

União de Termoplásticos Pelo Processo *Friction Stir Welding*: Influência da Ferramenta e Parâmetros do Processo

Leonardo Viana Dias^{1,2} , Cláudio Turani Vaz² 

¹ Instituto Federal de Minas Gerais – IFMG, Ouro Branco, MG, Brasil.

² Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, MG, Brasil.

Como citar: Dias LV, Vaz CT. União de termoplásticos pelo processo *Friction Stir Welding*: influência da ferramenta e parâmetros do processo. *Soldagem & Inspeção*. 2021;25:e2541. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI25.41>

Resumo: Polímeros são materiais que possuem boa relação resistência peso, baixo custo relativo, boa processabilidade, sendo essas algumas das características que justificam seu uso em diversos setores, substituindo inclusive os materiais metálicos. Apesar da facilidade de processamento, a união de materiais poliméricos não se apresenta como trivial. Entre as dificuldades, a baixa temperatura de degradação, condutividade térmica e capacidade de difusão, são as mais relevantes, dificultando a produção em larga escala de peças maiores e mais complexas com esses materiais. Em meio aos diferentes processos utilizados na união de polímeros, a soldagem por fricção com pino não consumível (*Friction Stir Welding*) tem se destacado como um dos mais recentes e promissores. Esse processo se baseia na inserção de um pino em rotação no material, que promove a mistura e aquecimento da região de soldagem devido ao atrito proporcionado, propiciando uma soldagem no estado sólido, sem a geração de fumos ou respingo. Nesse trabalho foi realizado um levantamento do estado da arte da soldagem FSW de polímeros termoplásticos. Buscou-se levantar a influência da ferramenta e dos principais parâmetros de processos sobre as soldas produzidas em diferentes tipos materiais pertencentes a essa classe tentando estabelecer correlação com suas propriedades.

Palavras-chave: Polímeros; Termoplásticos; *Friction Stir Welding*.

Termoplastic Joining by Friction Stir Welding: Influence of Tool and Process Parameters

Abstract: Polymers are materials that have good weight-to-strength ratio, low relative costs and good processability, justifying its uses in a lot of applications, even replacing metallic materials. Despite its good processability, it's not trivial to join polymeric materials. Polymers low degradation temperature, low thermal conductivity, and low diffusion capacity are major obstacles to produce bigger and more complex parts on a large scale. Among all polymeric joining methods, one of the most promising is Friction Stir Welding (FSW). This process works by the insertion of a rotation probe inside the material, promoting heating and mixing of the welding area by its friction, leading to a solid state welding, without gases or splashes. This paper brings the state of art of Friction Stir Welding of thermoplastics and aims to relate the tools and parameters influence in the welding of different polymers and its resulting properties.

Key-words: Polymers; Thermoplastics; Friction Stir Welding.

1. Introdução

O processo de soldagem *Friction Stir Welding* (FSW) foi desenvolvido e patenteado em 1991 pelo *The Welding Institute* (TWI). Sua execução se baseia no uso de um pino não consumível, que tem uma rotação relativa em relação a um substrato rigidamente fixado. Parte da ferramenta rotativa é inserida no substrato, e transladada ao longo dele, gerando calor por atrito, plastificando e misturando o material adjacente, promovendo a soldagem [1].

Esse processo promove a soldagem de materiais no estado sólido, eliminando problemas associados à solidificação, além de promover uma ótima estabilidade dimensional e não gerar fumos ou respingos, dado também a não utilização de consumíveis [2]. Mediante uma parametrização ótima, é possível obter conjuntos soldados com eficiência energética e propriedades mecânicas cada vez mais próximas às do material original [3,4].

A soldagem FSW, a princípio, foi desenvolvida para reparo de ligas metálicas de baixa densidade, obtendo resultados promissores na soldagem de alumínio [5,6], magnésio [7,8] e cobre [9,10]. Posteriormente, foram realizados estudos com o

Recebido: 02 Nov., 2019. Aceito: 30 Out. 2020.

E-mail: leonardo.dias@ifmg.edu.br (LVD)



Este é um artigo publicado em acesso aberto (*Open Access*) sob a licença *Creative Commons Attribution Non-Commercial*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais e que o trabalho original seja corretamente citado.

objetivo de avaliar seu emprego na união de outras ligas, como aços [11,12], aços inoxidáveis [13,14] e titânio [15,16]. Dado aos resultados obtidos, é empregado na indústria automobilística e aeroespacial, sendo apontado responsável pela redução de custo e aumento de produtividade no projeto de foguetes lançadores de satélites Delta IV e Delta II, e tendo sua versatilidade reconhecida pela *General Dynamics Land System* na soldagem de diferentes ligas de alumínio [17].

O avanço da soldagem por *Friction Stir Welding* em materiais metálicos, impulsionou a aplicação desse processo na união de polímeros. Tal classe de materiais tem sido cada vez mais empregada na indústria, resultando, em 2015, em uma produção de cerca de 380 milhões de toneladas [18]. Características como relação resistência/peso, versatilidade de forma, inércia química, fácil processamento, tem proporcionado o emprego destes em substituição aos materiais tradicionais em diversas aplicações [18,19]. Apesar disso, o desenvolvimento dos processos de união de polímeros ainda se apresenta desafiador dado às características desses materiais, como baixa energia superficial, baixa molhabilidade e presença de agentes de etapas de processamento anteriores [2].

Aplicação de FSW em polímeros apresenta vantagens, principalmente quando são avaliados os custos da operação. Os equipamentos utilizados não são específicos, sendo comum a adaptação de fresadoras para o processo, como feito por Aydin [20], Sadeghian e Besharati Givi [21] e Aghajani Derazkola e Simchi [22]. Além disso, há a possibilidade de se automatizar a operação de forma relativamente fácil, aumentando a produtividade [2].

A soldagem FSW em polímeros já foi executada com sucesso em diferentes termoplásticos. Panneerselvam e Lenin [3], realizou a soldagem em Nylon 6, obtendo uma junta com boas propriedades mecânicas usando uma ferramenta com pino de rosca esquerda rotacionando em sentido anti-horário. Hoseinlghab et al. [4] soldou placas de polietileno de alta densidade (PEAD) e, mudando apenas os parâmetros do processo e a geometria da ferramenta, conseguiu propriedades similares às do material de base. Outros termoplásticos foram submetidos ao processo, com resultados promissores [3,21-24], inclusive soldando polímeros dissimilares [25-27]. Apesar dos resultados obtidos nesses diferentes estudos, ainda não há emprego industrial da soldagem por FSW na soldagem de termoplásticos, sendo essa uma área promissora para o futuro desse processo.

2. *Friction Stir Welding* em Polímeros

Na soldagem de polímeros por FSW devem ser consideradas as propriedades físicas e químicas desses materiais, possibilitando que sejam propostos e implementados ajustes nos parâmetros de processo, de tal modo a se obter conjuntos soldados capazes de atender a requisitos mínimos exigidos. Um dos aspectos importantes que deve ser avaliado na soldagem de termoplásticos é a temperatura alcançada durante o processo, sendo que, cada material possui suas próprias características de cristalinidade, índice de fluidez e temperaturas de transição vítrea, fusão e degradação. Na Tabela 1 estão os dados de alguns autores quanto as temperaturas medidas¹ durante a soldagem FSW em diferentes polímeros.

Tabela 1. Temperaturas de referência encontradas durante a soldagem FSW.

Material	Temperatura Medida (°C)	T _g (°C)	T _m (°C)
Nylon 6	119 [24]	47-57 [28]	220 [28]
PEUAPM	70-90 [20]	-	130-138 [20]
PMMA	129 [22]	106-113 [28]	-
PEAD	120-165 [29]	-123 [28]	145 [28]
PC	209 [30]	150 [28]	-

Ao analisar os dados da Tabela 1 nota-se que as temperaturas medidas estão acima da temperatura de Transição Vítrea (T_g) do material, o que facilita a soldagem. A partir dessa temperatura, os termoplásticos passam a ter movimento segmental da fração amorfa, facilitando a ocorrência da mistura. Assim, pode-se dizer que a FSW de materiais poliméricos não ocorre no estado sólido, e sim no estado “borrachoso”. Um caso à parte é o do polietileno de ultra alto peso molecular (PEUAPM), que dado sua alta massa molar, acima de 1.500.000g/mol, mesmo em temperaturas acima da fusão, tem índice de fluidez próximo a zero [31].

A temperatura alcançada também atua diretamente na morfologia da região soldada. Apesar da zona de mistura (ZM) ser composta apenas pelas regiões do material que entraram em contato direto com o pino e ombro da ferramenta de soldagem, mudanças de temperaturas ocasionam alterações na extensão das regiões influenciadas diretamente pelo fluxo de material (zona termomecanicamente afetada - ZTMA), assim como nas regiões afetadas apenas pelo calor gerado (zona termicamente afetada - ZTA). Essas regiões estão demonstradas esquematicamente na Figura 1.

¹ Os dados levantados foram obtidos em diferentes artigos com diferentes metodologias.

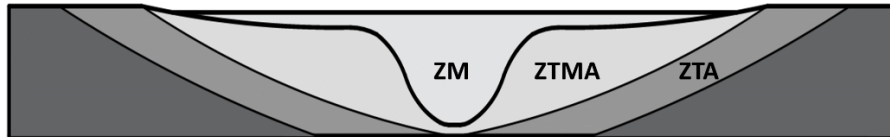


Figura 1. Seção transversal esquemática de soldagem por FSW [Autor].

As diferentes temperaturas alcançadas pelo material também são causas de diferentes defeitos. Excesso de calor pode ser prejudicial, principalmente em materiais com alto índice de fluidez. Zafar et al. [24] na soldagem do Nylon 6, utilizando parâmetros que geram maiores temperaturas, observou tanto saída excessiva de material, formando rebarba aderida à superfície (*flash defect*), quanto a formação de vazio na zona de mistura, dado a uma não consolidação de material ao longo do movimento da ferramenta (*tunnel defect.*), sendo esse um dos defeitos mais críticos para a qualidade do conjunto soldado [25]. Ambos os defeitos podem ser visualizados na Figura 2, na soldagem por FSW em chapas de policarbonato.

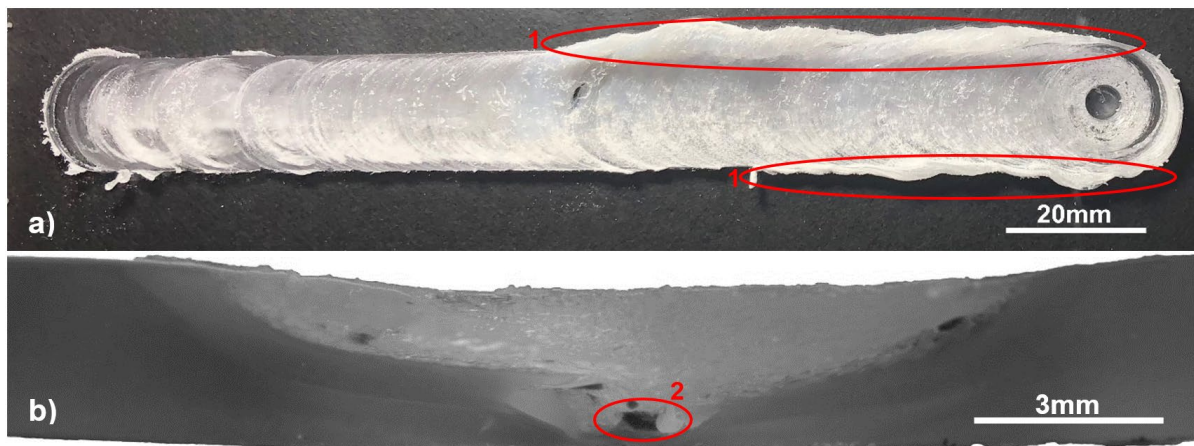


Figura 2. Defeitos comuns na soldagem por *Friction Stir Welding* 1:Flash Defect e 2:Tunnel Defect, ambos encontrados em chapas soldadas de policarbonato, sendo (a) superfície soldada e (b) seção transversal [Autor].

Aydin [20], realizou a soldagem de polietileno de ultra alto peso molecular (PEUAPM) utilizando pré-aquecimento, evitando expulsão de material durante o processo antes que ele alcançasse temperaturas ideais para a união. Quando o material se manteve em temperatura abaixo da fusão (T_m), obteve-se resistência a tração de até 89% da resistência do material recebido. Quando utilizada maiores temperaturas de pré-aquecimento, a região de solda superou T_m , produzindo uma solda com resistência a tração de no 72% do material original para os mesmos parâmetros de soldagem. Resultados diferentes foram encontrados por Bozkurt [29], onde na soldagem do PEAD obteve-se melhores resultados quando a temperatura ultrapassou a fusão do polímero. Isso foi justificado pela maior difusão do material para a raiz, o que diminuiu a ocorrência de defeitos na raiz.

Além do controle térmico, outra dificuldade encontrada na soldagem de polímeros por *Friction Stir Welding* está associada à natureza macromolecular desses materiais, dificultando a ocorrência de difusão no processo. Segundo Kausch e Tirrell [32], a difusividade em sistemas emaranhados pode chegar na ordem de grandeza de $10^{-16}m^2/s$, sendo mais lento do que o convencional para átomos em ligas metálicas, cuja ordem de grandeza gira em torno de $10^{-5}m^2/s$. Somado a isso esses materiais são, de modo geral, isolantes térmicos, podendo promover uma condução de calor ineficiente nas regiões adjacentes à região da solda, reduzindo as interações interatômicas na interface material base/solda.

A menor difusividade dos polímeros, associado ao fato do calor gerado por fricção ficar quase restrito à região de solda, torna a interface do material de base com a zona misturada a região mais frágil da solda. Nos estudos realizados tanto por Zafar et al. [24] quanto Shazly et al. [33], na soldagem de Nylon 6 e polimetilmetacrilato (PMMA) respectivamente, em todos os ensaios de tração realizados os corpos de prova se rompiam nessa interface. Aghajani Derazkola e Simchi [22], por sua vez, encontrou limite de resistência a tração 35,6% maior no conjunto soldado de PMMA ao se fazer o ensaio de tração da região de mistura de forma longitudinal, quando se comparado com os ensaios realizados com a solda na transversal do corpo de prova de tração.

Como indicam os trabalhos de Aydin [20], Bozkurt [29], assim como Aghajani Derazkola et al. [34], ou Sahu et al. [35], as diferentes condições de soldagem dos diferentes materiais influenciam diretamente na qualidade alcançada dos conjuntos soldados. Um dos desafios na soldagem é a manutenção das propriedades do material dentro de uma faixa aceitável, desse modo, uma forma comumente utilizada de análise da solda de polímeros por FSW é o limite de resistência a tração alcançado em relação ao do material original. A Tabela 2 reúne diferentes polímeros soldados por diferentes autores, e os respectivos resultados de limite de resistência a tração.

Tabela 2. Limite de resistência a tração de diferentes materiais antes e pós soldagem por FSW.

Material	LRT Material Base (Mpa)	LRT Material Soldado (Mpa)	Eficiência Relativa
Nylon 6 [3]	73	35	47%
ABS [21]	42	42	100%
PEAD [29]	22	21	96%
PP [35]	33	20	60%
PMMA [22]	70	43,5	62%
PEUAPM [20]	32	28	89%
PC [30]	67	55	82%

Mesmo com os bons resultados possíveis para a soldagem FSW em diferentes termoplásticos, são observadas variações consideráveis nas propriedades obtidas por diferentes estudos em materiais similares. Panneerselvam e Lenin [3] e Zafar et al. [24] estudaram as propriedades mecânicas da soldagem FSW em Nylon 6, sendo que o primeiro obteve limite de resistência a tração da solda 47% do encontrado para o material base, já o segundo teve resultado de 32%. Outros exemplos podem ser citados, como Aghajani Derazkola [30] que, ao fazer a soldagem FSW em chapas de 4mm de policarbonato (PC), encontrou um limite de resistência a tração de 82% em relação ao material base, resultado melhor do que o encontrado por Shazly et al. [33], que, ao soldar chapas de 10mm de policarbonato, encontrou para a mesma relação 31%. No caso desses autores não só foram usados diferentes parâmetros, como foram usadas diferentes ferramentas, montagens e metodologias para encontrar seus respectivos resultados ótimos. Há também diferenças entre os polímeros, como massa molar, aditivção e processamentos prévios realizados.

Em polímeros dissimilares a soldagem é ainda mais complexa dada a imiscibilidade dos materiais [26]. Nesses casos é importante uma análise prévia da compatibilidade para que seja possível obter uma solda com propriedades mecânicas adequadas. Eslami et al. [36] conseguiu realizar soldas sobrepostas efetivas entre polipropileno (PP) e poliestireno (PS) durante o desenvolvimento de novas ferramentas para a soldagem FSW, alcançando até 50% do limite de resistência a tração do PP para o conjunto soldado. Resultados ainda melhores foram obtidos nos testes feitos por Eslami et al. [37] onde materiais mais compatíveis foram usados, polietileno e polipropileno, obtendo-se 76% do limite de resistência a tração do PP nesse caso, resultado similar ao encontrado por Rezaee Hajideh et al. [25] na soldagem realizada com os mesmos materiais.

Na soldagem de polietileno de baixa densidade (PEBD) e PEAD reciclados, Singh et al. [26] obteve soldas com propriedades mecânicas melhores que os materiais originais. Este resultado foi obtido adicionando 10% de pó de ferro antes da soldagem. Outra solução foi o uso de nanotubos de carbono feita por Gao et al. [27], que conseguiu melhorar a formabilidade da soldagem feita com polietileno de alta densidade e ABS.

Em resumo, fica evidente a viabilidade de se obter juntas poliméricas soldadas por *Friction Stir Welding* com desempenho satisfatório, contudo, faz-se necessário o entendimento das variáveis do processo e como elas afetam nos resultados obtidos.

3. Ferramentas de Soldagem FSW

A ferramenta é um componente não consumível que atua penetrando a peça, aquecendo-a e movimentando o material plastificado, promovendo a mistura da junta soldada, sem permitir que o material seja expelido do conjunto. Para aumentar a durabilidade das ferramentas, elas normalmente são feitas de materiais que possuem alta resistência ao desgaste, com maiores durezas. Para a soldagem de PEUAPM Aydin [20] utilizou para a ferramenta aço H13 tratado termicamente, atingindo dureza de 57HRC, assim como feito por Zafar 2016 [24] na soldagem de Nylon 6. Sahu et al. [35], Shazly et al. [33] também usaram H13 na soldagem de polipropileno e policarbonato, respectivamente, porém, não foi reportado o uso de qualquer tratamento térmico nessas ferramentas. Bozkurt [29], por sua vez, usou aço SAE1050 tratado termicamente na soldagem de PEAD, alcançando dureza de 40HRC, e Sadeghian e Besharati Givi [21] e Aghajani Derazkola e Simchi [22] utilizaram aço ferramenta e aço rápido, respectivamente, em seus estudos.

Assim, a escolha adequada deste componente impacta de modo significativo o resultado da soldagem FSW. O projeto da ferramenta afeta diretamente o aquecimento por atrito da peça e o fluxo de material, determinando inclusive qual material pode ser soldado e quais limites de espessura [38,39].

Na soldagem de alumínio, Mehta [38] já havia verificado que as variações do ombro da ferramenta tinham maior efeito na temperatura de pico alcançada durante a soldagem do que mudanças na velocidade de rotação do processo. Conclusão similar também foi obtida no estudo de materiais poliméricos. Rezaee Hajideh [25] constatou que a influência da geometria da ferramenta nas propriedades mecânicas de uma junta soldada por FSW é superior a outros parâmetros de soldagem dentro de uma dada faixa.

A otimização da ferramenta, portanto, promove tanto uma melhoria de desempenho mecânico da junta soldada, quanto da velocidade máxima de soldagem durante o processo. A ferramenta convencional utilizada para a soldagem FSW é composta basicamente de um pino e um ombro, como indicado na Figura 3.

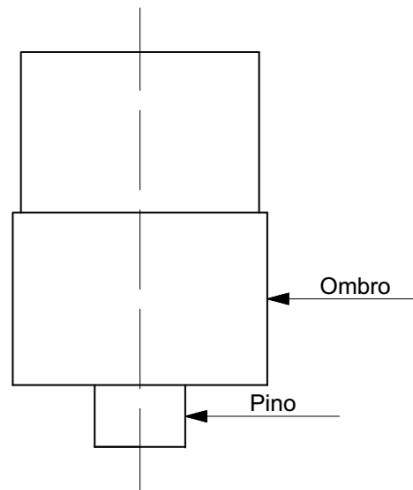


Figura 3. Componentes da Ferramenta de Soldagem FSW [Autor].

3.1. Ombro da ferramenta

O ombro da ferramenta é responsável por gerar maior parte do calor durante o processo devido à fricção e pressão efetuadas sobre a superfície da peça de trabalho. Além disso, essa parte da ferramenta restringe o material plastificado em torno do pino, evitando que seja expelido para fora do conjunto [38,39].

Dado que o ombro tem uma imersão na peça de no máximo 5% de sua espessura, sua geometria externa não influencia de forma significativa o conjunto soldado. Contudo, o formato da superfície de contato do ombro com a peça, que pode ser plana, côncava ou convexa conforme ilustrado na Figura 4, pode promover diferenças de propriedades durante o processo [39].

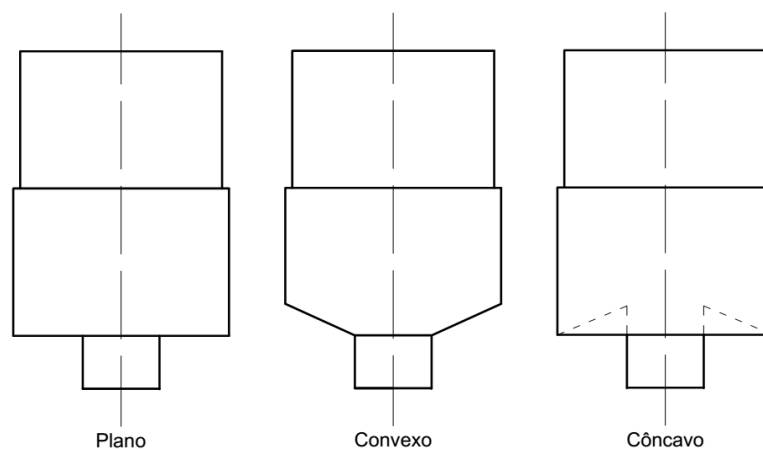


Figura 4. Superfície inferior do ombro [Autor].

Superfícies planas geralmente são menos eficazes na retenção do fluxo de material, podendo propiciar saída excessiva deste (*flash*). Superfícies côncavas tendem a restringir de forma mais eficiente a extrusão de material, armazenando volume de escape. Com uma inclinação de 1 a 3°, o ombro propicia uma maior força compressiva de forjamento, aumentando a pressão hidrostática. Por fim, as superfícies convexas atuam empurrando material para fora da ferramenta, porém podem ser interessantes em juntas dissimilares ou com espessuras diferentes, possibilitando maior contato efetivo entre as peças [39].

As superfícies inferiores dos ombros podem apresentar texturas específicas, promovendo um fluxo controlado de material ao se utilizar roscas, ou maior atrito e conseqüente aquecimento quando se utiliza recartilhamento ou entalhes [39].

Além da geometria, um aspecto importante do ombro são suas dimensões. Como o ombro é o principal responsável por gerar calor por fricção durante a soldagem, aumentar seu diâmetro aumenta a superfície de contato com a peça e mais calor é gerado. Calor insuficiente pode impedir a soldagem, enquanto calor excessivo pode ocasionar fusão parcial do material, fazendo com que este seja expelido ou acabe aderindo à ferramenta (Figura 5), prejudicando o contato efetivo ferramenta/peça [36].



Figura 5. Polipropileno aderido nas superfícies do pino e do ombro [Autor].

Sahu et al. [35] ao aumentar apenas o diâmetro do ombro durante a soldagem de polipropileno, encontrou um aumento de distorção da peça. O aumento de calor gerado também ocasionou degradação do material.

3.2. Pino da ferramenta

O pino em rotação tem a função de arrastar, plastificar e misturar o material presente na zona de mistura, soldando a região sem a fusão do material [23,27,36]. Este componente, portanto, influencia diretamente no cisalhamento do mesmo a sua frente e na deposição atrás, apresentando regiões de entrada e saída (avanço e recuo), conforme Figura 6, sendo que, a região de avanço alcança as maiores temperaturas no processo [40]. Derazkola [34], através de simulação termomecânica, observou uma menor geração de calor no lado de retrocesso "*Retreating Side*" durante a soldagem do PMMA, sendo que a baixa condutividade do material resulta em uma estreita Zona Termicamente Afetada (ZTA). Tal propriedade inerente aos polímeros possibilita inclusive carbonizar a superfície e o material imediatamente abaixo se manter imutável [35].

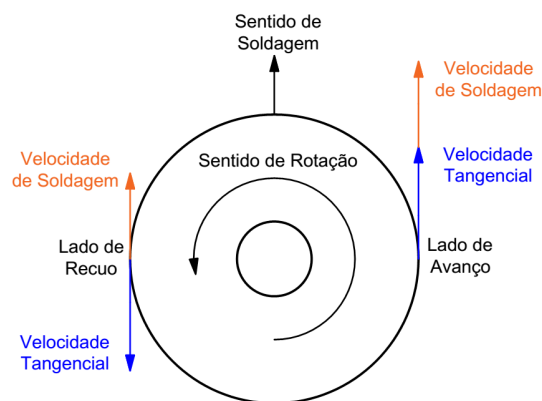


Figura 6. Vista inferior da ferramenta indicando os lados de avanço e recuo [Autor].

Mendes et al. [41] encontrou discontinuidades do tipo vazio na região de recuo durante a soldagem por fricção em placas de ABS. Considerando que essa é uma região onde há menor geração de calor, somado com a baixa condutividade térmica dos polímeros, por vezes a temperatura alcançada não é suficiente para promover ligação do material plasticamente deformado com o material a menor temperatura. Tal fenômeno também foi observado por Bagheri et al. [42].

Levando em conta tais fatores, a geometria do pino é fundamental para produzir soldas adequadas pelo processo FSW. Quanto a forma três são as regiões consideradas: a extremidade do pino, formato e a superfície.

A extremidade do pino pode ser reta ou abaulada, sendo a reta é mais utilizada por ser mais fácil de ser produzida. Entretanto, a extremidade abaulada aumenta a vida útil da ferramenta, por ter menos concentradores de tensão, além de precisar de menor força no mergulho da ferramenta no substrato [39].

Quanto ao formato do pino, ele pode ser cônico ou cilíndrico. Apesar de serem de manufatura mais complexa, os pinos cônicos geram mais calor por fricção, dado sua maior área de contato com a peça, além promover uma maior pressão hidrostática na região da solda, melhorando a mistura [39]. Seguindo a modelagem matemática feita por Buffa et al. [43], o ângulo do pino cônico tem uma maior influência na temperatura alcançada na soldagem quando este é menor que 30°, a partir dessa angulação atinge-se o pico de calor gerado, conforme ilustrado Figura 7 onde é apresentado o gráfico temperatura de pico \times ângulo de inclinação do pino.

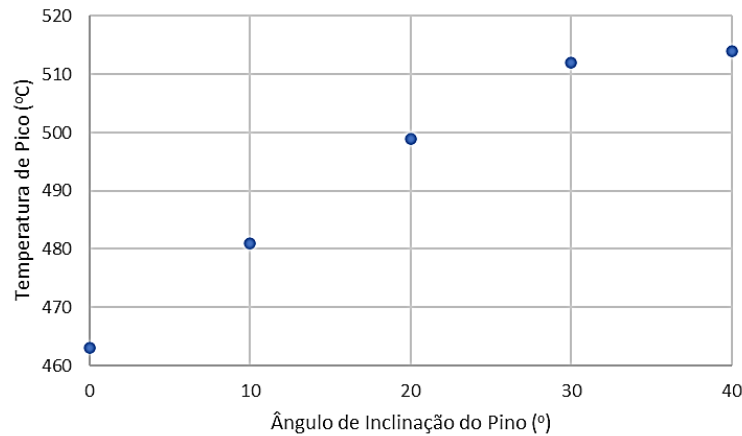


Figura 7. Pico de temperatura no material em função dos ângulos de pino na soldagem FSW, baseado nos dados levantados por Buffa et al. [43].

Apesar das vantagens desse tipo de pino, Sahu et al. [35], na soldagem de polipropileno (PP), relatou que seu uso não gerou mistura satisfatória, criando vazios e soldas frágeis. Por outro lado, nas soldagens realizadas por Sadeghian e Besharati Givi [21] em ABS, os melhores resultados de resistência foram encontrados ao se usar pino cônico, porém, o pino cilíndrico resultou em uma maior resistência média.

A superfície do pino, por sua vez, pode ser feita de diferentes formas de modo a propiciar melhor fluxo de material ou maior calor no processo. Na Figura 8 estão alguns exemplos de diferentes formatos de pino usados na soldagem de polímeros.

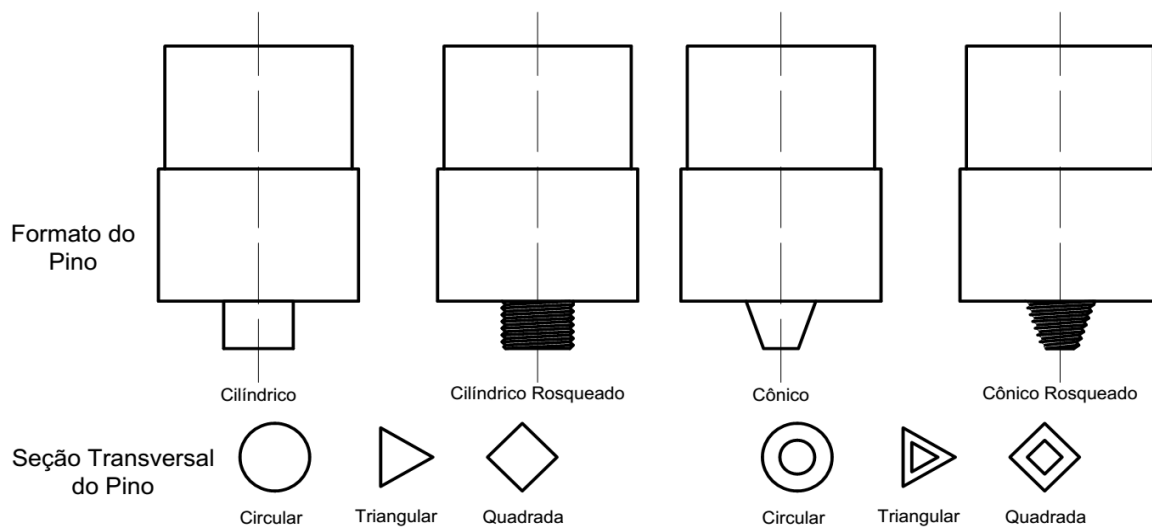


Figura 8. Superfícies do formato do pino [Autor].

Comparativamente ao pino cilíndrico simples, o de seção quadrática promove maior aquecimento durante o processo. Sua excentricidade permite que o material plastificado flua de forma mais fácil e suas faces geram pulsos que melhoram a mistura realizada [35]. Em relação aos perfis cônicos simples, cônicos com faces triangulares e cônicos com faces quadráticas, maior resistência mecânica foi encontrada no pino cônico simples para a soldagem de PMMA feita por Aghajani Derazkola e Simchi [22], justificado pelos vazios encontrados no material ao se utilizar ferramentas com menores áreas superficiais.

Quanto às ferramentas rosqueadas, resultados adequados foram obtidos. Um pino rosqueado para esquerda sob rotação no sentido anti-horário (Figura 9) faz com que o material seja arrastado para baixo pelas roscas ao longo da superfície do pino, o que promove agitação do material e fechamento de vazios/cavidades [36]. Panneerselvam e Lenin [3] constatou saída de material e consequentes defeitos na soldagem utilizando rosca esquerda e sentido horário de rotação da ferramenta, sendo que tanto a rosca esquerda no sentido anti-horário de rotação, quanto a rosca direta no sentido horário produziram soldas de boa qualidade no Nylon 6.

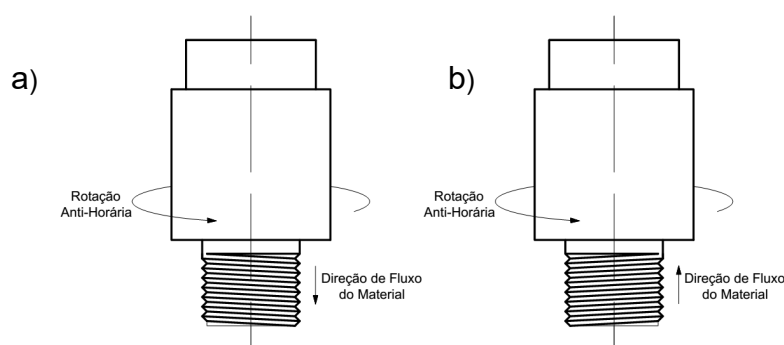


Figura 9. Representação do sentido de fluxo de material na soldagem FSW com rotação Horária para a) Rosca Esquerda e b) Rosca Direita [autor].

Não utilizar roscas ou sulcos pode ocasionar acúmulo de material no lado de avanço da solda, dificultando uma mistura adequada conforme observado por Eslami et al. [36] na soldagem sobreposta de materiais dissimilares (polipropileno e polietileno) empregando pinos rosqueado e não rosqueado.

Kordestani et al. [23] produziu soldas FSW utilizando pino cônico com rosca e chanfro, pino cônico com rosca, pino de seção quadrática e pino com 4 sulcos rosqueado. Nesse estudo obtiveram-se soldas com maior resistência a tração e melhor aparência com pino cônico rosqueado e chanfrado. Os autores atribuem o resultado ao fato dessa ferramenta ter uma grande superfície de contato, o que resulta em um maior calor por fricção, possibilita uma melhor mistura e resulta em maior homogeneidade da junta. Resultados dos estudos de Rezaee Hajideh et al. [25], também mostram que a ferramenta de maior superfície de contato usada, no caso cilíndrica e rosqueada, teve as melhores misturas e maior limite de resistência a tração.

Além da geometria, as dimensões do pino e seus componentes também devem ser avaliadas para a adequada execução da soldagem. Comprimento e diâmetro do pino, assim como o passe de rosca devem ser considerados.

Para menores comprimentos do pino, são observados defeitos na raiz ou a não soldagem a chapa inferior, no caso de chapas sobrepostas [36]. Arici e Sinmazçelýk [44] relatou inclusive que a espessura dos defeitos de raiz que aparecem equivalem à diferença do comprimento do pino e da espessura da chapa soldada, propondo desse modo a utilização de dois passes para a soldagem FSW.

Como compensar o comprimento do pino inserindo mais a ferramenta causa aumento da pressão forçando o material para fora da região fundida, formando *flash defect*, o ideal é planejar o comprimento do pino de acordo com a espessura da chapa a ser soldada. O gráfico da Figura 10 reúne os dados do comprimento utilizado em ferramentas para FSW em polímeros em relação à espessura da chapa soldada.

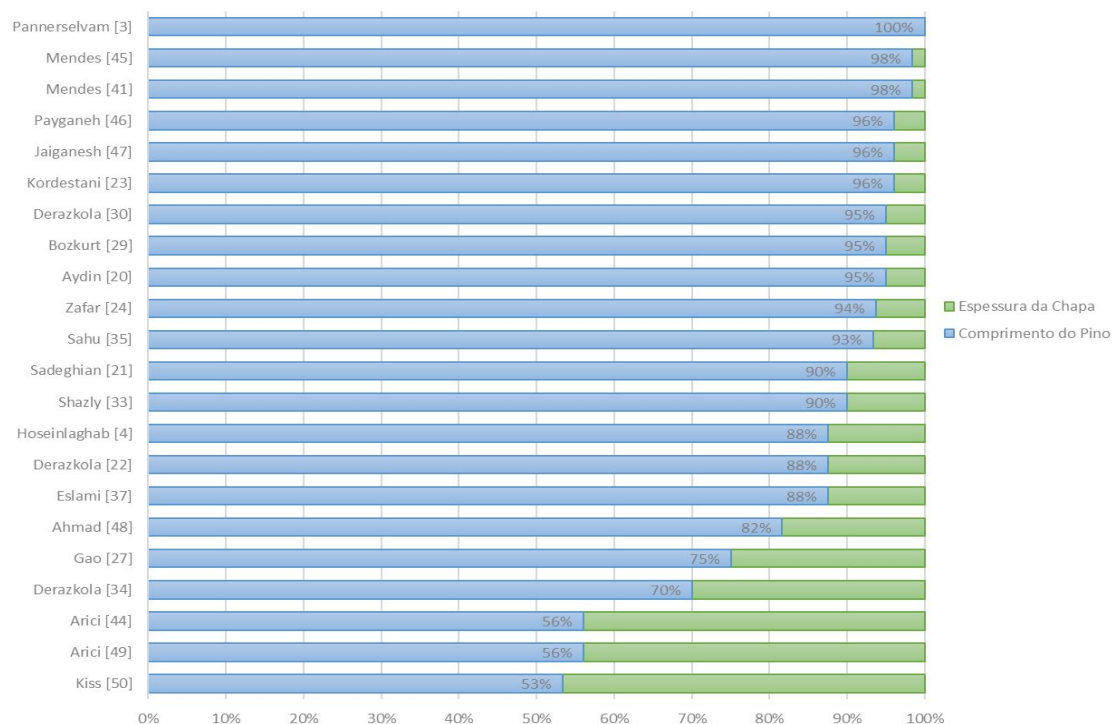


Figura 10. Compilado de comprimentos de pino da ferramenta em relação à espessura da chapa usadas em FSW.

No caso do uso de roscas, o passe de rosca deve ser bem avaliado. Pinos com passe muito grande, podem funcionar como broca, retirando material acumulado no ombro [45]. Kiss e Czigány [46] soldou duas placas de polipropileno de cores diferentes, possibilitando a visualização da mistura ocorrida no processo. Foi observado que o processo realizado com a ferramenta de ângulo de rosca de 45°, obteve uma mistura mais homogênea na solda, do que usando a ferramenta de ângulo de 15°.

4. Parâmetros de Soldagem

Segundo Rezaee Hajideh [25] modificações na ferramenta, mesmo alterando propriedades e desempenho das soldas produzidas, não afetam a parametrização ótima do processo. Entre as variáveis do processo de soldagem FSW, a penetração da ferramenta, o ângulo de inclinação, a velocidade de soldagem e a velocidade de rotação, são fatores determinantes para obtenção de soldas satisfatórias.

4.1. Velocidade de rotação

Bozkurt [29], com o objetivo de avaliar a influência dos parâmetros de soldagem sobre a resistência a tração de juntas soldadas pelo processo FSW, propôs o emprego de um índice (taxa de contribuição) para quantificar o impacto de cada uma das variáveis. Segundo seu estudo a velocidade de rotação é responsável por impacto da ordem de 73%, a velocidade de translação 20% e o ângulo de inclinação 6%.

Hoseinlghab et al. [4] observou que o aquecimento da peça é proporcional a velocidade de rotação da ferramenta. Por outro lado, o pouco calor gerado pela fricção durante a soldagem em menores velocidades de rotação da ferramenta, produzem soldas com aspecto visual e resistência a fluência inferiores. Tal fato se deve ao fluxo inadequado de material na zona de soldagem, podendo ocorrer inclusive remoção de material na linha da junta [25]. Soldando em uma velocidade de rotação baixa, Payganeh et al. [47] relatou um transporte insuficiente de material, e a geração insuficiente de calor, resultando na ocorrência de discontinuidades.

Para maiores velocidades de rotação, Mendes [48] encontrou uma maior facilidade do fluxo e mistura do material, reduzindo a ocorrência de defeitos nas soldas. Tais melhoras acontecem até um ponto ótimo, onde há geração de calor suficiente para o processo, resultando em propriedades mecânicas e aspecto visual ótimos na junta soldada [4,25].

O aumento excessivo de velocidade de rotação resulta em elevado aquecimento por atrito na linha de solda, o que pode provocar fusão e até escoamento do material para fora do cordão de solda, formando *flash defect* [25]. Nas soldagens feitas tanto por Zafar et al. [24] quanto por Shazly et al. [33] ao ser usada velocidade excessiva de rotação, a saída de material reduziu de forma significativa a espessura da chapa. Payganeh et al. [46] relata perda de resistência mecânica e degradação do polímero como consequência da velocidade excessiva.

Essas Altas velocidades de rotação também promovem altas forças inerciais responsáveis por alguns defeitos na zona de mistura que resultam na redução da resistência da junta. A falta de tempo para o material plastificado fluir sob a ferramenta resultando em *Tunnel Defect* na zona de mistura [25]. Nessas altas velocidades de rotação, o fluxo de material passa a ser turbulento, resultando em uma mistura não adequada conforme observado por Rezaee Hajideh [25] através de imagens geradas por microscopia eletrônica de varredura em soldas de placas de polietileno e polipropileno com velocidades de rotação de 2920rpm.

4.2. Velocidade de deslocamento

A velocidade de deslocamento da ferramenta (velocidade de soldagem), apesar de ter menor influência na qualidade da solda produzida pelo processo FSW em comparação à velocidade de rotação [29], é importante e pode alterar de forma significativa os resultados do processo.

Em velocidades de soldagem muito baixas, há um aumento do calor fornecido na região de solda, podendo provocar a fusão do material de base e até sua degradação. É possível afirmar, portanto, que a energia específica absorvida por unidade de comprimento na junta soldada é inversamente proporcional à velocidade de soldagem e diretamente proporcional à velocidade de rotação, o que pode ser visto no gráfico da Figura 11. Neste é possível também verificar uma influência maior da velocidade de rotação no ganho de temperatura, ao se comparar com a velocidade de soldagem.

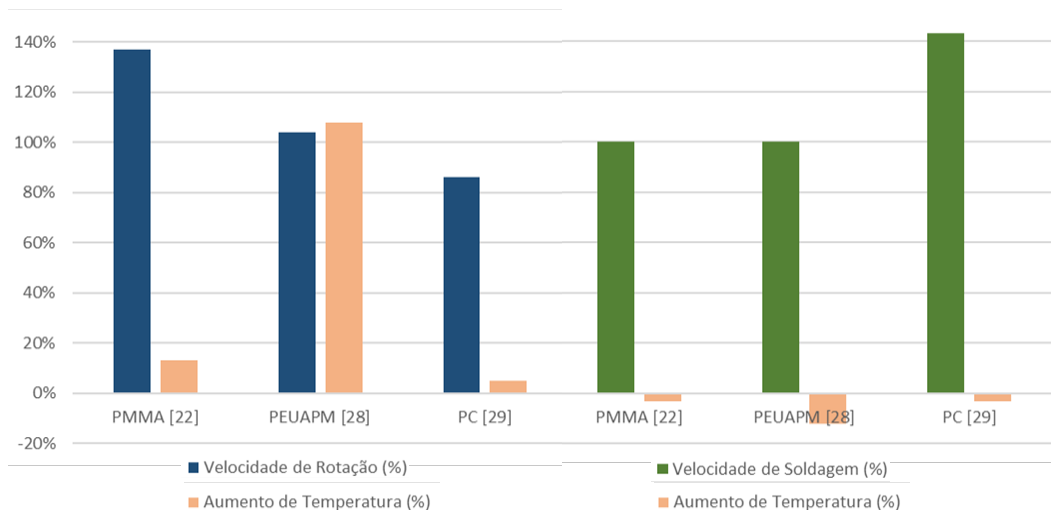


Figura 11. Efeitos da variação dos parâmetros de soldagem FSW na temperatura do processo.

Para velocidades de soldagem muito altas, o aquecimento inadequado pode resultar em juntas defeituosas e, em decorrência ao fluxo inadequado da matriz, ocorre a formação do *Tunnel Defect* com a consequente redução da resistência do conjunto soldado [25]. O aumento da velocidade de soldagem também é responsável pela falta de pré-aquecimento do material à frente durante a soldagem. Além de reduzir a plasticidade do material durante o processo, o que facilita a soldagem dada a baixa condutividade térmica dos polímeros, uma velocidade de soldagem alta o suficiente faz com que a ferramenta entre em contato com o material “frio”, podendo levar a trincas planares que ao crescer levam a fratura principalmente em polímeros frágeis conforme relatado por Aghajani Derazkola [30] em soldas de placas de policarbonato.

4.3. Razão R/T

Como mostrado por Hoseinlghab et al. [4], a velocidade de rotação pela velocidade de soldagem (razão R/T) é um fator importante para controlar a qualidade das soldas. Alta relação R/T leva ao superaquecimento e baixa resulta em pouco aquecimento do material, sendo atribuído a esses valores extremos soldas com menor resistência mecânica. Autores como Hoseinlghab et al. [4] e Mendes et al. [48] estipularam em seus estudos faixas de R/T para obtenção de soldas com melhor qualidade. Como a ferramenta escolhida não influi na parametrização ótima da soldagem FSW, para cada material é possível levantar uma faixa ótima da razão R/T evitando assim falta ou excesso de aquecimento. Na Figura 12 é apresentado um gráfico que reúne razões R/T utilizadas na soldagem de diferentes materiais, relacionando-as com o aumento de limite de resistência a tração da solda.

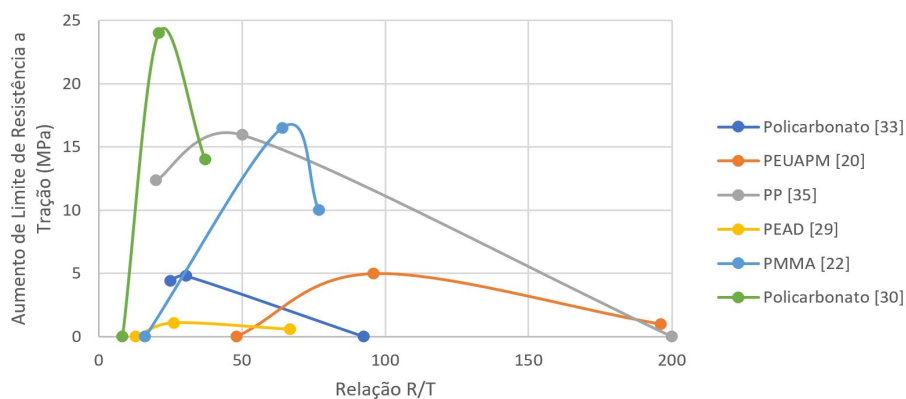


Figura 12. Compilado de dados referentes às variações de limite de resistência a tração com diferentes parâmetros utilizados na soldagem (Razão R/T).

4.4. Ângulo de inclinação e penetração

O ângulo da ferramenta é responsável por evitar a saída de material durante a soldagem FSW, minimizando discontinuidades por falta de material, além de exercer função de forjamento na região traseira do sentido de avanço do processo [40,41]. O aumento deste resulta no acréscimo da força axial feita sobre o conjunto soldado, alterando os resultados da operação de soldagem. Mendes et al. [41] observou a presença de vazios no cordão soldado por FSW em chapas de acrilonitrila butadieno estireno (ABS), que foram minimizados com o aumento da força axial aplicada gradativamente de 0,75kN para 2,25kN e 4kN

Bagheri et al. [42] relatou que, com ângulo de inclinação de 1°, o material plastificado foi mantido na zona soldada, resultando em um ganho de qualidade de superfície da solda, além da não formação de vazios ou trincas. Resultados similares foram levantados por Aghajani Derazkola [34], encontrando ângulo ótimo de 2° para a soldagem de PMMA, mais que isso ocasionava a defeitos no material. Zafar et al. [24], por outro lado, obteve soldas com mais *flash defect* ao utilizar 3 graus de inclinação, o que foi justificado pelo aumento da carga compressiva na superfície do material, aumentando fricção e a geração de calor. Esse aumento de temperatura pode ser significativo, e foi levantado por Derazkola variando de cerca de 189°C para um ângulo de 0,5° para entorno de 215°C a 4°.

Além dos efeitos de temperatura, Arici e Selale [49] constatou que o aumento de ângulo da ferramenta acima de 1° reduziu a resistência mecânica da solda. Ele atribuiu isso à redução de espessura da chapa causada pelo aumento desse parâmetro. Juntamente com a inclinação do ombro, a profundidade da penetração no material de base é importante para o processo. Aghajani Derazkola [34] relatou que o aumento na penetração da ferramenta em soldas de polimetilmetacrilato (PMMA) de 0,2 para 0,6mm resulta em maior área da zona de mistura, além de incrementar a temperatura na região, podendo fazer com que o polímero aquecido fique aderido à superfície do ombro.

5. Considerações Finais

Diante dos inúmeros aspectos apresentados neste artigo é possível constatar que o processo de soldagem por fricção com pino não consumível (*FSW - Friction Stir Welding*) se apresenta como uma alternativa interessante na união de polímeros termoplásticos. Verifica-se também a necessidade do domínio das propriedades e principalmente do comportamento térmico de tais materiais. Contudo, o grau de independência observado entre os parâmetros e a geometria da ferramenta, permite que o levantamento das condições ótimas de soldagem para diferentes polímeros seja realizado de modo árduo através de estudos em paralelo para a escolha da ferramenta mais adequada a cada material. O contexto apresentado confirma que ainda há muito a ser investigado na soldagem FSW de termoplásticos, mas que sua aplicação em escala industrial está próxima de se tornar viável.

Referências

- [1] Thomas WM, et al. International Patent Application. Friction stir butt welding. United Kingdom patent UK PCT/GB92/02203. 1991.
- [2] Nelson TW, Sorenson CD, Johns CJ. US Patent. Friction Stir Welding of Polymeric Materials. Patent n° US 6,811,632 B2. 2004.
- [3] Panneerselvam K, Lenin K. Joining of Nylon 6 plate by friction stir welding process using threaded pin profile. *Materials & Design*. 2014;53:302-307. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2013.07.017>.
- [4] Hoseinlghab S, Mirjavadi SS, Sadeghian N, Jalili I, Azarbarmas M, Besharati Givi MK. Influences of welding parameters on the quality and creep properties of friction stir welded polyethylene plates. *Materials & Design*. 2015;67:369-378. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2014.11.039>.

- [5] Murr LE, Liu G, McClure JC. Dynamic recrystallization in friction-stir welding of aluminium alloy 1100. *Journal of Materials Science Letters*. 1997;16(22):1801-1803. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1018556332357>.
- [6] Pires JP, Cota BS, Bracarense AQ, Campolina BA. Predição da distribuição de temperatura em juntas da liga de alumínio 5052 H34 soldadas pelo processo friction stir welding. *Soldagem e Inspeção*. 2018;23(2):247-263. <http://dx.doi.org/10.1590/0104-9224/si2302.11>.
- [7] Commin L, Dumont M, Masse JE, Barrallier L. Friction stir welding of AZ31 magnesium alloy rolled sheets: influence of processing parameters. *Acta Materialia*. 2009;57(2):326-334. <http://dx.doi.org/10.1016/j.actamat.2008.09.011>.
- [8] Afrin N, Chen DL, Cao X, Jahazi M. Microstructure and tensile properties of friction stir welded AZ31B magnesium alloy. *Materials Science and Engineering A*. 2008;472(1-2):179-186. <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2007.03.018>.
- [9] Barlas Z, Uzun H. Microstructure and mechanical properties of friction stir butt welded dissimilar Cu/CuZn30 sheets. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2008;30(2):182-186.
- [10] Sakthivel T, Mukhopadhyay J. Microstructure and mechanical properties of friction stir welded copper. *Journal of Materials Science*. 2007;42(19):8126-8129. <http://dx.doi.org/10.1007/s10853-007-1666-y>.
- [11] Fujii H, Cui L, Tsuji N, Maeda M, Nakata K, Nogi K. Friction stir welding of carbon steels. *Materials Science and Engineering A*. 2006;429(1-2):50-57. <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2006.04.118>.
- [12] Cui L, Fujii H, Tsuji N, Nogi K. Friction stir welding of a high carbon steel. *Scripta Materialia*. 2007;56(7):637-640. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scriptamat.2006.12.004>.
- [13] Andrade TC, Silva CC, Miranda HC, Motta MF, Farias JP, Bergman LA, et al. Microestrutura de uma solda dissimilar entre o aço inoxidável ferrítico AISI 410S e o aço inoxidável austenítico AISI 304L soldado pelo processo FSW. *Soldagem e Inspeção*. 2015;20(4):467-478. <http://dx.doi.org/10.1590/0104-9224/SI2004.13>.
- [14] Sato YS, Nelson TW, Sterling CJ, Steel RJ, Pettersson C-O. Microstructure and mechanical properties of friction stir welded SAF 2507 super duplex stainless steel. *Materials Science and Engineering A*. 2005;397(1-2):376-384. <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2005.02.054>.
- [15] Lee WB, Lee C-Y, Chang W-S, Yeon Y-M, Jung S-B. Microstructural investigation of friction stir welded pure titanium. *Materials Letters*. 2005;59(26):3315-3318. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matlet.2005.05.064>.
- [16] Su JQ, Nelson TW, Mishra R, Mahoney M. Microstructural investigation of friction stir welded 7050-T651 aluminium. *Acta Materialia*. 2003;51(3):713-729. [http://dx.doi.org/10.1016/S1359-6454\(02\)00449-4](http://dx.doi.org/10.1016/S1359-6454(02)00449-4).
- [17] Kallee SW. 5 – Industrial applications of friction stir welding. Cambridge: Woodhead Publishing; 2010. p. 118-163. <http://dx.doi.org/10.1533/9781845697716.1.118>.
- [18] Geyer R, Jambeck JR, Law KL. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*. 2017;3(7):e1700782. <http://dx.doi.org/10.1126/sciadv.1700782>. PMID:28776036.
- [19] Haque MS, Siddiqui MA. Plastic welding: important facts and developments. *American Journal of Mechanical and Industrial Engineering*. 2016;1(2):15-19. <https://doi.org/doi:10.11648/j.ajmie.20160102.12>.
- [20] Aydin M. Effects of welding parameters and pre-heating on the friction stir welding of UHMW-Polyethylene. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*. 2010;49(6):595-601. <http://dx.doi.org/10.1080/03602551003664503>.
- [21] Sadeghian N, Besharati Givi MK. Experimental optimization of the mechanical properties of friction stir welded Acrylonitrile Butadiene Styrene sheets. *Materials & Design*. 2015;67:145-153. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2014.11.032>.
- [22] Aghajani Derazkola H, Simchi A. Experimental and thermomechanical analysis of the effect of tool pin profile on the friction stir welding of poly(methyl methacrylate) sheets. *Journal of Manufacturing Processes*. 2018;34:412-423. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.06.015>.
- [23] Kordestani F, Ashenai Ghasemi F, Arab NBM. Effect of pin geometry on the mechanical strength of friction stir welded polypropylene composite plastes. *Mechanics of Composite Materials*. 2017;53(4):525-532. <http://dx.doi.org/10.1007/s11029-017-9682-8>.
- [24] Zafar A, Awang M, Khan SR, Emamian S. Investigating friction stir welding on thick nylon 6 plates. *Welding Journal*. 2016;95:210-218.
- [25] Rezaee Hajideh M, Farahani M, Alavi SAD, Molla Ramezani N. Investigation on the effects of tool geometry on the microstructure and the mechanical properties of dissimilar friction stir welded polyethylene and polypropylene sheets. *Journal of Manufacturing Processes*. 2017;26:269-279. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.02.018>.
- [26] Singh R, Kumar V, Feo L, Fraternali F. Experimental investigations for mechanical and metallurgical properties of friction stir welded recycled dissimilar polymer materials with metal powder reinforcement. *Composites. Part B, Engineering*. 2016;103:90-97. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.08.005>.
- [27] Gao J, Li C, Shilpakar U, Shen Y. Improvements of mechanical properties in dissimilar joints of HDPE and ABS via carbon nanotubes during friction stir welding process. *Materials & Design*. 2015;86:289-296. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2015.07.095>.
- [28] Mark JE. *The polymer data handbook*. New York: OUP USA; 2009.

- [29] Bozkurt Y. The optimization of friction stir welding process parameters to achieve maximum tensile strength in polyethylene sheets. *Materials & Design*. 2012;35:440-445. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2011.09.008>.
- [30] Aghajani Derazkola H, Simchi A, Lambiasi F. Friction stir welding of polycarbonate lap joints: relationship between processing parameters and mechanical properties. *Polymer Testing*. 2019;79:105999. <http://dx.doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.105999>.
- [31] Zhang Y, Liang Y. Extrusion processing of ultra-high molecular weight polyethylene. In: Qamar SZ, editor. *Extrusion of metals, polymers and food products*. London: InTech. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.72212>.
- [32] Kausch HH, Tirrell M. Polymer Interdiffusion. *Annual Review of Materials Science*. 1989;19(1):341-377. <http://dx.doi.org/10.1146/annurev.ms.19.080189.002013>.
- [33] Shazly M, Ahmed MMZ, El-Raey M. Friction stir welding of polycarbonate sheets. In: Carpenter JS, Bai C, Hwang J-Y, Ikhmayies S, Li B, Monteiro SN, Peng Z, Zhang M, editors. *Characterization of minerals, metals, and materials 2014*. New York: John Wiley & Sons; 2014. <http://dx.doi.org/10.1002/9781118888056.ch65>.
- [34] Aghajani Derazkola H, Simchi A. Experimental and thermomechanical analysis of friction stir welding of poly(methyl methacrylate) sheets. *Science and Technology of Welding and Joining*. 2018;23(3):209-218. <http://dx.doi.org/10.1080/13621718.2017.1364896>.
- [35] Sahu SK, Mishra D, Mahto RP, Sharma VM, Pal SK, Pal K, et al. Friction stir welding of polypropylene sheet. *Engineering Science and Technology*. 2018;21(2):245-254.
- [36] Eslami S, Ramos T, Tavares PJ, Moreira PMGP. Shoulder design developments for FSW lap joints of dissimilar polymers. *Journal of Manufacturing Processes*. 2015;20:15-23. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2015.09.013>.
- [37] Eslami S, Figueiredo MAV, Tavares PJ, Moreira PMGP. Parameter optimisation of friction stir welded dissimilar polymer joints. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018;94(5-8):1759-1770. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-017-0043-5>.
- [38] Mehta M, Arora A, De A, DebRoy T. Tool geometry for friction stir welding: optimum shoulder diameter. *Metallurgical and Materials Transactions. A, Physical Metallurgy and Materials Science*. 2011;42(9):2716-2722. <http://dx.doi.org/10.1007/s11661-011-0672-5>.
- [39] Zhang YN, Cao X, Larose S, Wanjara P. Review of tools for friction stir welding and processing. *Canadian Metallurgical Quarterly*. 2012;51(3):250-261. <http://dx.doi.org/10.1179/1879139512Y.0000000015>.
- [40] Souza GS. *Influência da geometria da ferramenta na soldagem da liga de alumínio 5052 pelo processo friction stir welding [dissertação de mestrado]*. Curitiba: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2010.
- [41] Mendes N, Loureiro A, Martins C, Neto P, Pires JN. Effect of friction stir welding parameters on morphology and strength of acrylonitrile butadiene styrene plate welds. *Materials & Design*. 2014;58:457-464. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2014.02.036>.
- [42] Bagheri A, Azdast T, Doniavi A. An experimental study on mechanical properties of friction stir welded ABS sheets. *Materials & Design*. 2013;43:402-409. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2012.06.059>.
- [43] Buffa G, Hua J, Shivpuri R, Fratini L. Design of the friction stir welding tool using the continuum based FEM model. *Materials Science and Engineering A*. 2006;419(1-2):381-388. <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2005.09.041>.
- [44] Arici A, Sinmazçelýk T. Effects of double passes of the tool on friction stir welding of polyethylene. *Journal of Materials Science*. 2005;40(12):3313-3316. <http://dx.doi.org/10.1007/s10853-005-2709-x>.
- [45] Boz M, Kurt A. The influence of stirrer geometry on bonding and mechanical properties in friction stir welding process. *Materials & Design*. 2004;25(4):343-347. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2003.11.005>.
- [46] Kiss Z, Czigány T. Applicability of friction stir welding in polymeric materials. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*. 2007;51(1):15-18. <http://dx.doi.org/10.3311/pp.me.2007-1.02>.
- [47] Payganeh GH, Arab NBM, Asl YD, Ghasemi FA, Boroujeni MS. Effects of friction stir welding process parameters on appearance and strength of polypropylene composite welds. *International Journal of Physical Sciences*. 2011;6(19):4595-4601. <http://dx.doi.org/10.5897/IJPS11.866>.
- [48] Mendes N, Loureiro A, Martins C, Neto P, Pires JN. Morphology and strength of acrylonitrile butadiene styrene welds performed by robotic friction stir welding. *Materials & Design*. 2014;64:81-90. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2014.07.047>.
- [49] Arici A, Selale S. Effects of tool tilt angle on tensile strength and fracture location of friction stir welding of polyethylene. *Science and Technology of Welding and Joining*. 2007;12(6):536-539. <http://dx.doi.org/10.1179/174329307X173706>.