

VARIAÇÕES DO BACKING BAR NO ESTUDO DO PROCESSO FRICTION STIR WELDING (FSW) EM LIGAS DE ALUMÍNIO¹

Marcio Jose Cuccolo Rosales²
Nelson Guedes de Alcântara³
Jorge Fernandez dos Santos⁴

Resumo

O desenvolvimento de novos materiais estruturais – especialmente ligas leves e aços de elevada resistência mecânica – vem sendo amplamente impulsionado pelas indústrias automotiva e aeroespacial. Embora sua aplicação, seja muitas vezes limitada em função da dificuldade de unirem-se tais materiais, *Friction Stir Welding* (FSW) é um processo de soldagem no estado sólido que proporciona ótimo desempenho, resultando em juntas de alta qualidade. Para o melhor controle do processo, foi realizado estudo acerca das condições térmicas (geração e fluxo de calor) e de deformação plástica das ligas do sistema Al-Mg-Si e Al-Cu-Mg, através do uso de três diferentes materiais que compõem o *backing bar* (cobre, aço e cerâmico) de condutividade térmica distinta. Além de influenciar a transferência de calor e impedir a perda de material na junta, o *backing* contribui para alterações microestruturais e a consolidação do material na raiz de solda. O presente trabalho visa relacionar a influência do *backing* na formação de zonas deformadas pelo processo FSW, a fim de compreender a transferência de calor em relação às variáveis do processo. A extração e o fluxo de calor variam em função da condutividade do *backing* e da resistência à deformação plástica dos materiais.

Palavras-chave: *Friction stir welding*; *Backing bar*; Ligas de alumínio; Transferência de calor.

WELDING (FSW) OF ALUMINIUM ALLOYS AS INFLUENCED BY CHANGES TO BACKING BAR MATERIAL

Abstract

Although new structural and advanced materials are being considered for use in the automotive and aircraft industries, especially lightweight alloys as well as advanced high strength steels, the successful introduction of such materials depends on the availability of proven joining technologies that can provide for high quality and performance joints. Solid-state joining techniques such as Friction Stir Welding (FSW) are a natural choice since welds are produced at low temperatures thus the low heat input provides for limited distortion; and microstructural as well as mechanical degradation. Great effort is currently being made in the joining of Al-Cu-Mg and lately in the Al-Mg-Si alloys because of their high strength, improved formability and application in airframe structures. FSW is a continuous, hot shear, autogenous process involving a non-consumable and rotating tool plunged between two abutting workpieces. The backing bar plays an important role in heat transfer from the joint or stir zone, which in turn must influence weld microstructure as well as consolidation of material in the root of the joint. This study has been undertaken to investigate issues concerning heat generation, heat transfer and plastic deformation within the stir zone of friction stir welded aircraft aluminium alloys.

Key-words: Friction stir welding; Backing bar; Aluminum alloys; Heat transfer.

¹ Contribuição técnica ao 63º Congresso Anual da ABM, 28 de julho a 1º de agosto de 2008, Santos, SP, Brasil

² Aluno do Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPGCEM) – UFSCar.

³ Professor Adjunto IV PhD. do Dep. de Engenharia de Materiais (DEMa) da UFSCar.

⁴ Líder do grupo de soldagem do instituto GKSS Forschungszentrum GmbH – Geesthacht/Alemanha.

1 INTRODUÇÃO

A utilização de ligas de alumínio nas indústrias automobilística e aeronáutica vem sendo amplamente explorada, principalmente por reduzir o peso de veículos e aeronaves – uma vez que a densidade do alumínio é cerca de 1/3 da densidade do aço, sem que propriedades mecânicas e estruturais sejam comprometidas. Ainda, questões ambientais são fundamentalmente visadas diante da produção de ligas mais leves, econômicas e, que geram menor quantidade de poluentes na atmosfera. No entanto, por diversas vezes, o emprego destas ligas torna-se inviável em função da dificuldade de unirem-se tais materiais.

Dado seu potencial de aplicação, novas alternativas de processamento e fabricação vêm se desenvolvendo, dentre os quais esta o processo de soldagem no estado sólido, derivado do processo de soldagem por fricção, conhecido por *Friction Stir Welding* (FSW). Uma ferramenta cilíndrica não consumível, constituída por pino e *shoulder* de geometrias definidas, caracteriza a solda por FSW. A solda é concretizada por esforços termomecânicos aplicados pela ação rotacional da ferramenta em contato e no interior da peça, em temperaturas abaixo do ponto de fusão do material.^[1] A rotação da ferramenta e o contato do *shoulder* com a peça promovem a geração de calor necessário para plastificar o material, que é movimentado ao redor do pino de modo que a solda seja consolidada na parte de trás da ferramenta. O *shoulder*, cuja direção é tipicamente normal ao eixo de rotação da ferramenta, está conectado ao pino de menor diâmetro, promovendo a maior parte do calor gerado e a concentração de material na superfície da junta.

A transferência de calor e o aporte de energia gerado durante a soldagem por FSW estão associados, usualmente, ao uso de equações empíricas que visam descrever o processo. Embora, a simulação e o modelo matemático estejam intimamente ligados com condições de contorno experimentais, tem se verificado que os resultados obtidos são poucos e insuficientes para prever e assegurar a estabilidade térmica do processo. Assim, o presente estudo exploratório objetivou melhor compreender as soldas realizadas por FSW no tocante à transferência de calor no material e nas demais partes envolvidas durante o processo, como na ferramenta e no *backing*. Além de relacionar o estudo termométrico com alterações metalúrgicas, avaliaram-se as propriedades mecânicas de soldas realizadas em três condições diferentes de extração de calor no *backing*, confeccionado em três materiais de condutividade térmica distinta (cobre, aço e cerâmico/isolante).

A combinação dos parâmetros de processo, incluindo a velocidade de rotação e de avanço da ferramenta e força axial aplicada, é essencial para produzir uma solda de qualidade. Como o processo envolve a relação de escoamento e deformação plástica do material, pequenas variações, associadas à mudança nos materiais que compõem o *backing*, podem resultar na formação de defeitos volumétricos na *stir zone* (SZ) e alterar as condições de transferência de calor.^[2] Usualmente, o *backing* é confeccionado em aço e sua função principal é a de consolidar a solda na raiz, além de influenciar as zonas afetadas termomecânicamente, quanto ao formato, perfil e tamanho. A condutividade térmica do *backing* faz com que o fluxo de calor extraído promova alterações metalúrgicas importantes no processamento de ligas de alumínio soldadas por FSW.

O desenho e a geometria da ferramenta, como por exemplo, a presença de roscas e lados facetados no pino, também auxilia no escoamento de material, bem como na distribuição de temperatura nas regiões envolvidas no processo de soldagem.^[3] O diâmetro do *shoulder* afeta diretamente as características da solda produzida, uma

vez que quanto maior o seu valor, maior é o calor gerado pelo atrito com a superfície do material, e, conseqüentemente, maior é a degradação das propriedades mecânicas da liga.

Tipicamente, os efeitos combinados entre a aplicação da força axial e a ação rotacional de fricção da ferramenta com o material dão origem à quase totalidade do calor gerado durante o processo de soldagem.^[4] Porém, devido ao elevado grau de deformação imposta pelo processo, regiões imediatamente adjacentes ao campo de atuação da ferramenta no centro da junta soldada também contribuem para geração e, conseqüente, transferência de calor. A condição de deformação plástica imposta pelo processo influencia na direção e no fluxo de calor gerado durante o escoamento do material. O tamanho e formato da SZ são dependentes das variáveis do processo, tais como velocidade de rotação e avanço da ferramenta, e da distribuição de energia térmica no material. Correlato a este fenômeno há a influência do *backing*, da parte inferior da junta, na extração de calor da região deformada ao redor da ferramenta.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

As ligas de alumínio utilizadas compreendem as da série 2xxx e 6xxx, sendo dos sistemas Al-Cu-Mg AA2024-T351 e Al-Mg-Si AA6013-T6, respectivamente. A escolha dos parâmetros de soldagem foi determinada por meio de estudos previamente realizados. Na primeira etapa, chapas de 4 mm da liga AA6013-T6 foram soldadas sob duas combinações de parâmetros e três condições do *backing* (aço, cobre e cerâmico). Posteriormente, chapas de 3,2 mm da liga AA2024-T351 foram soldadas em três combinações de parâmetros. Em ambas as situações, as combinações dos parâmetros de soldagem (Tabela 1) variaram quanto à velocidade de rotação da ferramenta e a velocidade de avanço da solda, mantendo-se constantes a força axial aplicada e a geometria da ferramenta (Figura 1).

Tabela 1 – Combinação dos parâmetros de soldagem para as três condições de *backing* (cobre, aço e cerâmico) a uma força axial constante de 10KN.

Parâmetros de Soldagem	Velocidade de Rotação (RPM)	Velocidade de Avanço (mm/min)	Liga de Alumínio
1	900	600	AA6013-T6
2	1200	900	
3	1600	800	
4	800	400	AA2024-T351
5	400	200	

As soldas por *Friction Stir Welding* foram produzidas no instituto alemão GKSS, em juntas de topo e *bead on plate* (BOP), que consiste em uma solda sem pino, somente *shoulder*. Foi utilizado um robô Neos Tricept TR 805 (Figura 1), capaz de mover-se em cinco eixos centrais, controlado por um sistema CNC de comando Siemens Sinumeric 840D. O equipamento foi projetado para aplicações de alta flexibilidade e elevado grau de rigidez, características desejáveis para o desenvolvimento de soldagem por meio do processo FSW. Ainda, a força axial e a velocidade de rotação da ferramenta foram controladas por um sistema integrado, desenvolvido no próprio instituto.



Figura 1 – FSW Robô Tricept 805 e ferramenta utilizada (pino facetado com rosca).

A extração de calor no *backing* foi conduzida por materiais de condutividade térmica diferente: em um extremo cobre foi utilizado como condutor e em outro, um material cerâmico como isolante térmico. Os *backing bars* utilizados na soldagem das ligas em estudo estão identificados na Figura 2. Uma mesa 'Horst Witte' foi utilizada para gerar vácuo a fim de fixar as chapas soldadas na superfície e os *backing*, parafusados mecanicamente, no centro da linha de solda.

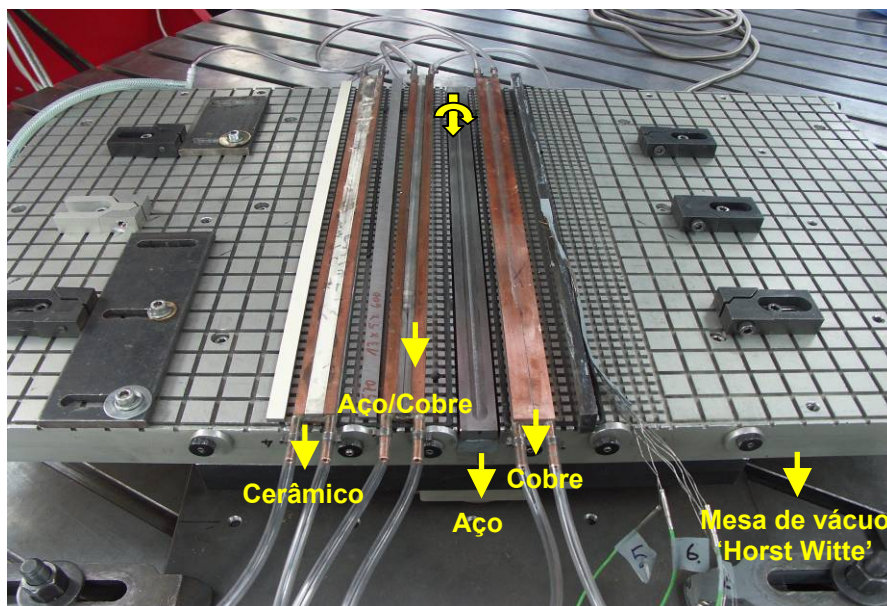


Figura 2 – *Backing* de diferentes materiais utilizados durante o processo FSW sob a mesa com sistema de fixação mecânica e a vácuo das chapas soldadas.

Os dados de temperatura foram medidos em todas as soldas produzidas por meio de quatro termopares do Tipo-K posicionados estratégica e simetricamente em ambos os lados nas chapas soldadas (lado de avanço e retrocesso) a uma profundidade de 2 mm e 3 mm e a uma distancia de 10 mm e 12 mm do centro da solda e, ao longo do eixo central nos *backing bars*, a uma profundidade de 0,5 mm da interface entre a chapa e a superfície do *backing*. Os dados de temperatura foram avaliados por meio de um microcomputador integrado ao sistema de aquisição de dados 'National Instrument SCXI-1000'

A caracterização macro/microestrutural das regiões soldadas foi realizada através de microscopia ótica, direcionada para a avaliação das transformações metalúrgicas ocorridas após o processo de soldagem, do perfil, tamanho e geometria das zonas deformadas plasticamente. Medições de microdureza foram determinadas para traçar os perfis das amostras soldadas (em relação da distância do centro da solda) em cada condição de *backing*, a fim de se avaliar a influência dos três materiais (cobre, aço e cerâmico) na extração de calor durante o processo.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Analisando os resultados obtidos das soldas FSW na liga 2024-T351 é evidente que a interação mecânica entre a ferramenta e o material influencia significativamente o tamanho da SZ. Com o aumento da rotação da ferramenta, há um decréscimo na área da SZ formada, pois a deformação ocorre bem próxima a ferramenta, uma vez que as ligas da serie 2xxx têm elevada resistência a deformação plástica. Isso não ocorre devido a temperaturas mais baixas de processo (Figura 3), mas porque uma porção maior do calor gerado é transferida verticalmente do material para a ferramenta FSW ao invés de ser disperso transversalmente ao longo da solda.

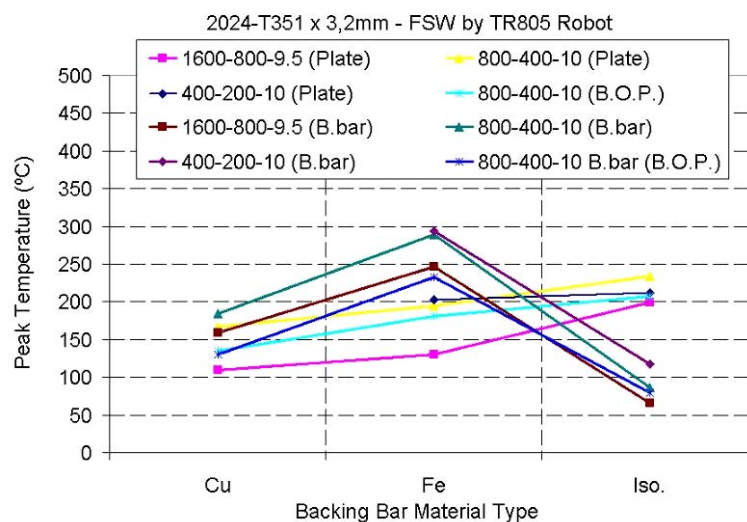


Figura 3 – Temperatura máxima registrada nas chapas de alumínio e no *backing* em função do tipo de material que compõe o *backing*. Para o menor parâmetro soldado com *backing* de cobre não foram registrados dados de temperatura.

A exceção observada ocorreu para soldas realizadas com *backing* de cobre. Na realidade, a menor área de SZ medida foi criada com menor parâmetro de velocidade de rotação da ferramenta (400 RPM – 200 mm/min – 10 KN) combinado com o uso do *backing* de cobre. Deve ser notado, no entanto, que nesta instância houve a fratura do pino na base do *shoulder*. Isso ocorreu devido a uma temperatura

insuficiente para amolecer o material (a extração de calor do *backing* foi extrema em função da condutividade térmica do cobre ser elevada), e mais ainda porque sobre tal condição forças cisalhantes foram impostas no pino (Figura 4).

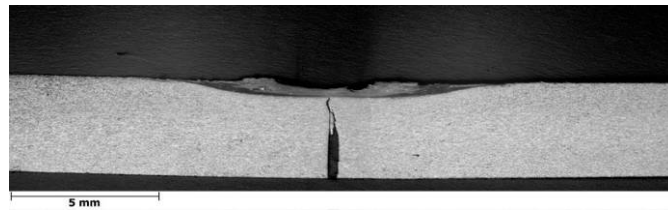


Figura 4 – Macro transversal na condição do *backing* de cobre (pino quebrado).

Perfis de microdureza e a análise microestrutural mostram que a SZ é mais mole que o metal base quando soldado com *backing* de aço e cerâmico, em comparação com o de cobre. Os valores de dureza aumentam em relação ao *backing* de cobre em função das baixas temperaturas de processo e também devido ao aumento da extração de calor do *backing* (aproximadamente 6 vezes mais quando comparado com o *backing* de aço). Em consequência, há energia e tempo insuficientes para ativar a degradação da microestrutura, como ocorrem nos casos do aço e cerâmico. É interessante ressaltar, no entanto, que nos perfis de microdureza ao longo de todas as condições de *backing* (Figura 5), a largura das zonas termicamente afetadas, transversal à solda, em comparação com a direção de avanço da solda, mantém-se relativamente inalterada. Essa largura aproxima-se ao diâmetro do pino, o que indica uma condição de escorregamento na interação ferramenta/material sobre todas as condições de soldagem para essa liga. Similarmente, a microestrutura confirma a evidência de defeitos volumétricos na SZ.

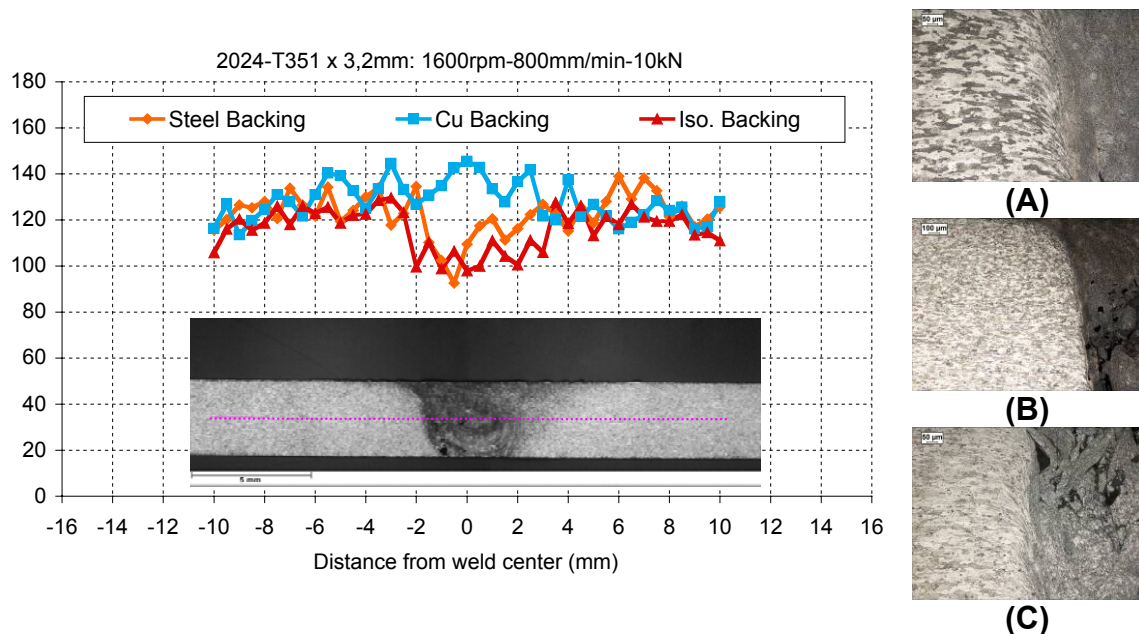


Figura 5 – Perfil de microdureza AA 2024-T351 soldado por FSW e microestrutura das três condições de *backing* (A) aço, (B) cobre e (C) cerâmico, com evidência de defeitos volumétricos formados na raiz da solda.

As soldas produzidas confirmam que a liga 6013-T6 é facilmente deformada durante o processo FSW com a maior parte da deformação produzida devido ao contato do

shoulder. Quanto ao tamanho das SZ, verificou-se uma variação significativa em função do tipo de material que compõe o *backing*. Nota-se também para este caso que a área da SZ decresce com o aumento da velocidade de rotação da ferramenta. A transferência de calor durante o processo é afetada diferentemente quando comparada com a das soldas na liga 2024-T351, no qual o *backing* exerce a função de extração de calor de forma mais intensa. Assim, para a liga 6013-T6, um aumento da SZ só é possível sob uma condição adesiva de interação entre o material e a ferramenta (pino e *shoulder*). Ainda, com o uso de material cerâmico, o bloqueio da transferência de calor para o *backing* força o calor a ser dissipado radialmente para o material, como evidencia a Figura 6.

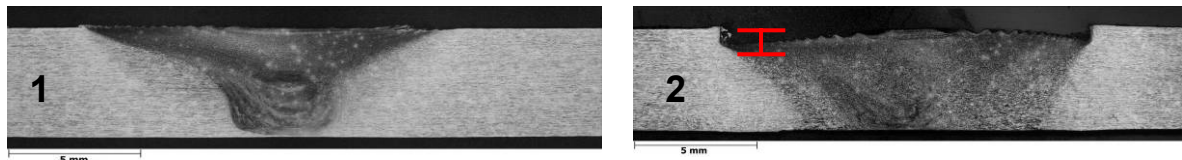


Figura 6 – Macro transversal 1) com *backing* de aço e 2) *backing* cerâmico, maior contato do *shoulder* e maior área da SZ (900 RPM – 600 mm/min – 10 KN).

A relação entre a temperatura medida no material e a geometria da SZ é fortemente evidente para liga 6013-T6. Quando a transferência de calor é reduzida no *backing*, devido a uma baixa condutividade térmica do material que o compõe (material cerâmico), nota-se que maiores temperaturas de processamento induzem a formação de áreas grandes da SZ, conforme Figura 7.

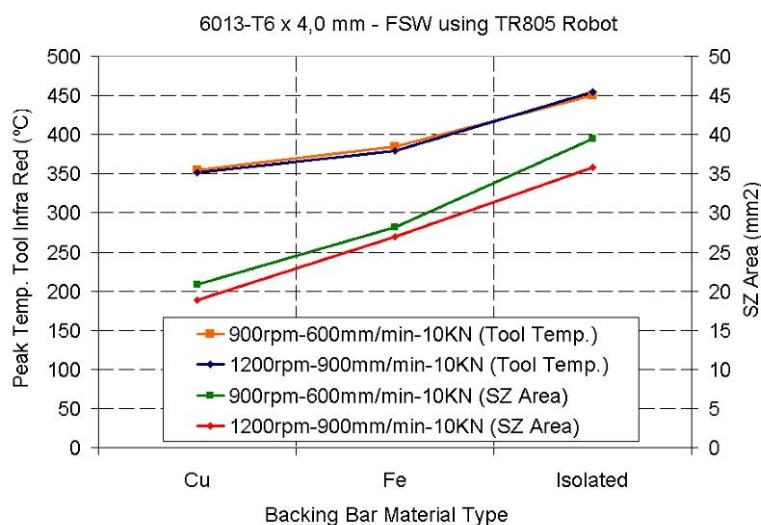


Figura 7 – Temperatura máxima da ferramenta e área da SZ em função do material do *backing*. Temperaturas mais elevadas foram registradas também nas chapas quando o calor é bloqueado no *backing* (cerâmico), o que leva a interpretação de instabilidade térmica do processo FSW.

É evidente que nas soldas produzidas com o *backing* cerâmico, devido à maior área da SZ, há maior degradação da microestrutura e, por conseqüência, uma queda das propriedades mecânicas, evidenciada pelos perfis de microdureza (Figura 8). Além disso, as zonas térmica e termomecanicamente afetadas também são influenciadas de modo que os valores de dureza são geralmente menores quando comparados com outras condições de *backing* (aço e cobre). Os perfis medidos para o *backing* de aço são típicos da serie 6xxx-T6 quando soldado por FSW. A SZ é

consideravelmente mais mole que o material base, uma vez que os precipitados estão dissolvidos e dinamicamente recristalizados. Na condição do *backing* de cobre, é observado um decaimento mais acentuado da dureza devido à mudança da transferência de calor, que é direcionada para o material (a temperatura na ferramenta também é menor quando comparada com as outras soldas).

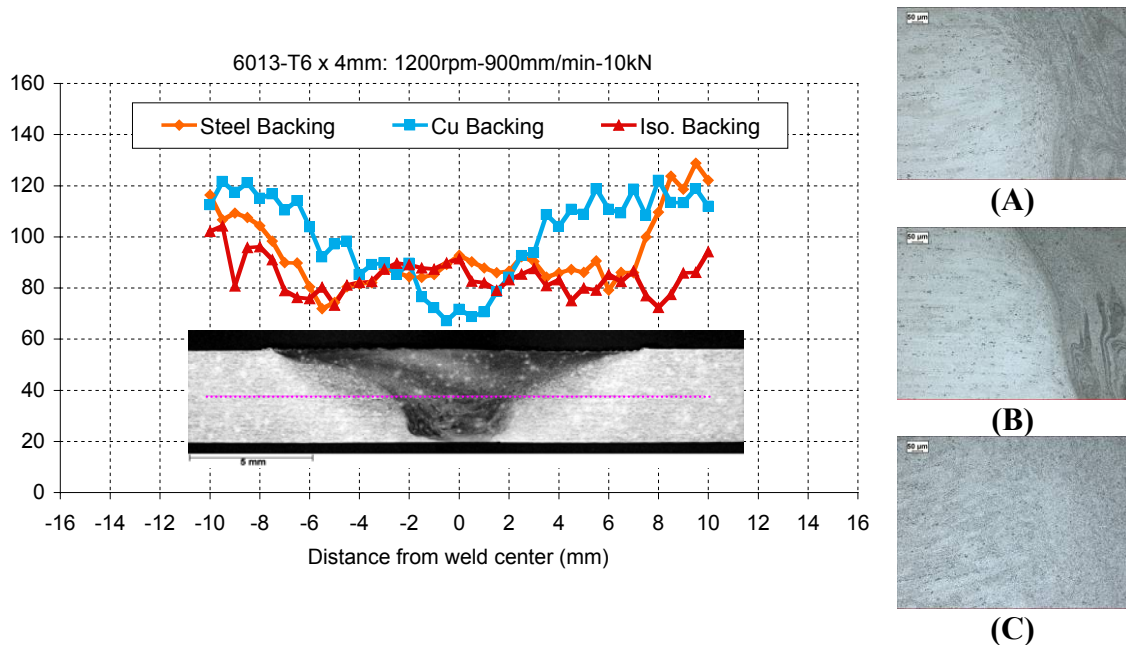


Figura 7 – Perfil de microdureza AA 6013-T6 soldado por FSW e microestrutura das três condições de *backing* (A) aço, (B) cobre e (C) cerâmico.

4 CONCLUSÕES

Este presente estudo demonstrou evidências claras que a condição de transferência de calor difere de acordo com o tipo de liga de alumínio (composição química), com os parâmetros de processo e com a condutividade térmica do *backing* durante a soldagem pelo processo FSW. As soldas produzidas em chapas de 4 mm da liga AA6013-T6 e em chapas de 3,2 mm da liga AA2024-T351 indicam que uma condição de deformação na interface entre o material e a ferramenta dominam o modo de transferência de calor durante a soldagem.

A influência da transferência de calor nas propriedades mecânicas e nas características microestruturais de juntas soldadas por FSW é atribuída à resistência a deformação plástica do material. Isso determina a principal causa de interação mecânica material/ferramenta, podendo ocorrer sob uma condição de escorregamento, para ligas da serie 2xxx ou adesão, para as da serie 6xxx.

Assim, para garantir qualidade da junta soldada e a formação de SZ livres de defeitos volumétricos, conclui-se que baixas velocidades de rotação da ferramenta são necessárias para produzir soldas por FSW em ligas 2024-T351. Além disso, constatou-se que para essa liga nenhum benefício foi verificado tanto na condição de *backing* cerâmico como de cobre. Em ligas de elevada resistência a deformação (2024-T351), a transferência de calor tem menor relevância durante o processo FSW. Isso porque com o ajuste e a seleção apropriada de parâmetros (essencialmente velocidades de avanço e de rotação da ferramenta) é possível garantir soldas de qualidade.

Este não é o caso, no entanto, das ligas de baixa resistência à deformação e artificialmente envelhecidas, como as do sistema Al-Mg-Si (6013-T6). Devido a uma condição de adesão entre a ferramenta e o material, a utilização do *backing* de cobre promove maior deslizamento do material na interface da solda, o que garante estabilidade térmica ao processo para soldas realizadas nessas ligas. Por outro lado, quando o calor é bloqueado na parte de baixo da junta (*backing* cerâmico), a transferência de calor se dá na direção do material, o que gera como consequência grandes áreas das zonas termomecanicamente afetadas pelo processo. Ainda, sugere-se que o aumento do gradiente térmico entre a ferramenta e o material, por meio de um sistema de resfriamento na própria ferramenta, faz com que uma maior porção do calor seja transferida na direção da ferramenta e não diretamente no material.

Agradecimentos

Ao apoio financeiro e suporte técnico do instituto de pesquisas alemão GKSS Forschungszentrum, um dos centros mundiais de referência em soldagem robotizada por FSW, especialmente em nome do Dr. Rudolf Zettler. Ao Departamento de Engenharia de Materiais (DEMa), e ao Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais (CCDM) da Universidade Federal de São Carlos.

REFERÊNCIAS

- 1 MISHRA, R. S. MA, Z. Y. Friction Stir Welding and Processing. *Materials Science and Engineering R* 50 (2005) 1-78;
- 2 ZETTLER, R. LOMOLINO, S. DOS SANTOS, J. F. DONATH, T. BECKMANN, F. LIPPMAN, T. LOHWASSER, D. A study on Material Flow in FSW of AA 2024-T351 and AA 6056-T4 Alloys. *5th International FSW Symposium*, Metz, França, Setembro 2004;
- 3 Ulysse, P. Three-dimensional modeling of the friction stir-welding process. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 42 (2002) 1549-1557;
- 4 RUSSELL, M. J. SCHERCLIFF, H. R. Analytical Modelling of Microstructure Development in Friction Stir Welding. *1st International FSW Symposium*, Thousand Oaks, EUA, Junho 1999;
- 5 COLEGROVE, P. 3 Dimensional Flow and Thermal Modeling of the Friction Stir Welding Process. *2nd International FSW Symposium*, Stockholm, Suécia, 2000;
- 6 LIENERT, T. J. STELLWAG, W. L. LEHMAN, L. R. Heat inputs, Peak Temperatures and Process Efficiencies for FSW. *4th International FSW Symposium*, Utah, EUA, Maio 2003;
- 7 VILAÇA, P. QUINTINO, L. DOS SANTOS, J. F. ZETTLER, R. SHEIKHI, S. Quality Assessment of Friction Stir Welding Joints via an Analytical Thermal model, *ISTIR. Materials Science and Engineering A* 445–446 (2007) 501–508;