

Influência dos Parâmetros de Soldagem em Tubos de Alumínio AA6063 pelo Processo CDFW

Tatiane Belluzzo Braguine¹, Daniel Soares de Alcântara¹, Carlos Alberto Carvalho Castro¹, Gabriel Henrique Ribeiro dos Santos¹

¹ Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Varginha, MG, Brasil.

Recebido: 24 Out., 2017

Aceito: 11 Fev., 2018

E-mail: tatianebraguine@hotmail.com
(TBB)

Resumo: Neste trabalho realizou-se um estudo das interações entre as variáveis do processo de soldagem por atrito, conhecido como Continuous Drive Friction Welding (CDFW) em junção de tubos de alumínio AA6063, com diâmetro de 12,7 mm e espessura de 1,59 mm. Foi analisada a influência das variáveis: rotação, pressão de atrito e tempo de atrito nas dimensões finais da rebarba e comprimento da peça soldada. O número de experimentos realizados foi definido por planejamento fatorial completo (3^k), onde cada variável de entrada recebeu três níveis. Os corpos de prova foram produzidos de acordo com as combinações de parâmetros e medidos para obter os valores finais do comprimento final e das dimensões da rebarba. Os dados foram analisados por um software de ferramentas estatísticas, utilizando gráfico de Pareto, análise das interações e variância. Observou-se que a variável de entrada que apresentou menor influência nos resultados foi a velocidade de rotação. Os melhores resultados ocorreram nos corpos de provas com menor diminuição no comprimento e rebarbas mais uniformes, foram obtidos com combinações do menor valor de pressão.

Palavras-chave: Soldagem por fricção; CDFW; Interação; Alumínio.

Influence of Welding Parameters on Aluminum Tubes AA6063 by the CDFW Process

Abstract: This paper presents a study of the interactions between the variables of the friction welding process, known as Continuous Drive Friction Welding (CDFW), at the junction of AA6063 aluminum tubes, with a diameter of 12.7 mm and a thickness of 1.59 mm. The influence of the variables: rotation, friction pressure and friction time on the final dimensions of the flash and length of piece welded is studied. The number of experiments performed was defined by full factorial design (3^k), where each input variable received three levels. The specimens were produced according to the combinations of parameters and measured to obtain the final values of the length and flash dimensions. The data were analyzed by statistical software tools, using Pareto chart, analysis of interactions and variance. It was observed that the input variable that presented the smallest influence on the results was the rotation speed. The best results, which occurred in the specimens with lowest reduction in length and more uniform flashes, were obtained with combinations of the lowest pressure value with reference values for time and pressure.

Key-words: Friction welding; CDFW; Interaction; Aluminum.

1. Introdução

A busca por processos e materiais mais sustentáveis é constante. Nesse cenário, o alumínio vem sendo cada vez mais difundido nas indústrias, por ser um metal de baixa densidade e apresentar resistência mecânica condizente com várias aplicações, como na indústria automotiva [1].

Porém, o alumínio e suas ligas apresentam algumas características que interferem diretamente na sua soldabilidade, como, por exemplo, a elevada condutividade térmica que requer alto aporte térmico. Além disso, a elevada afinidade química entre o alumínio e o oxigênio, culmina na formação de um filme de óxido, dificulta também a soldagem, já que essa camada apresenta elevada temperatura de fusão, sendo necessária a limpeza do metal e remoção deste filme antes da operação de soldagem.

É visto que tanto defeitos metalúrgicos (porosidades, trincas a quente, trinca de liquação) quanto defeitos estruturais podem ser observados quando a união de ligas de



alumínio é realizada por processos de soldagem por fusão [2]. Sendo assim, é necessário buscar por processos que não envolvam a fusão do material. Como o processo de soldagem por fricção é realizado com a mistura do metal base, no estado sólido, os defeitos citados são minimizados ou inexistentes quando a soldagem não é realizada por fusão, como no caso do processo de soldagem por fricção, conhecido como *Continuous Drive Friction Welding* (CDFW) [3].

O processo de soldagem por fricção é considerado uma tecnologia verde, já que apresenta elevada qualidade de união em conjunto com elevada eficiência energética [4]. Devido a esses fatores a soldagem por fricção vem sendo amplamente utilizada como processo de fabricação. Ainda como vantagens, o processo em questão apresenta economia de material, baixo tempo de produção e não utiliza consumíveis, como material de adição e gás de proteção.

A soldagem por fricção apresenta variações nos processos de união, dentre eles: *Friction Stir Welding* (FSW), *Linear Friction Welding* (LFW), *Orbital Friction Welding* (OFW) e *Inertia Friction Welding* (IFW). Essas variações no processo dependem do tipo de peça, do dimensionamento e rotação para gerar o atrito e deformação necessária para produzir a solda [5]. O processo CDFW e o IFW são usados para unir peças cilíndricas, com referência particular aos tubos [6].

O método CDFW é o mais antigo e popular dentre os processos de soldagem por fricção, e consiste no movimento relativo entre as partes a serem soldadas, no qual há um componente rotacional e um em movimento de avanço sob pressão axial. A união acontece devido à deformação plástica que ocorre com o aquecimento dos pontos em contato. A combinação de pressão e rotação gera o atrito que provém o aquecimento necessário, até exibir um estado estável de deformação plástica, com alta taxa de deformação, acarretando na união dos pontos de contato e formação da rebarba (*flash*) [7-9]. A união final dá-se por caldeamento, sem formação de fase líquida ou poça de fusão, e sem os defeitos de soldagem encontrados nos processos nos quais ocorre a fusão.

Os principais parâmetros desse processo são: rotação (rpm), pressão de atrito (P1), tempo de atrito (T1), pressão de forjamento (P2) e tempo de forjamento (T2) [10,11]. É importante saber a influência de cada um deles no produto soldado, seja no comprimento final e dimensões da rebarba. Sabendo-se então a influência de cada um dos parâmetros pode-se elaborar um procedimento de soldagem.

A fim de verificar a influência de cada uma das variáveis e suas interações no processo, é necessário recorrer a ferramentas estatísticas. O planejamento de experimento é um método que consiste em planejar a aquisição de dados a respeito do funcionamento de um processo, utilizando ensaios, definindo as variáveis e estipulando o valor de seus níveis. A quantidade de níveis é utilizada para melhorar a qualidade do processo/produto através da determinação das variáveis mais relevantes ao processo [12].

De acordo com o número de fatores e da quantidade de níveis utilizados, pode-se ter uma dificuldade quanto à realização do teste de todas as combinações. Ou seja, se o processo apresenta quatro fatores, com três níveis cada, tem-se um total de 81 combinações. Quando todas as combinações são testadas chama-se de Planejamento Fatorial Completo [13].

O planejamento experimental é extremamente importante para engenheiros e cientistas melhorarem o desempenho de um processo de fabricação. Essa ferramenta representa um conjunto de critérios estabelecidos com fundamentos científicos e estatísticos, objetivando determinar a influência de diversas variáveis nos resultados de um processo [14].

O estudo em questão apresenta como objetivo avaliar a influência das variáveis de entrada: rotação, pressão e tempo de fricção, no processo de soldagem CDFW de um perfil tubular de alumínio AA 6063, a fim de criar um delineamento de experimentos que possibilite analisar nas soldas, a influência das variáveis de soldagem e suas interações no comprimento final do corpo de prova, espessura da rebarba e diâmetro da rebarba.

2. Materiais e Métodos

O material utilizado é uma liga de alumínio, AA 6063, de perfil tubular, com 12,7 mm de diâmetro externo e parede com 1,59 mm de espessura, cada parte a ser soldada possui 30 mm. Na Tabela 1 são apresentadas as composições químicas para a liga AA6063 [15].

Tabela 1. Composição química da liga de alumínio AA6063.

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
Porcentagem	0,2-0,6	0,35	0,10	0,10	0,45-0,9	0,10	0,10	0,10

As operações de soldagem dos corpos de prova foram realizadas em uma máquina ferramenta, na qual foi adaptado um controlador a fim de atuar sobre o cabeçote móvel, que fará a pressão no sentido axial durante tempo pré-determinado. No cabeçote móvel foi colocado um mandril para fixação da parte que exercerá a pressão e na placa do torno foi fixada a parte que será rotacionada, conforme representado na Figura 1.

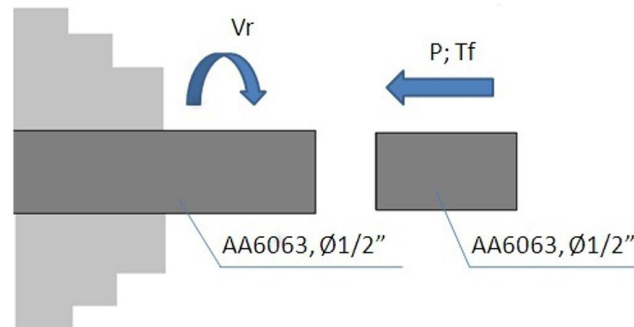


Figura 1. Ilustração do processo de soldagem por fricção rotacional.

A operação de soldagem procedeu-se da seguinte forma, conforme a descrição:

1. É realizada a montagem do corpo de prova na placa e no mandril;
2. Momento que o tubo rotacionado começa a agir na face do tubo estático;
3. Momento em que ocorre a solda propriamente dita, que possui os três níveis de tempo testados: 11, 15 e 19 segundos;
4. Ocorre o forjamento, momento que a placa do torno paralisa e a pressão ainda é exercida, durante um período de 5 segundos.

Na Figura 2 podem ser visualizados os procedimentos descritos acima.

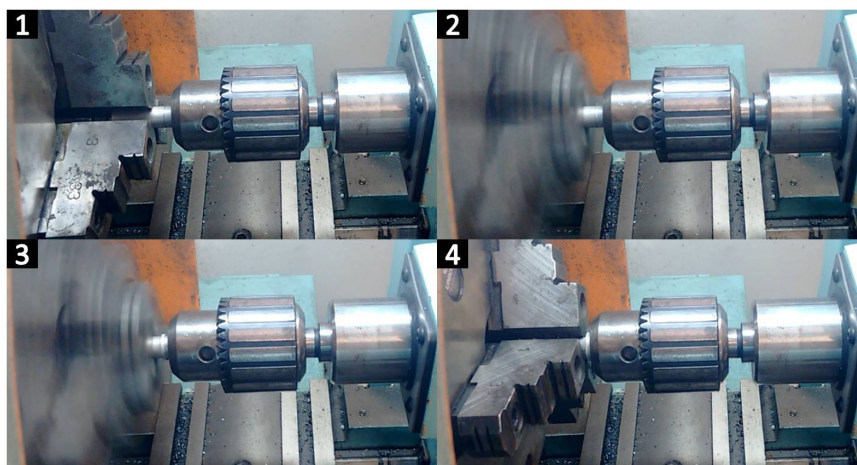


Figura 2. Processo de soldagem.

2.1. Delineamento do experimento

O experimento planejado é uma série de testes que induzem mudanças nas variáveis de entrada de forma que se possa observar e identificar os efeitos nas respostas.

A fim de analisar a influência das variáveis: rotação (rpm), pressão aplicada e tempo de atrito; e suas interações, as três variáveis receberam três níveis cada e foi elaborado o Planejamento Fatorial Completo.

No planejamento fatorial completo 3^k , o número de experimentos a serem realizados é igual ao número de níveis experimentais elevados ao número de fatores, cobrindo todo o espaço experimental, ou seja, 3^3 . A partir das combinações de parâmetros foram construídos 27 corpos de prova, constituídos por duas partes de 30 mm de tubo.

Para a definição dos valores de referência que as variáveis assumiriam foram feitos testes preliminares, considerando em quais valores eram possíveis obter soldas com boa penetração e rebarbas com aspectos mais uniformes.

O delineamento de experimentos ajuda a definir o menor número de experimentos necessários para a obtenção de um determinado resultado com a confiabilidade requerida. Neste caso, o número de soldas a serem realizadas utilizando os valores máximos (Nível 1), mínimos (Nível -1) e variáveis principais (Nível 0) do processo. Essa ferramenta também aponta quais dessas variáveis influenciam significativamente nas repostas finais estudadas.

A partir do valor de referência, das variáveis principais, foram adotados outros dois valores, um deles um nível acima e o outro um nível abaixo. Na Tabela 2 é possível visualizar os valores dos três níveis estabelecidos para cada variável.

Tabela 2. Variáveis e valores assumidos para cada nível.

Variável	Nível -1	Nível 0	Nível 1
Rotação [rpm]	1250	1600	2500
Pressão [Mpa]	686	1227	1840
Tempo [s]	11	15	19

Os corpos de prova com os parâmetros utilizados para sua obtenção, ou seja, cada um desses fatores foi testado com três níveis (-1, 0 e +1), onde -1 representa o menor nível e +1 representa o maior nível. Então, a matriz experimental genérica para o procedimento 3^3 é apresentada na Tabela 3.

2.2. Representação gráfica

Os efeitos e interação do planejamento fatorial podem ser analisados por meio de gráficos, como por exemplo, o gráfico de Pareto e análise de variância. O gráfico de Pareto é utilizado para identificar quais dos efeitos dos processos são mais significativos, de forma a concentrar os esforços de melhoria em áreas onde as maiores melhorias podem ser feitas.

O gráfico de Pareto mostra o valor absoluto dos efeitos e desenha uma linha de referência no gráfico. Qualquer efeito que se estende para além dessa linha de referência é potencialmente importante. Alpha (α) é o nível de significância adotado, isto é, o erro estatístico que é o inverso do nível de confiança. Portanto, um valor de 5% implica em um nível de confiança de 95%.

Como a soldagem é um processo de múltiplas entradas e saídas, a qualidade é influenciada diretamente pelos parâmetros das variáveis de entrada durante o processo. No entanto, o controle desses parâmetros de entrada aparece como um problema para se obter uma boa junção, o que torna importante realizar uma análise estatística.

3. Resultados e Discussão

Após serem soldados, os tubos já unidos possuem o aspecto apresentado na Figura 3.

Tabela 3. Numeração do corpo de prova de acordo com os parâmetros utilizados codificados.

Nº Corpo de Prova	Rotação [rpm]	Pressão [MPa]	Tempo [s]
1	-1	-1	-1
2	-1	-1	0
3	-1	-1	1
4	-1	0	-1
5	-1	0	0
6	-1	0	1
7	-1	1	-1
8	-1	1	0
9	-1	1	1
10	0	-1	-1
11	0	-1	0
12	0	-1	1
13	0	0	-1
14	0	0	0
15	0	0	1
16	0	1	-1
17	0	1	0
18	0	1	1
19	1	-1	-1
20	1	-1	0
21	1	-1	1
22	1	0	-1
23	1	0	0
24	1	0	1
25	1	1	-1
26	1	1	0
27	1	1	1

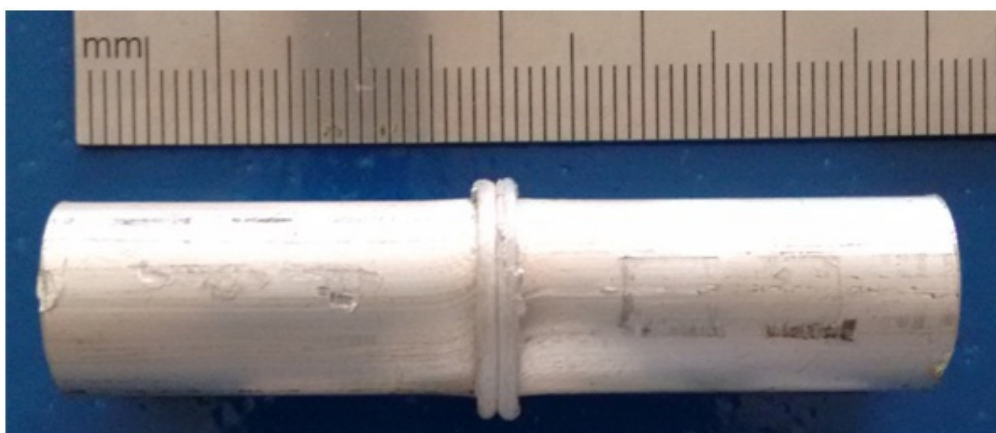


Figura 3. Aspecto final do corpo de prova após a operação de soldagem.

Após a realização do processo de soldagem, os 27 corpos de prova foram avaliados em seu comprimento final (Cf), espessura da rebarba (Er) e diâmetro da rebarba (Dr). As duas últimas variáveis de saída foram medidas três vezes, em cada corpo de prova. Os valores obtidos e relacionados com o número do corpo de prova podem ser observados nas Figuras 4, 5 e 6.

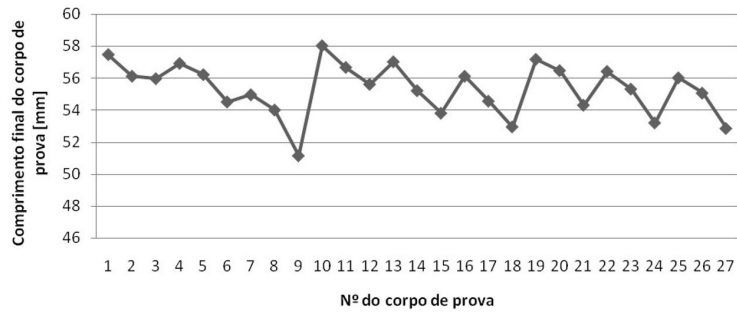


Figura 4. Média do comprimento final do corpo de prova.

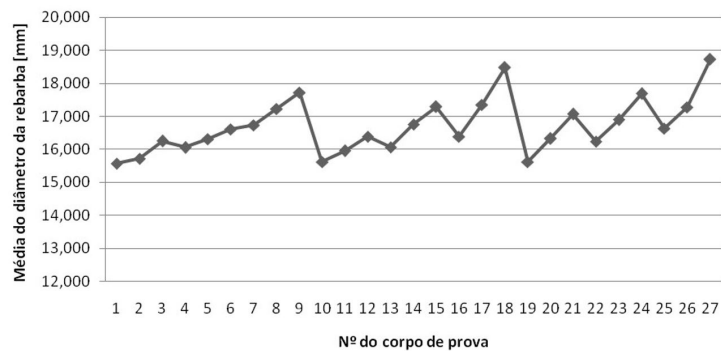


Figura 5. Média do Diâmetro da rebarba.

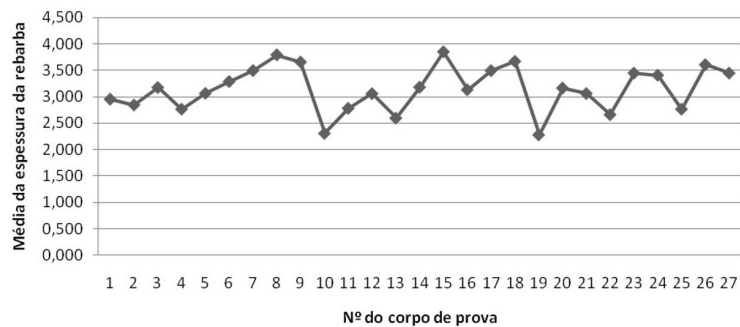


Figura 6. Média da Espessura da rebarba.

Os dados obtidos foram analisados por um software de ferramentas estatísticas. Inicialmente foram obtidos três modelos, um para cada variável de saída, estes foram ajustados tendo como base os valores do *p-value*. Quando o valor de *p-value* é menor ou igual 0,05 indica que os termos do modelo são significantes [16].

Na sequência são apresentadas as tabelas ANOVA que foram obtidas utilizando um software de ferramentas estatísticas. nas quais:

- a) DF: número de graus de liberdade, ou seja, quantidade de informações contidas nos dados;
- b) SS: é a soma dos quadrados seqüenciais, que são medidas da variação dos dados;
- c) MS: quadrados médios ajustados e, é a razão entre a soma de quadrados e os graus de liberdade;
- d) F value: é a estatística de teste usado para determinar se o termo está associado com a resposta;
- e) *p-value*: é probabilidade que mede a evidência contra a hipótese nula, na qual não há nenhuma associação entre o termo e a resposta.

Nas Tabelas 4, 5 e 6 a primeira coluna contém o modelo utilizado, linear ou interações entre as variáveis. Estas tabelas já estão reduzidas apenas para os modelos que se apresentaram válidos.

Tabela 4. Análise de variância para o comprimento final do corpo de prova.

Source	DF	SS	MS	F value	p-value
Model	4	61,4152	15,3538	53,64	0,000
Linear	3	55,9425	18,6475	65,15	0,000
Vr	1	0,0725	0,0725	0,25	0,620
P	1	19,3287	19,3287	67,53	0,000
T	1	36,5512	36,5512	127,71	0,000
Way Interaction	1	2,3832	2,3832	8,33	0,009
Vr x P	1	2,3832	2,3832	8,33	0,009
Error	22	6,2967	0,2862	-	-
Total	26	67,7119	-	-	-

Tabela 5. Análise de variância para o Diâmetro da rebarba.

Source	DF	SS	MS	F value	p-value
Model	5	17,0046	3,40093	115,48	0,000
Linear	3	16,5773	5,52578	187,63	0,000
Vr	1	0,9609	0,9609	32,63	0,000
P	1	8,0362	8,03616	272,87	0,000
T	1	7,5803	7,58028	257,39	0,000
Way Interaction	2	0,9763	0,48816	16,58	0,000
Vr x T	1	0,5312	0,5312	18,04	0,000
P x T	1	0,4451	0,44511	15,11	0,001
Error	21	0,6185	0,02945	-	-
Total	26	17,6231	-	-	-

Tabela 6. Análise de variância para a Espessura da rebarba.

Source	DF	SS	MS	F value	p-value
Model	2	3,434	1,71716	31,02	0,000
Linear	2	3,434	1,71716	31,02	0,000
P	1	1,648	1,64764	29,77	0,000
T	1	1,787	1,78668	32,28	0,000
Error	24	1,328	0,05535	-	-
Total	26	4,763	-	-	-

Os modelos obtidos para cada variável de saída estão representados nas Equações 1, 2 e 3.

$$C_f = 65,96 - 0,001610V_r - 0,04066P - 0,3562T + 0,000001V_r * P \tag{1}$$

$$D_r = 16,019 - 0,000865V_r - 0,000094P - 0,0935T + 0,0083P * T \tag{2}$$

$$E_r = 1,308 + 0,00052P + 0,0788T \tag{3}$$

A fim de verificar a influência das variáveis de entrada Rotação, Pressão, Tempo de atrito e suas interações nas variáveis de saída: Comprimento final do corpo de prova (Cf), Diâmetro da rebarba (Dr) e Espessura da rebarba (Er) foram gerados os gráficos de Pareto, que podem ser visualizados nas Figuras 7, 8 e 9.

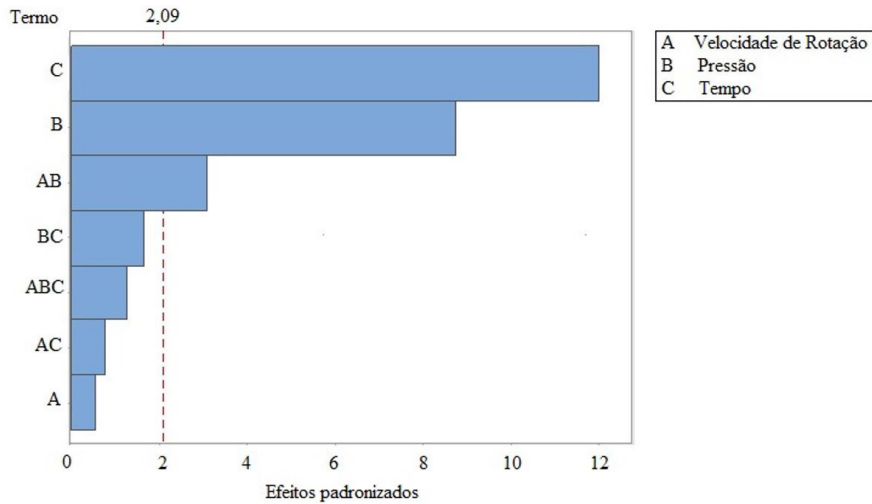


Figura 7. Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para o Comprimento final, Cf com $\alpha = 0,05$.

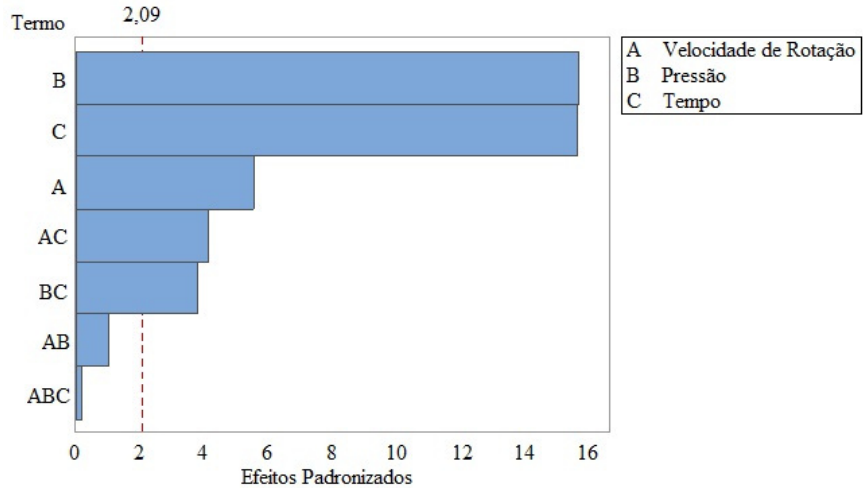


Figura 8. Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para o Diâmetro da rebarba, Dr, $\alpha = 0,05$.

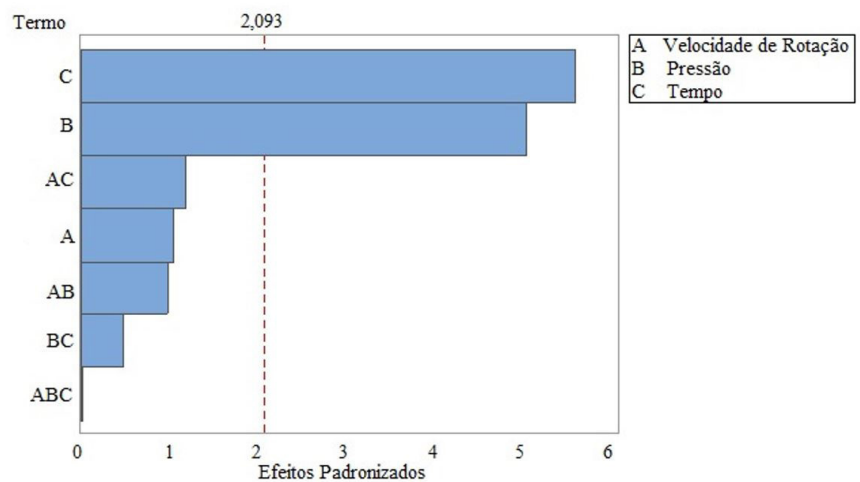


Figura 9. Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para a Espessura da rebarba, Er, com $\alpha = 0,05$.

Nos Gráficos de Pareto é possível visualizar os valores absolutos dos efeitos padronizados desde o maior efeito até o menor efeito. A linha de referência traçada indica quais efeitos são estatisticamente significativos. Na Figura 7, é possível verificar que a variável de maior influência é o Tempo, seguido pela Pressão e pela interação da Rotação com a Pressão.

Na Figura 8, pode-se perceber que a variável de maior influência, na resposta do Diâmetro da rebarba, é a Pressão, seguindo pelo Tempo de Velocidade de rotação. Houve interação da Velocidade de rotação com o Tempo e também uma interação Pressão com a Velocidade de rotação. Nota-se que neste seguimento ocorreu maior interação entre as variáveis.

Na Figura 9, tem-se que os fatores Pressão e Tempo apresentaram efeitos sobre a variável resposta Espessura da rebarba.

Na Figura 10 é possível analisar as interações obtidas em relação às variáveis de entrada e a respectiva resposta para o Comprimento final.

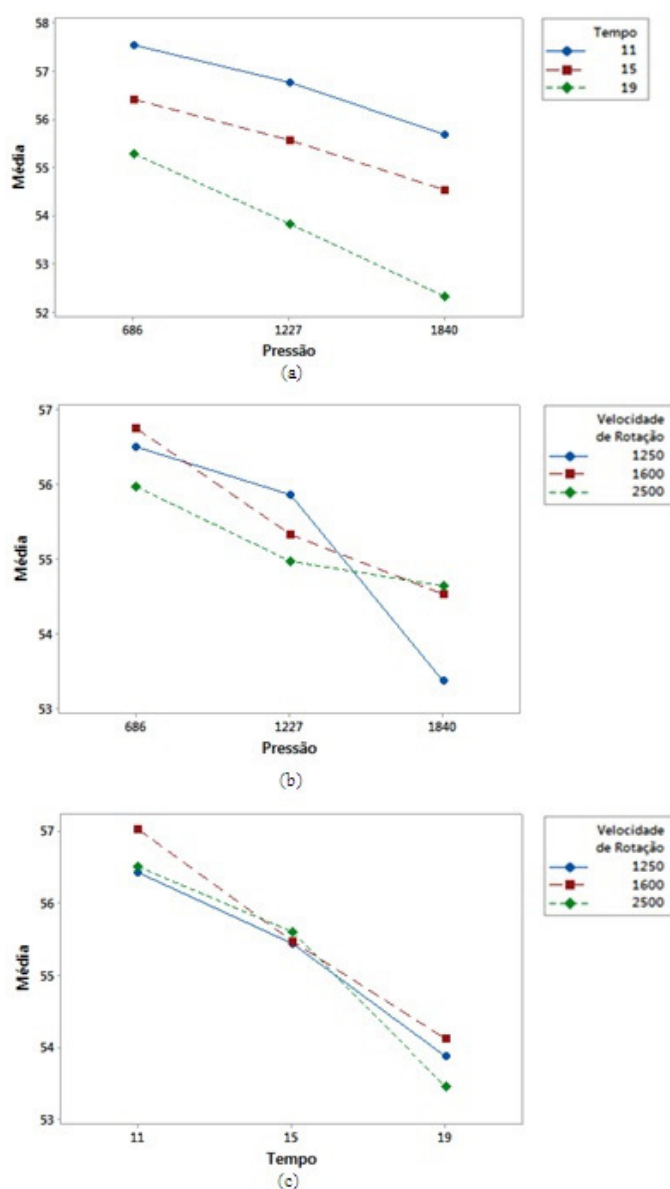


Figura 10. Interação das variáveis de entrada (a) Pressão e Tempo, (b) Pressão e Velocidade de Rotação e (c) Tempo e Velocidade de Rotação, para o Comprimento final.

Na Figura 10, podem-se verificar alguns fatos como:

- Para as pressões e tempos diferentes, nota-se que segue uma mesma linearidade, porém com aumento da pressão ocorre um maior encurtamento da peça soldada;
- Ao relacionar a pressão com a velocidade de rotação, verificasse que o encurtamento maior ocorre com a pressão maior. Ao analisar a velocidades de rotação, nota-se que as rotações mais baixas apresentam resultados próximos, ou seja, pouco encurtamento;
- A variação da velocidade de rotação com o tempo maior apresenta um maior encurtamento do corpo de prova, já que tem-se um maior período para que o material flua e forme a rebarba.

Na Figura 11 é possível analisar as interações obtidas em relação às variáveis de entrada e a respectiva resposta para o Diâmetro da rebarba.

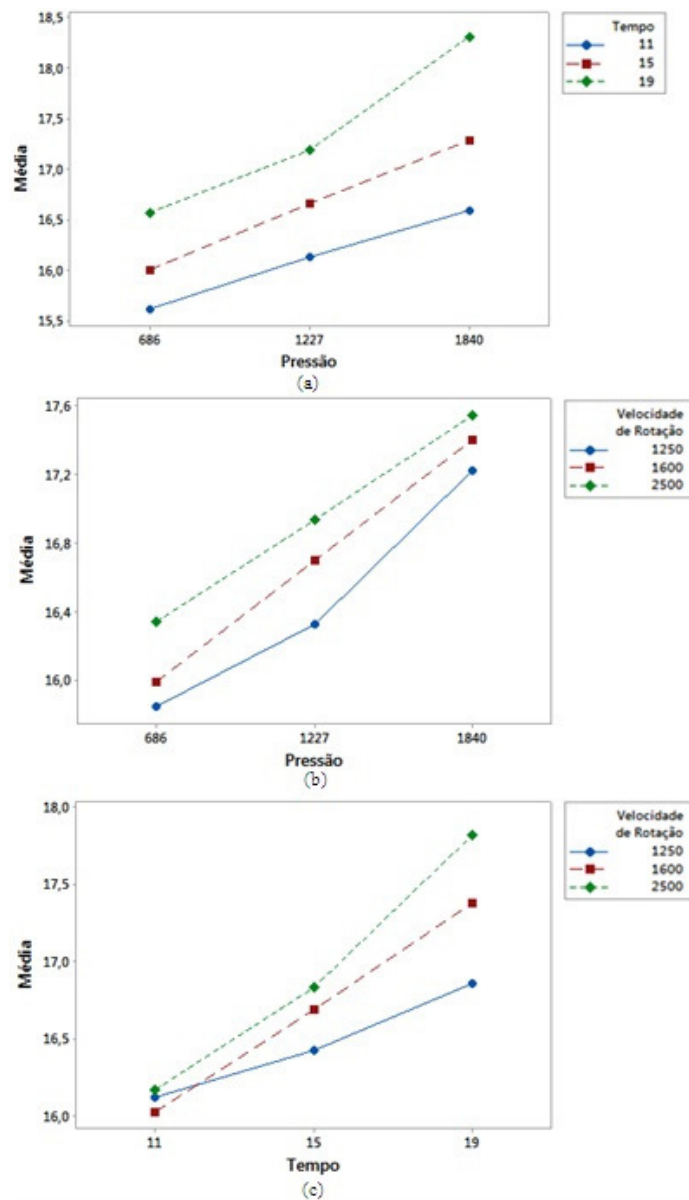


Figura 11. Interação das variáveis de entrada (a) Pressão e Tempo, (b) Pressão e Velocidade de Rotação e (c) Tempo e Velocidade de Rotação, para o Diâmetro da rebarba.

Da Figura 11 podem ser feitas as seguintes análises:

- a) Nota-se que quanto maior for o tempo e a pressão, maior será o Diâmetro da rebarba;
- b) Ao relacionar a pressão e velocidade de rotação, verifica-se um aumento no diâmetro da rebarba, à medida que os valores das variáveis são aumentados. Uma hipótese que pode ser feita é que a ocorrência da força centrífuga faz com que o material aquecido tenda a fluir para fora dos limites da peça, produzindo rebarbas mais altas e menos espessas quando a rotação for mais alta;
- c) Verifica-se que também há interação com a velocidade e o tempo, ou seja, o Diâmetro da rebarba aumenta, com o acréscimo das variáveis de entrada.

Na Figura 12 é possível analisar as interações obtidas em relação às variáveis de entrada e a respectiva resposta para a Espessura da Rebarba.

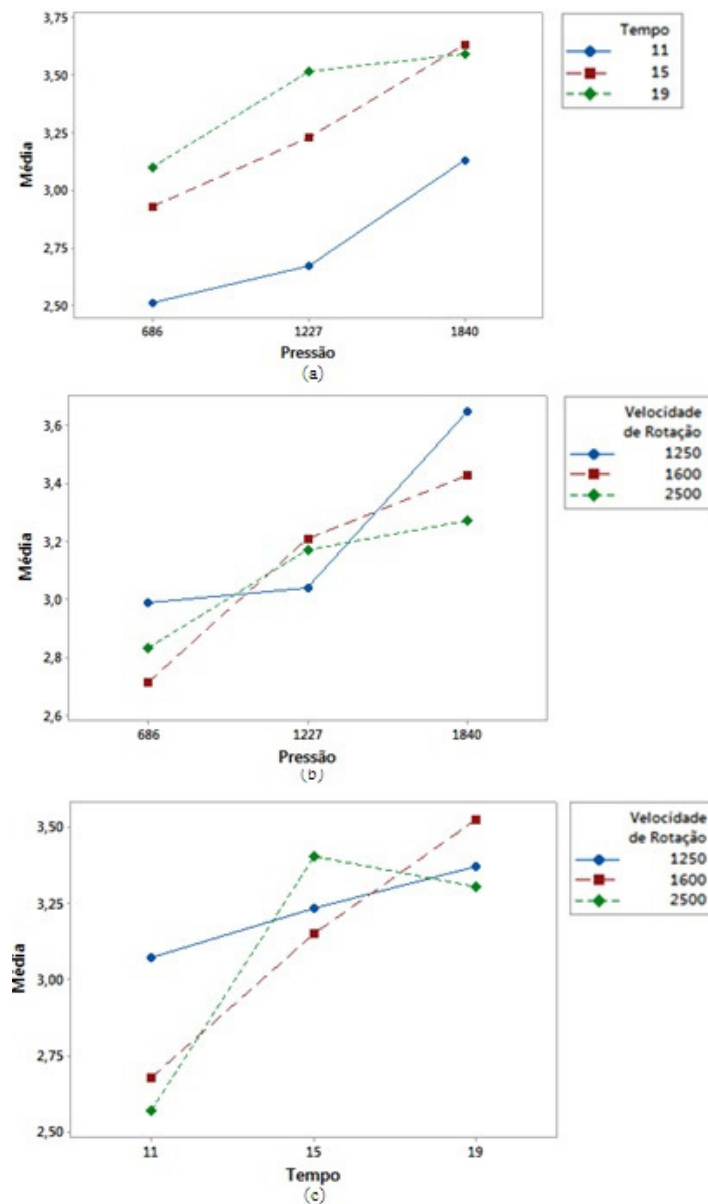


Figura 12. Interação das variáveis de entrada (a) Pressão e Tempo, (b) Pressão e Velocidade de Rotação e (c) Tempo e Velocidade de Rotação para a Espessura da rebarba.

A partir de análises feitas na Figura 12, pode-se observar:

- a) Verifica-se que há interação entre o tempo e a pressão, ou seja, a Espessura da rebarba aumenta com o acréscimo das variáveis de entrada;
- b) Nas interações velocidade de rotação e pressão, nota-se que a maior Espessura da rebarba ocorreu com o menor valor de rotação. Isso pode ser explicado devido a força centrífuga, ou seja, quanto menor a rotação, menor saída, que neste caso seria do material;
- c) Ao analisar o tempo e a velocidade rotação, constata-se que ambas aumentam a Espessura da rebarba, mas o a rotação 1600 rpm é mais expressiva no tempo maior.

Foi possível observar que os tubos geraram também rebarbas internas, que se mostraram maiores que as externas. Mas, como o intuito do trabalho foi estudar a rebarba externa, não foi feita nenhuma análise de medição. Este relato pode ser observado na Figura 13.

O pior resultado obtido foi o do corpo de prova 23, nele houve uma deformação muito acentuada, fazendo com que de certo modo houvesse um desalinhamento da rebarba gerada, conforme Figura 14.

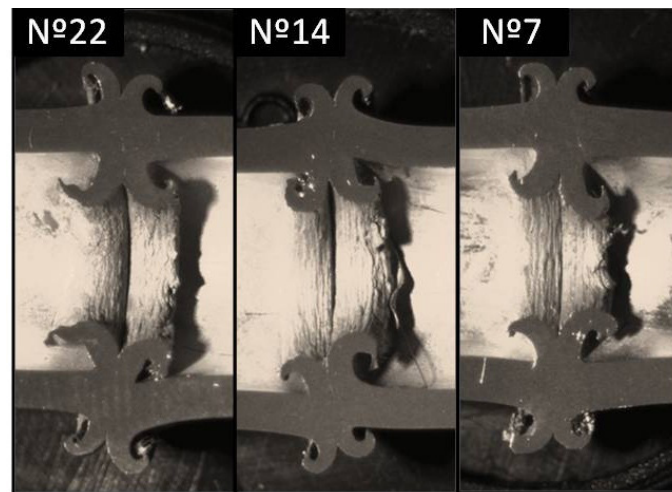


Figura 13. Rebarbas internas.

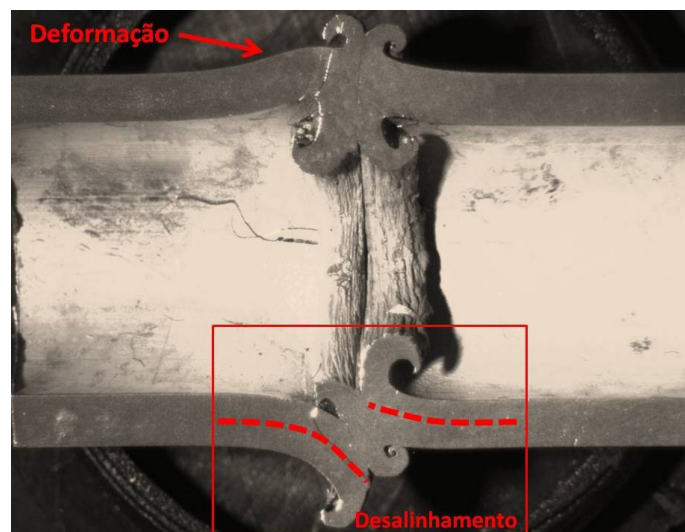


Figura 14. Corpo de prova 23, deformação e desalinhamento.

4. Conclusões

As soldas obtidas em tubos da liga de alumínio AA6063 de 12,7 mm de diâmetro com paredes de espessura de 1,59 mm, a partir do processo de soldagem por fricção rotativa acarretaram diferentes desafios na parte técnica. Foi possível concluir com resultados:

- 1) A geometria, espessura e o diâmetro (altura), da rebarba externa possuem uma dependência da rotação. Uma hipótese que pode ser feita é que a ocorrência da força centrífuga faz com que o material aquecido tenda a fluir para fora dos limites da peça, produzindo rebarbas mais altas e menos espessas quando a rotação for mais alta, e quando a rotação for mais baixa produzirá rebarbas mais baixas de espessura maior. Já o volume de material que virará flash será maior quando houver alta presença entre a pressão e tempo;
- 2) A variável de entrada Rotação é o fator que apresenta menor influência nas variáveis de saída;
- 3) Na resposta Comprimento Final, as variáveis de entrada e interação que apresentaram maior influência, em ordem decrescente foram: Tempo, Pressão e Rotação*Pressão;
- 4) As variáveis de entrada e suas interações, que apresentaram maior influência na resposta Diâmetro da Rebarba, foram, em ordem decrescente: Pressão, Tempo, Rotação, Pressão*Tempo, Rotação*Tempo;
- 5) Para a resposta Espessura da Rebarba as variáveis de maior influência foram Tempo e Pressão;
- 6) Os modelos encontrados para as três variáveis de saída são de primeira ordem;
- 7) A espessura do flash interno não mostrou uma clara mudança em relação aos níveis de rotação. O que pôde ser notado é o fato de que as dimensões da rebarba aumentam com a maior presença de tempo e pressão. Além disso, as rebarbas internas são maiores que as externas no mesmo corpo de prova;
- 8) Os melhores parâmetros obtidos são os que possuíam os menores encurtamentos, com uma junção sem falhas na solda, com rebarba uniforme, sem que haja deformações nas paredes do tubo próximas as junções. De acordo com a metodologia adotada, os melhores resultados ocorreram nos corpos de prova obtidos com combinações do menor valor de pressão com os valores referência para tempo e pressão.

Referências

- [1] Torres EA, Ramirez AJ. União de juntas dissimilares alumínio-aço de chapas finas pelo processo de Soldagem por Atrito com Pino não Consumível (SAPNC). *Revista Soldagem & Inspeção*. 2011;16(3):265-273. <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-92242011000300008>.
- [2] Adalarasan R, Sundaram Shanmuga AS. Parameter design and analysis in continuous drive friction welding of Al6061/SiCp composites. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2015;29(2):769-776. <http://dx.doi.org/10.1007/s12206-015-0138-6>.
- [3] Oliviecki NJ, Beskow AB. Análise dos parâmetros do processo de solda por fricção em uma liga de alumínio. *Eng Perform*. 2013;37(138):15-29.
- [4] Song C, Lin T, He P, Jiao Z, Tao J, Ji Y. Molecular dynamics simulation of linear friction welding between dissimilar Ti-based alloys. *Computational Materials Science*. 2014;83:35-38. <http://dx.doi.org/10.1016/j.commatsci.2013.11.013>.
- [5] Motaleb-nejad P, Saeid T, Heidarzadeh A, Darzi K, Ashjari M. Effect of tool pin profile on microstructure and mechanical properties of friction stir welded AZ31B magnesium alloy. *Materials & Design*. 2014;59:221-226. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2014.02.068>.
- [6] Fratini L, Buffa G, Cammalleri M, Campanella D. On the linear friction welding process of aluminum alloys: experimental insights through process monitoring. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*. 2013;62(1):295-298. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2013.03.056>.
- [7] Iracheta O, Bennett CJ, Sun W. A sensitivity study of parameters affecting residual stress predictions in finite element modelling of the inertia friction welding process. *International Journal of Solids and Structures*. 2015;71:180-193. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijlstr.2015.06.018>.
- [8] Shankar Shiva P, Suresh Kumar L, Reddy Ravinder N. Experimental investigation and statistical analysis of the friction welding parameters for the copper alloy- CU Zn28 using Taguchi method. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 2009;2(7):155-160.
- [9] Xiong JT, Li JL, Wei YN, Zhang FS, Huang WD. An analytical model of steady-state continuous drive friction welding. *Acta Materialia*. 2013;61(5):1662-1675. <http://dx.doi.org/10.1016/j.actamat.2012.11.042>.
- [10] Uzkut M, Ünlü BS, Yilmaz SS, Akdağ M. Friction welding and its applications in today's world. In: *Proceedings of the 2nd International Symposium on Sustainable Development*; 2010 June 8-9; Sarajevo. Sarajevo: International Burch University; 2010. p. 710-724.
- [11] Sahin M, Misirli C. Mechanical and metalurgical properties of friction welded aluminium joints. In: *Ahmad Z. Aluminium alloys-new trends in fabrication and applications*. London: InTech; 2012. Chap. 11. <http://dx.doi.org/10.5772/3354>.

- [12] Piccolo DRG. Otimização do processo de soldagem por fricção por ponto (FSpW) de soldas de materiais similares e dissimilares de ligas leves [dissertação de mestrado]. São Carlos: Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos; 2014.
- [13] Soares NASB. Planeamento de experiências na soldadura na GE power controls [dissertação de mestrado]. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Universidade do Porto; 2014.
- [14] Barbedo ND. Análise das interações das variáveis no processo de soldagem GMAW duplo arame para avaliação da qualidade da solda [tese de doutorado]. Itajubá: Universidade Federal de Itajubá; 2017.
- [15] ASM International. Metals handbook. 10th ed. Vol. 2 - Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. USA: ASM International; 1990.
- [16] Paventhan R, Lakshminarayanan PR, Balasubramanian V. Optimization of friction welding process parameters for joining carbon steel and stainless steel. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2012;19(1):66-71. [http://dx.doi.org/10.1016/S1006-706X\(12\)60049-1](http://dx.doi.org/10.1016/S1006-706X(12)60049-1).