

ANÁLISE TÉRMICA DO PROCESSO DE SOLDAGEM EM UM EIXO RECUPERADO

Matheus Vinícius Linhares Barbosa, matheusvini.eng.mec@gmail.com¹

Ericles Xavier Marques de Araújo, ericlesx@gmail.com¹

Heytell Whitney de Souza Silvério, h.whitney15@hotmail.com¹

Rafael Sena de Andrade, senaengmec@gmail.com¹

Alessandra Gois Luciano de Azevedo, alessandragois@gmail.com¹

¹Universidade Federal de Sergipe, Cidade Universitária Prof. José Aloísio de Campos, Av. Marechal Rondon, s/n, Jd. Rosa Elze, São Cristóvão/SE. CEP: 49100-000.

Resumo: A chamada soldagem de manutenção é um processo ainda muito utilizado para prolongar a vida útil das peças de máquinas e equipamentos, sendo usada para restauração de componentes que sofreram algum tipo de falha, constituindo-se em uma alternativa à substituição das peças comprometidas, já que tal peça é recuperada e pode voltar ao uso. Esse tipo de processo é econômico para as indústrias, pois reduz as paradas forçadas de produção e a necessidade de estoque, agindo com rapidez e eficiência para que peças danificadas voltem a funcionar. Componentes como eixos são comumente recuperados por meio de tal processo. Porém, ao se realizar a recuperação por soldagem, a peça sofre uma aplicação localizada de calor, o que causa uma distribuição heterogênea de temperatura no componente, criando zonas de contrações e dilatações no material. Esse campo de temperatura induzido pela soldagem gera tensões térmicas residuais na peça, as quais apresentam potencial para ocasionar diversos problemas como falta de estabilidade dimensional, trincas, fragilização e fraturas. O objetivo do presente trabalho é a realização da análise térmica computacional do processo de soldagem em um eixo recuperado utilizando o software Ansys®, avaliando a distribuição e magnitude dos campos de temperatura no componente ao longo da simulação de tal processo. Os resultados indicam uma influência térmica significativa da soldagem em praticamente todos os pontos do eixo no instante final da simulação realizada.

Palavras-chave: soldagem, análise térmica, eixos, simulação computacional

1. INTRODUÇÃO

1.1. Soldagem de Manutenção e Análise Térmica

Um dos procedimentos bastante utilizado na fabricação e na recuperação de peças, equipamentos e estruturas é a soldagem, processo que promove a união localizada de materiais metálicos, similares ou não, por intermédio de uma fonte de calor, com ou sem material de adição e ainda com ou sem aplicação de pressão. (Cary, 1979). Este método de união utiliza forças microscópicas e a junção é feita através da aproximação dos átomos e moléculas das partes que serão unidas, de forma que atinjam distâncias bastante pequenas para que ocorra a formação de ligas metálicas (Marques e Modenesi, 2006). De acordo com Leal (2015), estruturas soldadas têm sido largamente usadas na indústria moderna por apresentarem uma série de vantagens em relação a estruturas unidas por juntas rebitadas, seja em termos de maior praticidade, de redução de peso ou de maior estanqueidade contra ar e água. Além de ser considerada um processo de união, a soldagem também é usada para a deposição de material sobre uma superfície com o objetivo de recuperar peças desgastadas ou para a formação de um revestimento com características especiais. Existem várias formas para se realizá-la, entre elas a chamada soldagem de manutenção, que é um meio ainda muito utilizado para prolongar a vida útil das peças de máquinas e equipamentos. Ela promove economia para as indústrias, pois reduz as paradas das máquinas e diminui a necessidade de se manter grandes estoques de reposição (Macedo Filho, 2015).

A soldagem de manutenção é amplamente utilizada no processo de recuperação de componentes como eixos e árvores após fraturarem. O processo permite revestir áreas críticas da peça, aplicando materiais de maior resistência ao desgaste ou à corrosão, favorecendo a recuperação seguida do retorno ao uso normal de peças antes trincadas ou fraturadas (Marques e Modenesi, 2006). Normalmente, os processos de soldagem mais utilizados são os de fusão a arco. Entre esses, encontra-se a soldagem por arame tubular ou FCAW (Flux Cored Arc Welding), muito utilizada nos processos de soldagem de manutenção. Segundo Marques e Modenesi (2006), tal processo consiste na obtenção da união de metais através de um arco estabelecido entre um eletrodo tubular de consumo contínuo e a peça, apresentando algumas vantagens como elevadas produtividade, qualidade e eficiência, além de um custo relativamente baixo.

Um processo comumente empregado após a soldagem de manutenção é a usinagem. Por meio deste, é possível obter a forma originalmente projetada do eixo que foi recuperado por soldagem. Nesse processo, obtêm-se as dimensões de projeto das peças removendo-se o excesso de material na forma de cavacos. Sendo o cavaco a porção de material

retirada, caracteriza-se por apresentar forma irregular. É um processo complexo devido às dificuldades em determinar as imprevisíveis condições ideais de corte. No entanto, uma vez determinadas essas condições, o cavaco se forma corretamente, dispensando qualquer tipo de intervenção do operador (Machado et al., 2012).

Mesmo sendo largamente utilizada no cotidiano das indústrias, a recuperação feita por soldagem é muitas vezes realizada sem dar a devida importância ao tempo de vida útil que o componente terá depois de feito o reparo. O procedimento mais comum é, inicialmente, a usinagem para retirada do defeito, seguida da etapa de realização da soldagem. Por último, é realizada uma usinagem posterior para adequação às dimensões de projeto. Porém nem sempre a soldagem é feita de forma correta, pois para isso é necessário fazer o levantamento dos parâmetros de soldagem ideais para o processo de acordo com o material e com a forma que vai ser realizado o procedimento. O não levantamento desses parâmetros e a forma com que o cordão de solda é feito podem acarretar em propriedades mecânicas indevidas, gerando concentradores de tensões e comprometendo o funcionamento do componente, por exemplo.

Durante a soldagem, ocorre uma distribuição heterogênea de temperatura no componente devido à aplicação localizada de calor, criando diferentes zonas de dilatação e contração no material a ser soldado. O resultado disso é a geração do que se conhece como tensões térmicas residuais, que são induzidas em um corpo como resultado de operações de aquecimento ou resfriamento não uniformes. Como ocorre forte aquecimento de certas regiões das peças a serem unidas enquanto que o restante do material permanece a temperaturas bem inferiores, há tendência natural de dilatação térmica das partes aquecidas, a qual é restringida pelas regiões adjacentes menos aquecidas, gerando deformações elásticas e plásticas não uniformes. Estas últimas são as responsáveis por grande parte das tensões residuais de soldagem (Bezerra, 2006). É importante uma compreensão das origens e da natureza das tensões térmicas, pois elas podem levar à fratura ou a uma deformação plástica indesejável (Callister Jr., 2012). Naturalmente, a magnitude das tensões residuais depende da intensidade e distribuição das temperaturas atingidas, das reações ocorridas durante a solidificação e do resfriamento do cordão de solda.

Sabe-se que as tensões térmicas residuais podem ser extremamente perigosas para o bom funcionamento e para a vida útil do material. Após o processo de soldagem ser concluído e o equilíbrio térmico ser atingido, as tensões residuais permanecem no material, podendo ocasionar instabilidade dimensional, deformações, trincas, alteração de propriedades mecânicas e da microestrutura ou mesmo uma falha catastrófica pela aplicação de cargas menores que aquelas máximas toleradas pelo projeto, já que este não considera as tensões térmicas internas existentes. (Barban, 2014). O processo de solidificação da zona fundida, por exemplo, pode gerar tensões residuais, ocasionando uma fragilização do metal fundido, assim como da Zona Afetada pelo Calor (ZAC), o que pode levar a formação de uma microestrutura indesejável, alterando as propriedades da peça (Azevedo et al., 2015). Nesse sentido, torna-se evidente a necessidade de se fazer uma análise térmica do processo de soldagem em um componente, avaliando-se a distribuição, variação e magnitude da temperatura resultante no corpo em decorrência de tal procedimento, além de se realizar a comparação entre os resultados da análise térmica simulada e aqueles provenientes de experimentos. A obtenção desse conjunto de informações é fundamental para o diagnóstico das tensões residuais no corpo e para, conseqüentemente, prever ou evitar possíveis falhas em uso do componente.

1.2. Modelagem Térmica do Processo de Soldagem

No processo de soldagem a arco, uma fonte elétrica gera uma diferença de potencial (tensão) U entre o eletrodo e a peça a ser soldada. Esta diferença de potencial induz a formação de um arco elétrico, percorrido por uma corrente de soldagem I . A potência gerada é dada pela multiplicação destes dois parâmetros. No entanto, devido a fatores como convecção e radiação, somente uma parte desta potência é realmente aproveitada, tornando necessária a adoção do rendimento η , também conhecido como eficiência do arco. (Bezerra, 2006). Assim, a entrada real de calor $\dot{Q}$ pode ser expressa pela Eq. (1).

$$\dot{Q} = \eta \cdot U \cdot I \quad (1)$$

De uma forma geral, a análise térmica do processo de soldagem é dada pela solução da Eq. (2), conhecida como Lei de Fourier, que trata da condução de calor em um sólido. (Leal, 2015).

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \dot{Q} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (2)$$

Onde:

ρ = densidade do material

c_p = calor específico do material

k = condutividade térmica do material

T = temperatura do material

t = tempo

Os primeiros estudos realizados nessa área para analisar a condução de calor de acordo com a Eq. (2) utilizavam métodos analíticos de solução. Segundo Masubushi (1980), a primeira solução com o objetivo de analisar a condução de calor em um sólido a partir de uma fonte de calor em movimento foi proposta por Rosenthal ainda na década de 1930. Sua análise considerava uma fonte de calor concentrada (pontual), velocidade de soldagem e propriedades térmicas do material e do meio condutor constantes, além de fazer algumas simplificações ao desprezar as perdas de calor para o ambiente, o efeito Joule e as transformações de fase durante o processo. No entanto, de acordo com Goldak e Akhlaghi (2005), a temperatura infinita na fonte de calor e as propriedades físicas que não variam com a temperatura fazem a solução de Rosenthal se submeter a grandes erros na região da zona de fusão. Mais recentemente, surgiram alguns modelos analíticos que consideram uma fonte distribuída de calor, como nos trabalhos de Fassani e Trevisan (2003). No entanto, a partir do final do século XX, começaram a se desenvolver, de forma relativamente rápida, os métodos numéricos para análises térmicas.

Devido à complexidade e dificuldade de se representar analiticamente os fenômenos envolvidos no processo de soldagem e ao avanço e evolução da informática, os métodos analíticos se tornaram ultrapassados, não sendo mais conveniente sua utilização (Barban, 2014). A resolução do problema utilizando métodos numéricos computacionais é mais eficiente em termos de velocidade e de desempenho. Tais métodos vêm sendo largamente utilizados nas duas últimas décadas, especialmente o chamado Método dos Elementos Finitos (MEF). Ao contrário dos métodos analíticos, o MEF é bem mais prático e eficiente, permitindo levar em consideração a dependência das propriedades termofísicas do material em relação à temperatura, as trocas de calor com o meio (convecção e radiação), além da possibilidade de modelar estruturas de geometrias complexas, embora possa necessitar de grandes tempos de cálculo computacional e de recursos de informática relativamente sofisticados (Depradeux, 2004). As primeiras simulações com o MEF datam da década de 1980 com os trabalhos de Hibbitt e Marcal (1973). Com o passar do tempo, os métodos numéricos foram sendo cada vez mais aprimorados, passando de análises bidimensionais como a de Papazoglou et al. (1982) até modelos tridimensionais transientes complexos como o de Depradeux (2004).

Existem muitos códigos de elementos finitos disponíveis comercialmente que são capazes de realizar simulações de soldagem. Um deles é o Ansys®, programa computacional bastante conhecido e eficiente nas simulações que envolvem as mais diversas áreas da engenharia. Especificamente na parte de soldagem, o Ansys® é capaz de simular o decorrer do processo e calcular os campos de temperatura, deformações e tensões desejados por meio do MEF.

No MEF, a Eq. (1) é discretizada em pequenos elementos e as incógnitas passam a ser as temperaturas dos nós. Na biblioteca do Ansys®, existem vários elementos térmicos que podem ser utilizados, como SOLID70, SOLID90, PLANE78, entre outros. A utilização de cada um deles depende da geometria da peça e do tipo de simulação desejada. Para realizar uma simulação por elementos finitos, é necessária a criação de um modelo que, no caso da soldagem, pode ser de duas ou três dimensões, com uma malha adequada à simulação que se pretende efetuar. Devido aos campos de temperatura, é normalmente necessário um tamanho de elemento bem pequeno próximo ao cordão de solda para manter a precisão da simulação (Francis, 2002). Muitas vezes, a escolha pela dimensão e tipo do modelo depende da capacidade computacional requerida. Em relação aos modelos bidimensionais, Depradeux (2004) explica que há o modelo da secção transversal, perpendicular ao avanço da tocha, e os modelos axissimétricos, muito utilizados no caso de peças cilíndricas. Em ambos os casos, o calor é depositado simultaneamente sobre o comprimento linear (ou sobre o diâmetro, no caso dos modelos axissimétricos), sendo aplicado na malha em função do tempo e reproduzindo a aproximação e distanciamento da tocha durante o processo. De acordo com Barban e Gonçalves (2013), os modelos tridimensionais são os mais gerais e completos, sendo os mais usados nos dias de hoje e computando todas as componentes de tensão e deformação. No entanto, estes também são mais complexos e exigem grandes recursos computacionais.

A convecção é tratada como condição de contorno no MEF. Para isso, utiliza-se a Eq.(3), chamada de Lei de Resfriamento de Newton.

$$q_{conv} = h \cdot A \cdot (T_s - T_0) \quad (3)$$

Onde:

q_{conv} = calor perdido por convecção

h = coeficiente de transferência de calor por convecção

A = área de contato com o fluido

T_s = temperatura da superfície quente

T_0 = temperatura do fluido

Outra condição de contorno utilizada é a consideração das perdas por radiação, por meio da Lei de Stefan Boltzmann, ilustrada na Eq.(4).

$$q_{rad} = \epsilon_s \cdot \sigma_B \cdot A \cdot (T^4 - T_\infty^4) \quad (4)$$

Onde:

q_{rad} = calor dissipado por radiação

ϵ_s = Emissividade da superfície

σ_B = constante de Boltzmann

T = temperatura da superfície quente

T_∞ = temperatura do fluido

Um ponto importante para simular o processo de soldagem é a modelagem da fonte de calor, ou seja, a distribuição da entrada do calor no componente. Segundo Leal (2015), a modelagem computacional da fonte de calor pode ser feita basicamente de duas formas: com temperaturas prescritas ou com fluxo de calor prescrito. No primeiro caso, são aplicadas temperaturas prescritas aos nós dos primeiros elementos da região da solda. Os nós recebem tais temperaturas por um intervalo de tempo e depois são deixados em resfriamento livre enquanto as temperaturas prescritas são aplicadas aos elementos subsequentes, simulando o movimento da fonte de calor. Esse processo é repetido até que todos os elementos do cordão de solda tenham recebido a aplicação da temperatura considerada. Esse tipo de abordagem requer um conhecimento prévio da poça de fusão e de medição de temperaturas experimentais (Leal, 2015). Já no caso da abordagem por fluxo de calor prescrito, o fluxo de calor é aplicado diretamente sobre a área ou volume da região em contato com a fonte de calor. A Fig. (1) mostra alguns dos principais tipos de distribuições do fluxo de calor usadas por essa abordagem.

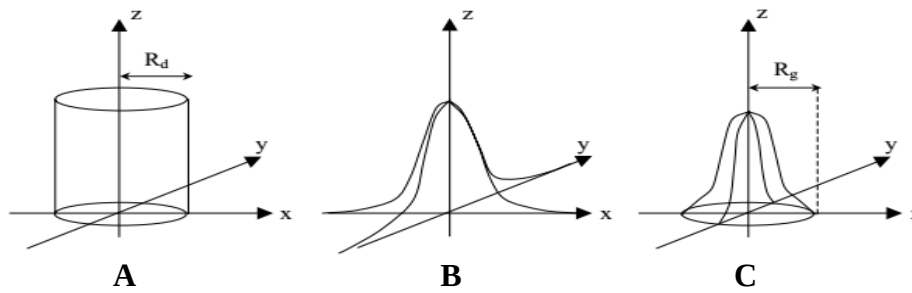


Figura 1. Tipos de distribuições para a entrada de calor (Depradeux, 2004).

Na Fig. (1), a primeira imagem (A) mostra a repartição constante sobre um disco de raio R_d , a segunda (B) mostra a distribuição gaussiana infinita e a terceira (C) apresenta a distribuição gaussiana finita sobre um raio R_g .

Além desses, outro modelo bastante utilizado e consolidado na literatura é o modelo de Goldak e Akhlaghi (2005), conhecido como o de dupla elipsoidal. Esse modelo é apresentado na Fig.(2).

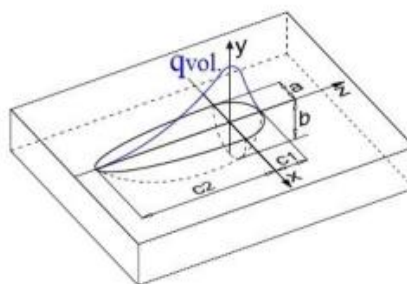


Figura 2. Modelo da Dupla Elipsoidal de Goldak (Goldak e Akhlaghi, 2005).

Segundo Barban e Gonçalves (2013), ele é o mais completo na apresentação do aporte de calor e o mais usado atualmente, combinando duas formas elipsoidais separadas, sendo uma na parte frontal em relação ao centro da fonte e outra na parte traseira. O fluxo de calor na parte frontal é descrito pela Eq.(5), enquanto o da parte traseira é mostrado na da Eq.(6).

$$(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3} \cdot f_f \cdot \dot{Q}}{a \cdot b \cdot c_1 \cdot \pi \cdot \sqrt{\pi}} \cdot e^{\frac{-3x^2}{a^2}} \cdot e^{\frac{-3y^2}{b^2}} \cdot e^{\frac{-3[z+v(\tau-t)]^2}{c_1^2}} \quad (5)$$

$$(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3} \cdot f_r \cdot \dot{Q}}{a \cdot b \cdot c_2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\pi}} \cdot e^{\frac{-3x^2}{a^2}} \cdot e^{\frac{-3y^2}{b^2}} \cdot e^{\frac{-3[z+v(\tau-t)]^2}{c_2^2}} \quad (6)$$

Na Eq.(5) e na Eq. (6), v é velocidade de soldagem, t é o tempo e τ é um fator de retardamento necessário para que a posição da fonte esteja correta no instante $t=0$. Além disso, os termos a , b , c_1 e c_2 são parâmetros geométricos da dupla elipsoidal (Fig.(2)) que buscam descrever o tamanho característico da poça de fusão. Tais parâmetros são sempre medidos em relação ao ponto determinado pelo contato da tocha com a peça, que é representado pela origem (ou centro da fonte) da Fig.(2). Uma boa estimativa de tais parâmetros é feita de forma que as dimensões da dupla elipsoidal sejam aproximadamente 10% menor que as dimensões da poça de fusão (Hansen, 2003). Os termos f_f e f_r são frações do calor depositado, respectivamente, nas partes frontal e traseira, tal que sua soma seja igual a 2 (Goldak e Akhlaghi, 2005). Segundo Hansen (2003), esse modelo pode fornecer uma boa estimativa da poça de fusão dispensando medições experimentais posteriores nos casos em que o objetivo é analisar de forma global a junta soldada. Ainda assim, é necessário que o usuário tenha uma boa experiência com simulações numéricas. Na literatura, muitos trabalhos recentes utilizam o modelo da dupla elipsoidal para a estimativa dos campos de temperatura e das tensões residuais. Yegaie et al. (2010) utilizaram tal modelo na simulação da união de chapas Monel 400 pelo processo TIG, com boas aproximações entre os resultados numéricos e as medições de termopares. Os trabalhos de Bate et al. (2009), de Deng (2009) e de Sattari-Far e Farahani (2009) também utilizam o modelo da dupla elipsoidal. Rodeiro (2002) utilizou o modelo das temperaturas prescritas na análise da simulação de uma solda tipo anel e chegou à conclusão de que as diferenças entre as temperaturas medidas experimentalmente e as resultantes da simulação divergiam em apenas 3%.

1.3. Objetivo

O presente trabalho visa, por meio de simulações numéricas computacionais utilizando o programa Ansys®, realizar a análise térmica do processo de soldagem por Arame Tubular de um eixo de motor elétrico recuperado utilizado por Azevedo et al. (2015) e Macedo Filho (2015) em seus trabalhos, em termos de análise e determinação da distribuição, variação e magnitude das temperaturas no componente.

2. METODOLOGIA

A modelagem computacional do processo de soldagem foi realizada no programa Ansys® utilizando o MEF. A peça modelada é um eixo de Aço SAE 4340, comumente utilizado em cilindros, engrenagens e eixos de motores. As dimensões da parte do eixo simulada foram 48mm de diâmetro e 80mm de comprimento. Tais dimensões são as dimensões finais de projeto do eixo após a soldagem e a posterior usinagem. A Fig.(3) mostra o eixo aqui simulado após a usinagem inicial e antes da soldagem (A), depois da soldagem por Arame Tubular (B) e com um corte transversal já depois de usinado às dimensões de projeto (C).

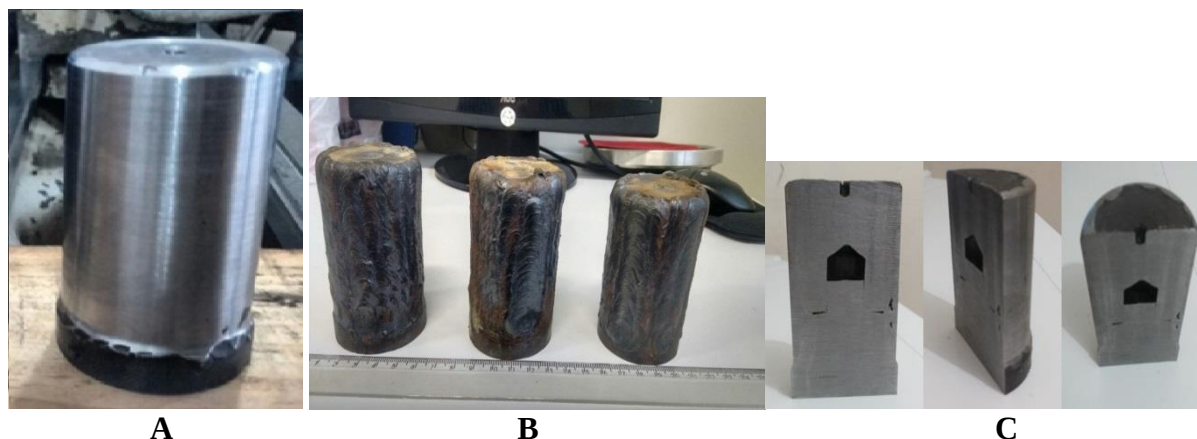


Figura 3. Eixo simulado antes do processo de soldagem (A), após a soldagem (B) e corte transversal após a usinagem às dimensões desejadas (C).

O processo de soldagem utilizado para simular a reparação do eixo foi a soldagem com Arame Tubular, com a tocha sendo considerada pontual. Foi empregado arame E71T-5C (M) e soldagem automatizada para obtenção dos parâmetros de soldagem. Conforme já descrito por Azevedo et al. (2015) e por Macedo Filho (2015), os valores médios obtidos para tais parâmetros foram: corrente de soldagem (I)=195A; tensão de soldagem(U)=23,3V; velocidade de soldagem (V)=0,005m/s. Além disso, foi considerada uma eficiência para o arco elétrico de $\eta=0,8$. Com o MEF, foi possível considerar as variações das propriedades termofísicas do material em função da temperatura.

A simulação do tipo térmica transiente foi realizada inicialmente no APDL® (Ansys Parametric Design Language), a qual foi depois exportada para o Ansys Workbench® 17.1. A simulação térmica foi conduzida por meio de um modelo bidimensional axissimétrico, próprio para peças de geometria cilíndrica. O elemento térmico escolhido

para a formação da malha foi o SOLID70 do próprio banco de dados do Ansys®, que possui oito nós e um grau de liberdade por nó, o qual é exatamente a temperatura. Esse elemento possui normalmente geometria cúbica, mas também pode assumir os formatos prismático, tetragonal e piramidal. Ele permite a condução de calor nas três dimensões, além da utilização de propriedades que variam com a temperatura (Leal, 2015).

A malha do modelo foi refinada na região do cordão de solda e próximo da ZAC para aumentar a precisão da simulação, conforme indicado por Francis (2002). Segundo os dados do Ansys®, a malha utilizada possui 97363 nós e 53472 elementos. A Fig. (4) mostra a malha criada para simulação (A), bem como oferece uma aproximação para melhor visualização da região de refinamento da malha (B).

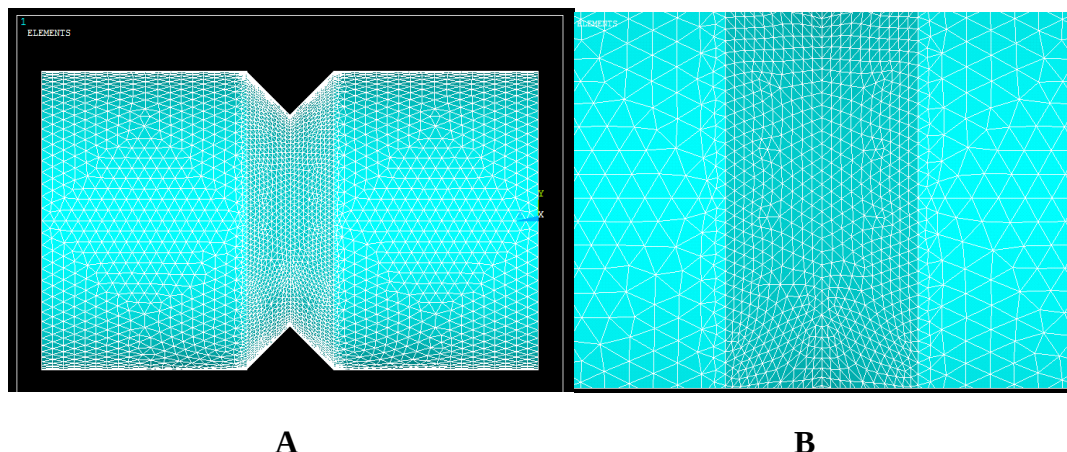


Figura 4. Malha do modelo computacional (A) e zoom na região de refino da malha (B).

A temperatura ambiente foi considerada de 30°C. Os fenômenos de radiação e convecção foram considerados no processo a fim de aproximá-lo à condições reais. Essas condições de contorno foram impostas à todas as superfícies do eixo. O coeficiente de transferência de calor por convecção envolvendo o ar ambiente e o eixo foi considerado como sendo igual a 15 W/m².K em toda a peça. Como se sabe, o cálculo exato de tal coeficiente é bastante complexo, dependendo da geometria da peça, da velocidade do ar, das temperaturas da superfície e do ambiente, entre outros. Dessa forma, tais cálculos foram aqui simplificados. Já a emissividade da superfície do corpo ϵ_s foi considerada como sendo 0,85, valor próximo aos adotados por Bezerra (2006) e sugeridos por Depradeux (2004) para placas

Para a aplicação e distribuição de calor no componente, foi utilizado o método do fluxo de calor prescrito por meio da Dupla Elipsoidal de Goldak, cujo modelo matemático foi integrado ao Ansys®. Os parâmetros geométricos da dupla elipsoidal foram inicialmente estimados, sendo refinados progressivamente após inúmeras simulações para se chegar à diferença de 10% entre as dimensões da dupla elipsoidal e da poça de fusão proposta por Hansen (2003). Como o processo de soldagem de recuperação foi realizado sem acompanhamento específico de temperatura, foram estimadas as temperaturas máximas na poça de fusão durante o processo, as quais representam a base para o cálculo da condução de calor nó a nó ao longo da malha, representado pela Eq.(2). Levando-se em conta a interação pontual entre a tocha de soldagem e a peça, com a transferência de calor para o material $\dot{Q}$ (calculada pela Eq.(1)) e com a massa m do componente simulado (encontrada com o volume da peça e a densidade média do Aço SAE 4340), foi possível chegar a estimativas próximas de 1700°C para a temperatura máxima atingida durante a soldagem, utilizando a Eq. (7).

$$\dot{Q} = m \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (7)$$

Essa temperatura aqui estimada é a responsável pelo fluxo de calor com a geometria de dupla elipsoidal ao longo da peça, uma vez que o calor flui naturalmente de um ponto de maior temperatura para outro de menor temperatura por condução. Na simulação, tal temperatura foi aplicada individualmente a cada ponto de contato da tocha com a peça durante o período de tempo de 1,25 segundos, depois do qual o ponto (ou nó) entra em resfriamento livre no ambiente. Conforme já comentado, tal ponto de contato é a origem da região de dupla elipsoidal do fluxo de calor proveniente da tocha. A soldagem foi simulada de forma circular, atendendo à velocidade considerada de 0,005m/s, o que define o tempo total do procedimento. Com todas essas atribuições e considerações, foi possível a simulação térmica da soldagem do eixo.

3. RESULTADOS

O processo de soldagem simulado durou 65 segundos. Na análise térmica, foram obtidos os campos de temperatura induzidos pela soldagem em três diferentes instantes: 5, 35 e 65 segundos. A Fig.(5) mostra os resultados obtidos para o instante $t=5s$, a Fig.(6) para o instante $t=35s$ e a Fig.(7) para o instante final, ou seja, $t=65s$. A primeira imagem (A) de cada uma dessas três figuras apresenta os campos de temperatura na superfície do eixo. Já a segunda imagem (B) de cada figura mostra os campos de temperatura com uma seção transversal exatamente no ponto da tocha soldagem. Essas três figuras avaliam a distribuição e a magnitude das temperaturas no componente aqui simulado.

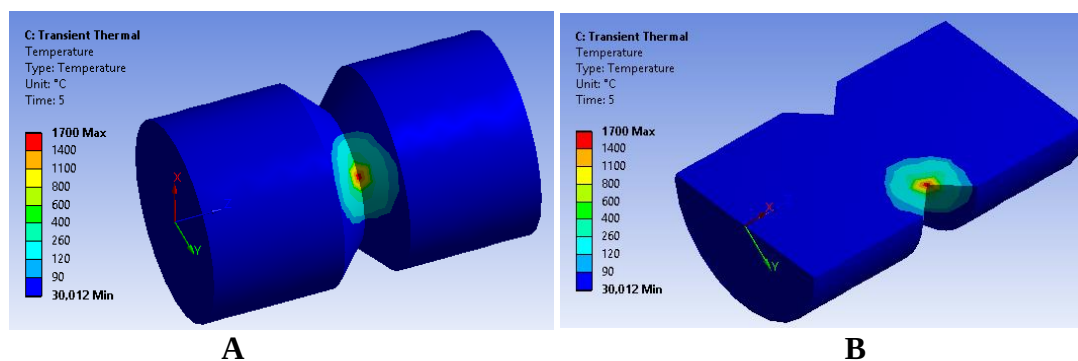


Figura 5. Campos de temperatura para o instante $t=5s$ na superfície do eixo (A) e na seção transversal do ponto de soldagem (B)

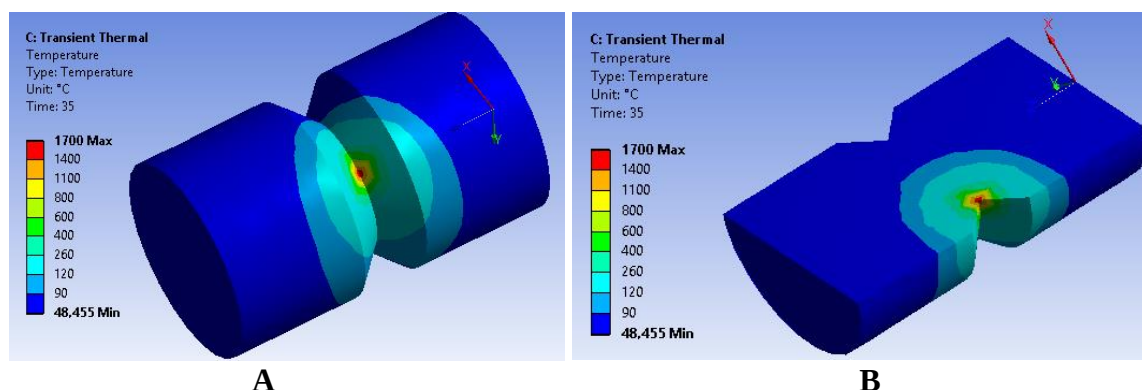


Figura 6. Campos de temperatura para o instante $t=35s$ na superfície do eixo (A) e na seção transversal do ponto de soldagem (B)

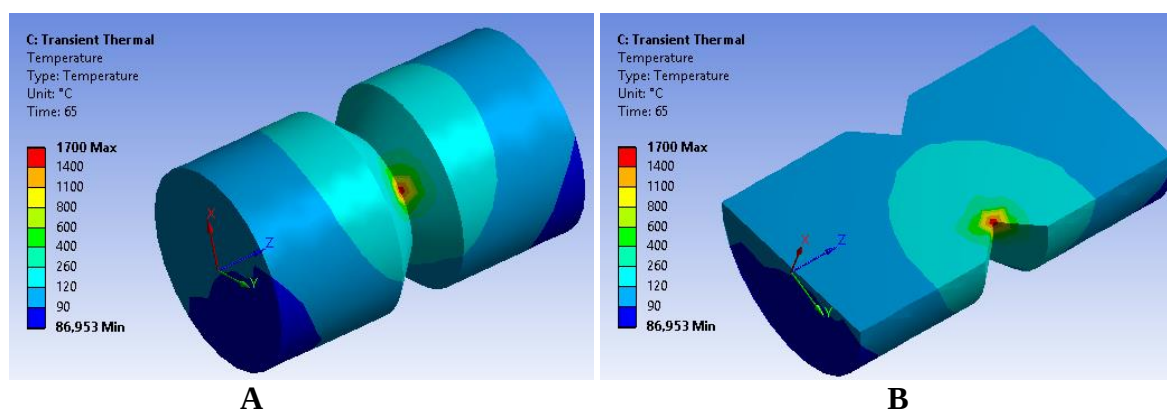


Figura 7. Campos de temperatura para o instante $t=65s$ na superfície do eixo (A) e na seção transversal do ponto de soldagem (B)

É importante frisar que, como a soldagem foi simulada de forma circular, a peça foi convenientemente rotacionada de forma que a tocha de soldagem naquele instante ficasse sempre de frente para o observador com o intuito de facilitar

a visualização. Na Fig.(5), nota-se que no começo do processo, instante $t=5s$, a temperatura de praticamente todo o eixo estava ainda bem próxima à temperatura ambiente ($30^{\circ}C$), exceto nas regiões bem próximas à tocha. Nesse instante, apenas um diâmetro de 10mm da peça a partir da tocha tem sua temperatura acima dos $200^{\circ}C$. Na Fig.(6), é possível perceber, que na metade do processo, a soldagem já induz um campo de temperatura significativamente maior que no começo, fazendo com que, inclusive, a temperatura mínima na peça já passe dos $48^{\circ}C$. Além disso, uma ampla faixa com quase 25mm de diâmetro a partir da tocha possui temperatura acima de $200^{\circ}C$, o que indica que o eixo já está sendo bastante influenciado termicamente pelo procedimento. Já na Fig.(7), é perceptível que no instante $t=65s$, final do processo, o eixo alcançou uma temperatura significativamente maior. Nesse instante, a temperatura mínima passa dos $85^{\circ}C$ e em praticamente todo o eixo a temperatura já está próxima dos $100^{\circ}C$. Isso demonstra que o eixo é influenciado termicamente em praticamente sua totalidade. Evidentemente, ao final do processo de soldagem e após o resfriamento do material, esses campos de temperatura mostrados na presente análise térmica devem provocar tensões residuais no eixo, as quais deverão ser cuidadosamente estudadas em um estudo posterior.

4. CONCLUSÃO

O presente trabalho contribuiu para a geração e difusão de conhecimentos sobre soldagem de manutenção e seu uso, bem como sobre os métodos, conceitos e paradigmas da análise térmica dos processos de soldagem. Foi realizada a análise térmica computacional da soldagem de um eixo de Aço SAE 4340 por meio do MEF utilizando o método do fluxo de calor prescrito, sendo obtidas a distribuição, variação e magnitude dos campos de temperatura no componente simulado em três diferentes instantes do processo. Os resultados dos campos de temperatura indicam que, ao final da simulação, o eixo sofre uma influência significativa do ponto de vista térmico.

Nesse sentido, para estudos futuros, serão realizadas a análise e avaliação de tensões térmicas residuais do eixo tendo como base os campos de temperaturas aqui obtidos.

5. AGRADECIMENTOS

Ao Laboratório de Soldagem e Usinagem da Universidade Federal do Espírito Santo.

6. REFERÊNCIAS

- Azevedo, A. G. L. de; Mota, G. C. da; Araújo, Y. L. B. de; Silvério, H. W. de S., 2015, “*Estudo da influência dos parâmetros de soldagem sobre um eixo recuperado*”. 8º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação- COBEF, BA, Brasil.
- Barban, L. M., 2014, “*Análise numérico-computacional das tensões térmicas induzidas por soldagem*”. Dissertação De Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, SP.
- Barban L. M. & Gonçalves, E., 2013, “*State of the Art of the Analysis of Thermal Stresses and Strains due to Welding*”. 7º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação- COBEF, RJ, Brasil.
- Bate, S.K.; Charles, R. e Warren, A., 2009, “*Finite element analysis of a single bead-on-plate specimen using SYSWELD*”, International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol.86, Issue 1.
- Bezerra, A. C., 2006, “*Simulação Numérica da soldagem com aplicação à caracterização do comportamento dinâmico de estruturas soldadas*”. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Uberlândia, MG.
- Callister Jr., W. D., 2012, “*Ciências e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*”. Ed. LTC, 8ª ed.
- Cary, H. B., 1979, “*Modern Welding Technology*”, New Jersey: Prentice-Hall Inc.
- Deng, D., 2009, “*FEM prediction of welding residual stress and distortion in carbon steel considering phase transformation effects*”, Materials and Design, Vol. 30, No.2.
- Depradeux, L., 2004, “*Simulation Numerique du Soudage – Acier 316L – Validation sur Cas Tests de Complexite Croissante*”, Tese de Doutorado, Ecole Doctorale des Sciences de L’Ingenieur de Lyon, L’Institut National des Sciences Appliquees de Lyon;
- Fassani, R. N. S & Trevisan, O.V., 2003, “*Analytical Modeling of Multipass Welding Process with Distributed Heat Source*”, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, Vol. XXV, No. 3.
- Francis, J.D., 2002, “*Welding Simulations of Aluminum Alloy Joints by Finite Element Analysis*”. Dissertação de Mestrado, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University
- Goldak, J.A. & Akhlaghi, M., 2005, “*Computational Welding Mechanics*”, Springer Science & Business Media Inc., New York, Estados Unidos.
- Hansen, J. L., 2003, “*Numerical Modelling of Welding Induced Stresses*”. Thesis (Ph.D.). Technical University of Denmark. Denmark.
- Hibbitt, H.D. & Marcal, P.V., 1973, “*A numerical, thermo-mechanical model for the welding and subsequent loading of a fabricated structure*”, Computers and Structures, Vol. 3, 5.
- Leal, S. D., 2015, “*Estudo de tensões residuais em juntas soldadas utilizando o método dos elementos finitos*”. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, SP.

- Macedo Filho, M. M. de, 2015, “*Estudo da Recuperação de eixos de aço por Soldagem e Usinagem*”. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, SE.
- Machado, Á. R. et al., 2012, “*Teoria da Usinagem dos Materiais*”. Editora Edgard Blucher LTDA, 2ª Ed., São Paulo.
- Marques, P.V. & Modenesi, P.J., 2006, “*Introdução aos Processos de Soldagem*”. Belo Horizonte.
- Masubuchi, K., 1980, “*Analysis of welded structures*”, Pergamon Press Inc., New York, Estados Unidos.
- Papazoglou, V.J. et al., 1982, “*Residual Stresses Due to Welding: Computer-Aided Analysis of Their Formation and Consequences*”, SNAME Transactions, Vol. 90.
- Rodeiro, P.F., 2002, “*Análise de distribuição de temperaturas e tensões residuais em soldas do tipo ring-weld*”, Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Sattari-Far, I. & Farahani, M.R., 2009, “*Effect of the weld groove shape and pass number on residual stresses in butt welded pipes*”, International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol.86, Issue 11.
- Yegaie, Y.S.; Kermanpur, A. & Shamanian, M., 2010, “*Numerical simulation and experimental investigation of temperature and residual stresses in GTAW with a heat sink process of Monel 400 plates*”, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 210, No. 13.

7. DIREITOS AUTORAIS

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

THERMAL ANALYSIS OF THE WELDING PROCESS IN A RECOVERED AXIS

Matheus Vinícius Linhares Barbosa, matheusvini.eng.mec@gmail.com¹

Ericles Xavier Marques de Araújo, ericlesx@gmail.com¹

Heytell Whitney de Souza Silvério, h.whitney15@hotmail.com¹

Rafael Sena de Andrade, senaengmec@gmail.com¹

Alessandra Gois Luciano de Azevedo, alessandragois@gmail.com¹

¹Universidade Federal de Sergipe, Cidade Universitária Prof. José Aloísio de Campos, Av. Marechal Rondon, s/n, Jd. Rosa Elze, São Cristóvão/SE. CEP: 49100-000.

Abstract: The so-called maintenance welding process is still widely used to prolong the life of machine parts and equipment, being used for restoration of components that have suffered some kind of failure, constituting an alternative to the replacement of the damaged parts, since such part is recovered and can return to use. This type of process is economical for the industry because it reduces forced production stops and also reduces the need for stock, acting quickly and efficiently to make damaged components to work again. Components such as axes are commonly recovered through this process. However, when recovering by welding, the material suffers a localized application of heat, which causes a heterogeneous distribution of temperatures in the component, creating zones of contractions and dilations. This welding-induced temperature field generates residual thermal stresses in the component, which have the potential to cause several problems such as lack of dimensional stability, cracking, embrittlement and fractures. The aim of the present work is to perform a computer thermal analysis of the welding process in a recovered axis using the software called Ansys®, evaluating the distribution and magnitude of the component temperature fields throughout the process simulation. The results indicate a significant thermal influence of the welding at practically all points of the axis at the final instant of the performed simulation.

Keywords: welding, thermal analysis, axes, computer simulation