

OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS DE PROCESSO DE SOLDAS HÍBRIDAS DE AA6082-T6 COM ADESIVO ESTRUTURAL PARA A INDÚSTRIA AUTOMOTIVA*

Bruno Hessel Silva¹

Bráulio Salumão de Oliveira²

Guilherme Zepon³

Claudemiro Bolfarin⁴

Resumo

A fabricação de automóveis com intenso uso de ligas de alumínio é limitada atualmente pela dificuldade de adaptação de métodos de fabricação utilizados em ligas ferrosas para ligas de alumínio. Entretanto, novas tecnologias, como a solda à ponto por fricção, estão sendo desenvolvidas em busca de suprir essa demanda. Este trabalho tem o objetivo de analisar a viabilidade desse processo para a liga AA6082-T6 a partir de critérios econômicos, de propriedades mecânicas e de capacidade de adaptação em soldas com adesivo estrutural. Foi realizada a otimização de parâmetros de processo através de técnicas estatísticas, avaliadas por caracterizações estruturais, análise de fratura e análise térmica do processo. Foi observado que a soldagem a ponto por fricção é uma tecnologia viável nos quesitos econômicos e requisitos normativos. Entretanto, na questão de capacidade de adaptação de soldas híbridas com aplicação de adesivo estrutural, o processo apresentou comportamento mecânico indesejável. Esse comportamento está associado a contaminação do adesivo e detrimento dos mecanismos de difusão e mistura do processo.

Palavras-chave: Solda a ponto por fricção; Soldas Híbridas; Otimização de Parâmetros de Processo; Indústria Automotiva.

PROCESS PARAMETERS OPTIMIZATION OF HYBRID JOINTS OF AA6082-T6 WITH STRUCTURAL ADHESIVE FOR THE AUTOMOTIVE INDUSTRY

Abstract

The manufacture of automobiles with intense use of aluminum alloys is currently limited due to the difficulty of adapting manufacturing methods used in ferrous alloys for aluminum alloys. However, new technologies, such as refill friction stir spot welding (RFSSW), are being developed to meet this demand. This work aimed to analyze the feasibility of this process for the AA6082-T6 alloy from the economic aspects, mechanical properties, and adaptation in welds with structural adhesive. It was optimized the process parameters through statistical techniques, evaluated by structural characterization, fracture, and thermal analysis. It was observed that RFSSW is a viable technology from standard requirements and economic criteria. However, regarding hybrid welds with the application of structural adhesive, the process presented undesirable mechanical performance. This behavior is associated with the adhesive contamination and the detriment of the diffusion and stirring mechanisms of the process.

Keywords: Refill Friction Stir Spot Welding; Hybrid Joints; Process Parameters Optimization; Automotive Industry.

¹ Mestrando em Ciência e Engenharia de Materiais, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPGCEM), Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos, São Paulo (SP), Brasil.

² Doutorando em Ciência e Engenharia de Materiais, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPGCEM), Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos, São Paulo (SP), Brasil.

³ Professor Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais, Departamento de Engenharia de Materiais (DEMa), Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPGCEM), São Carlos, São Paulo (SP), Brasil.

⁴ Professor Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais, Departamento de Engenharia de Materiais (DEMa), Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPGCEM), São Carlos, São Paulo (SP), Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, um dos grandes desafios da indústria automotiva envolve a substituição de processos de soldagem e junção de componentes fabricados em ligas ferrosas por processos ou juntas apropriadas para ligas de baixa densidade, como as de alumínio e magnésio. Entretanto, essa substituição necessita de inúmeros estudos e validações em relação aos requerimentos mecânicos, ambientais, econômicos, de produtividade e adaptação a outras tecnologias [1,2].

Um processo muito utilizado pela indústria automotiva nesse contexto é a soldagem a ponto por resistência, que apresenta limitações para soldas de ligas de alumínio como desgaste excessivo de eletrodos, soldas não uniformes, dificuldade de controle de parâmetros de soldagem e alto consumo de energia elétrica. Em adição a esses pontos, essa tecnologia é de complexa adaptação a procedimentos que envolvam resinas poliméricas, como adesivos estruturais, visto que o calor gerado durante a solda resulta em degradação do adesivo [1,3]. Outro método utilizado intensivamente para união de ligas de alumínio é o *self-pierce riveting* (técnica de rebiteamento auto perfurante), que apresenta propriedades mecânicas interessantes. Entretanto, a utilização de consumíveis torna a sua aplicação em larga escala inviável devido ao custo. Assim, a pesquisa e investimento no desenvolvimento das tecnologias de união de alumínio para a indústria automotiva ainda são intensos [2,3].

Uma das recentes tecnologias que apresentaram um expressivo crescimento em estudos para aplicação na indústria automotiva é a soldagem a ponto por fricção, do inglês *Refill Friction Stir Spot Welding* (RFSSW). Diferente da soldagem a ponto por resistência e *self-pierce riveting*, essa técnica produz soldas sem fusão dos elementos de união, necessita baixo consumo de energia elétrica, não utiliza consumíveis e tem apresentado resultados mecânicos superiores a diversas tecnologias para junção de materiais similares e dissimilares. Entretanto, o estudo da viabilidade dessa tecnologia em soldas híbridas, que se baseiam na combinação do método de solda em adição com adesivo estrutural, ainda é escasso [4].

Essa tecnologia foi desenvolvida e patenteada pelo instituto de pesquisa alemão *Helmholtz Zentrum Geesthacht* (HZG) e consiste na soldagem por fricção e mistura dos materiais no estado sólido, a fim de evitar possíveis limitações do processo de solidificação como porosidade, trincas e outros defeitos. O processo utiliza uma ferramenta não-consumível com três elementos de movimento independentes: o pino, a camisa e o anel de fixação. A Figura 1 apresenta uma ilustração esquemática do processo de solda em quatro etapas. Primeiro, a ferramenta é posicionada e realiza a fixação das duas chapas por meio do anel de fixação e um anteparo (a). Após a fixação, a camisa e o pino que rotacionam sobre as chapas realizam o movimento de penetração e retração respectivamente, de modo que ocorre a plastificação do metal por meio do calor de fricção e mistura. O material plastificado preenche a cavidade deixada pela retração do pino (b) e, posteriormente, é pressionado de volta a posição inicial pelo pino, ao mesmo tempo em que a camisa retrai (c). Por fim, o pino, a camisa e o anel de fixação são desacoplados da junta que resulta em uma superfície livre de defeitos (d) [4].

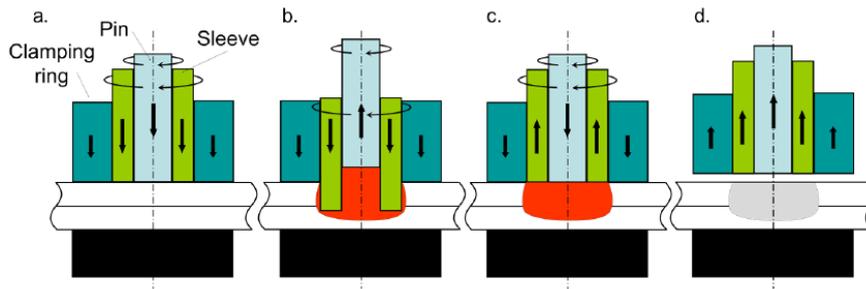


Figura 1. Ilustração esquemática das etapas do processo de solda a ponto por fricção (pin-pino; sleeve-camisa; clamping; ring-anel de de fixação) [4].

Alguns estudos de soldagem a ponto por fricção demonstraram excelente resistência ao cisalhamento para soldas de materiais similares [4]. A Figura 2 apresenta, para diferentes ligas de magnésio e alumínio, desempenho mecânico superior ao exigido pela norma aeroespacial que, por sua vez, exige valores superiores aos das normas automotivas [4].

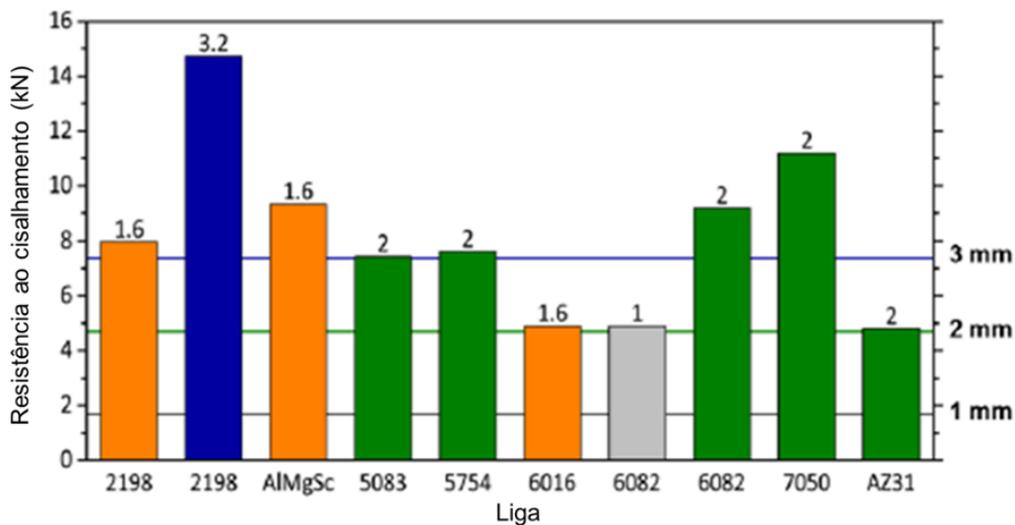


Figura 2. Resistência ao cisalhamento de materiais similares unidos por soldagem a ponto por fricção. A espessura em milímetros das chapas é apresentada no topo de cada barra e as linhas horizontais são relativas ao valor mínimo de resistência ao cisalhamento para cada espessura, segundo a norma AWS D17.2 [4].

Trabalhos recentes de solda a ponto por fricção na liga AA6082-T6 realizaram a avaliação de resistência ao cisalhamento para amostras de 2 mm de espessura [4,5]. Embora as resistências médias de cisalhamento obtidas sejam elevadas (8,5 e 9 kN), acima do que exige a norma (4,9 kN), é importante salientar que os tempos de solda utilizados foram maiores que 1.8s, incompatíveis com a exigências de produtividade da indústria automotiva [4,5].

Baseado nessas considerações, o objetivo deste trabalho foi avaliar e comparar a viabilidade do processo de solda a ponto por fricção com tecnologias já consolidadas na união de ligas de alumínio quanto a critérios mecânicos, econômicos e da capacidade de adaptação a soldas híbridas. Em relação a este último critério, o atual estudo também objetivou a otimização de parâmetros do processo RFSSW com adesivo estrutural a base de epóxi, para a indústria automotiva.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados neste trabalho consistiram em chapas de alumínio AA6082-T6 laminadas, de dimensões 100x25.4x2 mm, cujo a composição química está disponível na Tabela 1, além de um adesivo estrutural à base de epóxi.

Tabela 1. Composição química da liga de alumínio AA6082 em porcentagem em peso.

Material	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr
AA6082	0,7-1,3	0,5	0,1	0,4-1,0	0,6-1,2	0,2	0,25

O procedimento empregado nesta pesquisa foi constituído das seguintes etapas: (i) Comparação de viabilidade do processo de solda a ponto por fricção, (ii) Planejamento de experimentos e otimização de parâmetros de processo e (iii) Caracterização. A viabilidade foi avaliada a partir do tempo de solda, carga máxima de cisalhamento (CC) e arrancamento (CA), essas últimas previstas em norma [6]. Adicionalmente, a comparação de custos de produção foi realizada a partir de dados obtidos por um artigo de referência [3] e em consulta a um engenheiro de indústria automotiva alemã. Os experimentos foram avaliados a partir das respostas de cargas de cisalhamento e arrancamento. A caracterização utilizou técnicas de análises microestrutural, de fratura e térmica do processo, com foco em identificar as causas do comportamento observado em soldas híbridas e verificar a possível viabilidade quanto aos critérios previamente estabelecidos.

Na primeira etapa, definiu-se as restrições e critérios de aceitação através da análise do artigo “*Comparison of self-pierce riveting, resistance spot welding and spot friction joining for aluminium automotive sheet*” [3]. Essas restrições e critérios foram comparados com valores e parâmetros já praticados pela indústria automobilística e presentes na norma D8.2M-2017 [3,6], e são apresentados resumidamente a seguir.

Restrições:

- Valor médio mínimo de resistência ao cisalhamento – 3,5 kN
- Valor médio mínimo de resistência ao arrancamento – 1 kN
- Valor máximo de tempo de solda – 1,3 s

Critérios:

- Maximizar valor médio de resistência ao cisalhamento
- Maximizar valor médio de resistência ao arrancamento
- Minimizar valor de tempo de solda

Na segunda etapa, determinou-se o planejamento de experimento Box-Benhken [7] de três fatores: profundidade de penetração da camisa (PP), velocidade de rotação da ferramenta (VR) e velocidade de alimentação (VA), com conjunto de parâmetros central PP:2,1mm; VR:2700rpm e VA:3,9mm/s. A aplicação de adesivo na linha central transversal da posição da solda foi realizada com uma injeção manual, de forma constante e diâmetro de 1 mm por toda a largura das amostras (25,4 mm). A seguir, a solda a ponto por fricção foi realizada no topo das amostras adesivadas em uma máquina *Harms Wende RPS100®* presente no instituto de pesquisa *Helmholtz Zentrum Geesthacht* na Alemanha. Por fim, as amostras foram submetidas à 180°C durante 40 minutos e, então, testadas em ensaios de cisalhamento e arrancamento segundo as normas ASTM.

A terceira etapa envolveu a análise visual do modo de fratura das amostras testadas, análise metalográfica de seções transversais das amostras que foram submetidas a ataque eletroquímico em solução de Barker com voltagem de 25 V durante 180 segundos, e registradas a partir de um microscópio ótico Leica SM IRM® equipado com luz polarizada. Além desses métodos foi utilizado, como complemento, análises térmicas através de uma câmera térmica que captura imagens térmicas através do espectro infravermelho gerado pelo calor.

2.2 RESULTADOS E DISCUSSÕES

2.2.1 ANÁLISE DA VIABILIDADE DA TECNOLOGIA

A Tabela 2 sintetiza os resultados de referência a partir de estudos preliminares realizados sobre o comportamento mecânico e parâmetros otimizados de soldas sem aplicação do adesivo estrutural [8].

Tabela 2. Resultados obtidos pela otimização do processo em soldas de AA6082-T6.

PP [mm]	VR [rpm]	CC [kN]	CA [kN]	t [s]
2,1	2700	8,5±0,3	1,3±0,1	1,1

Através dos critérios pré-estabelecidos e dos resultados obtidos é possível afirmar que, em relação aos requisitos mecânicos de cisalhamento e arrancamento requeridos (3,5 kN e 1 kN respectivamente), a tecnologia de solda a ponto por fricção cumpre os mínimos previstos em norma. Além disso, embora a carga de arrancamento seja menor, comparada aos valores obtidos pelas tecnologias de *Self-Pierce riveting* e soldagem a ponto por resistência [3], a carga de cisalhamento é maior. Em relação ao tempo, os parâmetros otimizados resultaram em um tempo de solda menor que o pré-determinado pelo critério de avaliação (1,3 s), menor do que o de outras tecnologias [3] e menor em relação a trabalhos anteriores citados na literatura [4,8] (1,8 s), o que é de grande interesse da indústria automotiva visto que potencialmente resulta em maior eficiência de produção.

Com relação aos custos de automação, equipamentos, energia e consumíveis, estimam-se os mesmos custos que uma tecnologia similar, de solda a ponto por fricção e mistura (da sigla em inglês FSSW) [3]. Esses valores são avaliados em cerca de 23 milhões de dólares para instalação e produção anual de 35000 unidades durante 5 anos [3]. Ainda assim pode-se afirmar que, a longo prazo, a tecnologia de solda a ponto por fricção seria mais econômica, visto que a tecnologia de *self-pierce riveting* envolve um alto custo em consumíveis e a solda a ponto por resistência, com o passar dos anos, apresentaria um excedente de custo energético.

Assim, há uma indicação que a soldagem a ponto por fricção é uma tecnologia com potencial para aplicação em produção de automóveis com intenso uso de ligas de alumínio quanto aos parâmetros de produtividade, custos de produção, e adequação aos critérios previstos em normas. Além disso, ainda se mostra mais eficiente em relação a outras tecnologias revisadas, principalmente em carga de cisalhamento e custos de instalação, a longo prazo.

2.2.2 PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS E OTIMIZAÇÃO

Através dos resultados obtidos pelos testes de arrancamento e cisalhamento, apresentados na Tabela 3, obteve-se as cargas máxima de arrancamento (CA) e cisalhamento (CC), o tempo de solda (TT), assim como os modos de fratura de cada amostra (fratura interfacial e circunferencial). Exemplos de fratura interfacial (FI) e circunferencial (FC) são apresentadas nas Figuras 3 a e b respectivamente.

Tabela 3. Resultados de testes de arrancamento e cisalhamento dos conjuntos de parâmetros pré-determinado pelo design de experimento e seus respectivos modos de fratura.

	PP [mm]	VR [rpm]	VA [mm/s]	TT (s)	CC (kN)	Fratura (Cisalhamento)	CA (N)	Fratura (Arrancamento)
1	2,1	2700	3,9	1,1	10,6	FI	431	FI
2	2,3	2700	3,3	1,4	9,4	FC	443	FI
3	1,9	2700	4,5	0,8	10,2	FI	254	FI
4	2,1	3100	3,3	1,3	8,2	FC	294	FI
5	1,9	2300	3,9	1,0	9,2	FI	415	FI
6	2,1	2300	4,5	0,9	10,2	FC	408	FI
7	1,9	3100	3,9	1,0	9,9	FI	380	FI
8	2,3	3100	3,9	1,2	8,3	FC	591	FC
9	2,1	2300	3,3	1,3	9,1	FC	539	FI
10	2,1	2700	3,9	1,1	11,0	FI	403	FI
11	2,1	3100	4,5	0,9	9,9	FC	490	FI
12	1,9	2700	3,3	1,2	10,4	FI	355	FI
13	2,1	2700	3,9	1,1	11,4	FI	448	FI
14	2,3	2700	4,5	1,0	10,3	FC	532	FC
15	2,3	2300	3,9	1,2	9,3	FC	534	FC

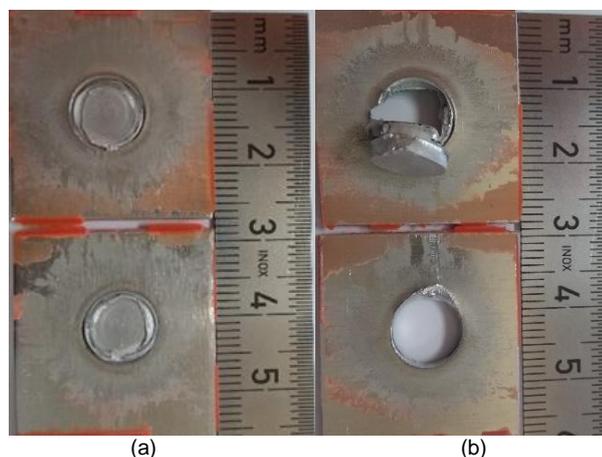


Figura 3. Exemplos de a) Fratura interfacial FI b) Fratura circunferencial FC.

Com os resultados obtidos, e com modelos de regressão aplicados no software MiniTab, obteve-se o parâmetro otimizado PP:2,1mm; VR:2700rpm e VA:3,9mm/s e a janela de processamento que é representada na Figura 4 pelas áreas brancas dos gráficos. Nessa janela de processamento, obteve-se a maximização de ambas as propriedades: a carga máxima de cisalhamento acima de 11 kN e a carga de arrancamento acima de 400 N. Entretanto, a carga de arrancamento apresentou valores menores em relação aos critérios estabelecidos inicialmente, que seria acima de 1 kN. Além disso, a carga de arrancamento é menor

comparada a solda sem adesivo que apresentou média de $1,3 \pm 0,1$ kN. Assim, embora a solda a ponto por fricção atenda os critérios inicialmente estabelecidos, quando aplicada em soldas híbridas com adesivo não os atende, devido à baixa carga de arrancamento.

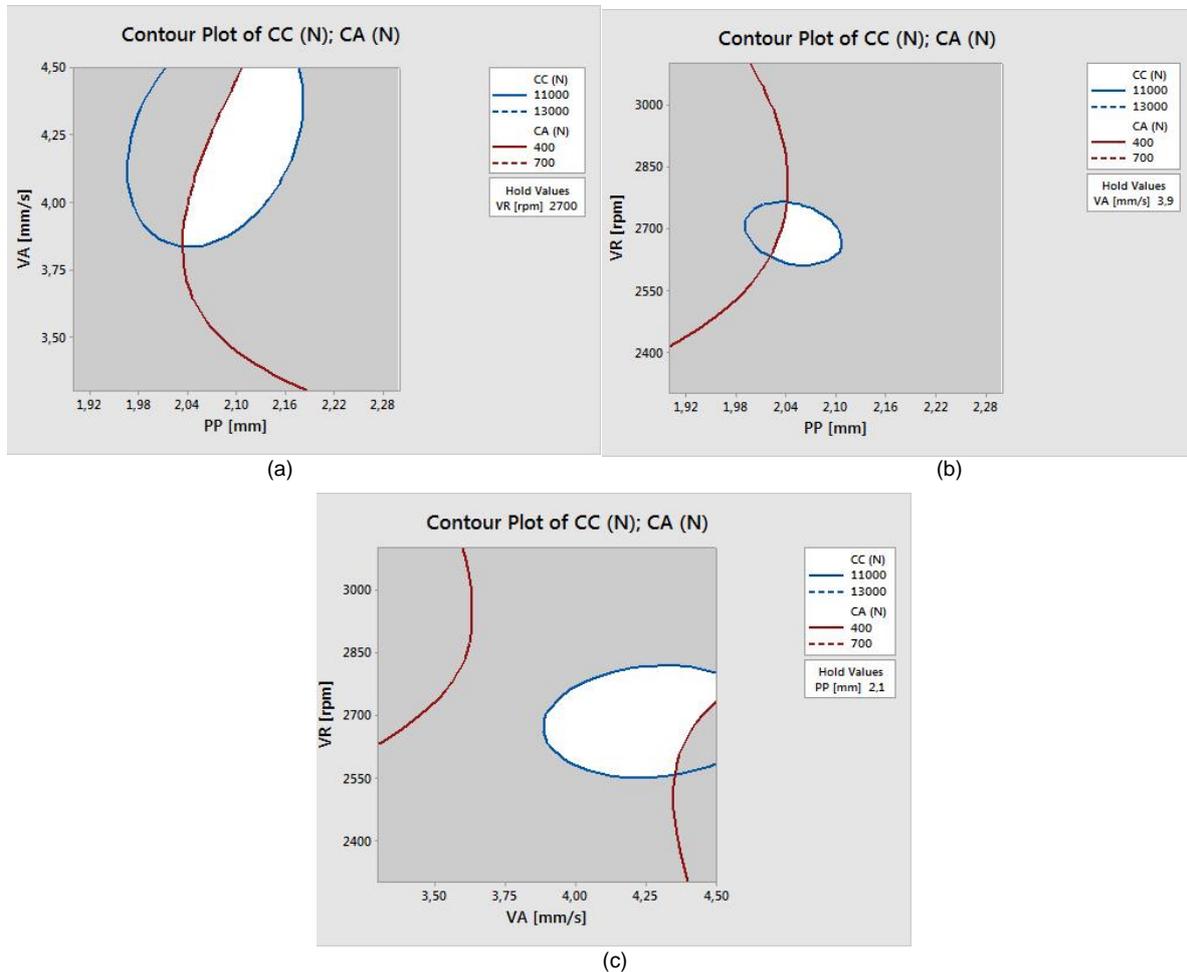


Figura 4. Gráficos de contorno sobrepostos dos parâmetros de processo a) velocidade de alimentação e profundidade de penetração b) velocidade de rotação e profundidade de penetração c) velocidade de rotação e velocidade de alimentação.

2.2.3 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL E ANÁLISE TÉRMICA DO PROCESSO

Ao observar as macrografias de amostras produzidas pelos conjuntos de parâmetros dos experimentos, foram identificados defeitos que podem ser associados aos tipos de falha e aos valores de propriedades mecânicas observados na Tabela 3. A Figura 5 apresenta esses defeitos identificados de 1 a 4.

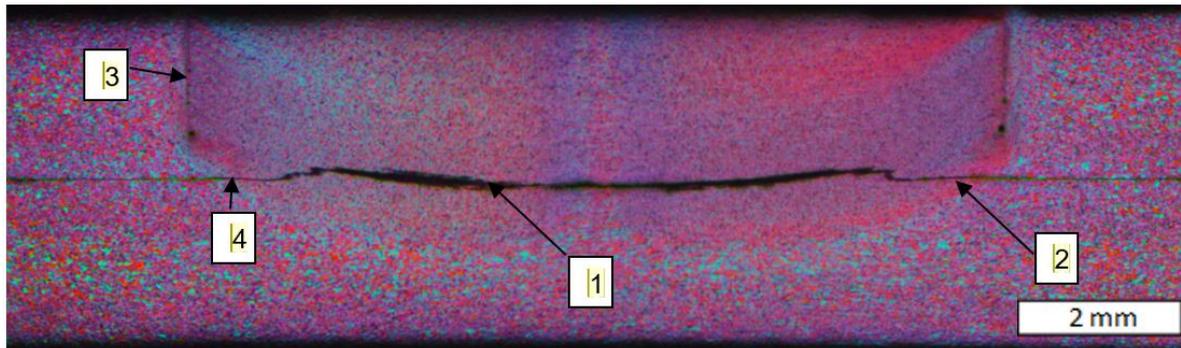


Figura 5. Macrografia de solda a ponto por fricção combinadas com adesivo com conjunto de parâmetros PP:1.9 mm VR:2700 rpm e VA:3.9 mm/s.

O defeito 1 ocorre na interface das placas soldadas e pode estar associado a contaminação e caráter isolante do adesivo que dificulta o processo de mistura e difusão entre as duas placas. Essas características também intensificam um defeito clássico de solda a ponto por fricção conhecido como linha de união, já reportado na literatura [4,9] (defeito 2), que é caracterizado por ser uma região parcialmente ligada devido a linha remanescente de óxidos entre as duas placas. O defeito 3 ocorre na região de penetração da camisa, que é caracterizada por tensões residuais causadas pela diferença microestrutural abrupta da zona termicamente afetada com a zona mecanicamente afetada. O defeito 4 é um defeito clássico de solda a ponto por fricção que é conhecido como cunha, e consiste na transição das regiões ligadas e não ligadas da solda [9]. A cunha pode ter diferentes formas e tamanhos dependendo dos parâmetros de processo, principalmente da profundidade de penetração da camisa. Assim, o defeito da cunha pode ser combinado e intensificado com os defeitos da região de penetração da camisa devido a contaminação do adesivo.

Ao correlacionar os modos de fratura com os parâmetros de processo da solda a ponto por fricção, foi observado uma transição do modo de fratura através da variação dos valores de profundidade de penetração (PP) tanto para os testes de cisalhamento quanto para os de arrancamento. Essa transição pode ser observada nas Figuras 6 e 7. Ao avaliar a macroestrutura de soldas com duas condições de parâmetro de profundidade de penetração (1.9 e 2.3 mm), foi observado que essa transição de fratura ocorre devido a mudança de geometria do defeito em cunha como são destacados o defeito 4 nas Figuras 5 e 8. Acredita-se que a fratura interfacial ocorre devido ao defeito da cunha plana, que é gerada para baixos valores de profundidade de penetração. Adicionalmente, devido a cunha estar conectada com os defeitos interfaciais gerados pelo adesivo, esse tipo de fratura também é favorecido. A fratura circunferencial, por sua vez, ocorre devido ao defeito em cunha apontando para cima (conforme defeito 4 na Figura 8) gerado por altos valores de profundidade de penetração. Além disso, esse tipo de fratura também seria favorecido pela cunha estar conectada com os defeitos gerados na região de penetração da camisa, devido a interação da ferramenta com o adesivo.

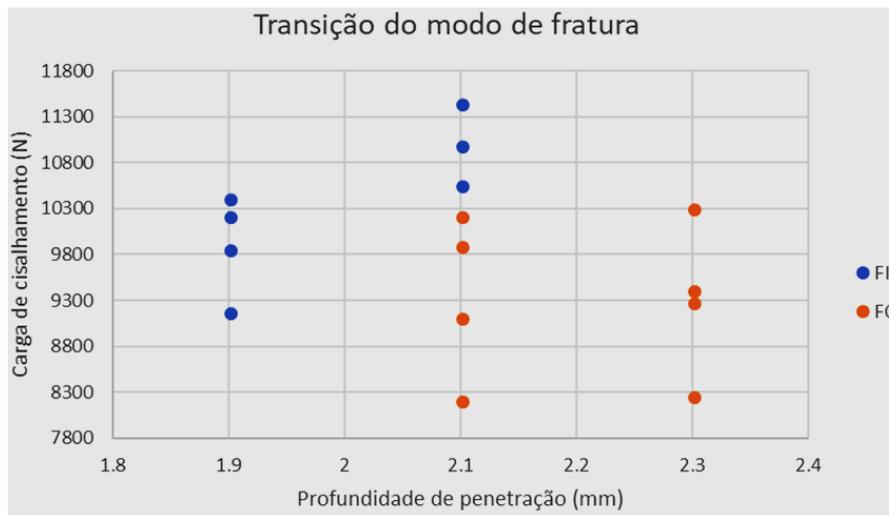


Figura 6. Transição do modo de fratura em ensaios de cisalhamento variando a profundidade de penetração.

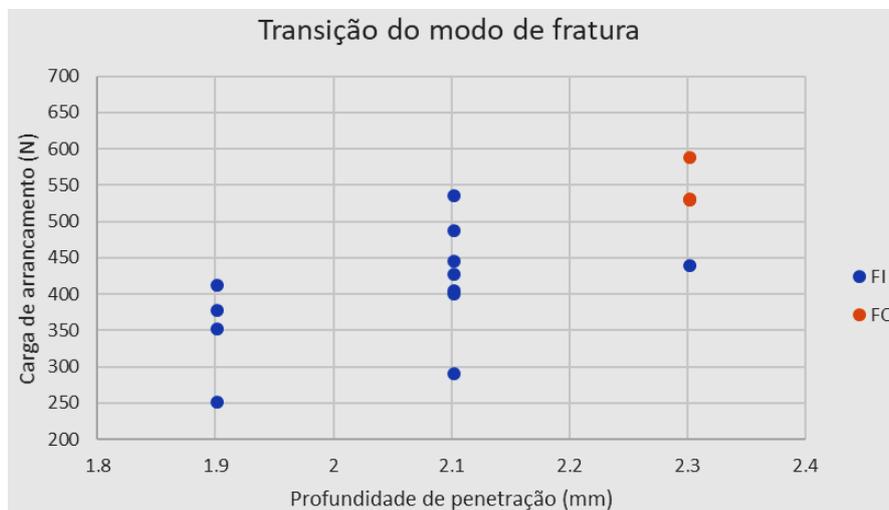


Figura 7. Transição do modo de fratura em ensaios de arrancamento variando a profundidade de penetração.

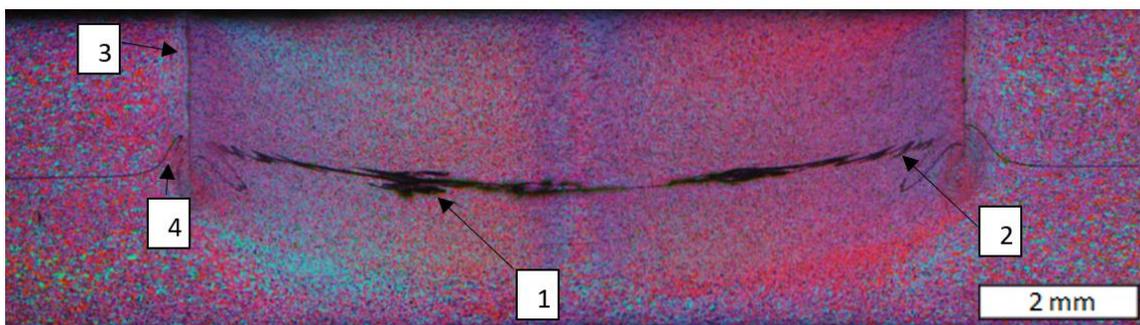


Figura 8. Macrografia de solda a ponto por fricção combinadas com adesivo no conjunto de parâmetros PP:2.3 mm VR:2700 rpm e VA:3.9 mm/s.

Os defeitos interfaciais e na região de caminho de penetração da camisa foram observados nas amostras ao variar os três parâmetros de processo. Como são combinados aos defeitos inerentes a solda, diminuem a resistência ao arrancamento, o que tornou as amostras inaptas a atender todos os critérios pré-estabelecidos.

Através da análise térmica do processo, foi possível observar que a formação dos defeitos interfaciais está relacionada a atuação do adesivo como isolante térmico, que dificulta os mecanismos de difusão e mistura do processo. Nas Figuras 9 a e b são apresentadas as imagens geradas pela câmera de infravermelho nas máximas temperaturas obtidas das amostras sem e com adesivo, respectivamente. Observa-se que para a amostra sem adesivo, o gradiente de temperatura entre a placa superior e inferior é de aproximadamente 8°C, enquanto na amostra com adesivo foi de aproximadamente 80°C, o que confirma a influência do adesivo como isolante no sistema.

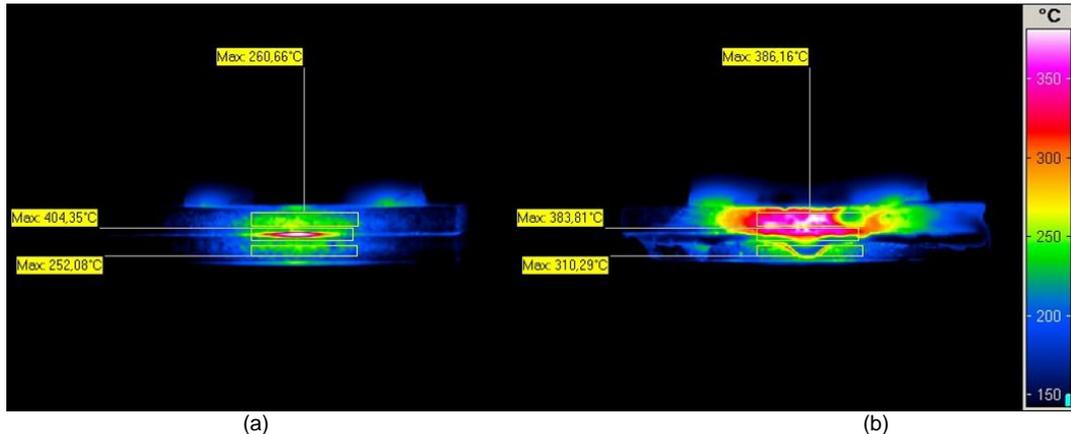


Figura 9. Imagens térmicas por análise com câmera de infravermelho demonstrando a máxima temperatura das chapas de a) amostra sem adesivo b) amostra com adesivo.

Através da análise das imagens, também é possível inferir que houve degradação no adesivo, visto que foram atingidas temperaturas próximas a 300°C. Este fato complementa a análise microestrutural na hipótese de que a maximização de resistência ao cisalhamento é obtida em valores intermediários de cada parâmetro. Ou seja, para valores de baixo calor empregado haverá pouca degradação do adesivo, porém os defeitos devido à baixa eficiência dos mecanismos de mistura e difusão serão mais presentes. Por outro lado, para altos valores de calor empregado, os mecanismos de difusão e mistura serão favorecidos, apesar da degradação do adesivo ser maximizada.

3 CONCLUSÃO

A tecnologia de solda a ponto por fricção se mostrou uma candidata viável para aplicação na indústria automotiva nos quesitos de produtividade, custo de produção (energia e instalação) e de adequação aos critérios previstos em norma para propriedades mecânicas de cisalhamento e arrancamento. Entretanto, no quesito de adaptação de soldas híbridas com adesivo estrutural, esse processo não atendeu aos requisitos mecânicos esperados na propriedade de resistência ao arrancamento. Essa característica é associada aos defeitos interfaciais e no caminho de penetração da ferramenta que as soldas apresentaram quando combinadas com o adesivo estrutural.

Os defeitos encontrados são associados a contaminação do adesivo e sua interferência nos processos difusivos e de mistura no processo de fricção, pela diferença do comportamento térmico durante a solda. Além disso, esses fatores intensificam ou atuam de forma conjunta com outros defeitos inerentes a solda,

como a linha união e o defeito de cunha, o que explica os modos de fratura apresentados (interfacial ou circunferencial) e a relação dos mesmos com o parâmetro de profundidade de penetração.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq (processo 139293/2018-3), ao Programa de pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPGCEM-UFSCar), e ao instituto de pesquisa Helmholtz Zentrum Geesthacht (HZG). O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- 1 European Aluminium Association. Aluminium Automotive Manual – Joining. Versão 2015. 2015 [acesso em 04 fev. 2019] Disponível em: <https://www.european-aluminium.eu/resource-hub/aluminium-automotive-manual/>
- 2 European Aluminium Association. Aluminium Automotive Manual – Body Structures. Versão 2013. 2013 [acesso em 04 fev. 2019] Disponível em: <https://www.european-aluminium.eu/resource-hub/aluminium-automotive-manual/>
- 3 Briskham P, Blundell N, Han L, Hewitt R, Young K, Boomer D. Comparison of Self-Pierce Riveting, Resistance Spot Welding and Spot Friction Joining for Aluminium Automotive Sheet. SAE International. 2006 [Acesso em 04 fev. 2019] Disponível em: DOI:10.4271/2006-01-0774.
- 4 Suhuddin U, Mesquita R, Santos JF. Friction Spot Welding of Similar Aluminum Alloys AA6082-T6 for Application in Automotive Industry. International Automotive Congress IABC. 2016.
- 5 Wang XJ, Wang XL, Zhang ZK, Jing WX. Comparison of Properties on Withdrawing and Refill Friction Stir Spot Welding Joints. Appl. Mech. Mater. 2014 [acesso em 3 abr. 2019] 633–634:601–606. Disponível em: DOI:10.4028/www.scientific.net/AMM.633-634.601.
- 6 American Welding Society (AWS). Specification for Automotive Weld Quality-Resistance Spot Welding of Aluminum (D8.2M:2017). 2017.
- 7 Ferreira SLC, Bruns RE. Box-Behnken design: An alternative for the optimization of analytical methods. Anal. Chim. Acta. 2007. [acesso em 3 abr. 2019] 597:179-186. Disponível em: DOI:10.1016/j.aca.2007.07.011.
- 8 Silva BH, Suhuddin U, Dos Santos JF, Bolfarini C. Relatório de Estágio PIEEG – Refill Friction Stir Spot Welding (RFSSW) in similar AA 6082-T6 for automotive industry. Universidade Federal de São Carlos (Departamento de Engenharia de materiais). 2017.
- 9 Cao JY, Wang M, Kong L, Guo LJ. Hook formation and mechanical properties of friction spot welding in alloy 6061-T6. J. Mater. Process. Technol. 2016. [acesso em 3 abr. 2019] 230:254–262. Disponível em: DOI:10.1016/j.jmatprotec.2015.11.026.