

ESTUDO DA SOLDA POR ATRITO LINEAR EM JUNTAS DE TOPO SIMILARES NAS LIGAS AA2024-T3 E AA7475-T761 UTILIZANDO EQUIPAMENTO DEDICADO AO PROCESSO

João Paulo Buoro Perandini, jp.perandini@gmail.com¹
Sérgio Delijaicov, sergiode@fei.edu.br¹
Hugo Borelli Resende, hresende@ipt.br²
Mario Henrique Fernandes Batalha, mariobatalha@ipt.br²

¹Centro Universitario FEI, São Bernardo do Campo, Brasil

²Laboratório de Estruturas Leves, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São José dos Campos, Brasil

Resumo: A tecnologia de união por atrito linear também conhecida por FSW (Friction Stir Welding), já apresenta ampla difusão na indústria internacional. É um processo de junção no estado sólido, ou seja, não há fusão entre o metal base e um metal de adição como nos processos de solda convencionais, o que lhe garante versatilidade, baixo impacto energético, confiabilidade e estabilidade dimensional. Na indústria aeroespacial, a principal aplicação tem ocorrido na união de ligas de alumínio que apresentam baixa compatibilidade com processos de solda convencionais, bem como possível redução de peso estrutural com a substituição do sistema de rebiteagem. No Brasil esta técnica de solda ainda é recente, havendo poucos dados disponíveis, principalmente relacionados a máquinas dedicadas ao processo FSW. O presente trabalho teve como objetivo avaliar a influência dos parâmetros de solda nos esforços atuantes durante a mesma, como força axial e torque. Para cumprir o proposto foram soldadas chapas de alumínio AA2024-T3 e AA7475-T761, ambas com 1,6 mm de espessura. A máquina utilizada foi a GG-7 do fabricante MTI, disponível no Laboratório de Estruturas Leves do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT). Inicialmente se fez uma matriz de ensaio utilizando-se a ferramenta estatística Planejamento Experimental (PE), combinando os parâmetros rotação, velocidade de avanço e ângulo de inclinação da ferramenta, de modo que as corridas fossem aleatoriamente dispostas. Em seguida, realizou-se análise visual das amostras e processamento estatístico dos dados no software Statística 12.0. Os resultados permitiram demonstrar a influência dos parâmetros no comportamento dos esforços através de análise estatística dos dados. Também mostraram de forma geral um baixo desvio dos dados entre as réplicas, demonstrando que o equipamento é adequado para os limites propostos neste experimento.

Palavras-chave: Solda por atrito linear (FSW), Alumínio, Planejamento Experimental

1. INTRODUÇÃO

A solda por atrito linear (FSW) é um processo de junção no estado sólido, ou seja, não promove a fusão do material durante o processo e não necessita de metal de adição. Conforme comentado por Mendez (2000) o processo é adequado para se trabalhar com ligas metálicas de difícil soldagem por fusão como as ligas de alumínio das séries 2xxx e 7xxx, frequentemente utilizadas em estruturas aeronáuticas. Além disso, essa técnica permite elevar a resistência mecânica da união em 30 a 50% a mais soldas por arco elétrico e vida em fadiga próxima a de peças rebiteadas.

Mishra e Ma (2005), descrevem este processo de forma simplificada. Ele é composto de uma ferramenta rotativa não consumível, composta por um pino e um ombro, que é inserida na região de interface entre as duas peças que se deseja unir, sejam estas peças chapas espessas ou delgadas. Após a inserção, aplica-se uma força axial, e devido ao atrito entre a ferramenta e a peça, esta é aquecida a uma temperatura abaixo da de fusão e deformada plasticamente. Então inicia-se o movimento de translação, gerando o cordão de solda.

Experimentos em geral são custosos em termos de tempo e financeiros. Assim, a necessidade de entender se há interação entre os parâmetros e seus respectivos níveis, além dos preceitos em relação a custo e tamanho do experimento, levam a utilização do modelo estatístico conhecido como delineamento central composto, como descrito por Rodrigues e Iemma (2014). Supondo que um experimento tenha dois níveis, teremos 2^k pontos fatoriais, somados a 2k pontos axiais e também somados a um número aleatório de pontos centrais. Para exemplificar de maneira visual, a Fig. (1) apresenta graficamente esta explanação, onde os pontos fatoriais são representados pelas arestas do cubo, os pontos axiais são os afastados das faces do cubo, também chamados de estelares, e por fim o ponto central, intersecção dos eixos x1, x2 e x3.

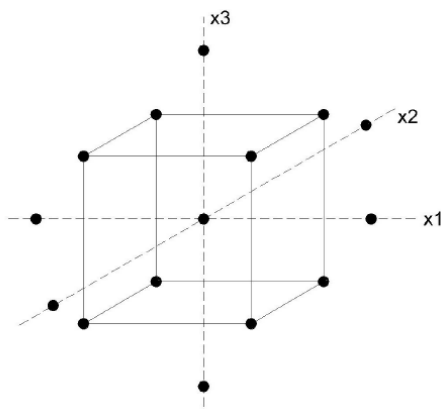


Figura 1. Modelo esquemático do planejamento experimental utilizado. Adaptado de Rodrigues e Iemma (2014).

A inclusão dos pontos centrais ao planejamento fatorial tem por objetivo viabilizar o cálculo de resíduos, e consequentemente, o erro padrão, bem como associar o grau de influência entre fatores com maior eficiência se comparado com o simples aumento da população analisada. Isso permite obter conclusões precisas analisando um menor grupo de dados.

O presente trabalho teve como motivação encontrar uma correlação entre os parâmetros de solda e a resposta do equipamento ao processo por meio do estudo em chapas finas de alumínio. O processo de solda por atrito linear é altamente sensível a combinação de diferentes parâmetros, tornando-o complexo principalmente quando aplicado em novos materiais. A fim de auxiliar e orientar esta busca foi aplicada uma ferramenta de planejamento estatístico, com objetivo de observar o comportamento dos resultados de força axial e torque da ferramenta, cujos quais estão associados a qualidade e homogeneidade do cordão de solda.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para esse estudo foram utilizadas as ligas de alumínio AA2024-T3 e AA7475-T761. Estas ligas apresentam dificuldade de serem unidas por processos convencionais devido à alta condutividade térmica, alto coeficiente de expansão térmica, alta solubilidade do hidrogênio no alumínio e maior susceptibilidade à trinca de solidificação e de liquação. Estas limitações geralmente resultarão em queda da propriedade mecânica na região de solda devido a descaracterização de sua estrutura complexa de precipitados finos, efeito este gerado pela alta temperatura que o material experimenta durante o processo. As chapas utilizadas tem as dimensões 200 x 100 mm, com 1,6 mm de espessura nominal. A composição química de ambas as ligas está descrita na Tab. (1).

Tabela 1. Composição química em % peso. Adaptado de Aluminum Association Inc. (2006).

Liga	Al (Mín.)	Cu	Zn	Mg	Cr	Si
AA2024-T3	91,6	3,8-4,9	0,3	1,2-1,6	0,1	0,5
AA7475-T761	88,7	1,2-1,9	5,2-6,2	1,9-2,6	0,2-0,3	0,1

2.1. Equipamento e ferramenta

Os experimentos foram executados em um equipamento dedicado ao processamento por atrito, fabricado pela empresa MTI, modelo GG7, disponível no Laboratório de Estruturas Leves (LEL) do IPT. Em relação às capacidades deste equipamento têm-se: mesa com 3800 x 3900 mm, cabeçote com 5 eixos, 80 kN de força axial, 3000 rpm de rotação, 3000 mm/min de velocidade de avanço e 280 N.m de torque. Este equipamento dispunha de um conjunto de células de carga acopladas ao cabeçote, responsáveis por aquilatar os esforços durante a solda a uma frequência de 5 Hz, e também de um sistema com comando numérico computacional (CNC), em que era preparada a programação da solda com todos os parâmetros e feito o controle destes. Para a execução das soldas o par de chapas era posicionado de forma que a linha de interface entre as duas estivesse abaixo da ferramenta de união e fixadas por meio de garras de topo e fixadores laterais, apresentados na Fig. (2).

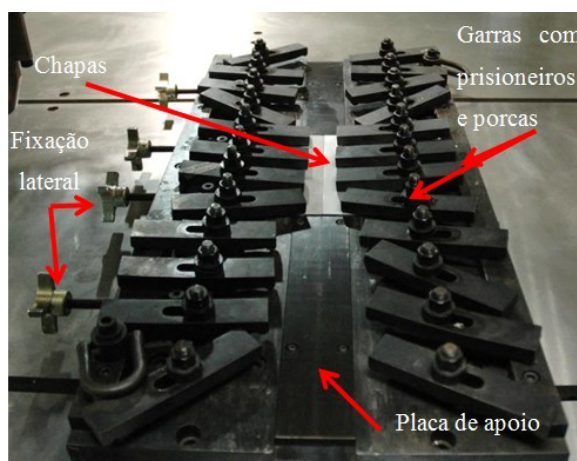


Figura 2. Máquina para processamento por atrito.

A ferramenta utilizada para realizar a solda das chapas foi fabricada em aço ferramenta AISI H13 temperado e revenido, atingindo 46 HRC de dureza. A fim de elevar a resistência ao desgaste, também foi realizada nitretação a plasma na região que compreende o pino e o ombro, atingindo dureza na ordem de HV 1000. A geometria utilizada foi de ombro liso com 8 mm de diâmetro e pino cônico liso de 1,42 mm de altura, diâmetro na ponta 2,0 mm e diâmetro na base 2,6mm.

2.2. Planejamento experimental

Os parâmetros de solda foram definidos baseando-se no trabalho publicado por Rajakumar e Balasubramanian (2012). As variáveis independentes foram definidas como a rotação em RPM, a velocidade de avanço em mm/min e o ângulo de inclinação da ferramenta em graus. São apresentados na Tab. (2) os valores mínimos e máximos para cada liga de alumínio. As variáveis dependentes foram definidas como a força axial em N e o torque em N.m.

Tabela 2. Valores máximos e mínimos das variáveis independentes.

Parâmetros	AA2024-T3		AA7475-T761	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Rotação (RPM)	1300	1600	1300	1600
Velocidade de avanço (mm/min)	40	90	40	90
Ângulo de inclinação (°)	1	3	1	3

Utilizando-se da ferramenta estatística Planejamento Experimental associada ao modelo delineamento central composto, e com a definição das faixas de trabalho das três variáveis independentes, é possível calcular todas as combinações entre elas. Assim, entrando com estes dados no software Statistica versão 12.0, tem-se como dado de saída

a Tab. (3) a seguir, com as corridas definidas aleatoriamente e com suas respectivas réplicas, garantindo dois dos preceitos básicos da estatística, aplicadas para ambas as ligas de Alumínio AA2024-T3 e AA7475-T761.

Tabela 3. Planejamento experimental definido pelo método estatístico.

Teste	Corrida	Rotação (RPM)	Avanço (mm/min)	Ângulo (°)
1	21	1539	50,1	1,35
2	1	1361	50,1	1,35
3	25	1300	65,0	2,00
4	20	1361	79,8	2,65
5	26	1600	65,0	2,00
6	9	1300	65,0	2,00
7	27	1450	40,0	2,00
8	15 (C)	1450	65,0	2,00
9	24	1539	79,8	2,65
10	6	1539	50,1	2,65
11	29	1450	65,0	1,00
12	28	1450	90,0	2,00
13	14	1450	65,0	3,00
14	31 (C)	1450	65,0	2,00
15	18	1361	50,1	2,65
16	30	1450	65,0	3,00
17	22	1539	50,1	2,65
18	2	1361	50,1	2,65
19	8	1539	79,8	2,65
20	11	1450	40,0	2,00
21	7	1539	79,8	1,35
22	23	1539	79,8	1,35
23	13	1450	65,0	1,00
24	10	1600	65,0	2,00
25	19	1361	79,8	1,35
26	5	1539	50,1	1,35
27	32 (C)	1450	65,0	2,00
28	17	1361	50,1	1,35
29	12	1450	90,0	2,00
30	16 (C)	1450	65,0	2,00
31	3	1361	79,8	1,35
32	4	1361	79,8	2,65

3. RESULTADOS E ANÁLISES

3.1. Dados extraídos do equipamento e inspeção visual

Após as soldas, as chapas foram identificadas e seu comportamento durante o processo foi avaliado por meio dos dados aquisitados pelo equipamento. Na Figura 3, apresenta-se um exemplo de gráfico extraído do equipamento de solda para a corrida 21 da liga AA 2024-T3 e uma foto do cordão de solda da corrida 5 da mesma liga. Nota-se neste gráfico que há um pico de força axial aproximadamente a 80 segundos. Este pico representa o momento que a ferramenta foi inserida nas chapas, vencendo o limite de resistência mecânica, deformando plasticamente o material. Também nota-se uma rampa de aquecimento, onde incrementou-se gradativamente a velocidade de avanço até o valor

determinado para cada corrida. Em seguida o comportamento dos esforços entra em um estado de regime, sendo este período utilizado para calcular o valor médio da força axial e do torque, bem como seus respectivos valores de desvio padrão.

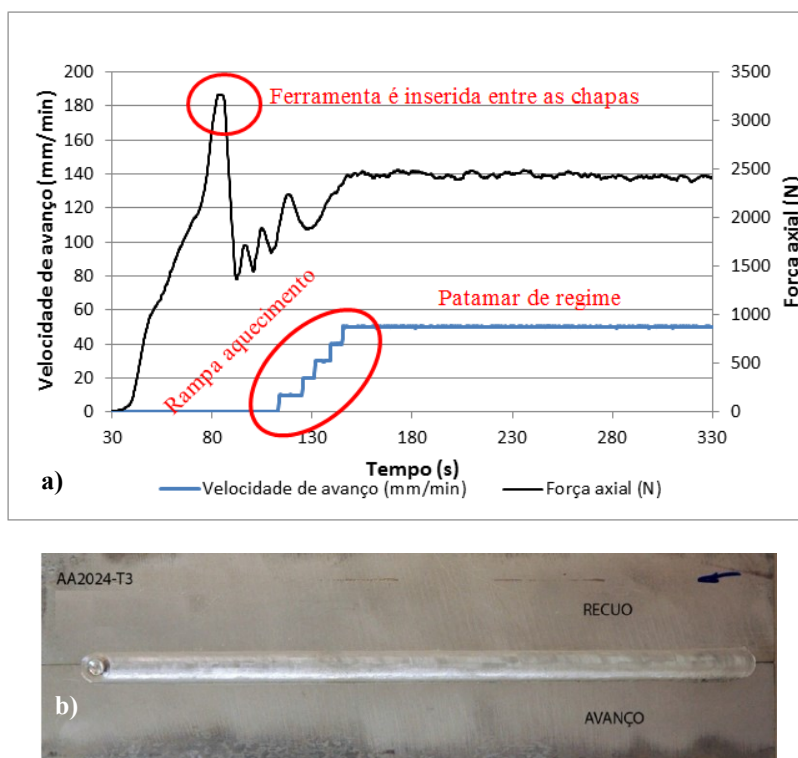


Figura 3. Resultados obtidos da união metálica: a) Dados extraídos do GG7 e b) Superfície da chapa soldada.

Após o tratamento dos dados aquisitados durante as soldas têm-se os valores médios para força axial e para o torque de todas as corridas realizadas no experimento, representados na Fig. (4) para a liga AA2024-T3, e na Fig. (5) para a liga AA7475-T761. Estes valores foram utilizados como dado de entrada para o software Statistica 12.0, a fim de correlacionar os parâmetros de solda com estes resultados.

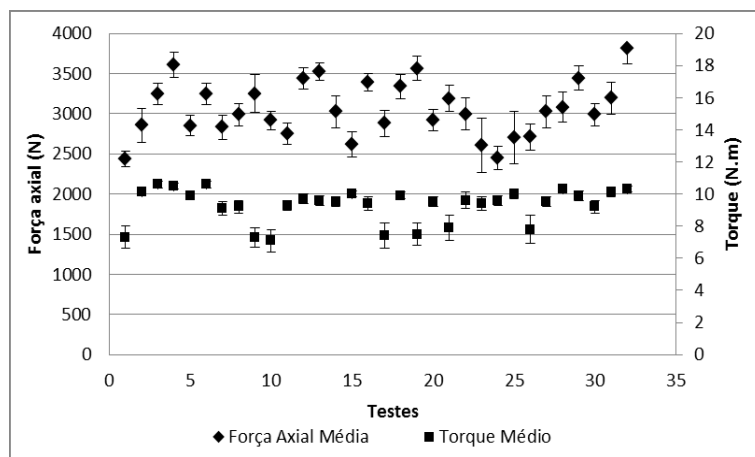


Figura 4. Resultados de força axial e torque médio para a liga AA2024-T3.

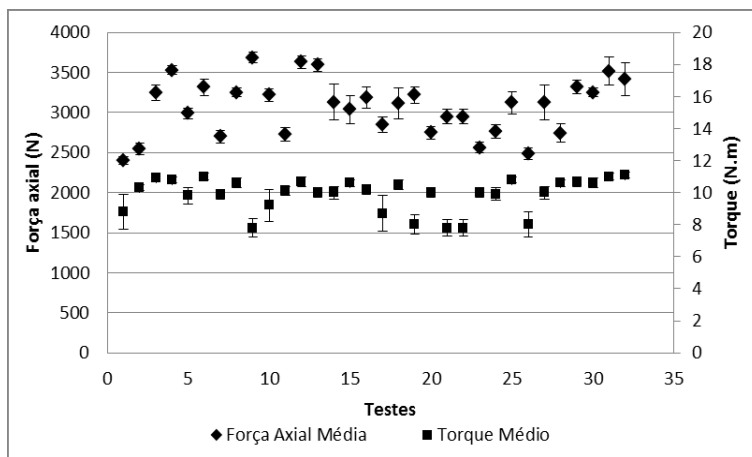


Figura 5. Resultados de força axial e torque médio para a liga AA7475-T761.

3.2. Resultados da análise estatística

3.2.1. Força axial

Analisou-se a variável dependente força axial através da análise de variância (ANOVA) para ambas as ligas. Encontrou-se para a liga AA2024-T3 um R^2 de 0,75492, ou seja, os parâmetros analisados explicam aproximadamente 75% da variância da força axial. Já para a liga AA7475-T761 esta mesma análise encontrou um R^2 de 0,8652, ou seja, aqui os parâmetros analisados explicam aproximadamente 86% da variância da força axial. Este resultado está graficamente apresentado na Fig. (6), com os valores observados pelos valores previstos, onde nota-se a boa aderência dos pontos a reta vermelha.

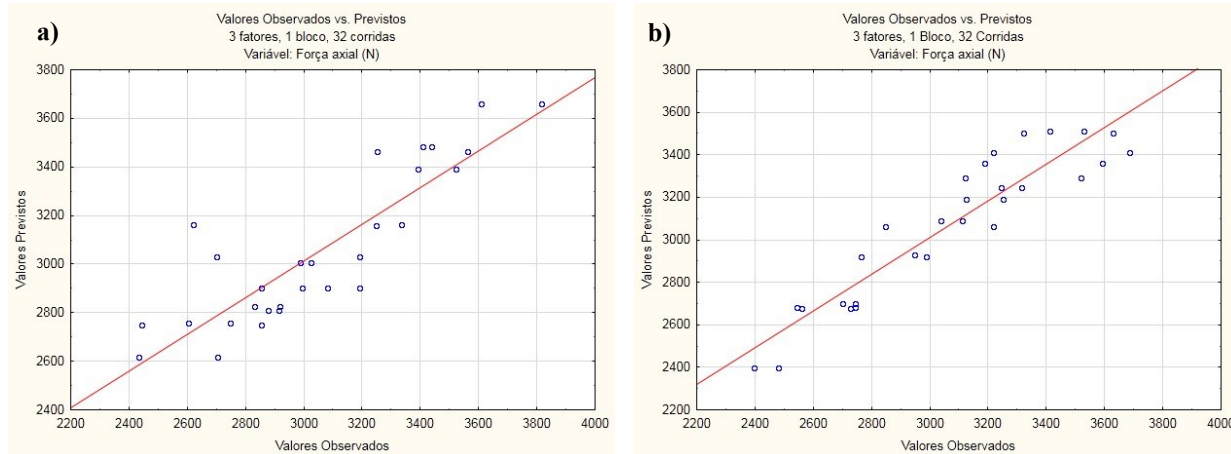


Figura 6. Valores observados pelos previstos, variável dependente força axial: a) AA2024-T3 e b) AA7475-T761.

Em seguida analisou-se o gráfico Pareto, buscando quais parâmetros eram estatisticamente significativos com 95% de confiabilidade. Para ambas as ligas encontrou-se que a velocidade de avanço, o ângulo de inclinação e rotação representam estes parâmetros, resultados estes apresentados na Fig. (7).

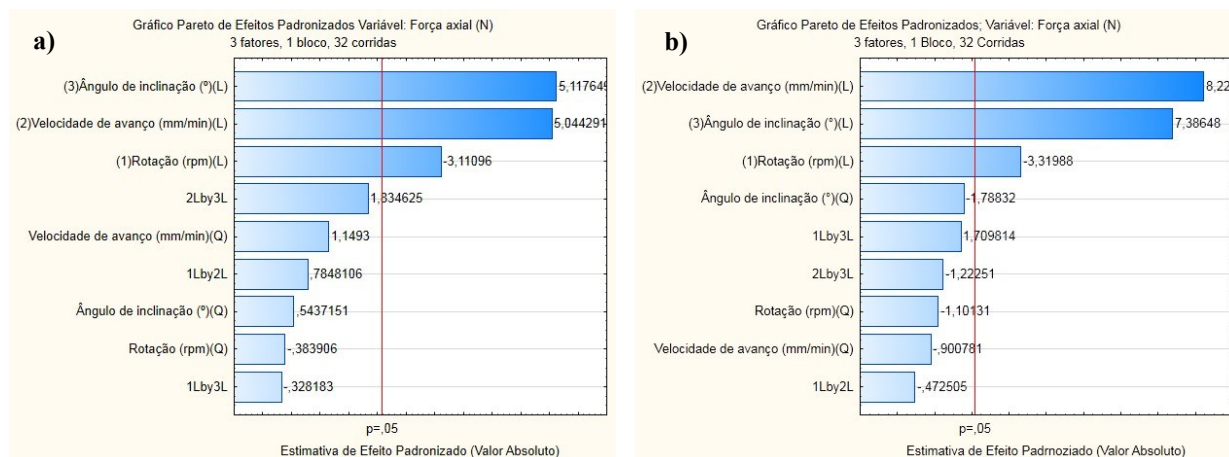


Figura 7. Gráfico Pareto, variável dependente força axial: a) AA2024-T3 e b) AA7475-T761.

E por fim, analisou-se a superfície resposta de ambas as ligas, buscando avaliar a influência da rotação e da velocidade de avanço em relação a força axial. Estes resultados estão apresentados na Fig. (8), a seguir. Observando-se o gráfico do item a, nota-se uma tendência para os valores de força axial. Tomando-se o ponto com rotação em 1300 rpm e velocidade de avanço em 90 mm/min, observa-se o valor máximo de força axial, ao passo que com 1600 rpm e 40 mm/min, observa-se o oposto, ou seja, o valor mínimo. Comportamento análogo pode ser observado no item b da Fig. (8), referente a liga de alumínio AA7475-T761. Assim, atribui-se estes comportamentos distintos dos dois pontos analisados ao aporte térmico durante a solda. No primeiro ponto, devido a ferramenta permanecer menos tempo rotacionando na mesma posição, fazendo-se necessário incrementar a força axial para manter o mesmo aporte térmico. Já para o segundo caso, devido a ferramenta permanecer um tempo maior na mesma posição e com maior rotação, necessita-se menor força axial para manter o aporte térmico.

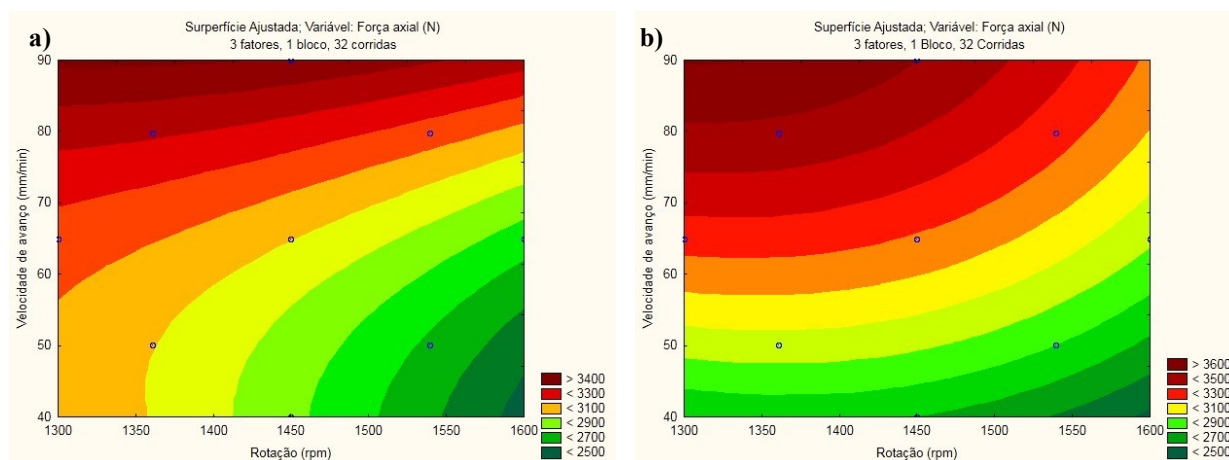


Figura 8. Superfície resposta, variável dependente força axial: a) AA2024-T3 e b) AA7475-T761.

3.2.2. Torque

Analisou-se também a variável dependente torque através da análise de variância (ANOVA) para ambas as ligas. Encontrou-se para a liga AA2024-T3 um R^2 de 0,63229, ou seja, os parâmetros analisados explicam aproximadamente 63% da variância da força axial. Já para a liga AA7475-T761 esta mesma análise encontrou um R^2 de 0,68661, ou seja, aqui os parâmetros analisados explicam aproximadamente 68% da variância da força axial. Este resultado está graficamente apresentado na Fig. (9), com os valores observados pelos valores previstos, onde nota-se certa aderência dos pontos a reta vermelha, porém ligeiramente menores do que os valores expostos no capítulo 3.2.1.

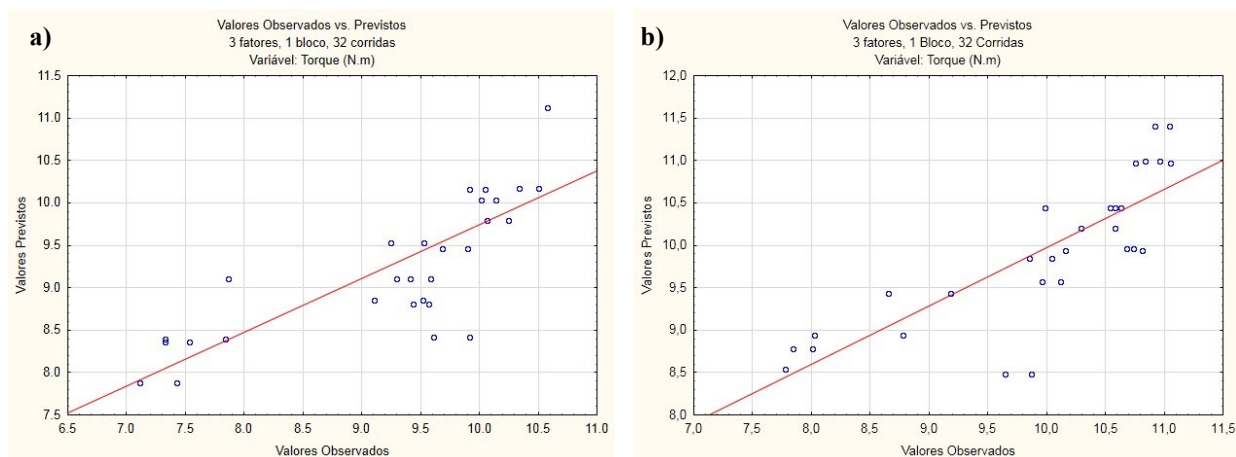


Figura 9. Valores observados pelos previstos, variável dependente torque: a) AA2024-T3 e b) AA7475-T761.

Em seguida analisou-se o gráfico Pareto, buscando quais parâmetros eram estatisticamente significativos com 95% de confiabilidade. Para ambas as ligas encontrou-se que a rotação representa este parâmetro. Este comportamento já era esperado, pois torque e rotação são variáveis correlatas de maneira inversamente proporcional. Com isto, evidencia-se que a aquisição dos dados e o modelo estatístico são robustos. Assim, analisando as superfícies de resposta da Fig. (10) é possível notar com bastante destreza que ao incrementar a rotação há um decréscimo do torque, ao passo que a velocidade de avanço exerce pouca influência. Interessante comparar este resultado com o da Fig. (4) e da Fig. (5), onde têm-se o valor médio e o desvio padrão de torque para cada corrida, pois observa-se pouca variação nos valores, sugerindo que o equipamento utilizado para realizar as soldas é estável e capaz de executá-las com bastante qualidade no que tange a aquisição de dados.

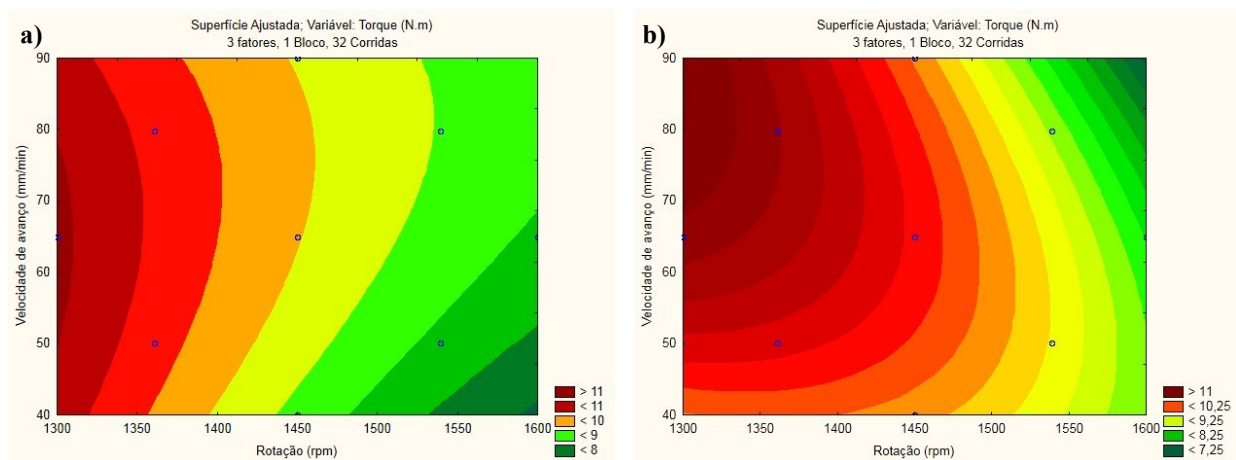


Figura 10. Superfície resposta, variável dependente torque: a) AA2024-T3 e b) AA7475-T761.

4. CONCLUSÕES

O equipamento GG7, utilizado para a execução das soldas, mostrou-se robusto e confiável para a realização de soldas com qualidade. Os dados de saída aquisitados também expõe a qualidade e a confiabilidade que o GG7 possui. Isto pode ser observado nos resultados obtidos com a variável dependente torque, pois apenas a rotação apresentou-se como parâmetro estatisticamente significativo com 95% de confiabilidade, corroborando com a teoria da Física, onde torque e rotação são variáveis correlacionadas de modo inversamente proporcional.

Conclui-se também que o aporte térmico exerce relação de dependência com a rotação da ferramenta, pois nos gráficos Pareto ela aparece como parâmetro estatisticamente significativo, exibindo a sua importância durante o processo de solda por atrito linear (FSW) na etapa de aquecimento/amolecimento, deformação plástica e mistura do material a ser soldado.

5. AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Laboratório de Estruturas Leves (LEL) do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), unidade sediada em São José dos Campos, pela concessão de utilização do equipamento GG7, dedicado para solda por atrito linear, contribuído substancialmente para a execução deste trabalho. Agradeço a Empresa Brasileira de Aeronáutica S.A. (Embraer) que gentilmente fez cessão das chapas de alumínio para este trabalho. A Heat Tech Tecnologia em Tratamento Térmico e Engenharia de Superfície Ltda, na pessoa do Dr. Carlos E. Pinedo, pela realização do tratamento térmico e nitretação nas ferramentas utilizadas para a solda. Ao Centro Universitário da FEI, campus São Bernardo do Campo, detentor das licenças do software Statistica 12.0.

6. REFERÊNCIAS

- Aluminum Association Inc. 2006, International Alloy Designations and Chemical Composition Limits for Wrought Aluminum and Wrought Aluminum Alloys. The Aluminum Association, Arlington, Virginia, p. 28.
- Mendez, P. F., 2000, "New Trends in Welding in the Aeronautic Industry", Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA.
- Mishra, R. S. e Ma, Z. Y., 2005, "Friction stir welding and processing". Materials Science and Engineering: R: Reports, v. 50, n. 1-2, p. 1-78.
- Rodrigues, M. I. e Iemma, A. F., 2014, "Planejamento de experimentos e otimização de processos". 3a Edição ed. Campinas, SP.
- Rajakumar, S. e Balasubramanian, V., 2012, "Establishing relationships between mechanical properties of aluminium alloys and optimised friction stir welding process parameters". Materials and Design, v. 40, p. 17-35.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

FRICION STIR WELDING STUDY OF SIMILAR BUTT JOINTS OF AA2024-T3 AND AA7475-T761 ALUMINUM ALLOYS USING PROCESS DEDICATED EQUIPMENT

João Paulo Buoro Perandini, jp.perandini@gmail.com¹
Sérgio Delijaicov, sergiode@fei.edu.br¹
Hugo Borelli Resende, hresende@ipt.br²
Mario Henrique Fernandes Batalha, mariobatalha@ipt.br²

¹Centro Universitario FEI, São Bernardo do Campo, Brasil

²Laboratório de Estruturas Leves, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São José dos Campos, Brasil

Abstract: The technology of joining process by friction, also known as FSW (Friction Stir Welding), is already widespread in international industry. It is a solid state joining process, what means there is no melting of the workpiece material like occurs in the conventional welding process, which guarantees versatility, low energy impact, reliability and dimensional stability. In the aerospace industry, the main application has been in the joining of aluminum alloys that have low compatibility with conventional welding processes, also as a solution to structural weight reduction by replacing the riveting system. In Brazil this welding technique is still recent, with few data available, even less related to FSW process machines. The objective of this work was to evaluate the influence of welding parameters in the process efforts, such as axial force and torque. To comply with the proposal, aluminum plates AA2024-T3 and AA7475-T761, they both with thickness of 1.6 mm, were welded. The machine used was a GG-7 from the MTI Manufacturer, available at the Light Structures Laboratory of the Technological Research Institute of the State of São Paulo (IPT). Initially the design of experiment was made by a statistical tool to Experimental Planning, which combines the parameters of rotation, welding speed and angle of the tool, besides these data were randomly arranged. After that its results were analyzed in the software Statistica 12.0. It was possible to demonstrate an influence between the data acquired and the welding behavior through the statistical analysis. They also showed, in general, a low data deviation between replicates, what demonstrate that the machine is adequate for the work conditions proposed in this experiment.

| *Palavras-chave: FSW, Aluminium, DOE*