

A importância da soldadura de termoplásticos: um estudo de comparação de processos com características distintas

Adelino Trindade ¹, André Guimarães ²

¹ CISED, Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Politécnico de Viseu, Portugal. Email: atrind@estgv.ipv.pt

² Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Politécnico de Viseu, Portugal. Email: aguimaraes@estgv.ipv.pt

Resumo

Três dos processos de soldadura mais utilizados na ligação de termoplásticos modernos foram analisados e comparados neste trabalho, concretamente a soldadura por gás quente (HGW), a soldadura por raio laser (LBW) e a soldadura por fricção (FSW). Os processos referidos foram utilizados na soldadura de vários materiais termoplásticos distintos, dando foco em apenas três desses materiais, tais como: polipropileno (PP), polietileno (PE) e policloreto de vinil (PVC). A qualidade obtida nas diferentes soldaduras foi avaliada recorrendo a uma análise visual, bem como através de ensaios de resistência à tração. Foram também realizados ensaios de dureza de Vickers às juntas soldadas, que revelaram algumas alterações microestruturais. O estudo efetuado teve como finalidade melhorar o conhecimento dos mecanismos envolvidos na execução dos processos de soldadura utilizados e na análise da resistência das juntas soldadas.

Palavras-chave: soldadura; termoplásticos; HGW; LBW; FSW.

Abstract

Three of the most commonly used welding processes for joining modern thermoplastics were analysed and compared in this work, namely hot gas welding (HGW), laser beam welding (LBW) and friction welding (FSW). The aforementioned processes were used in the welding of several different thermoplastic materials, focusing on only three of these materials, such as: polypropylene (PP), polyethylene (PE) and polyvinyl chloride (PVC). The quality obtained in the different welds was evaluated using a visual analysis, as well as through tensile strength tests. Vickers hardness tests were also carried out on the welded joints, which revealed some microstructural changes. The study carried out aimed to improve the knowledge of the mechanisms involved in the execution of the welding processes used and in the analysis of the resistance of the welded joints.

Keywords: welding; thermoplastics; HGW; LBW; FSW.

1. Introdução

Os materiais poliméricos ocupam um lugar de grande importância na maioria das áreas de fabrico de peças e componentes. Os termoplásticos modernos são usados numa gama crescente de aplicações na engenharia devido às suas relações de resistência-densidade, tenacidade, elevada resistência à corrosão e grandes possibilidades de processamento. Os termoplásticos podem ser utilizados na produção de elementos de máquinas, com recurso aos processos de fabrico, incluindo a soldadura. Nestes materiais, a ligação por soldadura deve-se à reconstituição das macromoléculas

após uma ação energética ter atuado na interface inicial, fundindo-a, figura 1.



Figura 1. Ligação após a ação energética na interface de uma soldadura.

Estão disponíveis vários processos de soldadura que permitem produzir novas peças e componentes de maior complexidade e dimensão, que não seriam

possíveis de obter por meios de produção comuns, permitindo que se efetuem reparações diversas e reutilização de componentes danificados.

Em todos os grupos de processos de soldadura, há fatores e parâmetros que influenciam a capacidade de produzir a ligação. Por um lado, os recursos humanos e os métodos e por outro, os materiais e equipamentos disponíveis, afetam a soldabilidade. Um diagrama de Ishikawa (figura 2) permite efetuar uma análise estruturada, que pode ser adaptado aos fatores e variáveis de cada processo.



Figura 2 - Diagrama de Ishikawa genérico dos processos de soldadura de termoplásticos. Fonte: Elaboração própria.

A ordem de espessuras das peças a soldar condiciona a seleção do processo e do tipo de junta. Nas ligações em juntas sobrepostas de componentes finos, sejam rígidos ou flexíveis, geralmente usam-se processos como: ultrassons, placa quente e laser em modo de transmissão (TTR). Em casos de maiores espessuras, que requerem mais as juntas de topo, as soldaduras são executadas por processos com a fusão e uso de material de adição (HGW), ou processos mais energéticos sem ou com material adição (LBW), ou sem fusão (FSW), entre outros. Estas peças mais espessas, usam-se mais em órgãos de máquinas, tubagens e reservatórios ou aplicações estruturais em plástico.

Para quantificar a resistência da ligação, é usado f_w , denominado fator de comparação da resistência da soldadura [1], definido por:

$$f_w = \frac{\sigma_w}{\sigma_{MB}}; \quad (1)$$

onde σ_w e σ_{MB} são os valores de resistência da soldadura e dos materiais de base, respetivamente. Os valores de f_w , de um modo geral, ainda são relativamente baixos, o que é típico de uma tecnologia em amplo desenvolvimento.

A soldabilidade de polímeros requer um estrito controlo para prevenir a formação de defeitos e porosidades [2]. No processo por HGW, como é um processo manual e sem ensaios não destrutivos reconhecidos, recomenda-se o treino e certificação do soldador pela EN 13067 [3]. Cramer (1993) explicou e classificou as soldaduras com defeitos por gás quente, extrusão e por placa quente como rebaixos na

superfície e na raiz dos cordões de soldadura, incompletas e de fusão excessiva, poros, reforço em soldas, entre outros [1].

Os defeitos mais comuns originados pelo processo LBW em termoplásticos surgem na formação de bolhas ou porosidades, fissuras e defeitos de decomposição, como por exemplo a descoloração.

O processo FSW de termoplásticos pode gerar defeitos de diversos tipos: cavidades, com tipologia de túnel, afundamento ou rebarba à superfície do cordão e falta de ligação geralmente na raiz do cordão [5]. A generalidade dos defeitos deve-se à não otimização do processo e de parâmetros que proporcionem melhor geração e distribuição do calor [6, 7, 8].

2. Processos utilizados

Como referido anteriormente, este trabalho teve como objetivo o estudo de três processos de soldadura de termoplásticos mais utilizados e considerados de maior importância industrial, assim como os de maior potencial de melhoria: por fusão com gás quente e bico de adição manual de material de soldadura (HGW), por fusão com raio laser e manipulação robotizada (LBW) e por energia mecânica devida ao atrito e movimento linear automatizado (FSW).

2.1. Soldadura HGW

A soldadura por gás quente é um processo manual que permite a ligação dos materiais termoplásticos. A versatilidade da soldadura por fusão a gás quente é devida ao equipamento elementar de baixo custo, figura 3, sendo adequada em ligações permanentes de fabrico ou de recuperação de peças. O controlo da temperatura, da velocidade e da pressão no bico de alimentação de MA estão na base das soldaduras de qualidade [9].

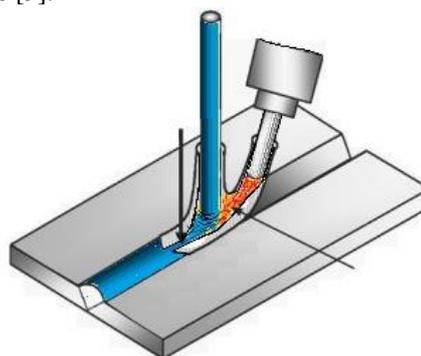


Figura 3. Esquema do funcionamento do processo HGW [10, 11].

A energia transmitida por unidade de comprimento à superfície do cordão, ou entrega térmica, durante a soldadura por gás quente pode ser usada para prever a resistência geral da junta acabada. A entrega térmica (E_T) é determinada utilizando a seguinte equação:

$$E_{T_{HG}} = \eta \frac{c_p(T_f - T_0)q_v \rho}{v_s}; \quad (2)$$

onde os parâmetros de gás quente incluem o calor específico (c_p), a temperatura inicial e final (T_0 e T_f , respetivamente), o caudal volumétrico (q_v), densidade (ρ) e a velocidade de soldadura (v_s) [4]. Alguns estudos realizados em materiais semicristalinos concluem que quanto maior for o valor da E_T aplicada na superfície, maior é a resistência da junta [4]. O controlo da temperatura e a elevada energia de soldabilidade está relacionada com a baixa viscosidade à superfície do cordão de soldadura, o que permite uma maior difusão através da interface de ligação, resultando numa soldadura mais resistente.

2.2. Soldadura LBW

A eficiência da soldadura por raio laser depende do sistema, nomeadamente dos seguintes parâmetros: comprimento de onda (λ), potência (P), ponto de focagem ou de incidência do feixe (F) e distribuição de energia [4, 12]. É fundamental conhecer as propriedades e parâmetros para melhor se compreender o processamento da soldadura [13, 14]. O comprimento de onda e a absorção dos materiais à radiação emitida, figura 4, a focagem e transmissão do feixe relativa ao tipo de junta, figura 5, e a entrega térmica (potência e velocidade de soldadura), figura 6, são parâmetros cruciais.

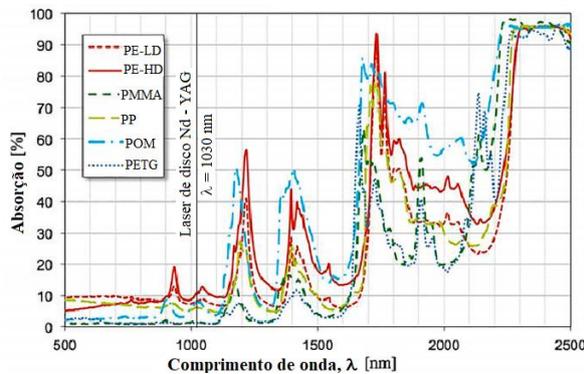


Figura 4. Grau de absorção dos principais polímeros. Fonte: Adaptado de [15].

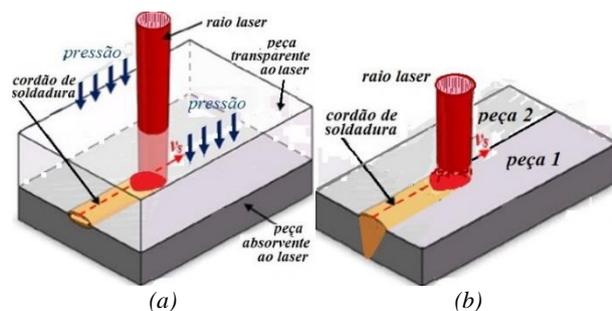


Figura 5. Princípio de soldadura laser de junta (a) sobreposta; (b) de topo. Fonte: Adaptado de [13].

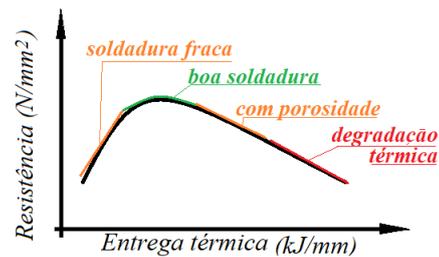


Figura 6. Curva caraterística da soldabilidade do processo LBW. Fonte: Adaptado de [13].

O valor da energia usada na soldadura, entrega térmica (E_T), é muito diferente da produzida na cavidade de ressonância e que efetivamente chega à peça, dependendo da capacidade de absorção do material. Assim, na determinação da entrega térmica é utilizado um valor de eficiência que associa a absorção do raio laser e a característica de soldabilidade aos valores da potência (P) e da velocidade de soldadura (v_s), conforme a equação (3):

$$E_{T_{LBW}} = \eta \frac{P}{v_s}; \quad (3)$$

2.3. Soldadura FSW

O processo de soldadura por fricção depende de uma ferramenta que cria atrito, gerando calor e consequentemente há uma alteração do comportamento plástico dos materiais. Esta alteração permite a sua mistura e, no arrefecimento, são recriadas as novas moléculas que definem a soldadura. Como o estado plástico é uma característica típica dos termoplásticos, seria esperado que, à partida, estes não apresentassem grandes dificuldades de soldadura. No entanto, necessitam da otimização de vários parâmetros, tais como: as velocidades de rotação (n) e de avanço (v_s) (velocidade de soldadura), as formas e dimensões do pino e do patamar que constituem a ferramenta, entre outros. Neste processo, devido à rotação da ferramenta, não se verifica simetria microestrutural, visto que as forças tangenciais comprimem o material no sentido do avanço do cordão de soldadura e no sentido do retrocesso. A figura 7 ilustra genericamente a distribuição das zonas afetadas pelo calor e pela energia mecânica: a – MB (metal de base); b – ZTA (zona termicamente afetada); c – ZTMA (zona termo mecanicamente afetada); d – ZM (zona de mistura ou *nugget*).

A energia total introduzida (E) neste processo é determinada utilizando a seguinte equação [16]:

$$E_{FSW} = \pi \mu p_s n \frac{D^2 + D \cdot d + d^2}{45(D+d)}; \quad (4)$$

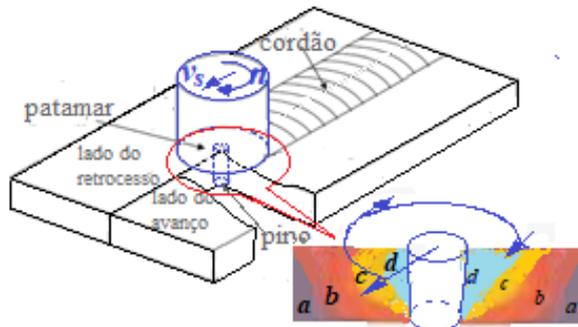


Figura 7. Princípio de soldadura FSW e zonas afetadas: a – MB; b – ZTA; c – ZTMA; d – ZM. Fonte: Elaboração própria.

onde: μ é o coeficiente de atrito, p_s é a pressão exercida (Pa), n é a velocidade de rotação (rad/s), d e D são os diâmetros do pino e do patamar, respetivamente. Apesar do processo FSW ter um princípio de funcionamento simples e possibilitar a formação de cordões de soldadura com bom aspeto superficial, este é suscetível à introdução de defeitos internos [18].

3. Materiais e métodos

Os materiais termoplásticos técnicos são alvo de diversos trabalhos de investigação. Neste trabalho utilizaram-se três termoplásticos de referência de utilização, especificamente o polietileno (PE), o polipropileno (PP) e o policloreto de vinil (PVC). Estes termoplásticos são utilizados na produção dos mais diversos componentes e peças. As principais propriedades dos termoplásticos utilizados são apresentadas na tabela 1.

Tabela 1. Propriedades dos termoplásticos.

Termoplásticos	Tensão última	Módulo de elasticidade	Dureza	Condutividade térmica
	MPa	GPa	HV	W / (m × K)
PE	22	0,8	6,4 *	0,38
PP	32	1,4	7,6 **	0,22
PVC	58	3	14 ***	0,16

Fonte: [17].

3.1. Preparação das juntas

A preparação das juntas e todo o cuidado prévio no ato da soldadura são fundamentais para se obter uma boa soldadura. Na soldadura que ocorre com MA, a preparação da junta deve incluir um determinado afastamento e chanfro em função da espessura. No caso do processo HGW, é aconselhado a obtenção de juntas com 60° de chanfros e 0,5 mm de afastamento, como indicado na figura 8 (a e b), onde a junta em duplo V apresenta melhores resultados [4]. Na soldadura que ocorre sem MA, pelos processos LBW e FSW, é fundamental haver o contato total entre as duas peças, figura 8 (c).

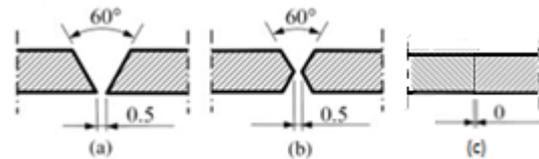


Figura 8. Esquema de preparação das juntas: (a) em V, (b) duplo V e (c) em contato total.

3.2. Realização das soldaduras

Para a realização das soldaduras HGW foi utilizado um soprador de gás quente, da marca Leister, modelo Triac S, com bico adaptável para a adição de material, conforme mostra a figura 9.

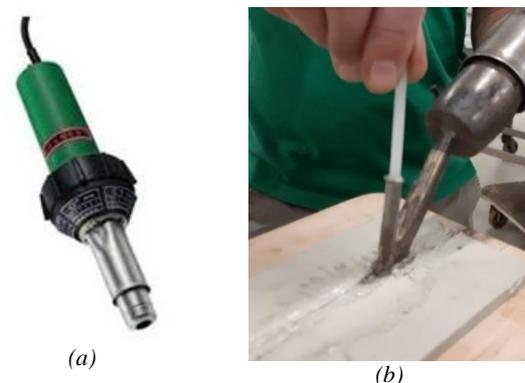


Figura 9. (a) Soprador de ar quente (Leister) e (b) Execução do processo HGW.

O processo LBW aplicado é baseado num laser de disco de Nd -YAG, cujo feixe é caracterizado por um comprimento de onda de 1030 nm [18]. À priori, verifica-se, pela análise da figura 4, que este laser não é o mais adequado na soldadura da maioria dos termoplásticos. Este laser é gerado pelo equipamento da marca Trumpf, modelo TruDisk 6602, que dispõe de regulação de potência de 60 W a 6,6 kW. O raio laser, de qualidade 8 mm.mrad, é conduzido por fibra ótica de diâmetro 0,6 mm até ao dispositivo ótico, cuja distância de focagem é de 72 mm. O ponto de focagem é ajustável, podendo situar-se à superfície da peça ($F=0$ mm), ou definido abaixo ou acima da superfície. A soldadura laser foi assistida por um robot Kuka KRC2, figura 10(a), com uma gama de velocidades de soldadura (v_s) que variou entre 0,001 e 2 m/s [19, 20]. Como este equipamento usado não tem ainda dispositivo para introduzir material de adição, todos os provetes foram realizados com cordões de soldadura sem material de adição, em juntas de topo, como ilustra a figura 10 (b). Os parâmetros de soldadura utilizados na produção deste provetes foram os seguintes: potências entre 60 e 300 W; focagem à superfície ($F=0$ mm) e assim como outros valores abaixo da superfície; velocidade de soldadura entre 0,0042 e 0,0833 m/s.

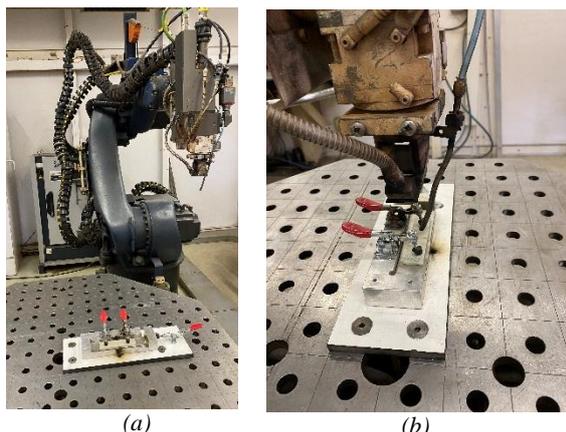


Figura 10. (a) Robot e (b) pormenor relativo ao processo LBW.

As soldaduras pelo processo FSW foram executadas numa fresadora universal Bulin FU 321M de 7,5 kW, com funcionamento em modo de eixo vertical. Para uma fixação rígida e mais prática de adequação das peças a soldar, foi desenhado e produzido um novo suporte, de modo a permitir um bom ajuste à mesa da máquina, figura 11.

As ferramentas foram desenhadas em CAD 3D e executadas com o auxílio das máquinas-ferramentas convencionais e CNC disponíveis. As ferramentas eram constituídas por um pino ajustável e uma peça que contém um patamar, a qual foi inserida na haste que é fixa à árvore rotativa da máquina. Neste trabalho, optou-se pela utilização de ferramentas de geometria simples, com relações entre diâmetros do pino e do patamar de 1:4 e 1:5. O pino foi ajustado com comprimento $L=t-0,2$ (mm), onde t é a espessura da placa. Os respetivos patamares tinham inicialmente diâmetros entre 8 e 13 mm e, por fim, 20 mm. Os pinos foram produzidos em aço HSS e a peça com patamar em aço ao carbono.

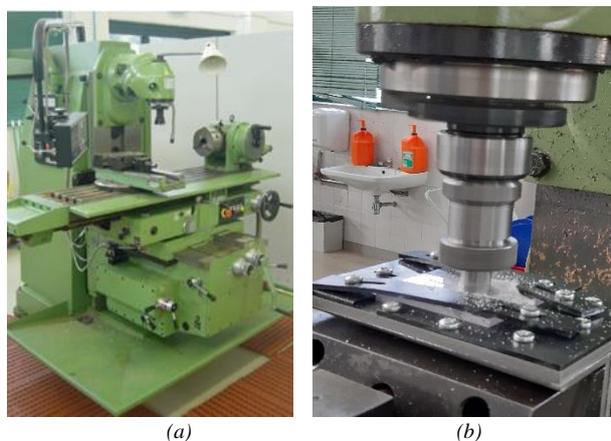


Figura 11. (a) Fresadora e (b) pormenor relativo ao processo FSW. Fonte: Elaboração própria.

Após terem sido experimentados alguns valores dos velocidades de rotação e de avanço para o processo

FSW, foram adotadas os seguintes: - PP: 650 e 800 rpm e 12,5 e 20 mm/min; - PE: 650 rpm e 12,5 mm/min; - PVC: 800 e 1000 rpm e 12,5 e 20 mm/min.

3.3. Realização dos ensaios de tração

Após a realização das soldaduras, a execução dos provetes foi efetuada por fresagem, de modo a garantir uma precisão adequada. As larguras, espessuras e comprimento iniciais L_0 de cada provete foram medidos para permitir uma análise em termos de tensão σ (N/mm²) e de deformação $\epsilon=\Delta L/L_0$ (%). Estes, foram tracionados até à sua rotura numa máquina de ensaios universal Instron, modelo 4206, onde foi registada a evolução da força *versus* deslocamento.

3.4. Análise micrográfica e medição de dureza

Após o polimento, com lixas com índices de granulometria crescente, fez-se o rastreio das superfícies num microscópio Zeiss Axiotec. A análise micrográfica com microscópio ótico tornou-se difícil, mas devido à utilização do contraste de interferência diferencial (DIC) e à luz polarizada, foi possível visualizar a existência de algumas anomalias e defeitos. As medições de dureza foram efetuadas num microdurómetro Shimadzu HVM com indentador Vickers.

4. Resultados

Os resultados basearam-se essencialmente na inspeção visual e na realização de ensaios de tração e na medição da dureza ao longo das zonas afetadas. As diversas juntas de topo efetuadas pelo processo HGW, nomeadamente de placas de polipropileno (figura 12 a) com 6 mm de espessura, sendo apenas duas delas com MA. As soldaduras FSW foram efetuadas em placas de diversas espessuras de PE e PP e PVC, com juntas de contato do tipo (c) da figura 8. No caso do PP, a qualidade superficial do cordão de soldadura obtida ainda não foi a ideal, apesar da penetração ter sido total e de este apresentar poucos defeitos. As soldaduras efetuadas em PVC apresentam melhor qualidade superficial, mas a ligação é fraca, com fratura de contorno da ZTA. Este facto, deve-se à fraca condução de calor deste polímero, tabela 1, cuja solução passará por desenvolver uma nova ferramenta ou incluir uma fonte de calor externa.

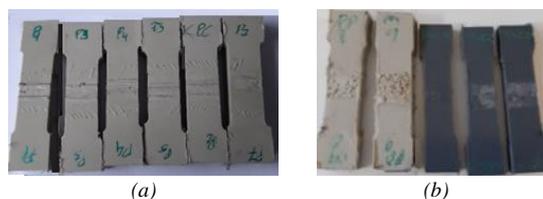


Figura 12. Provetes obtidos por: (a) HGW em PP; (b) FSW em PP e PVC.

Os provetes de termoplásticos, com junta de topo, soldados pelo processo LBW apresentaram algumas dificuldades, que tiveram origem no tipo de fonte laser usada, nos materiais a ligar e nas suas espessuras. Dado o baixo valor de absorção de alguns materiais de base (MB) ao raio laser e ao comprimento de onda utilizado, figura 4, já era previsível a dificuldade de algumas soldaduras. Também é fundamental o controlo da energia na região ótima da curva característica da soldabilidade, figura 6. Fora dessa região ótima, o aumento da potência ou redução da velocidade para se obter penetração total, equação (3), leva à queima de material à superfície. Termoplásticos de grande espessura necessitam de mais energia, saindo da região ótima, com consequente degradação superficial. Há, então, um compromisso entre a espessura das peças a soldar com penetração total e a degradação superficial.

4.1. Curvas de Carregamento F- Δ L e σ - ϵ

Os resultados da evolução de força versus deslocamento (F- Δ L) foram apenas um meio para obter as curvas de tensão-deformação (σ - ϵ), o que permitiram efetuar comparações entre os diferentes resultados obtidos, apesar dos provetes apresentarem dimensões diferentes. Os resultados obtidos para cada um dos processos são dispostos pela ordem inicialmente apresentada, relativamente aos principais termoplásticos em estudo (PP, PE e PVC). No final, são compilados num gráfico os melhores resultados de resistência obtidos com os materiais testados e respetivos processos que foram usados. Os provetes obtidos pelo processo HGW foram ensaiados à tração na direção transversal dos cordões de soldadura. Os resultados obtidos da resistência são apresentados na figura 13. Constata-se que a configuração da junta dos provetes em duplo V apresenta valores de $\sigma_u=20$ MPa, figura 13, que correspondem a uma eficiência de $f_w=60\%$, que corresponde a valores obtidos noutros estudos.

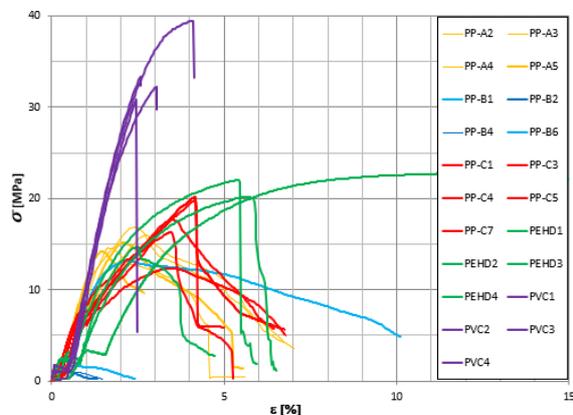


Figura 13. Resultados obtidos pelos ensaios de tração nos provetes soldados por HGW em PP, PE e PVC.

A utilização de materiais de adição de marca diferente (comparação de PP-A e PP-C) teve influência nos valores σ_u e no comportamento de fragilidade. Nas ligações efetuadas sem MA (casos PP-B) a resistência é variada e demasiado baixa, com valores de $f_w=20\%$. É a primeira demonstração da importância da técnica de soldadura na resistência das ligações.

Todas as soldaduras com o processo LBW, com melhores resultados com $P=300$ W e $v_s=83,3$ mm/s e $F=0$, efetuadas em juntas de topo, como foi esquematizado na figura 5 b). As potências foram de 300 W e Houve algumas dificuldades nas soldaduras dos termoplásticos, em que o mais evidente foi o PMMA, com origem na fonte laser utilizada, como referido aquando da figura 4. Mas também se deve às espessuras das placas de MB e à otimização conforme a curva característica da soldabilidade, figura 6. Fora da região ótima, pelo aumento de potência ou redução da velocidade, ao tentar-se obter penetração total, há queima de material à superfície. Com valores de E_T , mais adequados, equação (3), em alguns termoplásticos e de espessura considerável, o aspeto superficial do cordão era razoável mas a resistência mecânica era baixa devido a não haver penetração total.

Os resultados de resistência à tração, de provetes obtidos na direção transversal às ligações, são apresentados na figura 14.

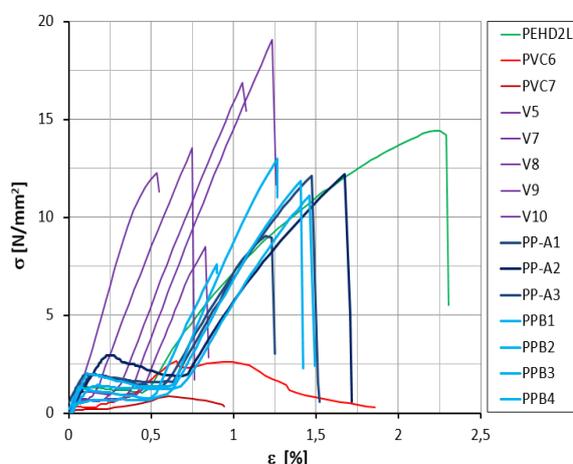


Figura 14. Resultados obtidos pelos ensaios de tração nos provetes soldados por LBW em PP, PE e PVC.

As soldaduras FSW foram efetuadas nas placas de PE e PP, e PVC de diversas espessuras. Os resultados de resistência, dos ensaios de tração dos provetes obtidos na direção transversal às ligações, são apresentados na figura 15.

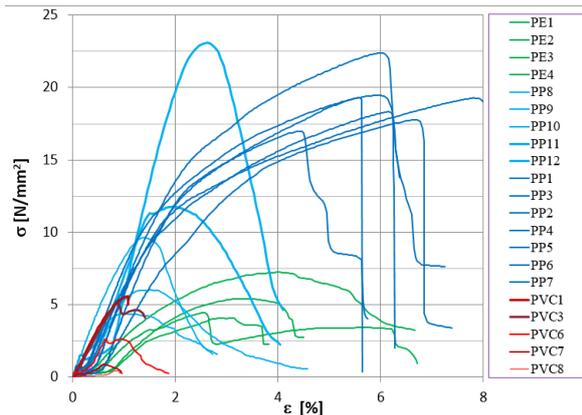


Figura 15. Resultados obtidos pelos ensaios de tração nos provetes soldados por FSW em PP, PE e PVC.

No caso de soldaduras por HGW, a seção do MA e a forma do bico de deposição podem não levar à forma ideal do cordão de soldadura. Ao longo do processo de soldadura por LBW, ocorreu demasiada liberação de energia o que poderá ter originado “queima” parcial da superfície. Em alguns materiais, o uso de uma ferramenta simples e a otimização de parâmetros no

processo FSW pode proporcionar um acabamento que ainda não é ideal. As particularidades físico-químicas dos termoplásticos, os processos, a falta de penetração total e a existência de defeitos internos e externos têm consequências nas resistências das ligações. A comparação dos melhores resultados de resistência obtidos nas soldaduras em diversos termoplásticos é apresentada na figura 16.

Da análise da eficiência das ligações, utilizando o fator de comparação da resistência da soldadura, equação (1), os melhores resultados são apresentados na tabela 2, verificando-se que a ligação com maior eficiência foi efetuada no PVC com o processo de soldadura HGW, com $f_w=73,1\%$.

Tabela 2 – Melhores resultados obtidos de f_w .

	PE	PP	PVC
HGW	109,1%	65,6%	73,1%
LBW	35,8%	40,6%	34,6%
FSW	31,8%	78,1%	10,3

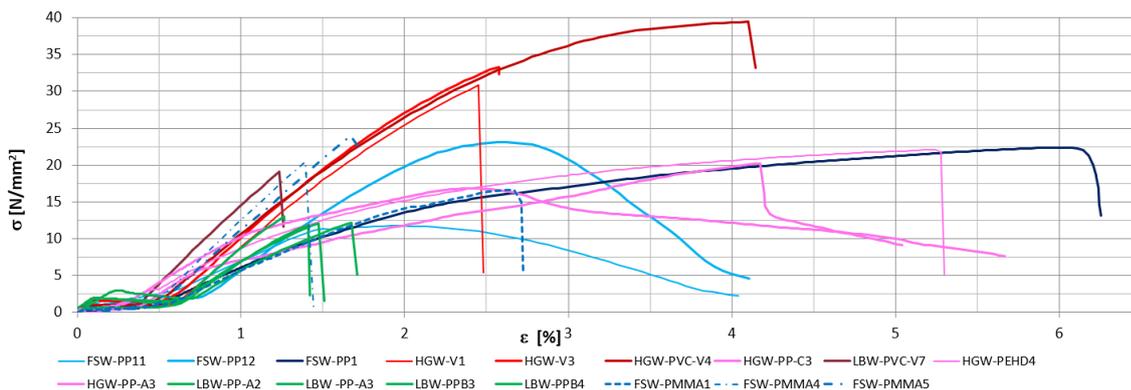


Figura 16. Comparação dos melhores resultados obtidos pelos ensaios de tração, aos três processos de soldadura estudados, nos termoplásticos: PP, PVC, PE, POM e PMMA.

Na tabela 2 há resultados diversos, mas valores de f_w acima de 60% são muito comuns. O valor obtido de 109,1% na soldadura do PE pelo processo HGW foi devido à existência de grande diversidade de PEs, desde a baixa até alta densidade. Os valores mais baixos de resistência pelo LBW foram resultado, em parte, da elevada espessura que as amostras utilizadas apresentavam. Os mais baixos valores obtidos com o FSW devem-se, em parte, ao amorfismo e às propriedades do PVC que tem uma condutividade térmica relativamente baixa.

4.2. Variação da dureza

A evolução dos valores da dureza ao longo da repartição térmica permitiu avaliar as influências das alterações microestruturais nas ZTAs. À priori, a soldadura com menores gradientes de dureza e menor diferença (ou ligeiro aumento) entre a zona do cordão

e as restantes, tem melhor comportamento em termos de tenacidade e resistência mecânica, respetivamente. A variação da dureza é causada pelo restabelecimento molecular após o aquecimento causado pelo atrito da ferramenta com o material. A diminuição da dureza nas zonas termomecanicamente afetada (pela influência do pino) e termicamente afetada (pela influência do patamar) pode ser significativa [21]. O processo e método afetam a distribuição da dureza [22]. A medição da dureza é difícil nalguns plásticos devido à recuperação elástica. As normas EN ISO 868-2003 e ISO 482-2018 referem-se à determinação da dureza Shore em diversos plásticos; tratam-se de métodos de utilização prática em meio industrial, mas em investigação não é a mais adequada, devido ao método e dimensão em causa. Para se efetuar uma análise da variação da dureza através das zonas afetadas pela soldadura, como aquela que aqui é feita, terá de ser realizada com um método de microdureza e, preferencialmente, com indentedor piramidal, do tipo

Vickers (HV), Knoop ou Berkovich. A microdureza HV é a mais utilizada na investigação do comportamento da microestrutura nas zonas afetadas [23]. A melhor solução passa pelo uso da nanoindentação que, ao medir a evolução da carga e deformação, permite obter o valor da dureza mesmo quando a indentação residual tem recuperação total e, ainda, avaliar outras propriedades mecânicas [24]. Há autores que já o têm feito [25]. O polipropileno permitiu visualizar a indentação residual e, assim, fazer a medição de dureza por um microdurómetro tradicional. Na figura 17 é apresentada a distribuição da dureza deste termoplástico soldado pelos três processos utilizados.

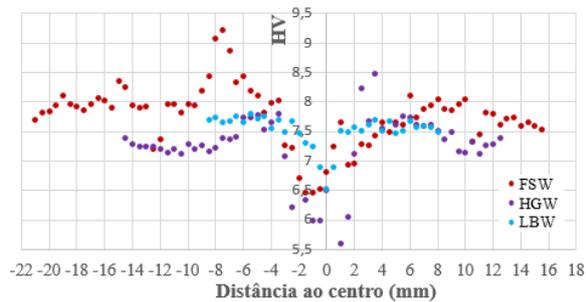


Figura 17. Resultados da dureza Vickers, através das zonas afetadas, para o PP, medida a 1 mm de profundidade.

Na comparação da variação da dureza Vickers, verifica-se que o processo HGW apresenta uma zona afetada pelo calor significativamente maior que o obtido do processo LBW. Isto deve-se à grande diferença energética entre estes processos e à conseqüente influência na sua microestrutura. Com o processo FSW, a variação de dureza também é extensa, que se deve à dimensão do cordão e às largas zonas afetadas causadas pela dimensão da ferramenta. Apresenta também alguma assimetria, que já era esperada, devido à rotação da ferramenta comprimir de modo diferente o material no sentido de avanço relativamente ao de retrocesso.

Com o processo HGW foram encontrados alguns defeitos de ligação relacionados com a falta de fusão, como se pode visualizar na figura 18.

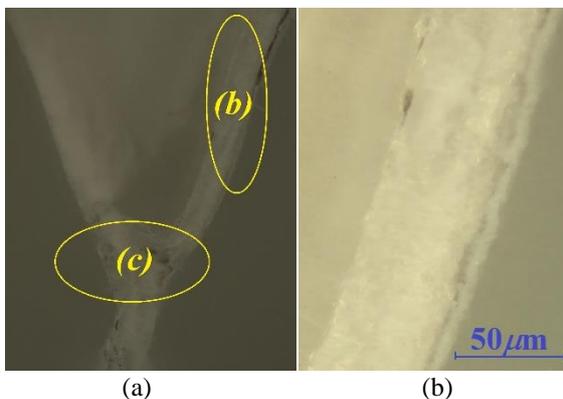


Figura 18. Defeitos na soldadura HGW numa amostra de PP de 10 mm de espessura. a) anomalias de falta de ligação. b) pormenor (b). c) pormenor (c).

Com o processo LBW, além do afundamento na superfície do cordão, figura 19 a), que é um defeito típico da soldadura sem material de adição, também se encontrou uma descoloração com uma pequena fissura, figura 19 b).

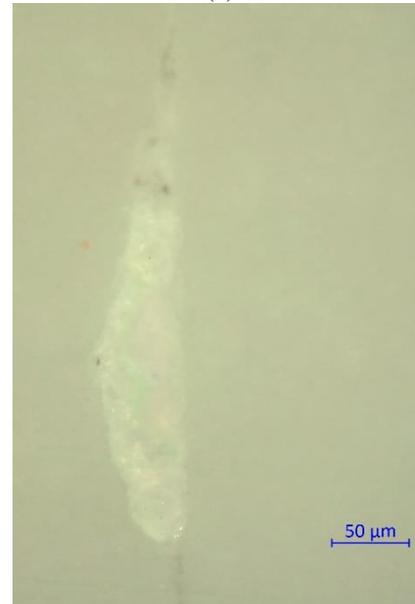
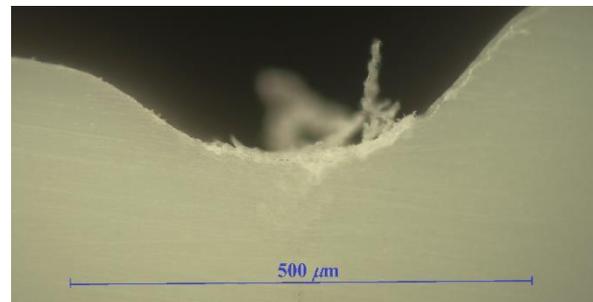


Figura 19. Defeitos na soldadura LBW numa amostra de PP de 3 mm de espessura, com anomalias de: a) afundamento da superfície do cordão e b) uma descoloração com pequenos poros e uma fissura.

Com o FSW, foram encontrados os defeitos típicos deste processo: o efeito de túnel, figura 20 a), e de falta de ligação a partir da superfície afundada do cordão, figura 20 b).

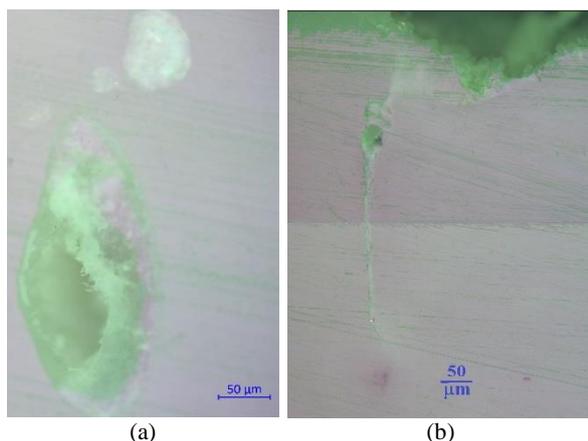


Figura 20. Defeitos na soldadura FSW numa amostra de PP de 10 mm de espessura, com anomalias do tipo: a) defeito tipo túnel, b) falta de ligação a partir da superfície afundada do cordão.

O aperfeiçoamento dos processos, com definição mais adequada de parâmetros e da técnica, bem como o ajustamento das ferramentas do FSW, particularmente a forma e dimensões do pino e do patamar, têm permitido melhorias e, prosseguindo, permitirá ainda melhores resultados.

A morfologia das soldaduras e, em particular, a presença de defeitos, é muito influenciada pelo calor adicionado no processo. O aumento do rácio entre a velocidade de rotação e avanço da ferramenta (n/v_s) aumenta a temperatura na soldadura. O aumento de temperatura local facilita o fluxo de material e reduz a formação de defeitos.

5. Conclusões

Como conclusões, ficará o essencial do conhecimento obtido sobre a soldadura de termoplásticos com os processos estudados, no âmbito das suas particularidades e da importância relativa entre eles. Por um lado, o processo HGW, é um processo manual que necessita da habilidade e treino do operador e recorre à introdução de material de adição com um equipamento de baixo custo. Por outro, a soldadura LBW, sem material de adição, necessita de um equipamento mais dispendioso, que inclui também um robot. Aumentar a eficiência neste processo requer um laser mais específico para termoplásticos, o que permitiria incrementar a qualidade e a produtividade. O FSW de termoplásticos requer ainda alguns aperfeiçoamentos na forma da ferramenta e nos ajustes dos parâmetros do processo. Com isso, melhorava-se a resistência das soldaduras e minimizava-se o aparecimento de defeitos.

A análise do comportamento mecânico e da resistência da soldadura em termoplásticos tem uma grande relevância do ponto de vista científico e industrial. Contudo, em termos das ligações efetuadas com os termoplásticos estudados, conseguiram-se muitos

casos com fator de comparação da resistência da soldadura acima de $f_w=60\%$, valor de referência por muitos autores.

O estudo realizado à zona de soldadura, por medição de dureza, permitiu obter informações importantes das zonas afetadas. Assim, foram reveladas algumas alterações microestruturais.

Para além do comportamento mecânico das juntas soldadas, foi também efetuada uma análise da qualidade macro e microestrutural dos cordões de soldadura produzidos. Com o processo HGW, as anomalias de falta de ligação podem ser anuladas com um maior controlo de temperatura e melhoria da técnica de soldadura por parte do operador. No entanto, há possibilidade da correção posterior da superfície do cordão. No processo FSW, a existência de zonas com poros e cavidades poderão ser consequência de uma má mistura entre o material, por insuficiência de calor produzido pelo pino da ferramenta, pois a maior parte dos defeitos encontram-se junto à interface do *nugget*. Estes, podem ter origem na falta de calor, provocada pela baixa velocidade de rotação e alta velocidade de avanço da ferramenta, não sendo suficiente para promover a plasticidade do material necessária à ligação. Com o processo LBW utilizado, as melhores soldaduras de topo foram executadas em menores espessuras do que pelo HGW e o FSW devido à necessidade de se limitar a potência.

Com a adequação de equipamentos e aperfeiçoamento das técnicas de cada processo, tem-se melhorado significativamente a qualidade das soldaduras. No entanto, ainda há muito a fazer e, por enquanto, todos os processos apresentam as suas vantagens e limitações.

6. Agradecimentos

Ao Nuno Esteves (IPROM) pelo apoio prestado nas soldaduras laser.

Ao Eng. Nelson Santos (ESTGV) pelo apoio prestado na execução de equipamentos e de provetes.

Este trabalho é financiado por Fundos Nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P., no âmbito do projeto ref^o UIDB/05583/2020. Agradecemos adicionalmente ao Centro de Investigação em Serviços Digitais (CISeD) e ao Politécnico de Viseu pelo apoio prestado.

7. Referências

- [1] Balkan O., et al, Morphological and mechanical properties of hot gas butt welded PE, PP, and PVC sheets. J. Achiev. Mater. Manuf. Eng. 31 (2008) 60-70.
- [2] Masse, S., "Measuring the Sensitivity of Interfacial Gaps in Laser Transmission Welding Using

Manufactured Voids" (2010). Electronic Theses and Dissertations. 199. <https://scholar.uwindsor.ca/etd/199>

[3] TWI, Hot Gas Welding of Plastics: part 1 - The Basics [Online] Available: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/hot-gas-welding-of-plastics-part-1-the-basics-056>.

[4] Balkan O, *et al*, Effects of welding procedures on mechanical and morphological properties of hot gas butt welded PE, PP, and PVC sheets. *Polymer Eng. and Scie.* 48 (2008) 732–46.

[5] Mendes, N., Robotic Friction Stir Welding of Polymers, PhD Thesis, (2014) UC, Coimbra.

[6] Banjare, P. N., *et al*; An assisted heating tool design for FSW of thermoplastics, *J. of Materials Processing Technology* 239, (2017), 83-91.

[7] Azhiri, R. B. *et al*, Measurement and evaluation of joint properties in friction stir welding of ABS sheets reinforced by nanosilica addition, *Measurement* 127 (2018), 198-204.

[8].Ahmadi, H. *et al*; *International Journal of Mechanics and Applications*, 2(3): (2012) 24-28

[9] Dar, S. A., Alam M., Dwivedi, A.: An Extensive Literature Review Showing Relation Between Process Parameter and Mechanical Properties of Welded Hard PVC by Hot Air. *IRJET* 03: 02 (2016).

[10] Leister: Extrusion and hot-air hand welders, *Plastic Fabrication* (2017/2018). Available and accessed on: Fev. 8, 2021: <https://www.leister.com/>

[11] Laserline GmbH, Plastic Welding Plastic Welding with Diode Lasers,; Germany (2005) Available and accessed on: Fev. 8, 2021: www.laserline.de.

[12] Singare S. *et al*, Laser Transmission Welding of Polycarbonate: Geometrical and Microstructure Characterisation of the Weld. *J Material Sci Eng*, 4:4 (2015).

[13] Boglea, A. Laser welding of polymers – State of the art and innovation trends – Part I. Fraunhofer 2011.

[14] Asseko, A., *et al*: Laser transmission welding of composites - A: Thermo-physical and optical characterization of materials. *Infrared Physics and Technology*, Elsevier, 72, (2015) 293-299.

[15] Acherjee, B.; State-of-art review of laser irradiation strategies applied to laser transmission welding of polymers. *Optics and Laser Techn.*, 137 (2021) 1-21.

[16] Deqing, W., Shuhua, W., Zhaoxia, C.; Study of friction stir welding of aluminium, *J. of Mater. Scie.* (2004) 1689 – 1693.

[17] Crawford, R. J.; Microhardness Testing of Plastics; *Polymer Testing* 3 (1982) 37-54.

[18] Trindade, A.: Comparação entre soldaduras TIG, FSW e LBW numa liga de alumínio. *Actualidad de la Ingeniería Mecánica en Iberoamérica. XIV CIBIM.* P. 25-32. Pub. FEIBIM/UIS (2019) Colômbia.

[19] TruDisk [Online] Available: Laser-based joining Perfect quality without residues. Accessed on: Fev. 8, 2021.

[20] KUKA Robot Group [Online] Available: <http://www.wtech.com.tw/public/download/manual/kuka/> Accessed on: Fev. 8, 2021.

[21] Vijendra, B., Sharma, A. Induction heated tool assisted friction-stir welding (i-FSW): A novel hybrid process for joining of thermoplastics. *J. of Manuf. Proc.* 20, (2015) 234-244.

[22] Kanti, R. *et al* A novel double-side welding approach for friction stir welding of polypropylene plate. *The Int. J. of Adv. Manuf. Tech.* 113 (2021) 691–703.

[23] Kaddour, H.; *et al*, Mechanical behaviour analysis of a friction stir welding (FSW) for welded joint applied to polymer materials. *Frat. Integrita Strutt.* 13, (2019) 459–467.

[24] Trindade, A. Indentação de Revestimentos Finos: Análise Experimental e Numérica. Tese PhD, Univ. de Coimbra (2003).

[25] Ovsik, M. *et al*. Nano-indentation test of PA12 after radiation cross-linking. *Int. J. of Mech.*, 8 (2014) 231-238.