

ANÁLISE TÉRMICA DO PROCESSO DE SOLDAGEM POR ATRITO CONVENCIONAL DA LIGA BRONZE ALUMÍNIO NÍQUEL CuAl10Ni5Fe5

Daniel Pezza Tchernov

Givanildo Alves dos Santos

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo – Rua Pedro Vicente nº 625 – Canindé, São Paulo/SP
d.thernov@aluno.ifsp.edu.br; givanildo@ifsp.edu.br

Carlos Frajuca

Paulo Henrique Lixandrão Fernando

Mauro Machado de Oliveira

Francisco Yastami Nakamoto

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo – Rua Pedro Vicente nº 625 – Canindé, São Paulo/SP
frajuca@ifsp.edu.br; paulo.lixandrao@ifsp.edu.br; mauro.mo@ifsp.edu.br; nakamoto@ifsp.edu.br

Resumo. O objetivo deste trabalho foi estudar o histórico térmico com a realização de procedimentos experimentais do processo de soldagem por atrito convencional da liga Bronze Alumínio Níquel CuAl10Ni5Fe5 com o auxílio de uma câmera termográfica e posterior investigação do gradiente de temperaturas por meio da análise por elementos finitos com a criação de um modelo térmico 3D axissimétrico não linear utilizando o software Ansys Workbench 19.2.

Palavras chave: Soldagem por Atrito Convencional. Análise por Elementos Finitos. Termografia. Bronze Alumínio Níquel

1. INTRODUÇÃO

Setores de transporte (automóveis, aeronaves e embarcações), infraestrutura e eletrodomésticos demandam cada vez mais por projetos leves, resistentes, duráveis e com boa relação de custo benefício. Dentre as diversas soluções de fixação disponíveis entre elementos mecânicos, os processos de soldagem por atrito vêm ganhando destaque (Cai, *et al.*, 2018). A principal vantagem deste processo é a conversão de energia mecânica em energia térmica na região da junta, que apesar do elevado gradiente térmico provoca baixas distorções e pequena zona afetada termicamente, além do mais, contaminantes e óxidos são removidos naturalmente durante o processo (Maalekian, 2007).

De acordo com Cai, *et al.*, 2018 por não haver fusão entre os materiais, torna-se possível a união de metais dissimilares e avançados que geralmente são muito difíceis ou impossíveis de serem unidos pelos processos de soldagem por fusão convencionais. Além do mais, metalurgicamente são mais vantajosos, visto que ocorrem poucas mudanças microestruturais e formação de intermetálicos na região da junta.

A soldagem por atrito convencional em diferentes materiais deve ser investigada, assim a validação do processo deve ser suficientemente estudada e praticada afim de garantir a aplicação. Portanto, a investigação deste trabalho procurou obter a correlação do gradiente térmico por meio da análise por elementos finitos com a leitura realizada por meio de uma câmera termográfica durante o processo de soldagem por atrito convencional da liga bronze alumínio níquel CuAl10Ni5Fe5 .

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Trabalhos recentes de (Stütz, *et al.*, 2018 e Cai, *et al.*, 2018) classificam os processos de soldagem por atrito como sendo processos de união no estado sólido. Trata-se do mais antigo processo deste gênero para promover a união de materiais similares e dissimilares (Cai, *et al.*, 2018). Maalekian (2007) afirma que os processos de soldagem por atrito podem ser classificados de acordo com três tipos básicos i) soldagem por atrito rotacional ii) soldagem por atrito linear e iii) soldagem por atrito orbital. A Fig. 1a (esquerda) retrata as principais diferenças, que basicamente, apresentam mudanças no tipo de movimento relativo, sendo rotacional, linear ou a combinação entre estes.

Em se tratando de soldagem por atrito rotacional, temos duas variações distintas i) soldagem por atrito convencional e ii) soldagem por atrito inercial, a principal diferença entre eles é que o primeiro utiliza um motor elétrico como fonte de energia externa e o segundo armazena energia cinética em um volante de inércia que é gradualmente convertida em calor (Vairis, *et al.*, 2016). A Fig. 1b (centro) apresenta os estágios envolvidos no processo de soldagem por atrito convencional, assim como os principais parâmetros do processo Fig. 1c (direita).

A publicação de (Hynes e Velu, 2019) apresenta um modelo por elementos finitos 3D axissimétrico não linear para o processo de soldagem por atrito convencional das ligas dissimilares Ti-6Al-4V / AA 6061-T6 usando o *software Abaqus*. Juntas soldadas foram promovidas onde pôde-se medir a temperatura na região de soldagem com o uso de um termômetro infravermelho acoplado a um aquisitor de dados, dessa maneira a simulação foi validada e apresentou um erro de 9,2%. O trabalho de (Reddy, 2017) determinou os parâmetros de soldagem do processo de soldagem por atrito convencional da liga AA1100 / Zr 705 com o uso de uma análise termomecânica 3D axissimétrica com o auxílio do *software Ansys*. A técnica estatística ANOVA foi empregada em duas situações distintas de refinamento de malha, assim como o teste de *Fisher* com confiança de 90%. Asif, *et al.*, 2015 estudou a evolução da temperatura e redução axial por meio da proposição de uma análise por elementos finitos do aço inoxidável duplex, para tanto utilizou um modelo 3D não linear com o *software Ansys*. Experimentos foram conduzidos com a máquina comercial da *KUKA Deutschland GmbH* onde foi possível validar a simulação com 95% precisão frente aos resultados numéricos.

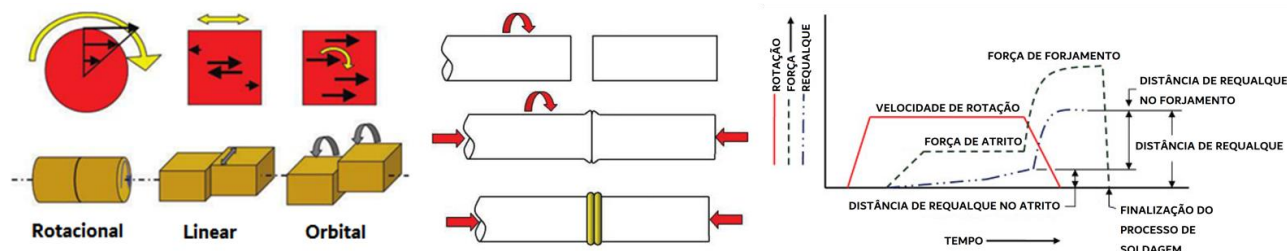


Figura 1. a) classificação dos processos de soldagem por atrito (esquerda) b) esquema do processo de soldagem por atrito rotacional (centro) c) fases do processo de soldagem por atrito convencional (direita) (Maalekian, 2007)

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Santos, *et al.*, 2017 destaca a liga bronze alumínio CuAl10Ni5Fe5, também conhecida como NAB (*Nickel Aluminum Bronze*), como um importante material aplicado entre os setores navais, *off-shore* e militar da marinha, na fabricação de buchas de rolamento e componentes de propulsão e hélice. Para a condução dos procedimentos experimentais deste trabalho, juntas serão promovidas pelo processo de soldagem por atrito convencional com a utilização de barras circulares, extrudadas a quente, trefiladas e revenidas no diâmetro de 15,875 mm. Sua composição química nominal é prevista pela norma DIN 17665 (1983). O material possui limite de resistência a tração de 600 MPa, módulo de elasticidade longitudinal de 115 GPa, coeficiente de Poisson de 0,34, dureza de 140 HB, temperatura *Liquidus* e *Solidus*, respectivamente em 1055° C e 1035° C.

3.1. Métodos

Schwer (2006) propõe que a condução de simulações computacionais deve observar alguns protocolos, a Fig. 4 contempla os elementos essenciais e indispensáveis para a execução e validação deste tipo de análise, dessa maneira, será adotado como procedimento metodológico neste artigo.

O *Objeto de Interesse* é o gradiente térmico do processo de soldagem por atrito convencional da liga bronze alumínio CuAl10Ni5Fe5, a partir deste iremos criar o *Modelo Conceitual*, que pode ser entendido como sendo a somatória de hipóteses e descrição dos processos físicos que configuram o comportamento do objeto de interesse. Na sequência o *Modelo Matemático* que rege o sistema físico deverá ser apresentado. A seguir, o *Modelo Computacional* será estabelecido com a implementação numérica, ou seja, o algoritmo de solução e os critérios de convergência.

A simulação computacional será realizada por meio de uma análise por elementos finitos (FEA) com a criação de um modelo térmico 3D axissimétrico não linear empregando o módulo *Transient Thermal* do *software Ansys Workbench 19.2* para a investigação do gradiente térmico das peças de trabalho. Paralelamente, procedimentos experimentais serão conduzidos por meio da união de peças de trabalho de dimensões de 15,875 mm de diâmetro e 65 mm de comprimento e utilização de uma câmera termográfica de modo a identificar as temperaturas máximas e mínimas durante a promoção das juntas metálicas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir serão apresentados os modelos matemáticos que descrevem o processo de CDFW em termos de geração de calor e transferência térmica (Thien, *et al.*, 2016).

$$q = \frac{\mu \pi^2 R^3}{45} \cdot P_1 n \quad (1)$$

Onde: q = calor necessário para unir as peças de trabalho [W]; R = raio da peça de trabalho [m]; P_1 = pressão de atrito [MPa] e n = rotação [rpm].

$$T(x) = T_{\infty} + \frac{q_s}{\sqrt{hpkA}} \frac{\cosh[m(L-x)]}{\cosh(mL)} \quad (2)$$

Em que: $T(x)$ = temperatura na posição x [°C]; T_{∞} = temperatura ambiente [°C]; h = coeficiente de transferência de calor [W/m²K]; p = circunferência da peça de trabalho [m]; k = condutividade térmica [W/mK]; A = área da seção transversal da peça de trabalho [m²]; m = variável do eixo x [m] e L = comprimento da peça de trabalho [m].

Os procedimentos experimentais foram conduzidos em equipamento adaptado a partir de um torno mecânico horizontal com sistema de controle evidenciado na Fig. 2a (esquerda), adotando-se como parâmetros de processo a velocidade de rotação de 3300 rpm, tempo de atrito e forjamento, respectivamente, de 17 e 15 segundos, pressão de atrito e forjamento, nessa ordem, de 0,5 e 5 MPa. A instrumentação foi realizada por meio de uma câmera termográfica da marca FLIR modelo T400 IR com ajuste de emissividade de 0,84, temperatura ambiente de 22,9 °C, umidade relativa do ar de 70% e faixa de leitura de medição de temperatura de 200 a 1200 °C. O termograma da Fig. 2b (centro) foi registrado no tempo de 14 segundos na fase de aquecimento do material, a junta obtida pode ser observada na Fig. 2c (direita), com formação de rebarba característica e redução axial de 10,3 mm por conta do fluxo de material.

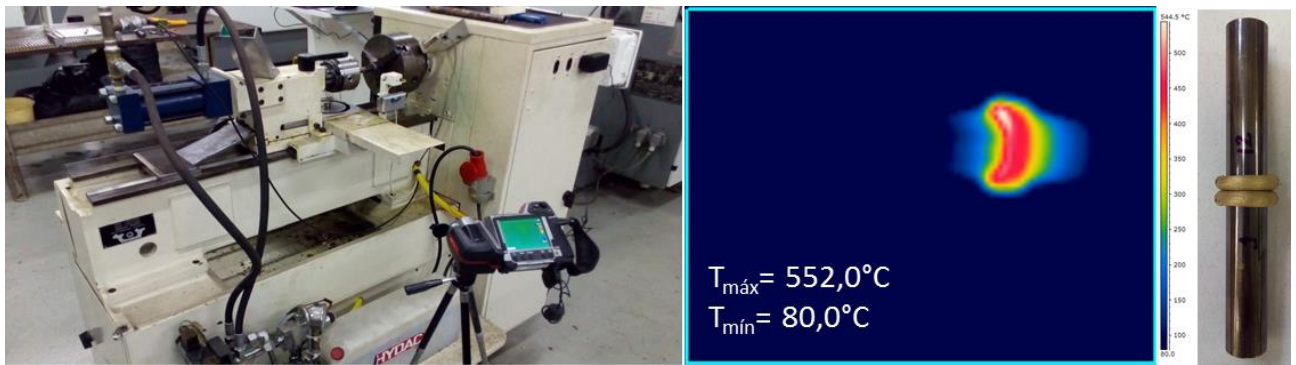


Figura 2. a) equipamento de soldagem (esquerda) b) termograma do processo de soldagem (centro) c) junta unida pelo processo de soldagem por atrito convencional (direita) (Do Autor)

Para a simulação por elementos finitos, foi criado um modelo térmico 3D axissimétrico não linear utilizando o módulo *Transient Thermal* do software *Ansys Workbench 19.2*. O contato utilizado foi do tipo atrito com coeficiente de 0,1. A Fig. 3a (esquerda) demonstra as condições de contorno adotado para a simulação numérica, Fig. 3b (centro) os carregamentos aplicados no modelo de elementos finitos como: Temperatura (A) ambiente nas faces opostas a região de soldagem, Temperatura 2 (B) na interface de difusão de acordo com a temperatura máxima de 552,0°C encontrada por meio do termograma da Fig. 3b (centro), Radiação (C) e Convecção (D) para o meio ambiente. A malha foi constituída por elementos tetraédricos de tamanho 3,5 mm conforme Fig. 3c (direita, acima) e refinamento na interface de difusão como exibe a Fig. 3c (direita, abaixo), somando para as peças de trabalho 16.245 nós e 10.477 elementos. A massa específica do material é de 7,5 g/cm³ (a 20°C), condutividade térmica de 37,7 W/m.K e coeficiente de transferência de calor adotado de 25 W/m².K. Os resultados obtidos por meio da simulação por elementos finitos podem ser observados por meio da Fig. 5 com a representação do gradiente de temperaturas ao longo do eixo longitudinal.

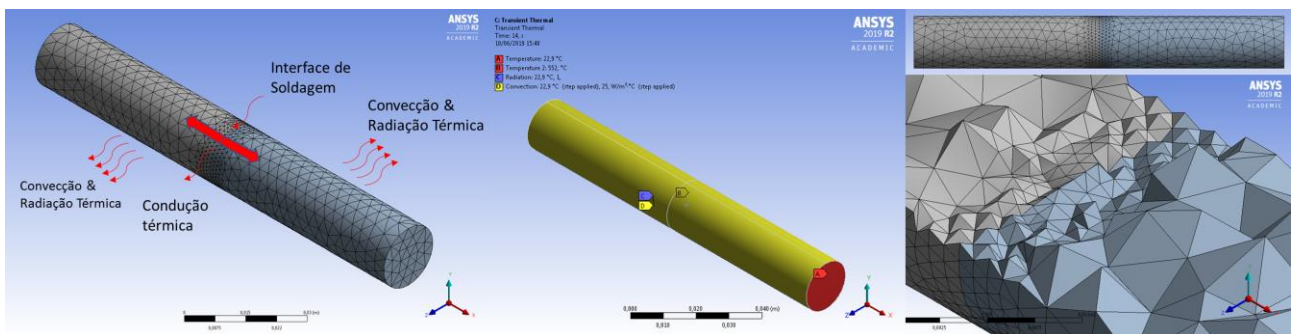


Figura 3. a) condições de contorno (esquerda) b) carregamentos aplicados ao modelo de elementos finitos (centro) c) representação da malha (direita, acima) d) detalhe do refinamento de malha (direita, abaixo) (Do Autor)

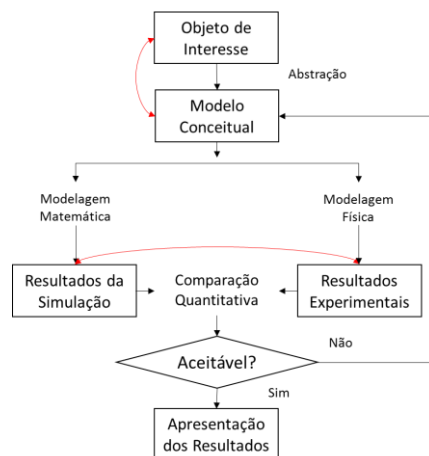


Figura 4. Atividades de verificação e validação de simulações FEA (Schwer, 2006)

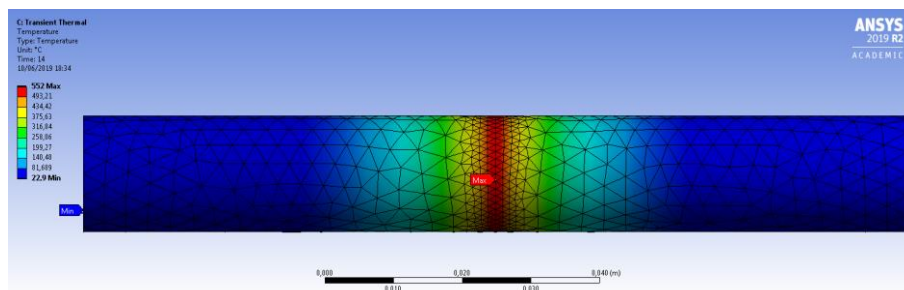


Figura 5. Gradiente de temperaturas ao longo do eixo longitudinal nas peças de trabalho (Do Autor)

5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, é possível verificar qual a influência da temperatura nas peças de trabalho durante o processo de soldagem por atrito convencional. Primeiramente com o uso da termografia, que indicou o gradiente térmico durante a realização dos ensaios experimentais com as amplitudes máxima e mínima dentro da faixa de temperatura de medição selecionada. O modelo por elementos finitos foi capaz de reproduzir os efeitos físicos inerentes ao processo, indicando que as condições de contorno foram bem definidas no Modelo Conceitual. O gradiente térmico revelado por este nos ajuda a entender qual o alcance da zona afetada termicamente, que foi de aproximadamente 20 mm para cada uma das peças de trabalho a partir a partir da interface de difusão. Portanto, o método proposto se mostrou adequado no estudo do gradiente térmico do processo de soldagem por atrito convencional com uso de termogramas e simulação computacional.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da empresa TERMOMECANICA São Paulo S.A. pela cessão dos materiais metálicos não ferrosos, a empresa ESSS por conceder a licença do *software* comercial Ansys, ao Prof. MSc. Arlindo de Goes Moreira da Universidade Santa Cecília e ao IFSP - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo pelo suporte para a realização do presente trabalho de pesquisa.

6. REFERÊNCIAS

- Asif, M, M.; Shrikrishana, K. A.; Sathiya, P. Finite element modelling and characterization of friction welding on UNS S31803 duplex stainless steel joints. *Engineering Science and Technology*, an International Journal, v. 18, n. 4, p. 704–712, 2015.
- Cai, W., Daehn, G., Vivek, A., Li, J., Khan, H., Mishra, R. and Komarasamy, M., 2019. “A State-of-the-Art Review on Solid-State Metal Joining”. *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 141(3):031012-031012-35. doi:10.1115/1.4041182.
- DIN 17665, 1983, “Kupfer – Aluminium – Legierungen”, *DIN International*.

- Hynes, N. R. J., Velu, P. S., 2019. "Numerical simulation of friction welding of aluminium / titanium joints". *Materials Research Express* 6. v. 2, n. 2.
- Maalekian, M., 2007. "Friction welding - critical assessment of literature". *Science and Technology of Welding and Joining*, v. 12, n. 8, p. 738–759.
- Reddy, A. C., 2017. "Evaluation of Parametric Significance in Friction Welding Process of AA1100 and Zr705 Alloy using Finite Element Analysis". *Materials Today: Proceedings*, v. 4, n. 2, p. 2624–2631.
- Santos, V.T., Santos, G.A., Nakamoto, F.Y., Silva, M.R., Franco, A.T.R., Couto, A.A., 2017. "Influência das Variáveis Térmicas de Solidificação na Microestrutura e Dureza da Liga Bronze Alumínio Níquel CuAl10Ni5Fe5". 10.26678/ABCM.COBEP2017.COF2017-0158.
- Schwer, L., 2006. "Guide for verification and validation in computational solid mechanics". *American Society of Mechanical Engineers*, v. PTC 60, n. V&V 10, p. 1–15.
- Stütz, M., Pixner, F., Wagner, J., Reheis, N., Raiser, E., Kestler, H. and Enzinger, N., 2018. "Rotary friction welding of molybdenum components". *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, v. 73, February, p. 79–84.
- Thien, N. D., Quang, D.L., Van, T.P. and Anh, T.T., 2016. "A Welding Temperature Determination Method of Low Carbon Steel and Stainless Steel Welded Joint by Rotary Friction Welding Process". *2016 3rd International Conference on Green Technology and Sustainable Development (GTSD)*, p. 206–211.
- Vairis, A., Papazafeiropoulos, G., Tsainis, A., 2016. "A comparison between friction stir welding, linear friction welding and rotary friction welding". *Advances in Manufacturing*, v. 4, n. 4, p. 296–304.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

THERMAL ANALYSIS OF CONTINUOUS DRIVE FRICTION WELDING PROCESS ON NICKEL ALUMINUM BRONZE ALLOY CuAl10Ni5Fe5 JOINTS

Daniel Pezza Tchernov

Givanildo Alves dos Santos

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo – Rua Pedro Vicente nº 625 – Canindé, São Paulo/SP
danieltchernov@gmail.com; givanildo@ifsp.edu.br

Carlos Frajuca

Paulo Henrique Lixandrão Fernando

Mauro Machado de Oliveira

Francisco Yastami Nakamoto

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo – Rua Pedro Vicente nº 625 – Canindé, São Paulo/SP
frajuca@gmail.com; paulo.lixandrao@ifsp.edu.br; mauro.mo@ifsp.edu.br; nakamoto@ifsp.edu.br

Abstract. The main objective of this work was to study the thermal history carrying out experimental procedures of the continuous drive friction welding process on Nickel Aluminum Bronze alloy CuAl10Ni5Fe5 with the aid of a thermographic camera and later investigation of the temperature gradient through finite element analysis with the creation of a non-linear axisymmetric 3D thermal model using the Ansys Workbench software 19.2.

Keywords: Continuous Drive Friction Welding, Finite Element Analysis, Thermography, Nickel Aluminum Bronze

RESPONSIBILITY NOTICE

The author(s) is (are) the only responsible for the printed material included in this paper.