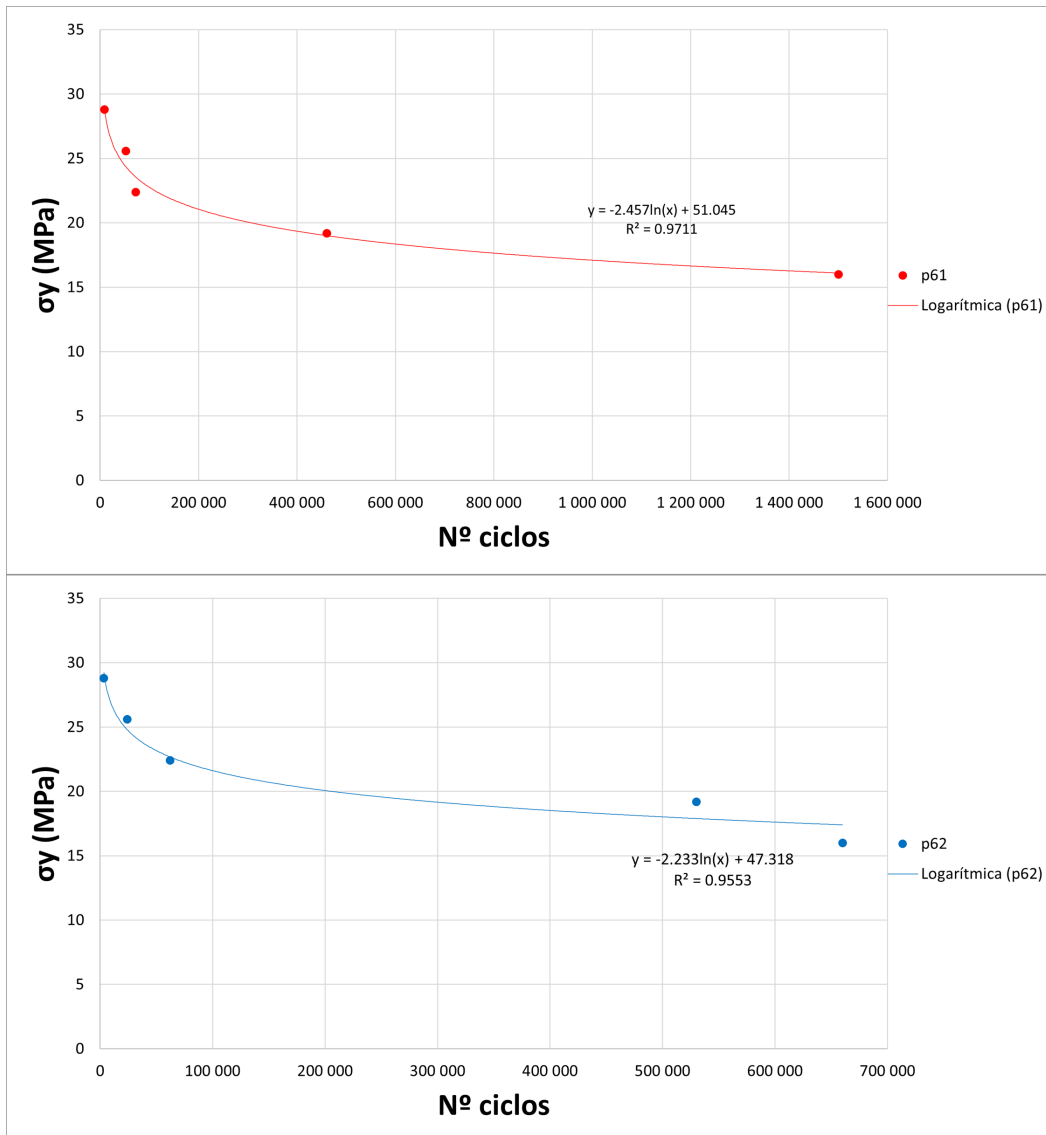


Figura 4.12: Curva S-N para provetes soldados p61 e p62 (30 Hz)

4.4 Discussão

Para simplificar a discussão de resultados, apresenta-se o resumo que sintetiza os resultados obtidos para os ensaios de tração (Tabela 4.3), flexão (Tabela 4.4) e fadiga (Tabela 4.5).

Provete	$\sigma_y (MPa)$
HDPE (material de base)	28.0
p58	30.0
p61	31.8
p62	30.6

Tabela 4.3: Síntese dos resultados dos ensaios à tração

$\sigma_y (MPa)$	HDPE branco	HDPE preto	p58	p61	p62
1 mm/min	17.20	15.60	16.50	15.93	15.71
1000 mm/min	41.11	38.71	34.94	31.32	32.62

Tabela 4.4: Síntese dos resultados dos ensaios à flexão

p61		
$\sigma_y (%)$	$\sigma_y (MPa)$	Nº ciclos (média)
50	15	1.500.000
60	18	460.000
70	21	72.000
80	24	52.000
90	27	8.000
p62		
$\sigma_y (%)$	$\sigma_y (MPa)$	Nº ciclos (média)
50	15	660.000
60	18	530.000
70	21	62.000
80	24	24.000
90	27	3.300

Tabela 4.5: Síntese dos resultados dos ensaios à fadiga para os provetes soldados (p61 e p62)

Apesar de não ser o foco desta dissertação, pelos resultados dos ensaios de tração fica perceptível que a tensão de cedência nos provetes soldados consegue ser cerca de 10% maior em relação aos provetes de material de base, havendo uma melhoria nesse caso em particular.

Analisando os resultados dos ensaio à flexão, fica claro que o provete HDPE branco apresenta valores de maior resistência a tensões deste tipo em relação aos restantes. Realçando o facto de terem sido feitos alguns ensaios extraordinários nesta fase, para confirmar com maior segurança esta diferença significativa entre o material de base branco e preto. No que diz respeito aos provetes soldados, fica também claro que os resultados são bastante satisfatórios, já que se consegue garantir uma resistência à flexão acima dos 30 MPa em todos as amostras soldadas (p58, p61, p62).

A análise aos resultados obtidos nos ensaios de fadiga é mais interessante quando feita de um ponto de vista gráfico. O objetivo maior de toda a investigação passava precisamente por obter as curvas S-N das juntas de HDPE soldadas. Ambos os provetes soldados p61 e p62 obtiveram linhas de tendência logarítmica de formato desejável e apresentam um coeficiente R^2 acima dos 0.95. Destaca-se o p61 como o conjunto de parâmetros de soldadura com maior resistência à fadiga, uma vez que apresenta de forma coesa maior número de ciclos de resistência às tensões cíclicas.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Parte IV

Conclusões e trabalhos futuros

Capítulo 5

Conclusões e trabalhos futuros

5.1 Conclusões

No decorrer da investigação que compõe esta dissertação foram desenvolvidas juntas de termoplástico soldadas por laser, que posteriormente foram submetidas a ensaios de tração e flexão para validação do processo de soldadura laser, e por fim analisadas à fadiga. O material de base usado para se desenvolver as juntas foi um polietileno de alta densidade, fornecido em folhas de 3 mm de espessura, em cor branca e preta. A soldadura laser realizada foi feita por transmissão, seguindo a técnica de transmissão por contorno, com uma configuração de junta sobreposta.

Como resultado desta investigação, e tendo em consideração o acima mencionado, as conclusões são as seguintes:

- A escolha correta do número de passes de soldadura é relevante para que se evitem acumulações de calor indesejáveis, e por conseguinte explosões de energia e de material que prejudicam a soldadura de juntas.
- As juntas soldadas de HDPE apresentam tensões de cedência à flexão superiores a 30 MPa.
- As juntas soldadas de HDPE apresentam aproximadamente 80% da capacidade de resistência à flexão do material base.
- As curvas S-N, que representam o comportamento à fadiga das juntas soldadas de HDPE, obtidas são de formato expectável e desejável.

5.2 Trabalhos futuros

Nesta última secção, a proposta de trabalhos futuros serve de incentivo à continuidade da investigação empregue nesta dissertação. Estas propostas conferem maior robustez a este trabalho e permitem analisar perspectivas complementares que são interessantes e valiosas para a elevação deste estudo.

Posto isto, e tendo em conta as conclusões, seria importante:

- Estudar e desenvolver um dispositivo de fixação específico para ser usado na soldadura laser por sobreposição
- Estudar e otimizar a soldadura laser de termoplásticos, em especial do HDPE, recorrendo a análise raio X, de forma a melhor compreender como o número de passes influencia a condução de calor entre juntas, e por consguinte os fenómenos explosivos resultantes de acumulação de energia
- Estudar outro tipo de geometria de juntas
- Nos ensaios de fadiga, aprofundar o estudo do comportamento das juntas a baixas frequências cíclicas (3 Hz)
- Melhorar o dispositivo de fixação de juntas para ensaios de fadiga. Foi notado que uma ligeira diferença de aperto no parafuso que fixa os batentes, era suficiente para alterar o número de ciclos registado para as mesmas condições.

Apêndice A

Anexos

PE
FICHA TÉCNICA

PROPRIEDADES	MÉTODOS DE TESTE	UNIDADES	PE-HD
COR		-	BRANCO/PRETO VERDE/OUTRAS
DENSIDADE	ISO 1183-1	g/cm ³	0.96
PESO MOLECULAR	-	10 ⁵ g/mol	0.5
ABSORÇÃO DE ÁGUA A 23°C ATÉ À SATURAÇÃO ¹	-	%	<0.1
PROPRIEDADES TÉRMICAS²			
TEMPERATURA DE FUSÃO (DSC, 10°C/MIN)	ISO 11357-1/-3	°C	135
CONDUTIVIDADE TÉRMICA A 23°C	-	W/(K.m)	0.40
COEFICIENTE DE EXPANSÃO TÉRMICA LINEAR			
ENTRE 23-100°C	-	M/(m.K)	150 x 10 ⁻⁶
TEMPERATURA MÁXIMA DE SERVIÇO NO AR			
PARA CURTOS PERÍODOS ³	-	°C	120
CONTINUAMENTE: PARA 20.000H ⁴	-	°C	80
TEMPERATURA MÍNIMA DE SERVIÇO ⁵	-	°C	-100
TEMPERATURA DE DEFORMAÇÃO SOB CARGA			
MÉTODO A: 1.8 MPa	ISO 75-1/-2	°C	44
TEMPERATURA DE AMOLECIMENTO VICAT - VST/B50	ISO 306	°C	80
INFLAMABILIDADE ⁶	-		
"ÍNDICE DE OXIGÊNIO"	ISO 4589-1/-2	%	<20
DE ACORDO COM UL94 (6MM DE ESPESSURA)	-	-	HB
PROPRIEDADES MECÂNICAS A 23°C⁷			
TESTE À TRAÇÃO⁸			
RESISTÊNCIA À TRAÇÃO ⁹	ISO 527-1/-2	MPa	28
RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA RUTURA	ISO 527-1/-2	%	>50
MÓDULO DE ELASTICIDADE ¹⁰	ISO 527-1/-2	MPa	1300
TESTE DE COMPRESSÃO¹¹			
RESISTÊNCIA A 1/2/5% DE DEFORMAÇÃO NOMINAL ¹⁰	ISO 604	MPa	12/18.5/26.5
RESISTÊNCIA AO IMPACTO DE CHARPY SEM ENTALHE ¹²	ISO 179-1/1eU	KJ/m ²	s/ FRATURA
RESISTÊNCIA AO IMPACTO DE CHARPY COM ENTALHE	ISO 179-1/1eA	KJ/m ²	105P
RESISTÊNCIA AO IMPACTO DE CHARPY COM ENTALHE DUPLO DE 14 ¹³	ISO 11542-2	KJ/m ²	25
DUREZA POR BOLA DE AÇO ¹⁴	ISO 2039-1	N/mm ²	48
DUREZA SHORE D (15 S) ¹⁴	ISO 868	-	62
PROPRIEDADES ELÉCTRICAS A 23°C			
RIGIDEZ ELÉCTRICA ¹⁵	IEC 60243-1	kV/mm	45
RESISTIVIDADE VOLUMÉTRICA	IEC 60093	Ohm.cm	> 10 ¹⁴
RESISTIVIDADE SUPERFICIAL	IEC 60093	Ohm	> 10 ¹²
PERMEABILIDADE RELATIVA ε _r : A 100HZ	IEC 60250	-	2.4
A 1MHZ	IEC 60250	-	2.4
FATOR DE DISSIPAÇÃO DIELECTRICA TAN δ : A 100HZ	IEC 60250	-	0.0002
A 1MHZ	IEC 60250	-	0.0002
ÍNDICE DE SEGUIMENTO COMPARATIVO (CTI)	IEC 60112	-	600

Figura A.1: Características e propriedades do HDPE segundo a ficha técnica do fabricante PolyLanema

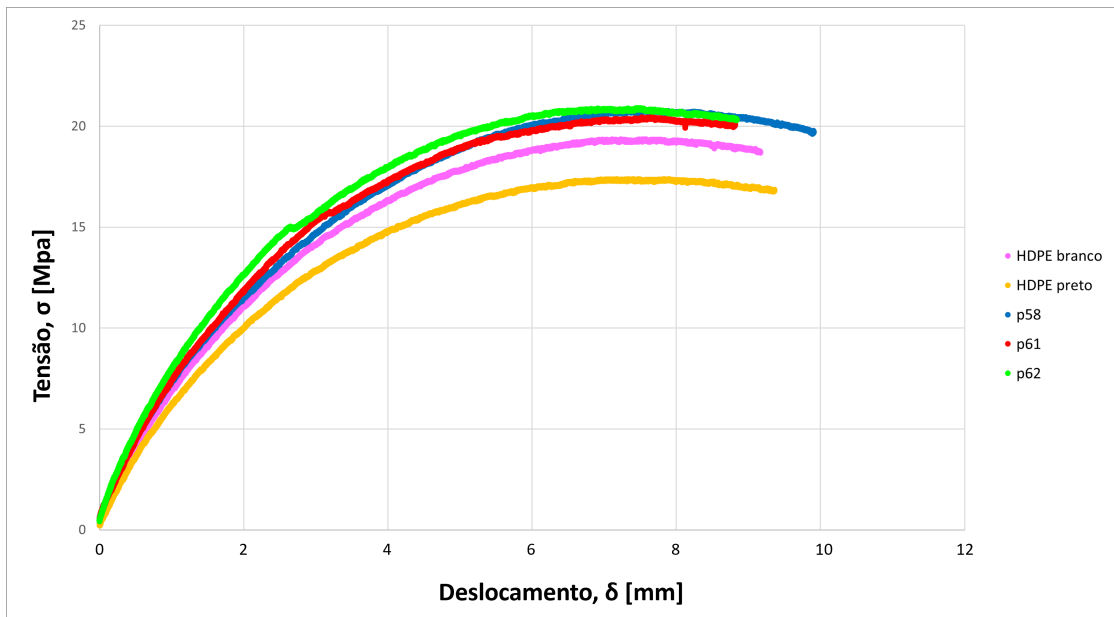


Figura A.2: Comparativo Curvas Tensão vs Deslocamento de provetes material base a provetes soldados em ensaio à flexão a 1 mm/min

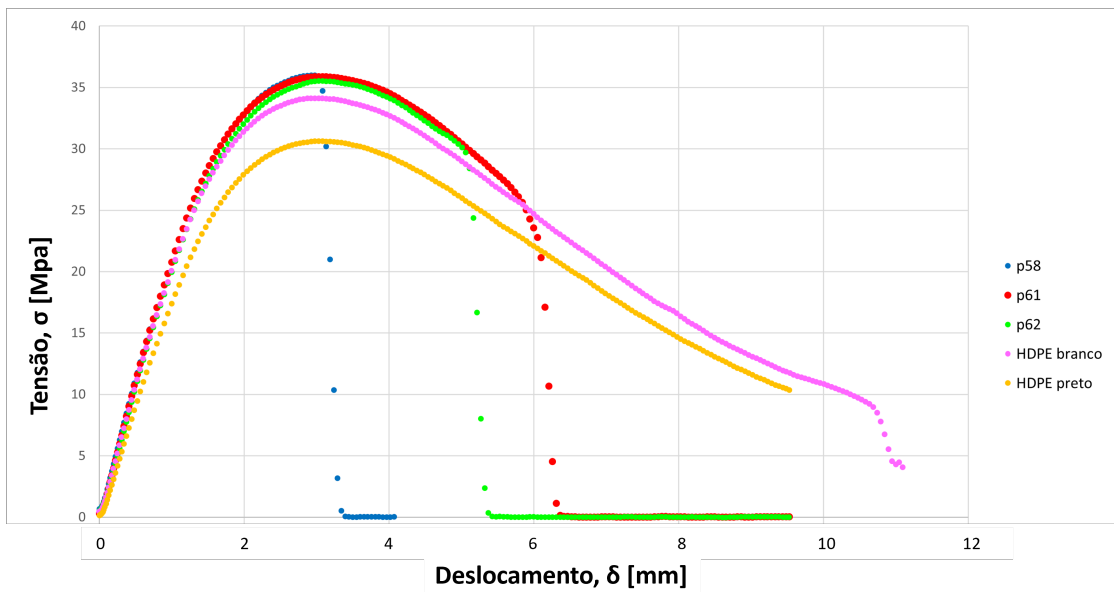


Figura A.3: Comparativo Curvas Tensão vs Deslocamento de provetes material base a provetes soldados em ensaio à flexão a 1000 mm/min

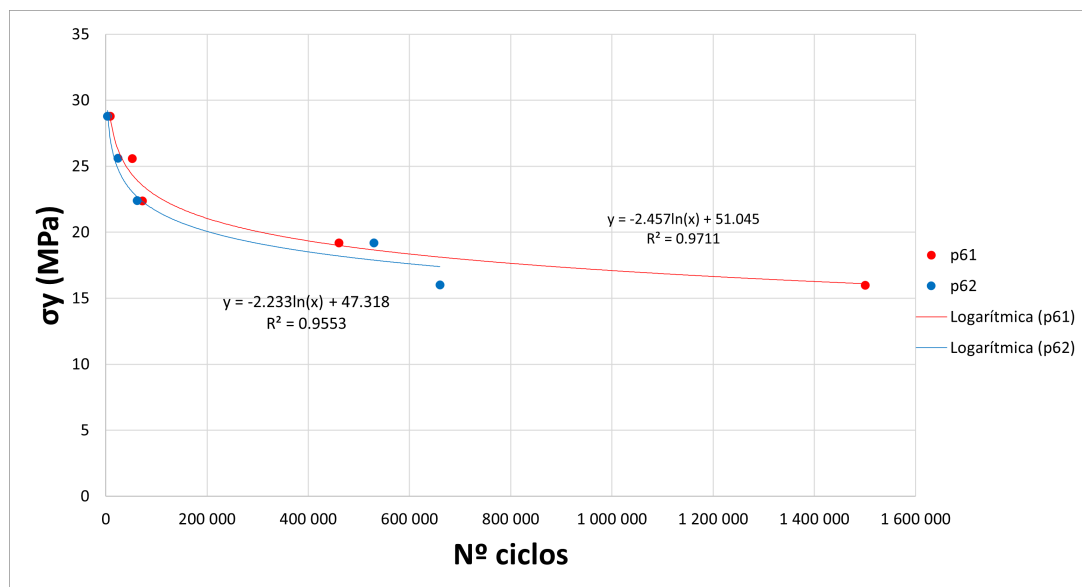


Figura A.4: Comparativo Curvas SN para provetes soldados p61 e p62 (30 Hz)

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Referências

- [1] Kamal H. Balani, N. Chandrasekaran, and S. K. Albert. *Laser Welding of Plastics*. Springer, 2016.
- [2] C. P. Carpenter. Thermoplastics: Economic overview. *The Greater Milwaukee dental bulletin*, 36:77–111, 1 2016.
- [3] Bappa Acherjee, Dipten Misra, Dipankar Bose, and Sanjib Acharyya. Optimal process design for laser transmission welding of acrylics using desirability function analysis and overlay contour plots. *IJMR*, 6:49–61, 01 2011.
- [4] James M Margolis. *Engineering plastics handbook*. McGraw-Hill Education, 2006.
- [5] Jeff Hecht. Short history of laser development. *Optical Engineering*, 49:091002, 9 2010.
- [6] Seiji Katayama. *Handbook of laser welding technologies*. Woodhead Publishing Limited, 2013.
- [7] S. Katayama. New developments in laser welding. *New Developments in Advanced Welding*, pages 158–197, 1 2005.
- [8] S Katayama. *Understanding and improving process control in pulsed and continuous wave laser welding*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2010.
- [9] Nasir. Ahmed. *New developments in advanced welding*. CRC Press, 2005.
- [10] João Pedro Castelo Quintão. Soldadura laser pulsado nd:yag de termoplásticos. Dissertação de Mestrado. Universidade de Aveiro, 2018.
- [11] M. Naeem and M. Brandt. *Nd: YAG laser welding*. Elsevier Ltd., 2005.
- [12] Luis F.F.F. Gonçalves, Fernando M. Duarte, Carla I. Martins, and Maria C. Paiva. Laser welding of thermoplastics: An overview on lasers, materials, processes and quality. *Infrared Physics and Technology*, 119, 12 2021.
- [13] Rolf Klein. *Process of Laser Plastic Welding*, chapter 4, pages 141–215. John Wiley Sons, Ltd, 2011.
- [14] Bappa Acherjee. Laser transmission welding of polymers – a review on process fundamentals, material attributes, weldability, and welding techniques. *Journal of Manufacturing Processes*, 60:227–246, 2020.

-
- [15] Francisco J. G. Silva. *Tecnologia da Soldadura - Uma abordagem técnico-didática (3ª Edição atualizada)*. Engebook, janeiro 2023.
- [16] Introduction to fatigue and fracture. In F. C. Campbell, editor, *Fatigue and Fracture: Understanding the Basics*, chapter 1, pages 14–37. ASM International, 2012.
- [17] Fatigue and fracture of ceramics and polymers. In F. C. Campbell, editor, *Fatigue and Fracture: Understanding the Basics*, chapter 9, pages 340–388. ASM International, 2012.
- [18] Wolfgang Fricke. *Fatigue analysis of welded joints: state of development*, volume 16. 2003.
- [19] Francisco J. G. Silva. *Tecnologia da soldadura : uma abordagem técnico-didática*. ENGEBOOK, 2ª edition, 2016.
- [20] I Campbell. *Flexural Testing of Plastics*. Rapra Technology Limited, 2001.
- [21] *ASTM D7774.12 Standard Test Method for Particulate Contamination in Middle Distillate Fuels by Laboratory Filtration*. 2012. ASTM International.
- [22] *Polylanema Plásticos de Engenharia*. 2023.
- [23] *ISO 178:2019 Plastics Determination of flexural properties*. 2019. ISO standard.
- [24] E. Bauer. *Revestimentos de Argamassa – Características e Peculiaridades*. LEM-UnB; Sinduscon, Brasília, 2005.
- [25] M. Rubinstein and R.H. Colby. *Polymer Physics*. Oxford University Press, 2003.