

ESTUDOS PRELIMINARES DA DEPOSIÇÃO DE LIGAS DE ALUMÍNIO EM SUBSTRATO DE 2024 UTILIZANDO PROCESSO DE FRICÇÃO¹

Cláudio Javier Almiron²

Gabriel Cogo³

Pedro Henrique Costa Pereira da Cunha²

Cléber Rodrigo Lima Lessa²

Mattias Beyer⁴

Jorge Fernandez dos Santos⁴

Telmo Roberto Strohaecker⁵

Resumo

O objetivo deste trabalho é melhorar o desempenho da liga de alumínio 2024 no que se refere a resistência ao desgaste e à corrosão revestindo-a com outras ligas de alumínio utilizando um processo de fricção. Foram realizados numerosos passes de revestimento com as ligas 5083, 6060 e 6082 em varias combinações de Velocidade transversal, Velocidade rotacional e Força. Utilizando inspeção visual, técnicas metalográficas e análise de imagens, foram avaliadas a geometria da camada depositada e a qualidade de adesão nas diferentes combinações do processo. Além disso, foram feitos testes de compressão em 25°C e 350°C, nas ligas 5083, 6060 e 6082, com o objetivo de entender o comportamento de cada material durante o processo de deposição. Também foi verificada a mudança das condições de adesão ao longo do passe de revestimento utilizando um teste de adesão comparativo.

Palavras-chave: Soldagem; Fricção; Revestimento; Ligas de alumínio.

PRELIMINARY STUDIES OF ALUMINUM ALLOYS DEPOSITION ON SUBSTRATE 2024 BY FRICTION PROCESS

Abstract

The purpose of this work is to improve the wear and corrosion resistance properties of 2024 aluminum alloy plates by coating it with different aluminum alloys using the friction surfacing process. Several deposits with the 5083, 6060 and 6082 aluminum alloys were performed using different combinations of Transversal speed, Spindle rotation and Force. Visual inspection, metallographic examination and image analyses were performed to evaluate the geometry and adhesion quality coating for the different combination of parameters. Several compression tests were done at temperatures of 25°C and 350°C, for the 5083, 6060 and 6082 aluminum alloys, aiming understand the behavior of each material during the coating process. The friction surfacing coating adhesion was evaluated along the length of the deposit by simple comparison between each alloy.

Key words: Friction welding; Surface coating; Aluminum alloys.

¹ Contribuição técnica ao 67º Congresso ABM - Internacional, 31 de julho a 3 de agosto de 2012, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Engenheiro Metalúrgico, Laboratório de Metalurgia Física (Lamef), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Brasil.

³ Engenheiro de Materiais, Lamef, UFRGS, Brasil.

⁴ Engenheiro Metalúrgico, Doutor, Instituto de pesquisa HZG, Geesthacht, Alemanha.

⁵ Engenheiro Metalúrgico, Professor Doutor, Lamef, UFRGS, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A demanda de ligas leves cresce a cada ano, especialmente nas indústrias aeroespacial e militar visando principalmente economia de combustível e aumentar a capacidade de carga útil no caso da indústria militar.

A liga de alumínio 2024 é bastante aplicada a estas indústrias devido às suas boa resistência à fadiga e alta relação resistência/peso. Por outro lado sua resistência à corrosão e ao desgaste é baixa, por essa razão é utilizado o processo de cladeamento.^(1,2) O processo de cladeamento consiste em laminar o material a ser revestido juntamente com o material de revestimento sobrepondo as duas chapas antes do passe de laminação que acarretará uma adesão entre os dois materiais. Em geral, o material utilizado como revestimento nesse processo é um alumínio da série 1000, pois este é anódico em relação ao substrato da série 2xxx.^(3,4)

Em alguns casos, tal como a aplicação de solda por fricção, a camada de cladeamento torna-se descontínua e o componente tem diminuída sua resistência à corrosão já que a resistência ao desgaste já é baixa em função das propriedades mecânicas do alumínio da série 1000. Para evitar este problema pode ser utilizado um processo alternativo de revestimento por fricção, conhecido como *Friction Surfacing Process (FSP)*.⁽⁵⁾

Este trabalho foi desenvolvido no Grupo de Tecnologia de Juntas e visa avaliar a deposição das ligas de alumínio 5083, 6060 e 6082 em um substrato de 2024 usando o FSP.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para realização dos revestimentos foi utilizada uma máquina portátil de solda por fricção de pinos, Portable Hydraulic Friction Stud Welding Machine HSM 3000 (Figura 1). A máquina foi projetada para pinos de 10 mm a 25 mm de diâmetro, operações subaquáticas e ambientes agressivos. O movimento transversal foi realizado utilizando um motor de passo unido à estrutura. As chapas foram presas em uma mesa movida pelo motor de passo.

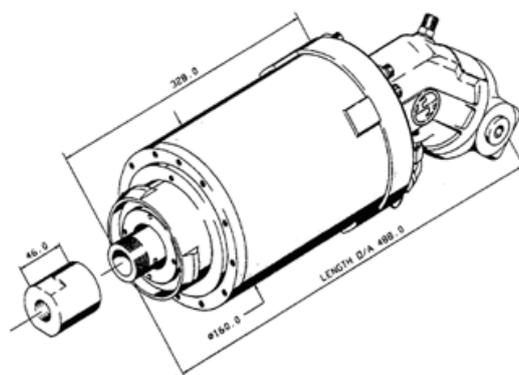


Figura 1. Conjunto flange/cruzeta conforme recebida para análise.

Os parâmetros aplicados para a realização de cada revestimento estão descritos nas Tabelas 1, 2 e 3.

Tabela 1. Parâmetros de soldagem para a liga 5083

Revestimento	Velocidade trans. [m/min]	Pressão [PSI]	RPM
2	2	100	2.500
4	2	100	4.500
8	2.5	100	4.500
9	2.5	150	3.500
10	2.5	200	3.500

Tabela 2. Parâmetros de soldagem para a liga 6060

Revestimento	Velocidade trans. [m/min]	Pressão [PSI]	RPM
2	2	100	2.500
7	2.5	100	3.500
10	2.5	100	4.500
13	2.5	150	3.500

Tabela 3. Parâmetros de soldagem para a liga 6082

Revestimento	Velocidade trans. [m/min]	Pressão [PSI]	RPM
2	2	100	3.500
9	4	100	3.500
10	5	100	3.500

A metodologia utilizada para o estudo comparativo entre as propriedades dos três revestimentos consistiu na realização de ensaios de tração, compressão nas temperaturas 25°C e 350°C, caracterização metalográfica e testes de microdureza. As amostras para avaliação macroestrutural dos revestimentos foram retiradas fazendo-se cortes transversais aos passes e embutidas de maneira que a vista analisada está no sentido do passe de revestimento. As superfícies foram lixadas, polidas e, após ataque metalográfico, analisadas em microscópio ótico. Para obtenção do perfil de microdureza foi utilizado o esquema mostrado na Figura 2.



Figura 2. Diagrama esquemático dos perfis de microdureza.

O perfil foi verificado à partir de duas linhas perpendiculares com uma carga de 0,5 kg. A linha 1 tem início à partir do centro do revestimento e a linha 2 inicia 2 mm antes do início do revestimento e termina 2 mm depois do final do revestimento. Os ensaios de tração e de compressão foram baseados nas normas ASTM E8M-11⁽⁶⁾ e ASTM E209-00⁽⁷⁾ respectivamente. Foi usado o corpo de prova de tração cilíndrico com diâmetro de 12,5 mm, comprimento da seção útil de 60 mm e distância entre marcas para medida de alongamento de 50 mm.

O reagente utilizado na preparação metalográfica foi o Keller (2 mL HF (48%), 3 mL HCl (conc), 5 mL HNO₃ (conc), 190 mL H₂O).

Além dos ensaios referidos acima, foram realizados testes de adesão para avaliar as condições de adesão conforme o passe de revestimento avança sobre o substrato. Para isso foram retiradas três amostras de passe de revestimento realizado com a liga 6082 com velocidade de 4 [m/min], pressão de 100 PSI e rotação de 3.500 RPM. O comprimento do passe foi de 180 mm e os corpos de prova foram retirados do início, no centro e no final do passe.

Após a retirada, as amostras foram furadas cuidadosamente para que o ensaio fosse feito um arrancamento da camada em cada amostra. A Figura 3a mostra em detalhe a furação e a Figura 3b mostra a montagem do dispositivo projetado para o ensaio.

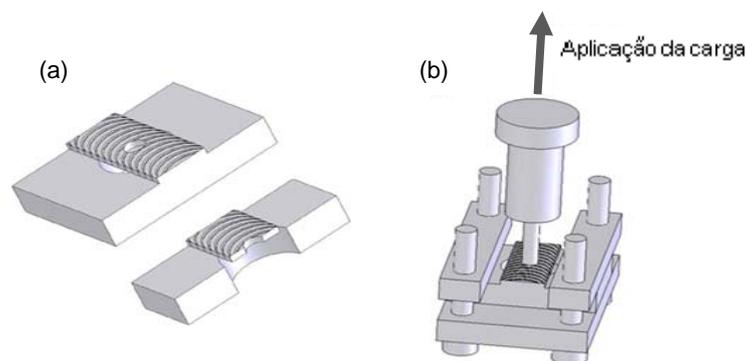


Figura 3. (a) Vista isométrica e em corte da amostra para teste de adesão; e (b) montagem do dispositivo para arrancamento.

3 RESULTADOS

3.1 Caracterizações do Substrato e dos Consumíveis

As chapas de alumínio 2024 utilizadas tinham 10 mm x 100 mm x 300 mm. A Figura 4 mostra a microestrutura das chapas. Os grãos alongados indicam que o material passou por um processo de laminação.

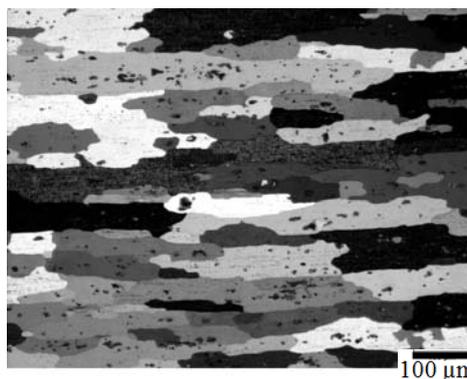


Figura 4. Microestrutura do substrato 2024 em corte transversal.

A Figura 5 apresenta as micrografias das seções longitudinais dos três pinos utilizados com consumíveis. Os consumíveis da liga 6060 apresentam menor grau de deformação prévia que os demais materiais. Já para as ligas 5083 e 6082 os cortes longitudinais mostram que os materiais se tratam de ligas trabalhadas com alto grau de deformação prévia. Para análise das seções transversais pode se

observar que somente na liga 6082 os precipitados encontram-se preferencialmente nos contornos dos grãos.

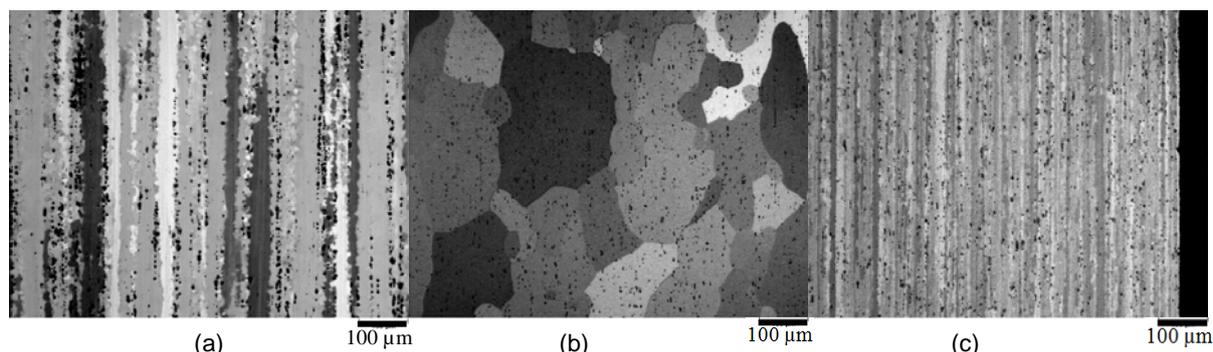


Figura 5. Seção longitudinal do consumível (a) 5083; (b) 6060; e (c) 6082.

A Figura 6 apresenta as curvas tensão-deformação obtidas nos ensaios de tração para os três consumíveis. Para os consumíveis 5083 e 6082 foram realizados três ensaios e para o consumível 6060 foi realizado quatro ensaios.

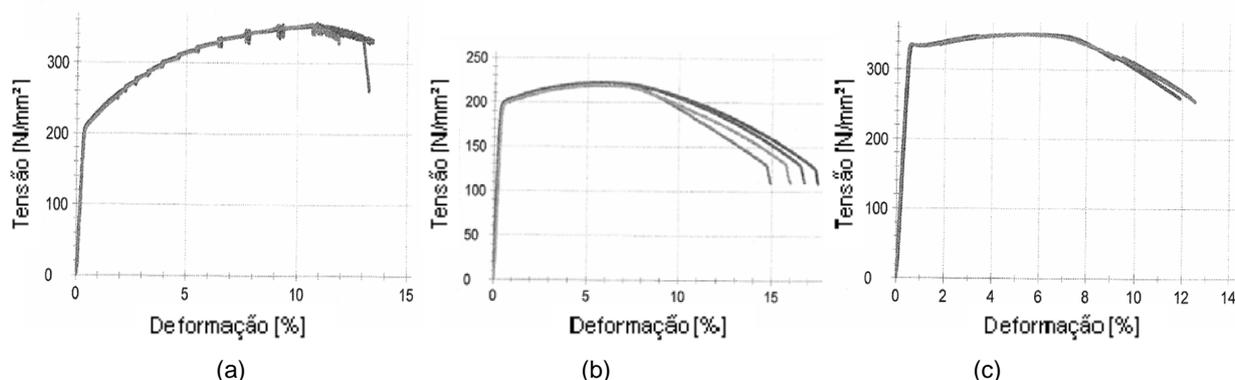


Figura 6. Curva Tensão x Deformação da liga (a) 5083; (b) 6060; e (c) 6082.

Todos os materiais apresentaram boa reprodutibilidade atestando sua qualidade. As informações relevantes destes ensaios estão mostradas na Tabela 4.

Tabela 4. Dados dos ensaios de tração para os três consumíveis

	Tensão de escoamento		Tensão máxima		Elongamento	
	(MPa)	Desv.pad.	(MPa)	Desv.pad.	(%)	Desv.pad
5083	214,1	1	355,8	0,7	12,4	0,9
6060	198,5	1,2	220,1	1,2	16,1	1,1
6082	334,5	0,1	350,4	0,2	11,9	0,3

A Figura 7 mostra as curvas (Tensão x Deformação) geradas pelos ensaios de compressão, em cada um dos três materiais de adição, nas temperaturas de 25°C e 350°C, respectivamente.

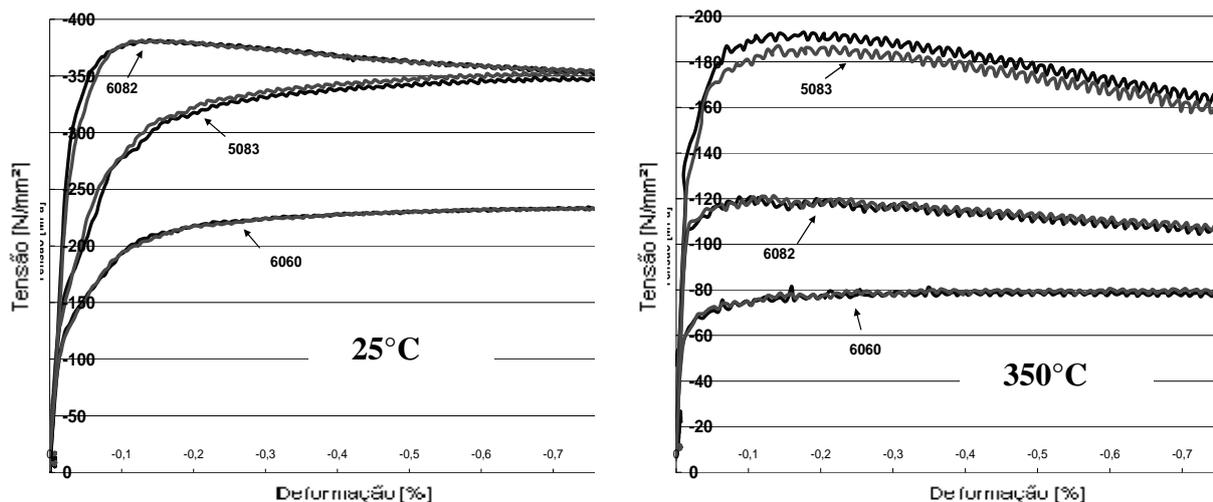


Figura 7. Curvas geradas por ensaio de compressão a 25°C e 350°C. A resistência à compressão da liga 5083 é a menos sensível ao aumento da temperatura, seguida da liga 6060. A liga 6082 foi a que apresentou maior variação neste ensaio.

3.2 Caracterização Metalográfica dos Passes

Analisando as imagens macroestruturais das seções transversais dos revestimentos, pode-se ter uma idéia do grau de adesão dos materiais depositado com o substrato. A Figura 8 mostra essas imagens. As ligas depositadas são respectivamente 5083, 6060 e 6082. As três imagens mostram que a linha de interface entre o substrato e o material depositado não são totalmente contínuas. Podem ser observados nas bordas pontos escuros que deixam visível essas descontinuidades próximas às bordas. Tais descontinuidades tendem a diminuir de acordo com os parâmetros aplicados e o material. A liga 5083 foi a que teve melhor comportamento nesse aspecto. O substrato é uma chapa da liga 2024 com 10 milímetros de espessura.

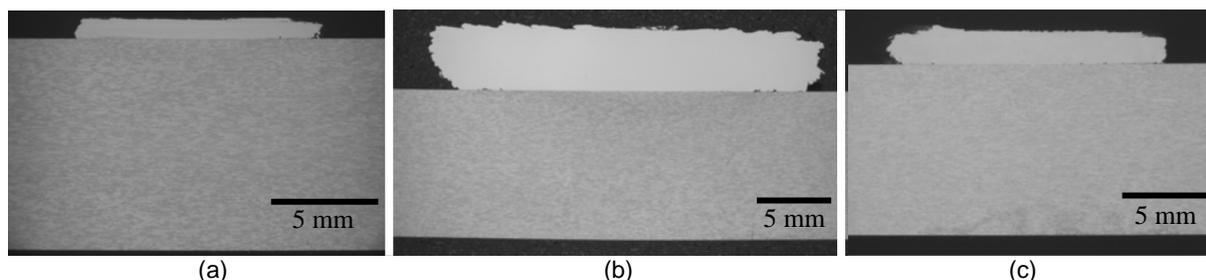


Figura 8. (a) Liga 5083 depositada (2 mm/min, 100 PSI, 4.500 RPM); (b) Liga 6060 depositada (2 mm/min, 100 PSI, 2.500 RPM); e (c) Liga 6082 depositada (5 mm/min, 100 PSI, 3.500 RPM).

Foi observado que a liga 5083 teve o melhor desempenho no que se refere à adesão, os passes realizados com esse material foram estáveis e com uma quantidade de descontinuidades bastante baixa. Em relação a esse aspecto, a liga 5083 foi seguida da 6082 e 6060.

A Figura 9 mostra imagens metalográficas das duas bordas e do centro da seção transversal de um passe realizado com 2 mm/min, 100 PSI, 2.500 RPM e liga 5083.

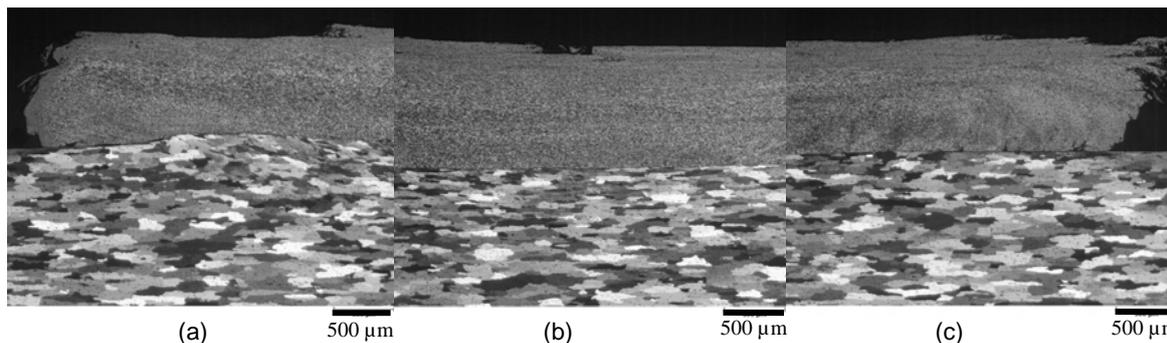


Figura 9. Passe realizado a 2 mm/min, 100 PSI, 2.500 RPM com a liga 5083. (a) lado do avanço do revestimento; (b) região central do revestimento; e (c) lado do recuo do revestimento.

3.3 Perfis de Microdureza

Os perfis de microdureza na direção vertical e horizontal para a liga 5083 na condição 10 (Tabela 1) estão indicados nas Figuras 10 e 11 respectivamente. Tais perfis foram realizados segundo esquema da Figura 2.

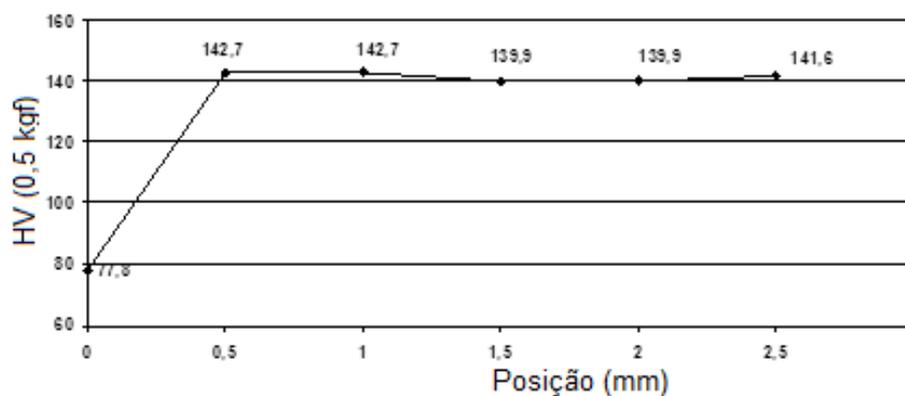


Figura 10. Perfil de microdureza de camada da liga 5083 na direção horizontal.

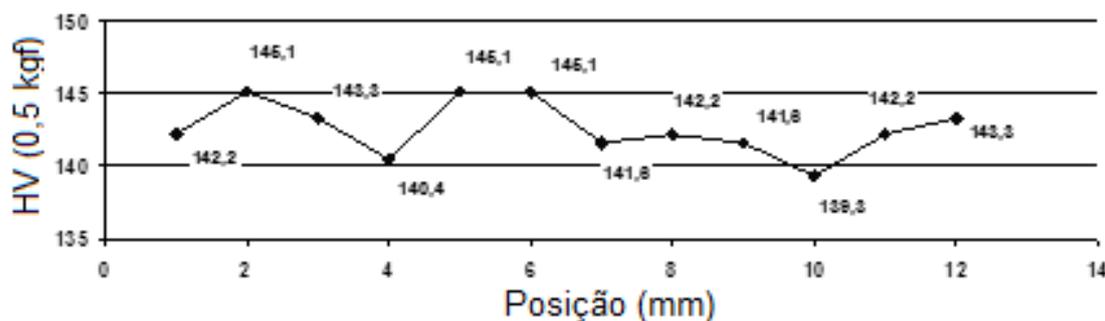


Figura 11. Perfil de microdureza de camada da liga 5083 na direção horizontal.

No perfil horizontal nota-se um pequeno aumento de dureza no lado de avanço (região da esquerda). O perfil vertical mostra pequena diminuição da dureza a conforme as medições afastam-se da interface entre os materiais.

As Figuras 12 e 13 mostram os perfis de microdureza, vertical e horizontal para deposição com a liga 6060, condição 10 (Tabela 2).

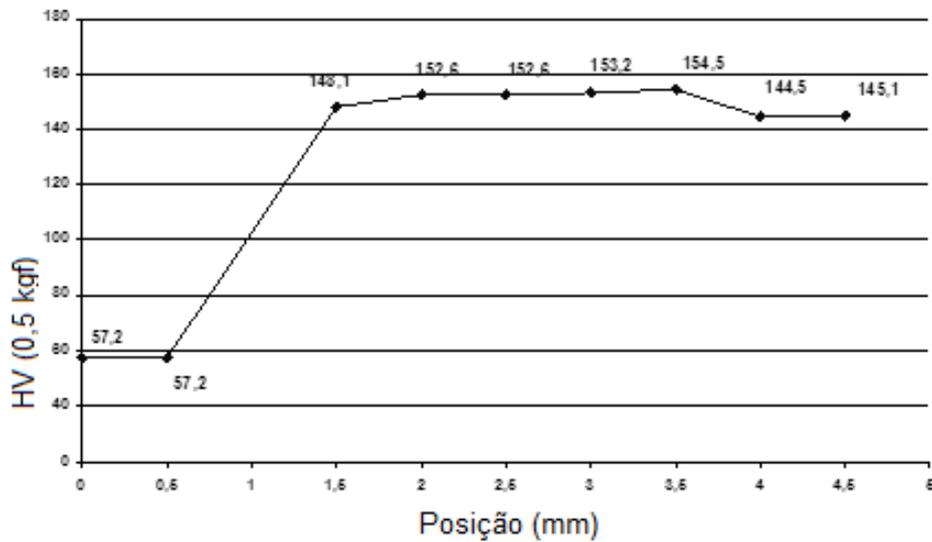


Figura 12. Perfil de microdureza de camada da liga 6060 na direção vertical.

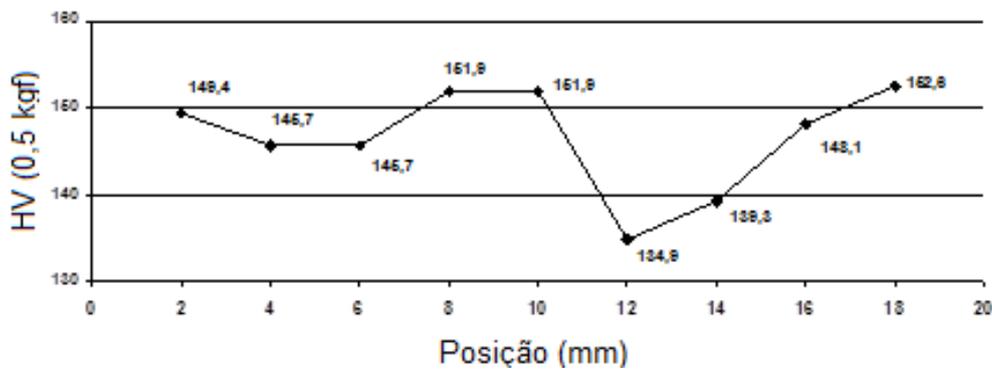


Figura 13. Perfil de microdureza de camada da liga 6060 na direção horizontal.

O perfil vertical indica maior dureza próxima à interface revestida. Na linha horizontal não fica evidente nenhuma tendência.

Os perfis de microdureza vertical e horizontal de deposição da liga 6082, na condição 2 (Tabela 3), são apresentados nas Figuras 14 e 15 respectivamente.

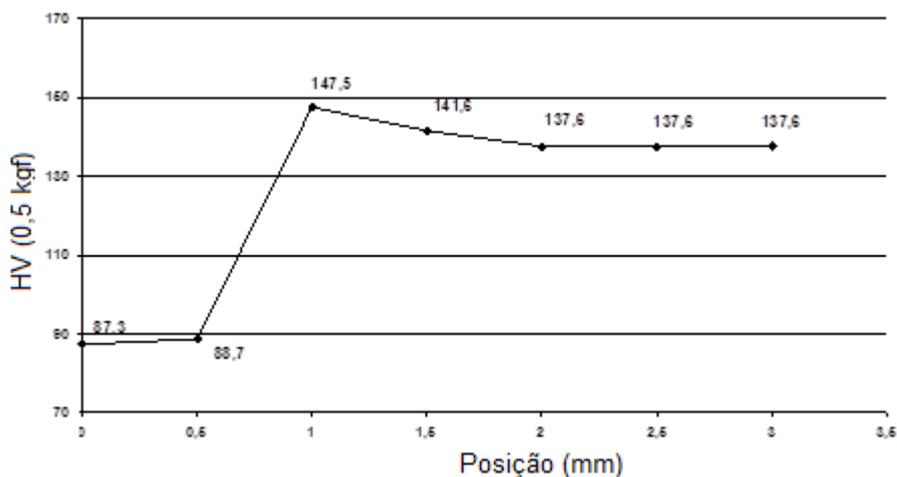


Figura 14. Perfil de microdureza de camada da liga 6082 na direção vertical.

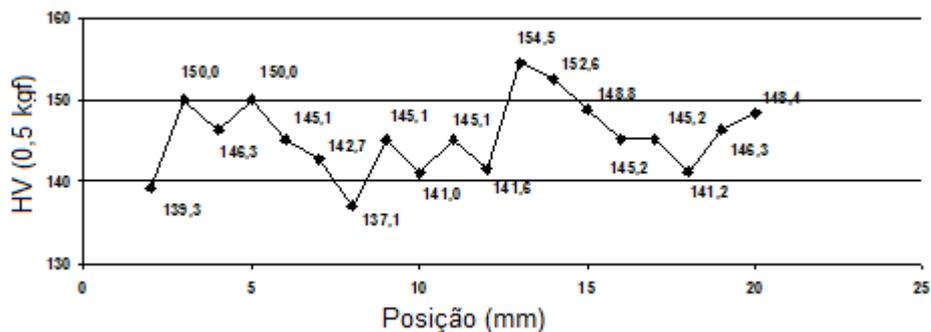


Figura 15. Perfil de microdureza de camada da liga 6082 na direção horizontal.

3.4 Teste de Adesão

As curvas geradas pelo ensaio de adesão estão mostradas na Figura 16a. Observa-se claramente um aumento da carga máxima em relação à posição do corpo de prova no passe de solda.

A Figura 16b indica as cargas máximas em cada região do passe de revestimento, os corpos de prova foram retirados ao longo do passe conforme o desenho esquemático na Figura 16b.

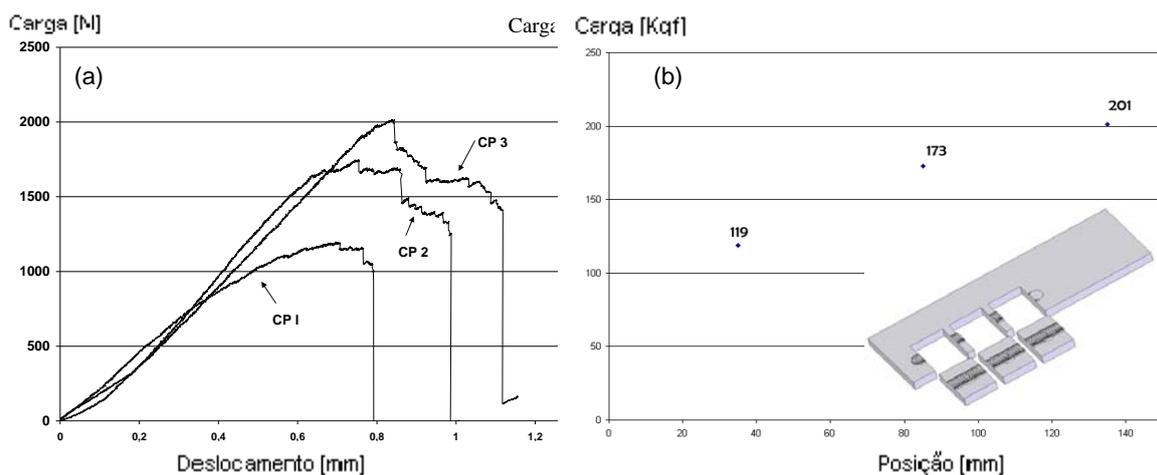


Figura 16. (a) Curvas geradas pelo ensaio de adesão; e (b) cargas máximas para cada posição do passe.

3.5 Relação Entre Geometria da Deposição e Pressão Empregada

As Figuras 17 e 18 mostram os resultados dos estudos da variação da geometria da camada com a pressão empregada no processo para as ligas 5083 e 6060, respectivamente.

A pressão mostra um efeito sobre a espessura mais pronunciado do que sobre a largura.

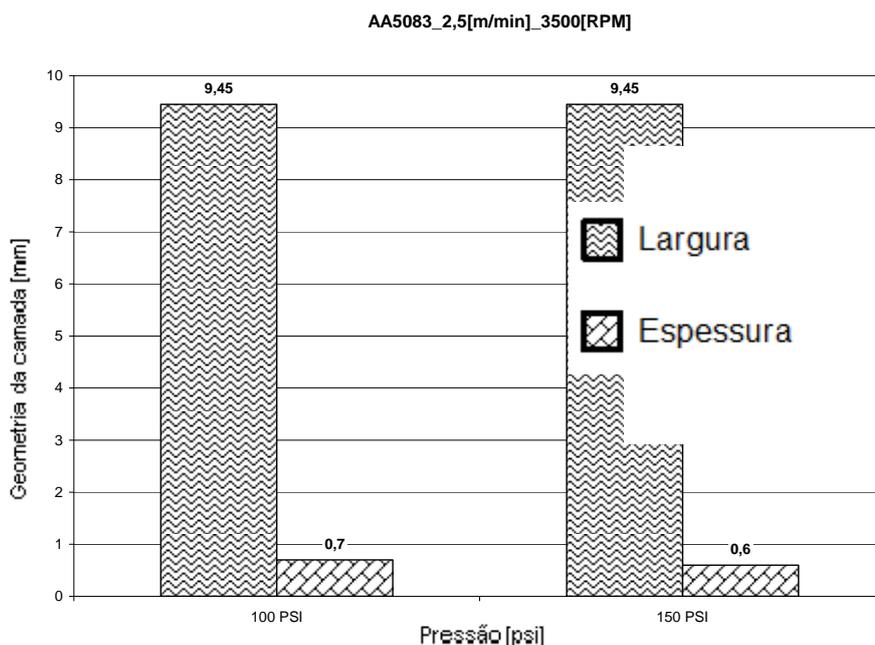


Figura 17. Relação entre geometria da deposição e pressão com a liga 5083.

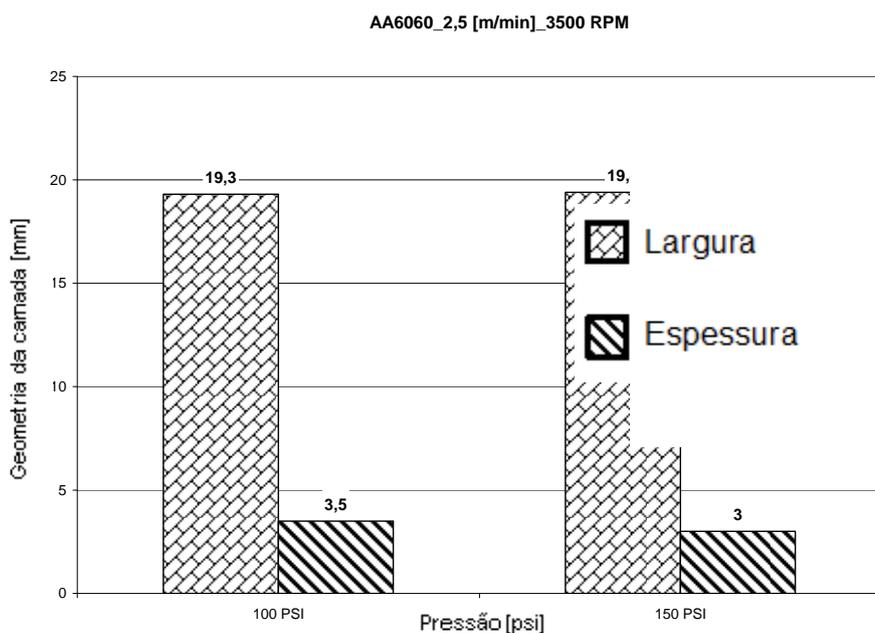


Figura 18. Relação entre geometria da deposição e pressão com a liga 6060.

4 DISCUSSÕES

Uma das contribuições do processo por fricção é a possibilidade de união de materiais anteriormente não-soldáveis (Al das séries 2xxx e 7xxx) por processos convencionais.⁽⁸⁾ Neste estudo nem todas as combinações de ensaios realizados tiveram êxito evidenciado pela não formação de uma camada contínua. Essa má formação da camada deve-se às combinações de Velocidade transversal, Velocidade rotacional e Força, não favoráveis a estabilidade da camada plastificada que se forma entre a barra consumível e o substrato.

As imagens metalográficas mostraram uma região de boa aderência no centro da camada depositada e descontinuidades nas bordas. Tais descontinuidades são geradas durante o processo, pois as tensões no centro da frente de revestimento são maiores do que nas bordas. Essa diminuição das tensões torna desfavorável às condições de adesão.

A análise do modo de deposição mostra que múltiplas camadas são depositadas umas sobre as outras durante o processo e dá uma idéia de como o material depositado flui durante o processo. O modo de fluência deve-se à assimetria do processo.

Os testes de adesão realizados indicaram um aumento da força de adesão à medida que o passe de deposição avança. Tais resultados devem-se ao fato de que conforme o consumível anda sobre o substrato, as condições de adesão vão tendendo a um estado estacionário mais favorável à deposição.

Uma análise dos perfis de microdureza indica que existe um aumento da dureza na região de deposição causada pela deformação imposta pelo consumível durante o processo.

A geometria do revestimento (largura x espessura) está relacionada com os parâmetros do processo de tal forma que o aumento da pressão causa uma diminuição da espessura, não interferindo, porém, de modo perceptível na largura da camada. Não foram avaliados os efeitos dos outros parâmetros sobre a geometria da camada depositada.

5 CONCLUSÃO

Os experimentos realizados com a liga 5083 mostraram os melhores resultados em termos de adesão e bom comportamento no que se refere às relações entre parâmetros e geometria das camadas depositadas. Os ensaios de compressão a alta temperatura, explicam esse comportamento para a liga 5083. Os experimentos indicaram que a altas temperaturas essa liga tem a maior resistência das três, o que se traduz em boa estabilidade da camada plastificada, formada durante o processo de deposição.

Agradecimentos

Ao Laboratório de Metalurgia Física (Lamef, UFRGS) e ao Centro de Pesquisas GKSS.

REFERÊNCIAS

- 1 Dietrich G. A. Aluminum: Technology, applications, and environment, p. 31-77, 1999.
- 2 R. W. Cahn, Phaasen, E. J. Kraemer. Materials science and technology, Vol.8, p. 41-89, 1996.
- 3 P.V. Petroyiannis, Sp.G. Pantelakis, G.N. Haidemenopoulos, Protective role of local Al cladding against corrosion damage and hydrogen embrittlement of 2024 aluminum alloy specimens. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, Volume 44, Issue 1, September 2005, Pages 70-81
- 4 J.R. Davis. Aluminum and Aluminum Alloys, ASM Handbook, 1996.
- 5 E. D. Nicholas; W. M. Thomas. Metal Deposition by Friction Welding. Welding Journal, Cambridge, England, p. 17-27, Agosto.1986
- 6 ASTM E8M-11: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials

- 7 ASTM E209-00: Standard Practice for Compression Tests of Metallic Materials at Elevated Temperatures with Conventional or Rapid Heating Rates and Strain Rates
- 8 Campanelli, L.C.; Alcântara, N.G.; Santos, J.F. Soldagem por ponto no estado sólido de ligas leves. In: Soldagem e inspeção. São Paulo, 2011
- 9 Sp.G. Pantelakis, A.N. Chamos, Al.Th. Kermandis, A critical consideration for the use of Al-cladding for protecting aircraft aluminum alloy 2024 against corrosion, Theoretical and Applied Fracture Mechanics, Vol 57, December 2011.
- 10 Ruidong Fu, Huan Xu, Guohong Luan, Chunlin Dong, Fucheng Zhang, Guang Li, Top surface microstructure of friction-stir welded AA2524-T3 aluminum alloy joints, Materials Characterization, Volume 65, March 2012.