

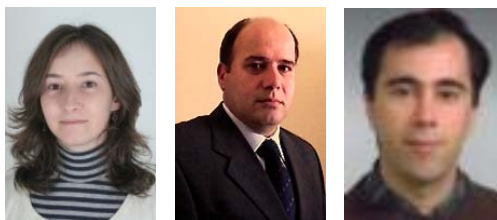
OPTIMIZAÇÃO DO PROCESSO SFL APLICANDO A METODOLOGIA TAGUCHI – EFEITOS DOS PARAMETROS NA TEMPERATURA

A.C.F.Silva¹, M. A. V. de Figueiredo², P. M. G. P. Moreira³

¹Laboratório de Óptica e Mecânica Experimental, INEGI, Porto, asilva@inegi.up.pt

²Departamento de Engenharia Mecânica, FEUP, mfiguei@fe.up.pt

³Laboratório de Óptica e Mecânica Experimental, INEGI, Porto, pmgpm@fe.up.pt



RESUMO

Este artigo apresenta os resultados preliminares obtidos no quadro de um projeto voltado para a otimização do processo soldadura por fricção linear (SFL), utilizando o método de Taguchi. Foi escolhida uma matriz Taguchi para definir a melhor combinação de parâmetros para a realização de soldaduras por fricção linear. Os parâmetros em estudo foram: a velocidade de rotação, velocidade de soldadura, o ângulo de inclinação, distância do pino à superfície da raiz e a razão do diâmetro encostador/pino. Foram realizadas juntas de topo de alumínio AA6082-T6 (3 mm). Durante a soldadura foi registada a temperatura gerada perto dos limites do encostador. Observou-se que a razão do diâmetro encostador/pino é o parâmetro mais influente na temperatura de soldadura.

1 - INTRODUÇÃO

O crescente uso de ligas de alumínio na indústria de transporte promove o desenvolvimento de processos de soldadura mais eficientes e confiáveis. A soldadura por fricção linear (SFL) surge como possível solução para substituir os processos de soldadura por fusão convencional. Trata-se de um processo de soldadura em estado sólido onde uma ferramenta com uma geometria apropriada é inserida em rotação entre os extremos do material a soldar seguindo ao longo da linha de junta. A ferramenta em rotação gera calor por fricção e induz uma forte deformação plástica no material, promovendo uma mistura complexa do material ao longo da linha de junta. No fim a ferramenta ainda em rotação é removida, deixando um orifício típico deste processo, Fig 1[1].

Embora este processo apresente boas características, como o bom acabamento superficial, a ausência de porosidade, ausência de segregação e de fissuração a quente e sem consumíveis adicionais[1, 2], requer a análise das interações entre os diversos parâmetros e sua influência na força conjunta.

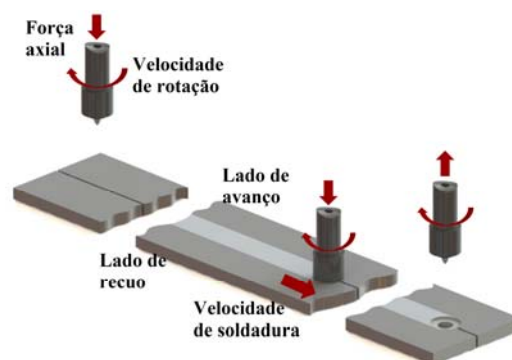


Fig 1 - Esquema representativo do processo SFL.

O uso do planeamento de experiências pode diminuir tempo e custos pela redução do número de experiências necessárias durante o estudo. O método Taguchi é utilizado como uma ferramenta para controlo da qualidade para fins de otimização de processos. Este método é baseado no planeamento de experiências, usando as matrizes ortogonais de Taguchi, e na análise estatística de dados. Oferece um meio simples e racional de análise e otimização de sistemas complexos. Existem duas abordagens de análise de dados com a finalidade de determinar os níveis ótimos dos parâmetros e a sua influência no processo: a primeira é a análise média (determinação dos efeitos principais e interações) e análise da variância (ANOVA), a segunda é semelhante mas trata as respostas em termos de razão sinal/ruído (S/N) [3]. Neste trabalho foi utilizada a primeira abordagem: análise de médias e ANOVA das respostas. Na literatura é possível encontrar alguns artigos sobre a aplicação do método Taguchi na otimização do processo de soldadura por fricção linear como [2, 4-6].

O presente projeto está focado na otimização e previsão da força conjunta usando o método Taguchi e o método de Rede Neuronal Artificial para determinar as interações entre os parâmetros, a fim de alcançar soluções de soldadura melhoradas. Neste trabalho foram realizadas juntas topo a topo de AA6082-T6 soldadas por SFL. Foram usados 5 parâmetros com 3 níveis para realizar 27 soldaduras segundo um planeamento de experiências previamente definido pelo método Taguchi. Durante as soldaduras foram registadas as temperaturas, sendo estes dados usados na ANOVA, efeito das médias e resposta de superfície. Foi identificado o parâmetro mais influente na temperatura assim como o seu efeito principal e o efeito das interações na temperatura.

2- MATERIAIS E MÉTODOS

Foram utilizadas chapas de alumínio AA6082-T6 com as dimensões 380x150x3mm, Fig 2. As propriedades do

material encontram-se na Tabela 1. As soldaduras foram realizadas ao longo da direção de laminagem numa fresadora modificada para a realização das soldaduras.

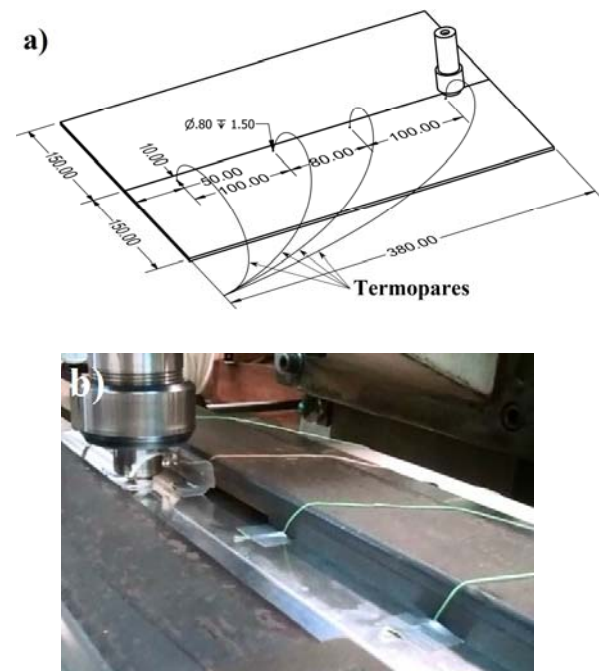


Fig 2 - Configuração aplicada durante a soldadura: a) esquema de soldadura e localização dos termopares; b) imagem de uma soldadura.

Os parâmetros a otimizar e os seus valores encontram-se na Tabela 2. A geometria do pino e do encostador foi mantida constante. O pino possui uma forma cônica, quatro ranhuras e diâmetro de 6mm. O diâmetro do encostador variou entre 12, 15 e 18 mm. A razão de diâmetros foi definida pela variação do diâmetro do encostador. As geometrias das ferramentas encontram-se na Fig3.

Tabela1 -Propriedades mecânicas da liga AA6082-T6[7]

Propriedade	Valor
Tensão de rotura (MPa)	322.9
Tensão de cedência (MPa)	276.2
Alongamento (%)	17.5

As colunas 1, 2, 6, 7 e 8 da matriz ortogonal L27 foram selecionadas para o planeamento de experiências. Cada coluna corresponde a um dos parâmetros, nomeadamente A-1, B-2, C-3, D-7, E-8.

Tabela 2–Parâmetros selecionados e valores para cada nível.

Parâmetros		Nível 1	Nível 2	Nível 3
A	Velocidade de rotação (rpm)	735	1000	1500
B	Velocidade de soldadura (mm/min)	216	290	360
C	Ângulo de inclinação da ferramenta (°)	0	1	2
D	Distância do pino às superfícies da raiz (mm)	0.10	0.15	0.20
E	Razão dos diâmetros das ferramentas (D/d)	2 (12/6)	2.5 (15/6)	3 (18/6)

Neste estudo foram também consideradas três interações: velocidade de rotação com a velocidade de soldadura (A*B), a velocidade de rotação com a razão de diâmetros (A*E) e a velocidade de soldadura com a razão de diâmetros (B*E).

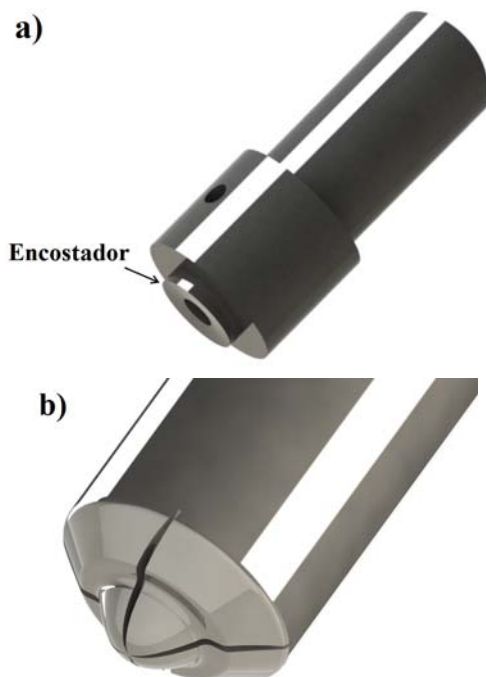


Fig 3 -Geometria das ferramentas:a) encostador e o corpo da ferramenta; b) pino.

Para cada um dos parâmetros foram escolhidos três níveis, ver Tabela 2. Os parâmetros, os intervalos estudados e as interações foram selecionados tendo em conta estudos anteriores feitos por este

grupo e outros trabalhos que podem ser encontrados na literatura [8, 9]. Cada linha da matriz selecionada corresponde a uma combinação de parâmetros para a soldadura, ver Tabela 3. Por conseguinte 27 de diferentes juntas topo a topo foram produzidas de acordo com a tabela.

Durante o processo de soldadura, foram utilizados quatro termopares junto à fronteira do encostador para registo da temperatura. Para a análise, apenas a temperatura máxima foi considerada. Estes dados foram então utilizados na ANOVA, com um nível de confiança de 95%. O efeito das médias e metodologia da resposta de superfície foram também aplicadas.

Com esta análise foi possível determinar os parâmetros e/ou interações mais influentes na temperatura obtida durante o processo de soldadura assim como quantificar a influência destes na temperatura.

3- RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para cada soldadura foram obtidos registos de temperaturas de quatro termopares. Na Tabela 3 encontra-se os valores máximos de temperatura registados em cada soldadura realizada.

Foram registadas temperaturas entre 189 e 474 °C durante as soldaduras realizadas. No estudo de Xu *et al.*[10] relativo à evolução da temperatura, microestrutura e propriedades mecânicas de juntas de AA2219-O soldadas por SFL reporta temperaturas na mesma ordem de grandeza. Na liga AA6082-T6 o principal precipitado endurecedor é β'' -Mg₂Si₆, que é estável a temperaturas até 200°C [7]. Assim, durante a soldadura ocorre a dissolução de β'' , degradando as propriedades mecânicas do material. As temperaturas das principais transformações metalúrgicas são reportadas no trabalho de Shang *et al.*[11] através de uma análise de Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC) na liga em questão. Duas reações exotérmicas foram registadas a 350°C (precipitação das fases β'' e β') e a 490°C (precipitação da fase β).

Através da análise de variância (ANOVA) dos dados de temperatura adquiridos foram obtidas as percentagens de contribuição de cada parâmetro e interação na temperatura, ver Fig 4. Apenas os parâmetros E, e as interações B*E e A*E têm significado estatístico num intervalo de confiança de 95%.

Tabela 3– Plano de experiências obtido da matriz ortogonal L27 de Taguchi com valores correspondentes de cada parâmetro em estudo.

Amostra	Parâmetros					Temperatura [°]
	A	B	C	D	E	
1	735	216	0	0.10	2.00	189
2	735	216	1	0.15	2.50	366
3	735	216	2	0.20	3.00	459
4	735	290	0	0.10	2.50	429
5	735	290	1	0.15	3.00	474
6	735	290	2	0.20	2.00	359
7	735	360	0	0.10	3.00	403
8	735	360	1	0.15	2.00	331
9	735	360	2	0.20	2.50	363
10	1000	216	1	0.20	2.00	385
11	1000	216	2	0.10	2.50	434
12	1000	216	0	0.15	3.00	429
13	1000	290	1	0.20	2.50	369
14	1000	290	2	0.10	3.00	432
15	1000	290	0	0.15	2.00	362
16	1000	360	1	0.20	3.00	358
17	1000	360	2	0.10	2.00	413
18	1000	360	0	0.15	2.50	325
19	1500	216	2	0.15	2.00	281
20	1500	216	0	0.20	2.50	363
21	1500	216	1	0.10	3.00	453
22	1500	290	2	0.15	2.50	328
23	1500	290	0	0.20	3.00	450
24	1500	290	1	0.10	2.00	356
25	1500	360	2	0.15	3.00	451
26	1500	360	0	0.20	2.00	399
27	1500	360	1	0.10	2.50	309

O parâmetro mais influente na temperatura é a razão de diâmetros das ferramentas (E), possuindo uma percentagem de contribuição de 39%. As interações da velocidade de soldadura com a razão de diâmetros (B*E) e a velocidade de rotação com a razão de diâmetros (A*E) são as

mais influentes, 19% e 17% de contribuição respectivamente.

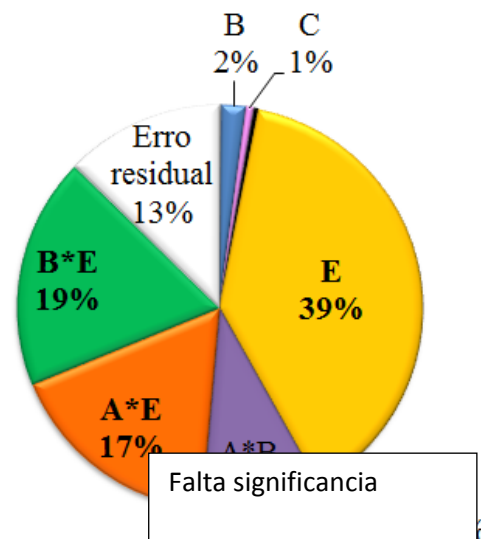


Fig 4 - Percentagem da contribuição de cada parâmetro e interação na temperatura.

Na Fig 5 encontra-se apresentado o efeito das médias, representando o efeito de cada parâmetro na temperatura. Foi verificado que apenas a razão de diâmetros (E) tem um valor estatístico significativo. A análise demonstra que o uso de razões de diâmetros das ferramentas superiores (maior diâmetro de encostador) leva ao aumento da temperatura durante a soldadura. Tal ocorre devido ao calor proveniente da fricção gerando maior área de contacto entre o encostador e o material. Também referido no trabalho de Lertora *et al.*[12]. Uma grande parcela do calor gerado durante a soldadura é proveniente da fricção na interface encostador-material [13].

Foi verificado que as interações têm influência na temperatura, especialmente as interações entre a velocidade de soldadura com a razão de diâmetros (B*E) e interação da velocidade de rotação com a razão de diâmetros (A*E).

Na Fig 6 apresenta-se a resposta média de superfície obtida para cada uma das interações em estudo. Relativamente à interação entre as duas velocidades (A*B) pode-se verificar que não há uma forte interação entre os parâmetros uma vez que se encontra representada quase por um plano.

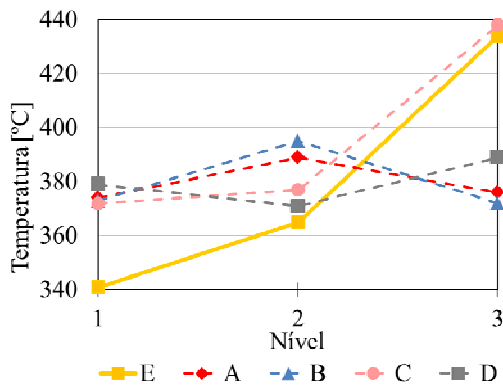


Fig 5 - Efeito de cada parâmetro na temperatura. As linhas a cheio representam os parâmetros com significado estatístico.

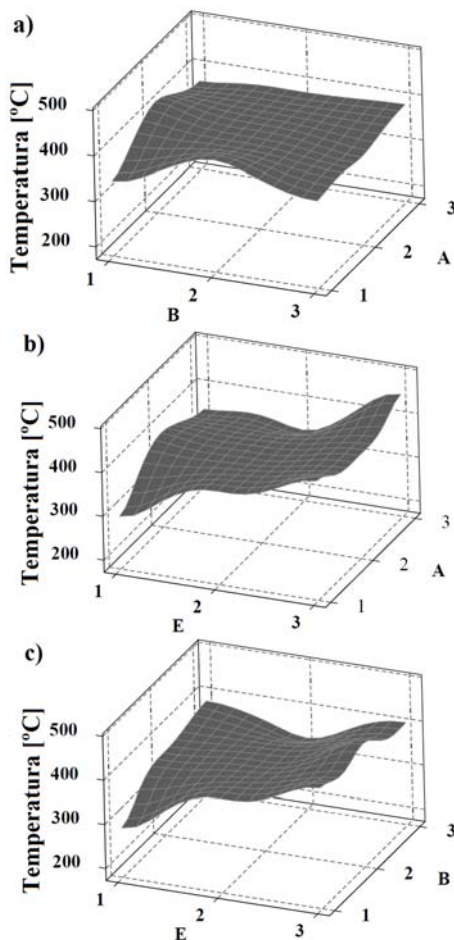


Fig 6—Resposta média de superfície para as interações estudadas: a) Velocidade de rotação com a velocidade de soldadura (A*B); b) velocidade de rotação com a razão de diâmetros (A*E); c) velocidade de soldadura com a razão de diâmetros (B*E).

No entanto pode-se constatar que o uso das velocidades no nível inferior (735rpm e 216mm/min) leva a uma diminuição significativa da temperatura. Nas interações A*E e B*E verifica-se uma forte influência da

razão de diâmetros (E), como já era esperado. Verifica-se também que a influência das velocidades destaca-se mais quando se utilizam razões de diâmetros inferiores. Este efeito é facilmente explicado pela diminuição de calor gerado quando se usam diâmetros de encostador inferiores.

4- CONCLUSÕES

Neste trabalho foi analisada a influência dos parâmetros de soldadura na temperatura. Averiguou-se que o método Taguchi é adequado para analisar os resultados preliminares de temperatura. Da ANOVA dos resultados conclui-se que só têm efeitos significativos o parâmetro E, as interações B*E e A*E para um intervalo de confiança de 95%.

A percentagem de contribuição de cada parâmetro na temperatura desenvolvida durante o processo de soldadura foi obtida. O parâmetro mais influente é a razão entre diâmetros das ferramentas (39%), seguindo-se a interação entre a velocidade de soldadura com a razão de diâmetros (19%) e a interação entre velocidade de soldadura e a razão entre diâmetros das ferramentas (18%).

A partir da análise do efeito das médias conclui-se que o aumento da razão entre os diâmetros das ferramentas leva a um aumento significativo de temperatura.

A partir da análise da resposta de superfície verificou-se que as velocidades de rotação e de soldadura apenas demonstram o seu efeito quando se utiliza um encostador de 12 mm de diâmetro.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi apoiado pelo projecto FCT PTDC/EME-TME/114703/2009. O Dr. Moreira agradece a POPH – QREN-Tipologia 4.2 – promoção de emprego científico fundado por ESF and MCTES.

REFERÊNCIAS

[1] D. Lohwasser, Z. Chen, Friction Stir Welding - From Basics to Applications, Woodhead Publishing, 2010.

- [2] A.K. Lakshminarayanan, V. Balasubramanian, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 18 (2008) 548-554.
- [3] P.J. Ross, Taguchi techniques for quality engineering : loss function, orthogonal experiments, parameter and tolerance design, McGraw-Hill, New York, 1996.
- [4] M. Jayaraman, R. Sivasubramanian, V. Balasubramanian, A.K. Lakshminarayanan, Journal of Scientific & Industrial Research, 68 (2009) 36-43.
- [5] S. Vijayan, R. Raju, S.R.K. Rao, Materials and Manufacturing Processes, 25 (2010) 1206-1212.
- [6] M. Nourani, A.S. Milani, S. Yannacopoulos, Engineering Failure Analysis, 3 (2011) 144-155.
- [7] P.M.G.P. Moreira, V. Richter-Trummer, P.M.S.T. Castro, Fatigue Behaviour of FS, LB and MIG Welds of AA6061-T6 and AA6082-T6, in: G.C. Sih (Ed.) Multiscale Fatigue Crack Initiation and Propagation of Engineering Materials: Structural Integrity and Microstructural Worthiness, Springer Netherlands, 2008, pp. 85-111.
- [8] S. Rajakumar, C. Muralidharan, V. Balasubramanian, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 20 (2010) 1863-1872.
- [9] A. Heidarzadeh, H. Khodaverdizadeh, A. Mahmoudi, E. Nazari, Materials & Design, 37 (2012) 166-173.
- [10] W. Xu, J. Liu, G. Luan, C. Dong, Materials & Design, 30 (2009) 1886-1893.
- [11] B.C. Shang, Z.M. Yin, G. Wang, B. Liu, Z.Q. Huang, Materials & Design, 32 (2011) 3818-3822.
- [12] E. Lertora, C. Gambaro, Int J Mater Form, 3 (2010) 1003-1006.
- [13] R. Nandan, T. DebRoy, H.K.D.H. Bhadeshia, Progress in Materials Science, 53 (2008) 980-1023.