



De 21/10/2015 a 23/10/2015



EFEITO DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM FRICTION STIR WELDING SOBRE A UNIÃO DE CHAPAS SOBREPOSTAS DE ACRÍLICO

Augusto Marcel Garbrecht, ag001712@fahor.com.br¹ Eduardo Breitenbach Camargo, ec001727@fahor.com.br¹ Richard Thomas Lermen, richard@fahor.com.br¹ Anderson Dal Molin, anderson@fahor.com.br¹

¹FAHOR - Avenida dos Ipês, 565 - Horizontina - RS - CEP: 98.920-000 - Brasil

RESUMO

Com o crescimento da substituição de estruturas metálicas por estruturas poliméricas em diversos setores a união de termoplásticos ganha destaque. Dentre as técnicas de soldagem de polímeros, a friction stir welding diferencia-se dos demais processos, principalmente, por ocorrer no estado sólido, isto é, não há a fusão do material nem a necessidade do uso de material de adição. Com o objetivo de analisar os efeitos dos parâmetros de soldagem sobre a seção transversal do conjunto soldado e a qualidade visual do cordão de solda, foi realizada a soldagem sobreposta de chapas de acrílico. Para os testes experimentais de soldagens três parâmetros foram analisados, tais como: velocidade de soldagem (90, 270, 480 e 670 mm/min); tipo de ferramenta (pino facetado e pino roscado); e rotação (2500, 3000 e 3500 RPM). Os resultados encontrados permitem concluir que a geometria da ferramenta influencia o preenchimento longitudinal do cordão de solda. A velocidade de rotação tem efeito sobre a altura da região defeituosa acima dos corpos soldados, enquanto a velocidade de soldagem afeta o preenchimento da seção transversal do cordão de solda.

Palavras-chave: Friction stir welding, acrílico, parâmetros de soldagem.

ABSTRACT

Due the growth in the substitution of metallic structures for polymeric structures in many departments the union of thermoplastics is highlighted. Between polymeric weldment techniques, the friction stir welding differs from the other processes, mainly, because it happens in the solid state, that is, there is no fusion of the material and no addition material is needed. In order to analyze the effects of the welding parameters on the cross section of the welded conjunct and the visual quality of the welding cord, the overlay welding of acrylic sheets was performed. For experimental welding tests three parameters were analyzed, such as: welding linear speed (90, 270, 480 and 670 mm/min); tool geometry (faceted and threaded); and tool rotation (2500, 3000 and 3500 RPM). The results allow the conclusion that the tool geometry affects the longitudinal filling of the welding cord. The tool rotation affects the height of the defective region above the welding cord, while the welding linear speed affects the filling of the welding cord's cross section.

Keywords: Friction stir welding, acrylic, welding parameters.

INTRODUÇÃO

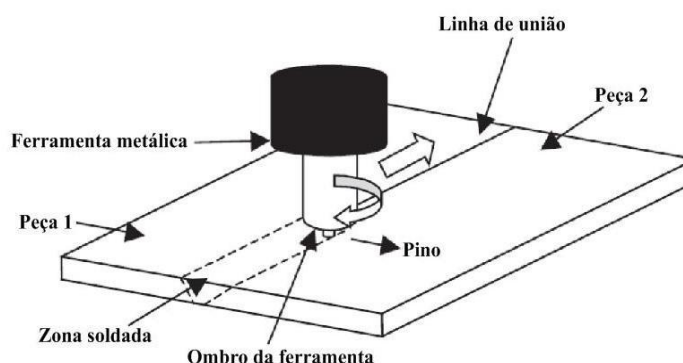
Yousefpour, Hojjati e Immarigeon (2004) apontam que os processos de união de polímeros se dividem em três grupos, isto é, grupo da soldagem térmica, soldagem eletromagnética e soldagem por atrito. A soldagem térmica corresponde à soldagem por gás aquecido, soldagem infravermelho e soldagem por LASER. A soldagem eletromagnética

consiste na soldagem dielétrica, a qual aplica um campo elétrico alternado de alta amplitude na chapa ou filme de plástico a ser soldado. Na soldagem por atrito aparecem técnicas como a soldagem vibracional, ultrassônica e soldagem por fricção/mistura ("Friction Stir Welding - FSW"), na qual duas superfícies são atritadas até que a fricção crie calor suficiente e os materiais são levados a um estado plástico, sem alcançar o ponto de fusão, e aplica-se uma força de forja para completar a solda.

Uma das principais vantagens da FSW sobre as técnicas de soldagem convencionais é ser um processo de união no estado sólido, ou seja, não ocorre fusão/solidificação das partes envolvidas e com isso tem-se a ausência de problemas como trincas de solidificação e tensões residuais. (Oliveira et al., 2012).

De acordo com Yousefpour, Hojjati e Immarigeon (2004), nessa técnica as partes a serem soldadas devem estar firmemente conectadas. Um pino de metal rotacional penetra as peças até que o ombro da ferramenta toque a superfície das chapas, conforme indicado na Fig. 1.

Figura 1. Desenho esquemático do processo FSW (Yousefpour, Hojjati e Immarigeon, 2004).



Ainda segundo os autores, a ferramenta, então, percorre toda a linha de união. O calor gerado pelo atrito entre a ferramenta e a peça amolece o material. O polímero amolecido é forjado na parte posterior do pino, onde se mistura, resultando numa solda.

Segundo Payganeh et al. (2011), os parâmetros que influenciam no processo FSW são: a velocidade de rotação da ferramenta, velocidade linear, força axial e ângulo de inclinação da ferramenta. Ainda segundo o autor, a geometria do pino tem grande influência no processo, principalmente sobre a aparência da solda e as tensões no material.

Mishra e Ma (2005) apontam que a velocidade de rotação está diretamente ligada à geração de calor pelo atrito. Porém, devido ao coeficiente de atrito, há um limite na rotação e outros parâmetros devem ser modificados para obtenção de condições favoráveis

de soldagem.

A velocidade de soldagem tem relação direta com a geração de calor durante a soldagem, quanto menor a velocidade, maior o calor gerado no processo. Conseqüentemente, este parâmetro tem influência significativa nas propriedades mecânicas e na microestrutura resultante. (Capelari, 2006).

Kiss e Czigány (2007) indicam velocidades de soldagem na faixa de 400 mm/min e rotação de 630 RPM para a soldagem de materiais poliméricos. Segundo Payganeh et al. (2011), o ângulo de inclinação afeta o fluxo vertical e horizontal do material soldado.

Conforme Khaled (2005) e Mishra e Ma (2005), a geometria da base assume papel importante no aquecimento e confinamento do volume de material aquecido. A relação entre a base/pino e sua relação de dimensões são os elementos chaves da geometria da ferramenta.

Segundo Yousefpour, Hojjati e Immarigeon (2004), a soldagem de termoplásticos está se tornando relevante, pois, conforme reportou um grupo da companhia Boeing em estudo de comparação de custos, uma economia de energia superior a 61% foi atingida ao substituir uma estrutura polimérica parafusada por uma estrutura do mesmo material, porém soldada.

O principal objetivo deste artigo foi realizar a soldagem de chapas sobrepostas de acrílico através da técnica *FSW*, de forma a analisar os efeitos dos parâmetros de soldagem sobre a seção transversal do conjunto soldado e a qualidade visual do cordão de solda.

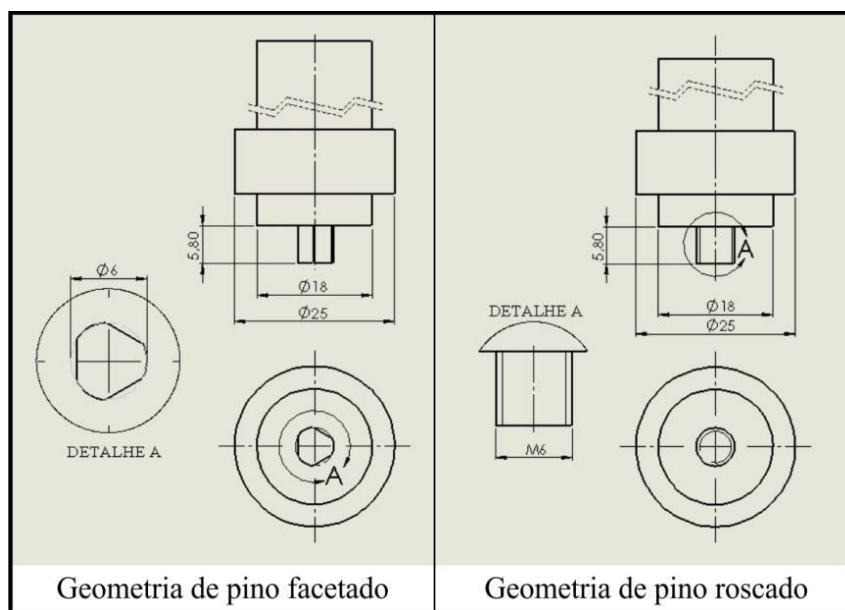
MATERIAIS E MÉTODOS

Chapas de acrílico Cast 45 com dimensões de 150,0 x 50,0 x 3,0 mm foram utilizadas na confecção dos corpos de prova.

A soldagem foi realizada numa máquina fresadora Sanches Blaines SA, modelo FHVII A, que possui controle da velocidade de rotação da ferramenta e do avanço automático da peça.

Foram confeccionadas duas ferramentas de soldagem em aço ABNT 1020. Os detalhes da geometria do pino das ferramentas encontram-se na Fig. 2.

Figura 2. Detalhes da geometria do pino das ferramentas utilizadas, onde as dimensões são dadas em milímetros.



De forma a avaliar o efeito dos parâmetros de soldagem, foram testadas duas geometrias de ferramenta, três velocidades de rotação e quatro velocidades de soldagem. O projeto de experimento, baseado na metodologia fatorial completo, encontra-se na Tab. 1.

Tabela 1. Projeto de experimento.

Corpo de prova	Geometria	Rotação (RPM)	Velocidade de soldagem (mm/min)
F01	Pino Facetado	2500	90
F02	Pino Facetado	2500	270
F03	Pino Facetado	2500	480
F04	Pino Facetado	2500	670
F05	Pino Facetado	3000	90
F06	Pino Facetado	3000	270
F07	Pino Facetado	3000	480
F08	Pino Facetado	3000	670
F09	Pino Facetado	3500	90
F10	Pino Facetado	3500	270
F11	Pino Facetado	3500	480
F12	Pino Facetado	3500	670
R01	Pino Roscado	2500	90
R02	Pino Roscado	2500	270
R03	Pino Roscado	2500	480
R04	Pino Roscado	2500	670
R05	Pino Roscado	3000	90
R06	Pino Roscado	3000	270
R07	Pino Roscado	3000	480
R08	Pino Roscado	3000	670
R09	Pino Roscado	3500	90
R10	Pino Roscado	3500	270
R11	Pino Roscado	3500	480
R12	Pino Roscado	3500	670

Conforme indicado na Tab. 1, no total, foram testadas 24 configurações diferentes

de soldagem. A escolha dos valores para a rotação da ferramenta e a velocidade de soldagem foi feita através da análise de testes experimentais iniciais e conforme literatura.

Para fixação dos corpos de prova na máquina fresadora, foi desenvolvido um sistema de fixação, que foi preso à morsa presente no equipamento.

A Figura 3 mostra um detalhe do sistema de fixação. A união dos corpos de prova no sistema de fixação foi realizada com o auxílio de quatro parafusos.

Figura 3. Detalhe do sistema de fixação.

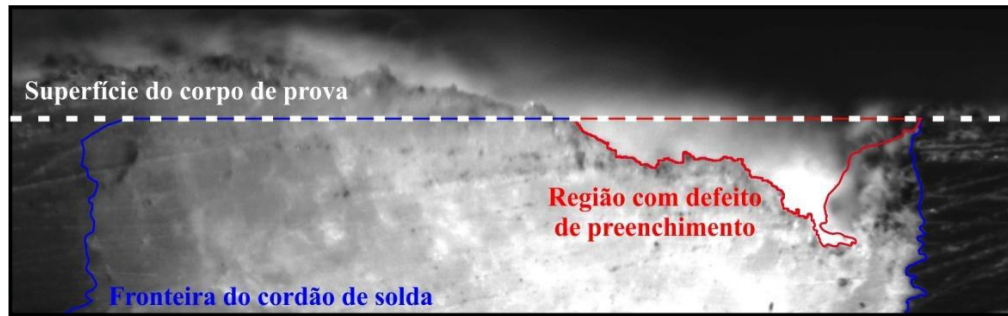


Depois de realizada a soldagem, os conjuntos soldados foram seccionados e polidos para realização de ensaios de macrografia. Os ensaios, utilizados para medições de preenchimento transversal de cordão de solda e de acabamento superficial, foram realizados através de um microscópio estereo marca Opton.

Medição do preenchimento da seção transversal do cordão de solda

A medição do percentual de preenchimento do cordão de solda foi realizada através de dois softwares: Coreldraw e Solidworks. O Coreldraw foi utilizado para traçado da fronteira do cordão de solda e das regiões que apresentaram defeitos de preenchimento, como fendas ou rebaixos. O traçado das regiões está exposto na Fig. 4.

Figura 4. Detalhe da macrografia do conjunto de prova R02.

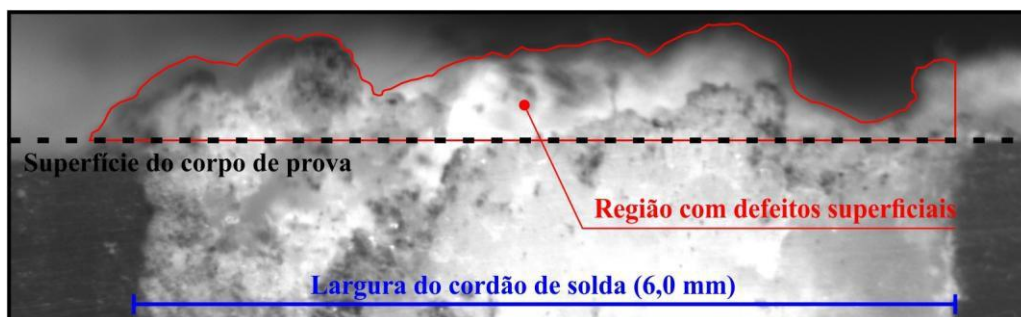


Os contornos de cada região foram exportados e carregados no Solidworks, onde se realizou a medição da área de cada traçado. As áreas – fronteira do cordão e região com defeitos de preenchimento – ao serem comparadas, forneceram o percentual de preenchimento do cordão de solda.

Medição do acabamento superficial

A medição do acabamento superficial de solda ocorreu de forma semelhante à medição do preenchimento da seção transversal do cordão. A área que foi traçada e teve sua área calculada foi a região acima do cordão de solda, que é tida como defeituosa, pois forma ressaltos que afetam a qualidade superficial da peça. A área em que foi realizada a medição aparece na Fig. 5.

Figura 5. Detalhe da macrografia do conjunto de prova R07.



O valor de área encontrado para a região com defeitos superficiais foi dividido pela largura do cordão de solda (6,0 mm). O resultado mostrou a altura média da região defeituosa, o que foi utilizado como critério para avaliação da qualidade superficial do cordão.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A apresentação dos resultados divide-se em quatro partes. A primeira trata da

importância do sistema de fixação. A segunda parte traz a análise sobre os efeitos da geometria do pino da ferramenta sobre o preenchimento de seção longitudinal do cordão de solda. A terceira apresenta a influência da rotação da ferramenta sobre a qualidade superficial

do conjunto soldado. A última relata o efeito da velocidade de soldagem sobre o percentual de preenchimento da seção transversal do cordão de solda.

Sistema de fixação

Durante realização dos experimentos foi constatada a importância de um rígido sistema de fixação. Conforme indicado na Fig. 6, três conjuntos de prova apresentaram trincas na região final da solda, resultado do empenamento das chapas de acrílico durante a soldagem.

Figura 6. Corpos de prova trincados.



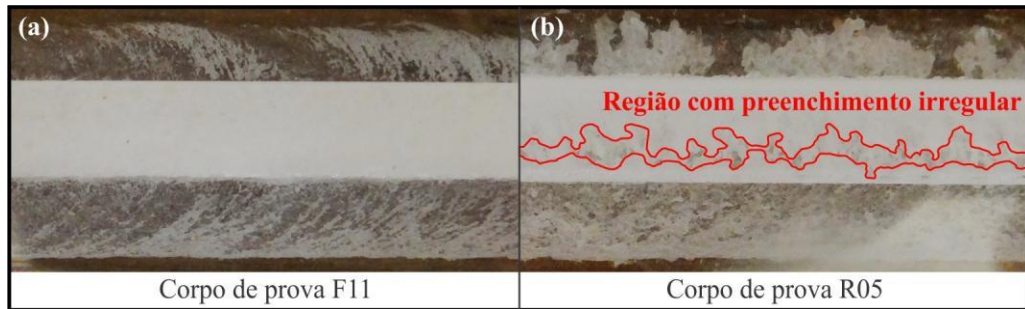
Este problema foi resolvido através do aumento da força de aperto nos parafusos de fixação e na morsa que une o sistema à bancada da máquina fresadora.

Geometria do pino da ferramenta

A geometria do pino da ferramenta teve influência sobre o preenchimento da seção transversal de solda e sobre o preenchimento longitudinal da região de soldagem. A Figura 7 mostra duas situações de cordão de solda encontradas durante o experimento: cordão totalmente preenchido e cordão com preenchimento irregular. A Figura 7 (a) mostra o cordão de solda totalmente preenchido, o qual foi gerado utilizando a ferramenta de pino facetado, rotação de 3500 RPM e velocidade de soldagem de 480 mm/min. A Figura 7 (b) mostra o cordão de solda gerado pela ferramenta de pino roscado, rotação de 3000 RPM e velocidade de soldagem de 90 mm/min. Conforme indicado, o cordão gerado por esta ferramenta apresentou preenchimento irregular, constatado pelas crateras no interior do

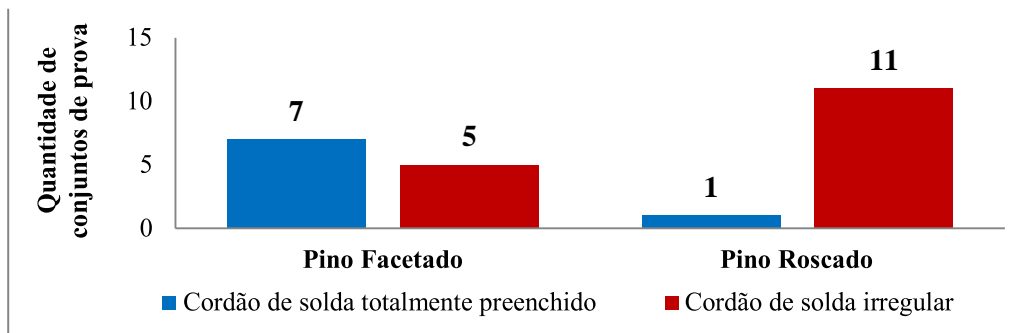
cordão.

Figura 7. Efeito da geometria da ferramenta no preenchimento longitudinal da região de soldagem. a) Ferramenta com geometria de pino facetado. b) Ferramenta com geometria de pino roscado.



De acordo com a Fig. 8, dos doze corpos de prova testados com a ferramenta de pino facetado, sete apresentaram cordão de solda totalmente preenchido. Já na ferramenta com geometria de pino roscada, o número de corpos de prova com preenchimento total foi de apenas um.

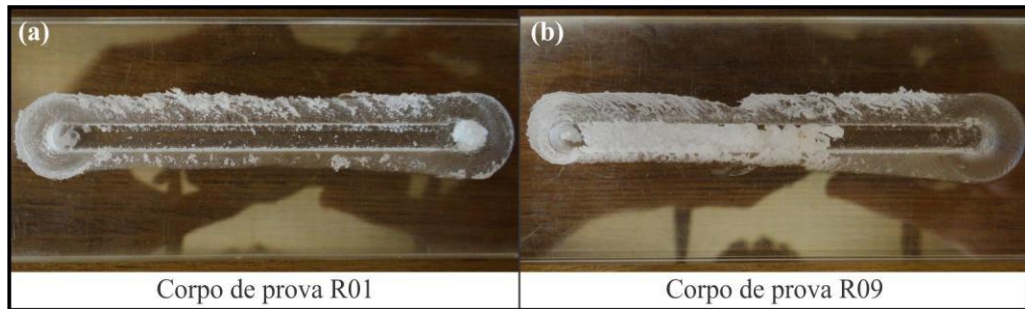
Figura 8. Comparação entre geometria da ferramenta e quantidade de conjuntos de prova com preenchimento total do cordão de solda.



Outro problema que surgiu durante a soldagem utilizando a geometria de pino roscado foi o desprendimento do cordão de solda de região de soldagem. Conforme a Fig. 9, a soldagem realizada com a ferramenta de pino roscado, rotação de 2500 RPM e velocidade de soldagem de 90 mm/min teve seu cordão totalmente expelido, enquanto que na soldagem realizada com a ferramenta de pino roscado, rotação de 3500 RPM e velocidade de soldagem de 90 mm/min o cordão foi parcialmente eliminado. Problemas desta natureza não apareceram durante soldagens com a ferramenta de pino facetado.

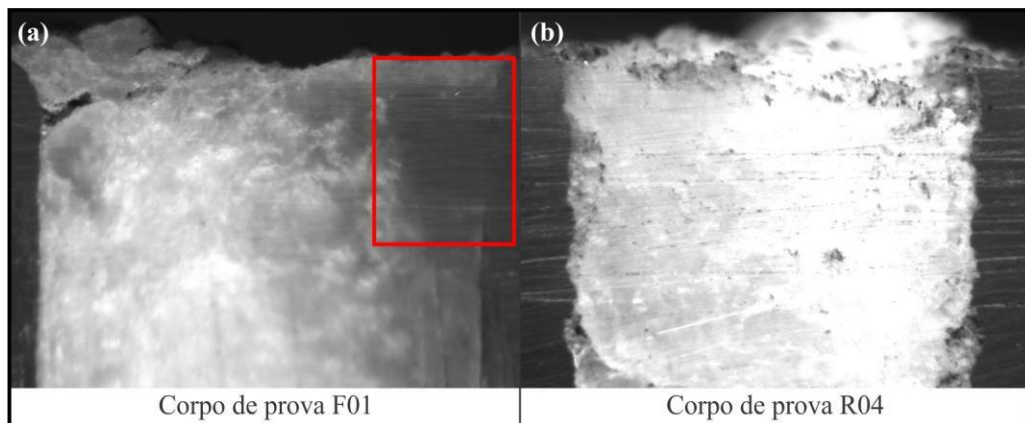
Figura 9. Ausência de cordão de solda durante soldagem com ferramenta com geometria de pino roscado. a) Eliminação total do cordão de solda. b) Eliminação parcial do cordão de

solda.



Esta fragmentação entre cordão de solda e região de soldagem é percebida através da análise macroestrutural das seções de soldagem. A Figura 10 mostra a macrografia da união das chapas de acrílico com diferentes ferramentas.

Figura 10. Efeito da geometria da ferramenta sobre a união entre cordão de solda e região de soldagem. a) Ferramenta de pino facetado. b) Ferramenta de pino roscado.



Conforme indicado na Fig. 10 (a), nos corpos de prova soldados com a ferramenta de pino facetado houve mistura, em certas regiões, entre o cordão de solda e as regiões adjacentes. Este fenômeno não ocorreu para a geometria de pino roscado. Pela Figura 10 (b) está clara a distinção entre cordão de solda e regiões adjacentes dos corpos de prova.

Conforme observado por Mendes et al. (2014), defeitos de mistura estão ligados à geometria do pino e costumam ocorrer na superfície de saída da ferramenta. Os defeitos ocorrem porque o calor gerado na superfície de saída torna-se insuficiente para estabelecer a mistura do material.

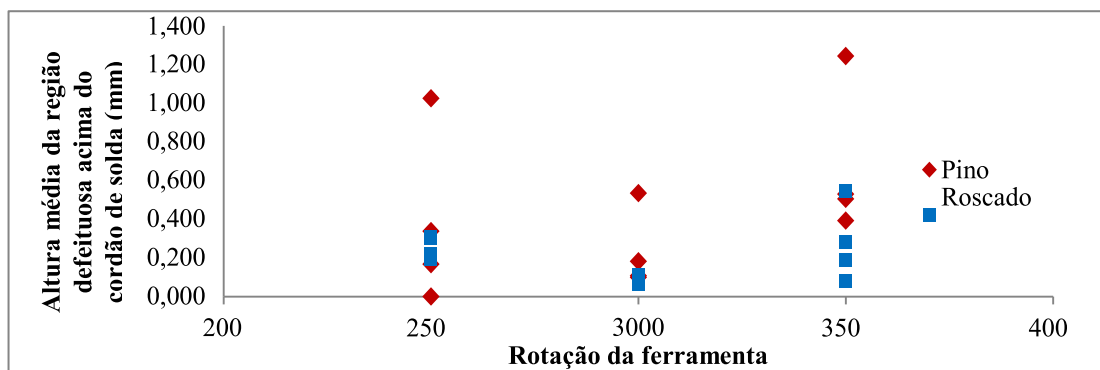
A área de ataque da ferramenta de pino facetado – aresta contínua em todo o comprimento do pino – é maior que a área de ataque da ferramenta de pino roscado, isto é, o filete da rosca. Desta forma, pode-se atribuir a fragmentação dos cordões gerados pela ferramenta de pino roscado à insuficiência de calor durante a soldagem.

Deve-se ressaltar, ainda, que a geometria da ferramenta de pino facetado possui regiões de contenção do material – regiões em que a aresta de ataque não está em contato com a região soldada, o que facilita a mistura do material. Por outro lado, a geometria da ferramenta de pino roscado, por possuir canais concêntricos, tende a expelir o material do cordão de soldagem.

Rotação da ferramenta

A Figura 11 mostra a relação entre a altura média da região defeituosa acima do cordão de solda e a rotação da ferramenta. Pode-se observar que a velocidade de rotação de 3000 RPM apresenta menor variação quanto à altura.

Figura 11. Efeito da rotação da ferramenta sobre a altura média da região defeituosa.

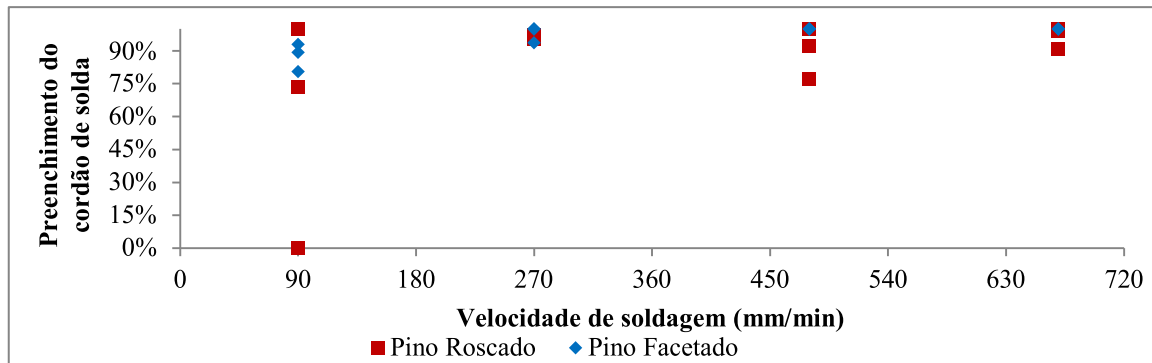


Deve-se ressaltar que a ferramenta de pino facetado apresentou soldagens com menores valores de altura média e com menor dispersão, quando comparada à ferramenta de pino roscado.

Velocidade de soldagem

A velocidade de soldagem tem influência sobre o preenchimento da seção transversal do cordão de solda. De acordo com a Fig. 12, a velocidade de soldagem que gerou cordões de solda com maior percentual de preenchimento foi diferente para cada geometria de ferramenta.

Figura 12. Efeito da velocidade de soldagem sobre o preenchimento da seção transversal do cordão de solda.



Para a geometria roscada, a velocidade de 270 mm/min gerou cordões de solda com maiores percentuais de preenchimento.

A geometria facetada apresentou cordões de solda totalmente preenchidos quando aplicadas velocidades de soldagem de 480 e 670 mm/min. Sendo assim, o efeito da velocidade de soldagem para a geometria facetada tem efeito contrário ao apresentado pela geometria de pino roscado, isto é, há o aumento do preenchimento da seção transversal com o aumento da velocidade de soldagem.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Dentre os aspectos analisados – percentual de preenchimento da seção longitudinal do cordão de solda, preenchimento do cordão longitudinal e altura média da área defeituosa acima do cordão de solda – a geometria da ferramenta afetou, principalmente, o preenchimento longitudinal do cordão de solda.

A geometria do pino da ferramenta está relacionada ao aquecimento e acomodação do material deformado na área de soldagem. Desta forma, este parâmetro afeta o desempenho da rotação da ferramenta e da velocidade de soldagem.

Os resultados encontrados demonstraram que a ferramenta com geometria de pino facetado, em comparação com a geometria de pino roscado, gerou maior quantidade de corpos de prova com preenchimento longitudinal aceitável, isto é, livre de imperfeições de preenchimento. Esta geometria também foi responsável pelos corpos de prova com maior percentual de preenchimento da seção transversal e menores valores de altura média para a

região defeituosa acima do cordão de solda.

A rotação teve efeito sobre a altura média da região defeituosa dos corpos de prova, o que afeta a qualidade visual do cordão de solda. Para ambas as geometrias de ferramenta a velocidade de 3000 RPM gerou corpos de prova com menor altura de região defeituosa. O resultado mostra que a rotação é um parâmetro que exige atenção durante seu dimensionamento, uma vez que menores alturas foram atingidas com rotação média, isto é, valores elevados ou reduzidos comprometem a qualidade visual do cordão.

A velocidade de soldagem afeta o preenchimento da seção transversal do cordão de solda. Para a ferramenta de pino facetado, as velocidades de 480 e 670 mm/min geraram soldas totalmente preenchidas. Já para a ferramenta de pino roscado, a velocidade de 270 mm/min gerou soldas com até 98% de preenchimento.

REFERÊNCIAS

- Capelari, T. V., 2006, "Avaliação da geometria da ferramenta e parâmetros do processo FSW na soldagem da liga de alumínio AA 5052", Tese (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.
- Khaled, T., 2005, "An outsider looks at friction stir welding", Federal Aviation Administration, REPORT #ANM- 112N-05-06, Lakewood, United States.
- Kiss, Z., Czigány, T., 2007, "Applicability of friction stir welding in polymeric materials", *Periodica Polytechnica*, Vol. 51, No. 1, Budapest, Hungary, pp. 15-18.
- Mendes, N., et al., 2014, "Effect of friction stir welding parameters on morphology and strength of acrylonitrile butadiene styrene plate welds", *Materials and Design*, Vol. 58, Coimbra, Portugal, pp. 457-464.
- Mishra, R. S., Ma, Z. Y., 2005, "Friction stir welding and processing", *Reports: A review journal, Materials Science and Engineering*, Vol. 50, pp. 1-78.
- Oliveira, P.H.F. et al., 2012, "Estudo de viabilidade da soldagem de termoplásticos por 'friction spot welding' (FSpW)", *Soldag. Insp. São Paulo*, Vol.17, No. 2, São Paulo, Brasil, pp.096-103.
- Payganeh, G.H. et al., 2011, "Effects of friction stir welding process parameters on appearance and strength of polypropylene composite welds", *International Journal of the Physical Sciences* Vol. 6, Tehran, Iran, pp. 4595- 4601.
- Yousefpour, A., Hojjati, M. e Immarigeon J., 2004, "Fusion bonding/welding of thermoplastic composites", *Journal of THERMOPLASTIC COMPOSITE MATERIALS*, Vol. 17, Quebec, Canada.

RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.