



Análise térmica de soldagem obtida numericamente na liga de alumínio AA 5056 pelo processo GMAW

Welding thermal analysis numerically obtained in the aa 5056 aluminum alloy by gmaw process



Artigo

Submetido em 09.08.16 | Aceito em 20.03.17 | Disponível on-line em 25.04.18

Pablo Batista Guimarães*, Jocemar Jose Costa de Oliveira Neto, Tiago de Sousa Antonino, José Dásio de Lira Junior

IFPE | * pabloguimaraes@recife.ifpe.edu.br

Carlos Augusto do Nascimento Oliveira e Ricardo Artur Sanguinetti Ferreira

UFPE

RESUMO

Esse trabalho tem como objetivo determinar numericamente o campo de temperatura e ciclo térmico em uma soldagem MIG (Metal Inerte Gás). Foi empregada a técnica por fluorescência de raios X (FXR), para determinar a composição química da liga de alumínio AA5056. Foram realizadas simulações em uma junta de topo, por meio do software comercial Abaqus®, que utiliza o método dos elementos finitos (MEF). Para simulação da deposição de material de adição no cordão de solda, foi utilizada a técnica elemento ãmortoö, elemento ãnascidoö. A fonte de calor analítica utilizada para modelar o aporte térmico foi do tipo dupla elipsoide proposta por Goldak. Resultados mostram o campo de temperatura e ciclo térmico na placa que servirão de base para determinação das tensões residuais que na normalmente são indesejáveis devido à possibilidade de prejudicarem a qualidade de componentes soldados.

Palavras-chaves: processo GMAW, campo de temperatura, ciclos térmicos.

ABSTRACT

This study aims to determine numerically the temperature field and thermal cycle in a MIG (Metal Inert Gas). It was used the technique by X-ray fluorescence (FXR), to determine the chemical composition of AA5056 aluminum alloy. Simulations were performed on a butt joint, through Abaqus® trading software, using the finite element method (FEM). To simulate the deposition of the filler metal weld bead, the technique used was "dead" element, "born" element. The analytical heat source used to model the thermal input was the double ellipsoid type proposed by Goldak. Results show the temperature field and thermal cycle in the plate that will serve as the basis for determining the residual stresses that are normally undesirable due to the possibility of impairing the quality of welded components.

Keywords: GMAW welding, temperature field, thermal cycle.

1. Introdução

O processo de soldagem GMAW (Gas Metal Arc Welding), conhecido como MIG (Metal Inerte Gás), Figura 1, visa a coalescência entre dois materiais pelo aquecimento e fusão da área a ser unida a partir de um arco elétrico entre um eletrodo não revestido (arame) consumível e a peça. A poça de fusão é protegida contra as contaminações do meio por um gás inerte, geralmente argônio e hélio, ou mistura destes. O

Uma excepcional combinação de propriedades faz do alumínio um dos mais

eletrodo nu ao se fundir transfere o metal de adição à peça.

O processo MIG pode ser aplicado a chapas de espessuras variadas e em várias ligas ferrosas ou não ferrosas, como o cobre, aço, magnésio e é largamente utilizado para soldar alumínio. A leveza do alumínio e sua excelente resistência à corrosão, associados à facilidade de sua união pelo processo MIG, o tornam uma ótima opção para diversos segmentos industriais (VEIGA, 2011).

versáteis materiais utilizados na engenharia, arquitetura e indústria em geral (ABAL, 2014). A

leveza, alta resistência à corrosão, elevada dureza e resistência mecânica, alta formabilidade, soldabilidade, durabilidade e impermeabilidade, aliado ao seu bom acabamento superficial e a sustentabilidade, fazem do alumínio o material de maior consumo nas organizações, depois do aço. A liga de alumínio utilizada nesse estudo está catalogada pela Aluminium Association como AA 5056, uma liga Al-Mg que possui uma grande facilidade de soldagem, boa resistência mecânica, boa resistência à corrosão e uma boa ductilidade, sendo usada frequentemente em indústrias navais, aeronáuticas e de bens de consumo (alimentícia e utensílios domésticos), para fabricação e reparação de equipamentos e componentes.

A fluorescência de raios X (FRX) trata-se de uma técnica, na qual foi utilizado um equipamento portátil que é capaz de transmitir qualitativamente ou quantitativamente os elementos químicos do material, Figura 2. É possível induzir transições eletrônicas entre os orbitais mais internos dos átomos utilizando radiações eletromagnéticas de energia adequada (raios X e raios gama) (JENKINS et al., 2009).

As transições que ocorrem nos níveis e subníveis eletrônicos emitem radiações X que permitem identificar e mensurar a espécie atômica envolvida. Cada espécie atômica do material manifesta uma determinada energia (radiação X) na transição.

Figura 1. Soldagem MIG. Fonte: Marques *et al.*, (2007).

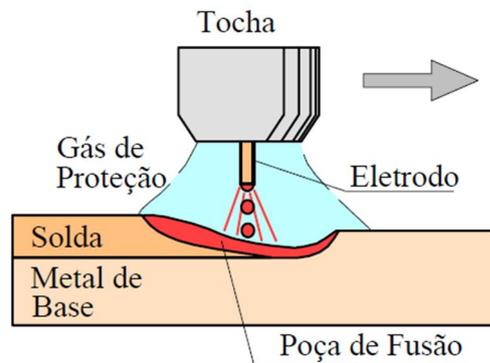


Figura 2. Analisador portátil FRX. Fonte:www.olympus-ims.com.



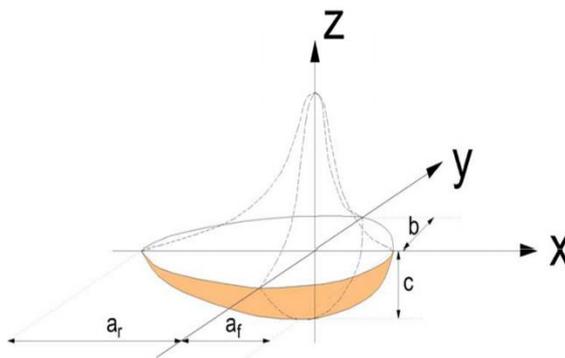
É de extrema importância para as indústrias conhecerem o campo de temperatura na peça, transmitindo a evolução térmica durante o processo de soldagem. O Método dos Elementos Finitos possibilitou resolver o problema térmico levando em consideração aspectos que fazem a modelagem matemática do processo de soldagem complexa, tais como: variações nas propriedades físicas dos materiais em função da temperatura, a transitoriedade e rapidez do processo de soldagem e as trocas de calor com o meio por convecção e radiação (ATTARHA & SATTARI ó FAR, 2010).

2. Materiais e Métodos

A simulação de soldagem foi realizada pelo o processo MIG, mediante um software comercial, baseado no Método de Elementos Finitos. Foi usada a fonte de calor proposta por GOLDAK na qual, a distribuição de calor é considerada gaussiana (GOLDAK & AKHLAGUI, 2005). O arranjo de dois elipsóides, com aproximadamente a forma e o tamanho da poça de fusão, junto com gradientes para representar a densidade da potência, descrevem o comportamento da geração de calor a frente e atrás do arco de solda (WENTZ, 2008; DEPRADEUX & JULLIEN, 2003). Os elipsóides são descritos por semieixos: b , c , a_f e a_r como apresentado na Figura 3, os quais para a simulação, baseado em ensaios metalográficos, foi convencionado que $b = 0,002$ m, $c = 0,003$ m, $a_f = 0,001$ m, $a_r = 0,004$ m, $f_f = 0,6$; $f_r = 1,4$. Por meio de uma sub-rotina em Fortran chamada DFLUX, foi possível realizar o deslocamento da fonte de calor ao longo da placa. A duração da soldagem foi de 30 s.

Os parâmetros de soldagem para a simulação foram: rendimento 80%, velocidade da tocha 1,86 mm/s, tensão 20V e corrente 125A.

Figura 3. Fonte de calor proposta por GOLDAK. Fonte: Guimarães *et al.* (2011).



Onde:

q_f = Distribuição volumétrica de energia antes da tocha [W/m^3];

q_r = Distribuição volumétrica de energia após a tocha [W/m^3];

f_f = Repartição de energia antes da tocha;

f_r = Repartição de energia após a tocha;

a_f = Comprimento da poça de fusão - energia distribuída antes da tocha [m];

a_r = Comprimento da poça de fusão - energia distribuída após a tocha [m];

b = Semi-largura da poça de fusão [m];

c = Profundidade da zona fundida [m].

As equações de distribuições volumétricas de energia antes e após a tocha foram dadas pelas Equações 1 e 2, respectivamente.

$$q_f(x, y, z) = 3,73 \cdot 10^{11} \cdot \exp(-3 \cdot 10^6 x^2) \cdot \exp(-7,5 \cdot 10^5 y^2) \cdot \exp(-3,3 \cdot 10^5 z^2) \quad (1)$$

$$q_r(x, y, z) = 2,17 \cdot 10^{11} \cdot \exp(-1,87 \cdot 10^5 x^2) \cdot \exp(-7,5 \cdot 10^5 y^2) \cdot \exp(-3,3 \cdot 10^5 z^2) \quad (2)$$

A placa a ser utilizado na soldagem é o alumínio AA 5056 e para a caracterização da composição química deste, foi usada a espectroscopia de fluorescência de raios X (FRX). A peça foi dimensionada com 100 mm de comprimento, 50 mm de largura e 3,175 mm (1/8") de espessura, dividida em elementos do tipo DC3D8, contínuos e 3D, de formulação linear no qual, cada um possui 8 nós. A malha na Zona Termicamente Afetada (ZTA) foi mais refinada, propondo uma maior precisão nas variações térmicas durante a soldagem, como apresentado na Figura 4.

Para simulação da deposição de material de adição no cordão de solda, foi utilizada a técnica elemento morto, elemento nascido de modo que, antes de iniciar a soldagem os elementos do metal de solda estarão desativados (mortos). Conforme o arco elétrico avança sobre o chanfro depositando o metal de solda, os elementos serão reativados (nascidos) (TORRES, 2013). Quando os elementos estiverem mortos (desativados) a condutividade térmica do material

é estabelecida como zero, quando os elementos estiverem nascidos (reativados), a condutividade térmica é estabelecida como sendo a do material de adição.

Além de dimensionar a placa também foram levadas em consideração as propriedades físicas da liga Al-Mg: calor específico (C_p), Equação 3, massa específica (ρ), Equação 4, e condutividade térmica (k), Equação 5, em função da temperatura.

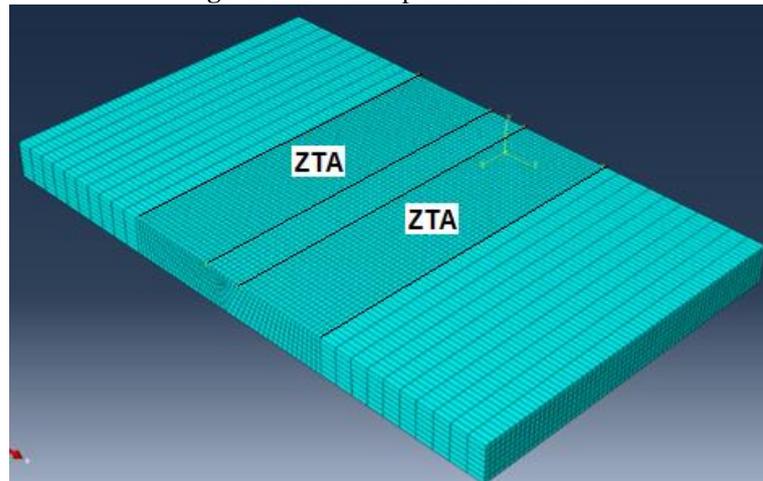
$$C_p = 959,79135 + 0,23599(T - 273) \quad (3)$$

$$\rho = 2476,94497 - 0,06982(T - 273) - 3,91162 \times 10^{-5} \times (T - 273)^2 \quad (4)$$

$$k = 32,59381 + 0,01698(T - 273) \quad (5)$$

A Tabela 1 apresenta a variação destas propriedades entre 25 °C e 683 °C.

Figura 4. Malha da placa de alumínio.



Fonte: Autoria Própria.

Tabela 1. Propriedades Termofísicas da LigaAl-Mg.

TEMP. (°C)	Cp (J/kg.°C)	K (w/m.°C)	P (Kg/m³)
25	965,6911	33,01831	2475,144
75	977,4906	33,86731	2471,207
125	989,2901	34,71631	2466,825
175	1001,0896	35,56531	2461,997
225	1012,8891	36,41431	2456,724
275	1024,6886	37,26331	2451,005
325	1036,4881	38,11231	2444,841
375	1048,2876	38,96131	2438,231
425	1060,0871	39,81031	2431,175
475	1071,8866	40,65931	2423,674
525	1083,6861	41,50831	2415,727
575	1095,4856	42,35731	2407,334
625	1107,2851	43,20631	2398,496
683	1120,9725	44,19115	2387,686

Fonte: Goyal *et al.*, (2009)

Levou-se em consideração a temperatura *solidus* e *liquidus*, 568°C e 638 °C, respectivamente, e calor latente de 400.000 kJ/kg. Para as condições de contorno térmicas foram consideradas as trocas de convecção e radiação. A temperatura ambiente foi considerada 24 °C, a emissividade 0,08 e a constante de Stefan-Boltzmann $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$.

3. Resultados e Discussões

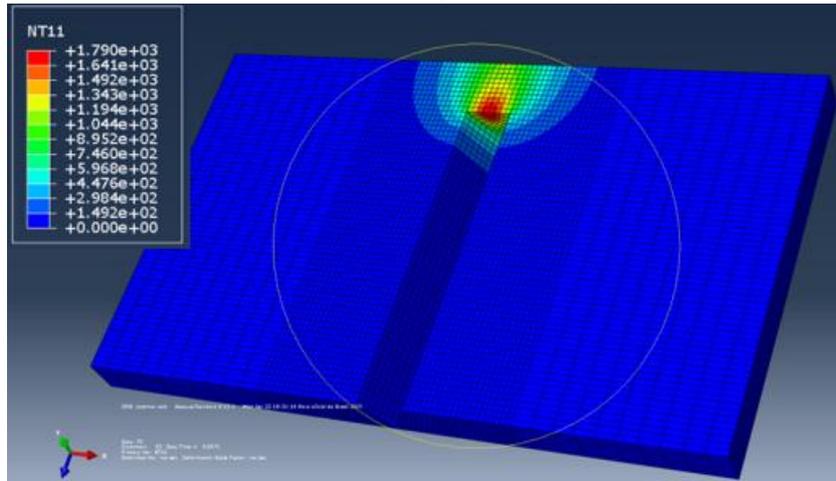
A composição química da liga foi determinada por espectroscopia de fluorescência de raios X como apresentada na Tabela 2.

A duração da simulação de soldagem foi de 30s e a evolução do campo de temperatura é mostrada na Figura 5, 6 e 7.

Tabela 2. Composição Química do Alumínio AA 5056.

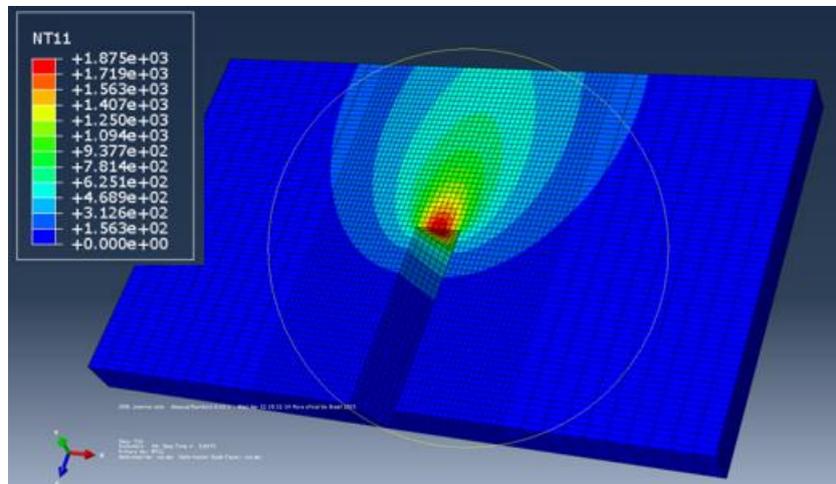
Mg	Si	Ti	Cr	Mn	Fe
6,04	0,11	0,02	0,07	0,45	0,49

Figura 5. Evolução da temperatura no tempo de 5s.



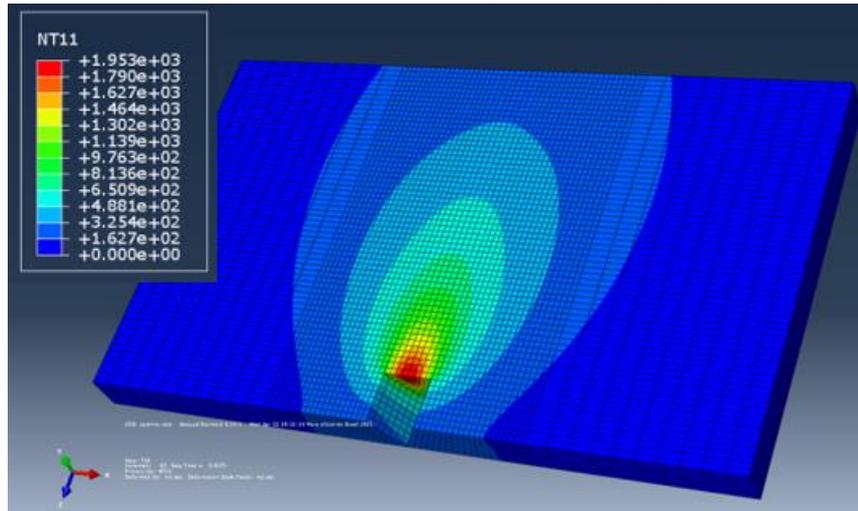
Fonte: Autoria Própria.

Figura 6. Evolução da temperatura no tempo de 15 s.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 7. Evolução da temperatura no tempo de 26 s.



Fonte: Autoria Própria.

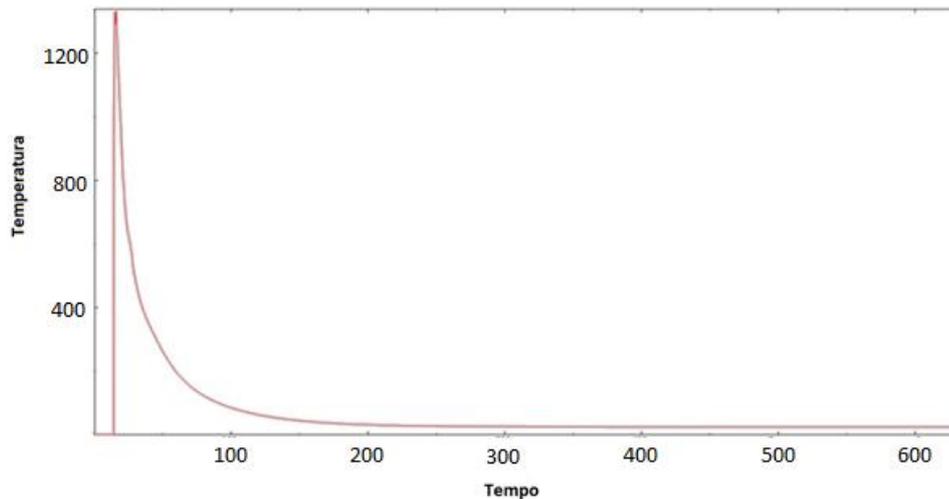
A partir do campo de temperatura, pode-se traçar um gráfico que apresenta o avanço dessa temperatura em função do tempo para um ponto considerado, o ciclo térmico de soldagem. A Figura 8 apresenta o ciclo térmico de um ponto a 5 mm do centro do cordão de solda.

A evolução do campo de temperatura numa junta soldada é influenciada pelos parâmetros de soldagem (aporte térmico), pelos parâmetros da fonte de calor, pelas propriedades termo físicas do material e pela velocidade de soldagem. Quanto maior o aporte térmico, maior a zona termicamente afetada (ZTA) e quanto maior a velocidade de soldagem, menor a ZTA e, conseqüentemente, menor os valores do campo de temperatura na placa. A temperatura máxima

alcançada na simulação foi de 1953 °C, na qual, não ultrapassou a temperatura de vaporização do alumínio. Os valores de temperatura estão coerentes com estudos em ligas de alumínio que atingiram valores de pico próximos a 2000 K (GOYAL *et al.*, 2009).

À medida que a tocha vai passando pelo ponto desejado, sua temperatura aumenta em relação ao tempo e quando atingida a temperatura de pico, ou seja, quando a tocha passa pelo ponto, ocorre o resfriamento da placa, caracterizando a curva de resfriamento, onde a temperatura diminui em relação ao tempo até atingir a temperatura ambiente e estabilizar. Para a curva de ciclo térmico, a temperatura de pico do ponto de 5mm foi de 1041 °C.

Figura 8. Ciclo térmico no ponto de 5 mm (Temperatura [°C] e Tempo [s]).



Fonte: Autoria Própria.

4. Conclusões

Determinar o campo de temperatura e ciclo térmico é importante para entender as transformações metalúrgicas ocorridas durante um processo de soldagem. A temperatura máxima alcançada na simulação foi de 1953 °C e de 1041 °C para um ponto a 5 mm do centro do cordão de solda.

A técnica elemento ômorto, elemento ônascido para simulação da deposição de material de adição no cordão de solda nessa liga produziu resultados coerentes com a literatura. O campo de temperatura e ciclo térmico na placa servirão de base para determinação das tensões residuais que normalmente provocam diversos inconvenientes na fabricação de equipamentos, como a formação de trincas em soldas, a corrosão do cordão sob tensão e a instabilidade dimensional.

5. Agradecimentos

Agradecemos ao CNPq pelo apoio financeiro por meio do processo 478138/2012-1, ao PIBIC-IFPE pelas bolsas de iniciação científica, e acima de tudo a Deus que proporcionou a oportunidade de participação neste estudo.

6. Referências

ABAL. Associação Brasileira do Alumínio. <<http://www.abal.org.br/aluminio/processos-deproducao/soldagem/>> Acesso em 19/02/2015.

ATTARHA, M.J. e SATTARI ó FAR, I. Study on welding temperature distribution in thin welded plates through experimental measurements and finite element simulation, Tehran, Iran, 2010.

DEPRADEUX, L. e JULLIEN, J. F. Experimental and numerical simulation of thermomechanical phenomena during a TIG

welding process, International Conference on Thermal Process Modelling and Computer Simulation N°2, Nancy, Vol. 120, 2003, p. 697-704.

GOLDAK, J.A. e AKHLAGHI, M. Computational Welding Mechanics, Spring. New York, 30-35 p., 2005

GOYAL, V.K., GHOSH, P.K. e SAINI, J.S. Analytical studies on thermal behaviour and geometry of weld pool in pulsed current gas metal arc welding, Journal of materials processing technology. Vol. 209, 2009, p.1318-1336.

GUIMARÃES, P. B.; PEDROSA, P. M. A.; YADAVA, Y. P.; SIQUEIRA FILHO, A. V.; BARBOSA, J. M. A. e FERREIRA, R. A. S. Obtaining Temperature Fields as a Function of Efficiency in TIG Welding by Numerical Modeling. Engenharia Térmica, 2011, v. 10, p. 50-54.

JENKINS, R.; GOULD; R.W. e GEDCKE, D. Quantitative X-Ray Spectrometry. 2. Ed. New York: Marcel Dekker, 1995.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J. e BRACARENSE, A. Q. Soldagem: Fundamentos e Tecnologia. Belo Horizonte: Ed. UFMG. p. 51-125, 2007.

TORRES, V.D.Z. Aplicação do método de elementos finitos na correção de distorções devido à soldagem de placas pelo método de aquecimento localizado. 2013. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

VEIGA, E. Processo de soldagem MIG/MAG. Globus. São Paulo. 152p. 2011.

WENTZ, A.V. Simulações de Soldagem por Arco e Resistência Elétrica Usando o Método dos Elementos Finitos. 2008. Dissertação de Mestrado, Porto Alegre, Brasil, p. 12-18. www.olympus-ims.com. Acesso em: 06/01/2016.