

ANÁLISE NUMÉRICA DE DISTORÇÕES EM CHAPAS FINAS SOLDADAS POR JUNTA TIPO T ATRAVÉS DE PROCESSO GMAW

Gilmara Machado Rabelo¹
André Issao Sato²

RESUMO

A utilização do processo de soldagem nas indústrias tem se expandido constantemente durante as diversas etapas da produção e, conseqüentemente, a resistência, bem como a qualidade, das peças soldadas deve acompanhar tal avanço na utilização do processo. Portanto, torna-se crucial prevenir a ocorrência de problemas relacionados à soldagem, destacando-se as distorções, para possibilitar o emprego desta tecnologia na manufatura atual e, para tanto, a simples utilização de metodologias práticas para a prevenção e redução das distorções em peças soldadas não garante suficiente controle sobre tais falhas. Com isto, em vista do grande aperfeiçoamento da informática nas últimas décadas, há a possibilidade do desenvolvimento de metodologias computacionais para a simulação das distorções em chapas soldadas através do método de elementos finitos, garantindo uma ferramenta importante para o projetista. Neste trabalho, a simulação foi realizada através de um modelo computacional no programa de elementos finitos Abaqus 6.4-1 e utilizando uma abordagem de análise térmica e mecânica sujeita à gradientes de temperatura. A validação do modelo computacional foi realizada através da comparação com valores obtidos por ensaios práticos de soldagem e compreendeu: a capacidade do modelo representar o surgimento de distorções, a obtenção de comportamento de distorções pertinentes com os resultados práticos e a comparação da intensidade de deformação. Concluiu-se que o modelo atingiu parcialmente os resultados esperados.

Palavras-chave: Análise Computacional, Elementos Finitos, Distorções, Soldagem.

INTRODUÇÃO

Com o aumento da utilização de peças soldadas na indústria moderna e, conseqüentemente, a alta responsabilidade (tanto mecânica como de segurança) destas, associado ao desenvolvimento computacional das últimas décadas, tornou-se possível e necessário uma melhor compreensão das relações entre as variáveis inclusas na soldagem e o surgimento de distorções. Com isto, a possibilidade de se prever a ocorrência ou não de falhas mecânicas através da obtenção dos parâmetros de soldagem (variáveis) através de simulações numéricas auxiliadas com software computacional.

É apropriado destacar que, conforme Asle Zaeem et al. (2007), o processo de soldagem tem sido cada vez mais empregado nas indústrias navais, em reatores nucleares, plantas

¹Mestra pelo Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, gilmararabelo@aluno.utfpr.edu.br;

²Doutor pelo Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, andre.sato@ufop.edu.br (83) 3522.3222

petroquímicas, indústrias aeroespaciais entre outras. Desta forma, o emprego de peças soldadas torna-se, cada vez mais, predominante ao projetista e às indústrias. Ainda segundo Michaleris e DeBiccari (1997), os métodos convencionais de projeto, em sua maioria, ignoram os efeitos da soldagem na integridade das estruturas e das mudanças dimensionais destas. Portanto, para que sejam criados mecanismos no controle ou alívio das distorções, há a necessidade de se programar uma metodologia que simule a ocorrência de distorções devido à soldagem.

Recentes trabalhos quanto à simulação numérica e busca para a predição das deformações na soldagem são concentrados em distorções de chapas paralelas ou grandes estruturas, exemplificando no trabalho de Zubairuddin et al. (2017) que realizaram análise numérica com a soldagem multipasse de junta de chapas paralelas e obtiveram uma correlação de predição de distorção por meio do modelo numérico. Ma et al. (2016) realizaram estudos numéricos quanto à predição de distorções em estruturas sujeitas às restrições temporárias e obtiveram boa correlação entre os resultados numéricos e experimentais.

Quanto ao estudo em grandes estruturas, Lee et al. (2018) desenvolveram uma análise numérica para a predição de distorções com a entrada de parâmetros geométricos e de variáveis de soldagem. Neste trabalho, o foco consistia nas distorções angulares resultantes em soldagem com junta T. Mingyu et al. (2015) buscaram uma simplificação das metodologias de predição de distorções em juntas soldadas, com a análise de elementos do tipo casca e características de compósitos na constituição do cordão de solda. Resultados significativos da predição da deformação plástica foram obtidos e validados experimentalmente.

A necessidade de metodologias simplificadas, utilizando programas computacionais, para a prevenção de distorções em chapas soldadas, garantindo um mecanismo ao qual se utiliza de análises teóricas, como o estudo de esforços térmicos e mecânicos induzidos pela soldagem, ao invés de métodos essencialmente práticos é a principal justificativa para a realização deste trabalho; contudo a finalidade deste estudo não é uma tentativa de se substituir as metodologias empíricas utilizadas na prevenção e redução de distorções, mas sim uma forma de embasar tais conhecimentos através do estudo computacional do comportamento térmico e mecânico das chapas soldadas. Em especial, quanto às juntas do tipo T sem que estejam aplicadas em estruturas.

Este trabalho tem como objetivo principal o estudo do surgimento de tensões térmicas e distorções, utilizando o processo computacional de elementos finitos (da sigla em inglês, FEM), durante o processo de soldagem a arco elétrico com proteção gasosa (da sigla em inglês, GMAW) de chapas de espessuras reduzidas, nas quais os efeitos das distorções são mais

notados. Podendo se destacar, a obtenção de uma modelagem que simule o surgimento de distorções, obtendo assim o comportamento, bem como a intensidade de deformação, compatíveis com os resultados práticos.

A validação do modelo de elementos finitos ocorrerá quando este atender os parâmetros: capacidade do modelo de gerar distorções decorrentes da soldagem, capacidade do modelo de representar o comportamento real de uma chapa soldada e obtenção de valores de distorções próximos do real.

ANÁLISE COMPUTACIONAL

A modelagem matemática da soldagem é complexa devido aos aspectos transitórios e não lineares envolvidos e por este motivo, a modelagem numérica assistida por computador é usualmente aplicada. Os estudos computacionais de tensões térmicas transientes tiveram início na década de 60 e trabalhos concretos se iniciaram com Masubuchi (1980) ao desenvolver programas para a solução de problemas unidimensionais. Com a evolução dos computadores e programas para soluções em elementos finitos vários estudos aprimorados foram realizados para a determinação de tensões residuais e distorções.

A simulação da soldagem, empregada neste trabalho, envolve duas análises separadas. O campo de temperatura é resolvido independentemente da solução mecânica e os resultados desta análise são transportados na forma de carregamentos para o estudo mecânico do processo. Sendo que para determinar o perfil do histórico de temperaturas, uma análise térmica transiente não linear é empregada e uma análise mecânica transiente não linear é utilizada para se determinar o perfil do histórico de tensões conforme apresentado nos trabalhos de Michaleris e DeBiccari (1997) e Asle Zaeem et al. (2007).

Transferência de calor na soldagem

O surgimento das tensões residuais e, conseqüentemente, as distorções de soldagem decorrem do gradiente de temperatura existente na peça; sendo caracterizada pela equação de Fourier, Equação (1), a qual representa a distribuição de temperatura do material em função do tempo. Devido à variação das propriedades do aço em função da temperatura, a equação de Fourier apresenta solução não linear e de difícil resolução.

$$\rho \frac{\partial cT}{\partial t} = Q + \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial cT}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial cT}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial cT}{\partial z} \right) \quad (1)$$

Sendo Q a fonte de calor; c o calor específico; k a condutividade térmica e t o tempo.

As condições de contorno são conhecidas (transferência de calor por condução, convecção e radiação), tornando-se possível abordar a Equação (1) e simplificar a equação da energia para a Equação (2).

$$k_n \frac{\partial cT}{\partial n} + Q + h(T - T_0) + \sigma \varepsilon (T^4 - T_0^4) = 0 \quad (2)$$

Sendo: k_n a condutividade térmica na direção n ; h a coeficiente de convecção; T_0 a temperatura ambiente; σ a constante de Stefan-Boltzmann e ε a emissividade.

Modelo em Elementos Finitos

Para a construção do modelo, foi representado o material de solda previamente adicionado à junta da peça, devido à grande dificuldade na simulação de deposição de material e ao grande esforço computacional exigido. O cordão de solda foi aplicado sobre o lado considerado como Esquerdo (LE), enquanto o lado oposto foi considerado como Direito (LD). A malha foi gerada utilizando elementos lineares com 8 nós preparados para receber as condições de contorno na solução combinado térmica e mecânica. Cada elemento com comprimento de 25 mm. O modelo é representado na Figura 1.

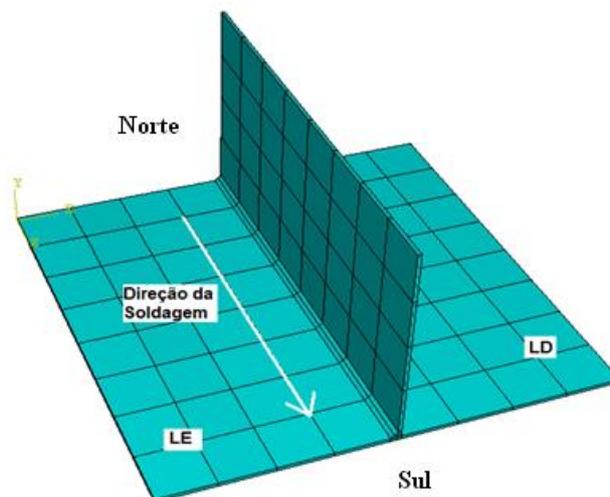


Figura 1 – Modelo de Elementos Finitos
Fonte: Próprio autor.

A determinação das deformações plásticas decorrentes da aplicação de tensão foi baseada no modelo de Ramberg-Osgood. A equação que descreve a deformação plástica do material pode ser descrita em função da tensão aplicada conforme Equação 3.

$$\varepsilon = \left(\frac{\sigma}{k}\right)^{1/n} \quad (3)$$

Onde n adquire valor de 0,26 e k de 542,81 N/mm² para aços baixo carbono.

O limite de escoamento adotado foi de 200 N/mm² e obteve-se a curva de deformação plástica em função da tensão através da Equação (3), expressa na Figura 2. Esta curva foi configurada no processo de inicialização das simulações no *software Abaqus*®.

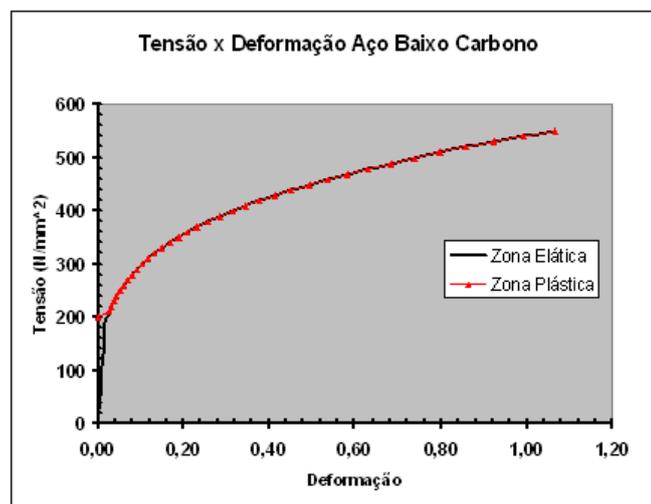


Figura 2 – Gráfico Tensão x Deformação para Aço Baixo Carbono
Fonte: Próprio Autor

As propriedades físicas do material foram expressas na Tabela 1.

Tabela 1 - Propriedades físicas do material

| | |
|---|-----------------------|
| Densidade (kg/mm ³) | 7,85x10 ⁻⁶ |
| Expansão térmica (K ⁻¹) | 1.5x10 ⁻⁵ |
| Condutividade térmica (W/mm.K) | 0.03 |
| Calor específico (J/Kg.K) | 500 |
| Modulo de elasticidade (N/mm ²) | 210000 |
| Coefficiente de Poisson | 0.3 |

Coeficientes de convecção

A condução de calor por convecção presente no sistema pode ser considerada como natural (ou livre). O coeficiente de convecção (\bar{h}) do modelo deve ser dividido em duas

formulações: placa plana horizontal e placa plana vertical. Sendo considerado o coeficiente de convecção médio, obtido a partir da equação (4).

$$\bar{h} = \frac{\overline{Nu}_L L}{k} \quad (4)$$

Para a placa plana horizontal, o número de Nusselt (\overline{Nu}_L) é função do número de Rayleigh (Ra_L) através da formulação nas equações (5):

$$\begin{aligned} \overline{Nu}_L &= 0,54 Ra_L^{\frac{1}{4}} (10^4 \leq Ra_L \leq 10^7) \\ \overline{Nu}_L &= 0,15 Ra_L^{\frac{1}{3}} (10^7 \leq Ra_L \leq 10^{11}) \end{aligned} \quad (5)$$

Onde o número de Rayleigh é dado por (6):

$$Ra_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\alpha\nu} \quad (6)$$

Sendo g a aceleração da gravidade (m/s^2), β = coeficiente de expansão (K^{-1}), T_s a temperatura da superfície (K), T_∞ a temperatura do meio (K), α a difusividade térmica (m^2/s), ν a viscosidade cinemática (m^2/s), L o comprimento característico ($L = \text{Área da superfície} / \text{Perímetro}$) (m) e k a condutividade térmica (W/m K).

Para a placa plana vertical, Nusselt é função de Rayleigh através da formulação na Equação (7):

$$\overline{Nu}_L = 0,68 + \frac{0,54 Ra_L^{\frac{1}{4}}}{\left[1 + (0,49/Pr)^{\frac{9}{16}}\right]^{\frac{4}{9}}} (Ra_L \leq 10^9) \quad (7)$$

Onde Pr é o número de Prandtl.

O valor adotado para o coeficiente de convecção para placa plana horizontal foi o valor médio da Figura 3. Sendo este igual a $11,9 \times 10^{-6}$ W/mm²K. O valor adotado para o coeficiente de convecção da placa plana vertical foi o valor médio da Figura 4. Sendo este igual a $9,9 \times 10^{-6}$ W/mm² K.

Abordagem do processo térmico e mecânico

Para o processo térmico de soldagem, optou-se por uma abordagem simplificadora, onde o cordão de solda foi previamente representado na junta e, posteriormente, dividido em oito partes iguais, conforme a Figura 5, onde foi imposta uma elevação da temperatura dos cordões, durante uma fração do tempo de soldagem para cada parte, até a temperatura limite de 1510° C e depois deixado resfriar livremente; neste instante, o cordão seguinte sofreria o aumento de temperatura. O resfriamento do sistema ocorre por meio de transferência de calor por convecção natural e radiação; sendo esta última parcela considerada como sendo 20% da perda de calor total da peça e concentrada somente nos cordões de solda aquecidos.

Cada pontuação em amarelo na Figura representa um nó que delimita o elemento do modelo numérico, cada volume representado é aquecido uniformemente de Temperatura ambiente até a temperatura máxima especificada pela simulação e, em seguida, permite-se que o modelo se resfrie por meio de convecção natural.

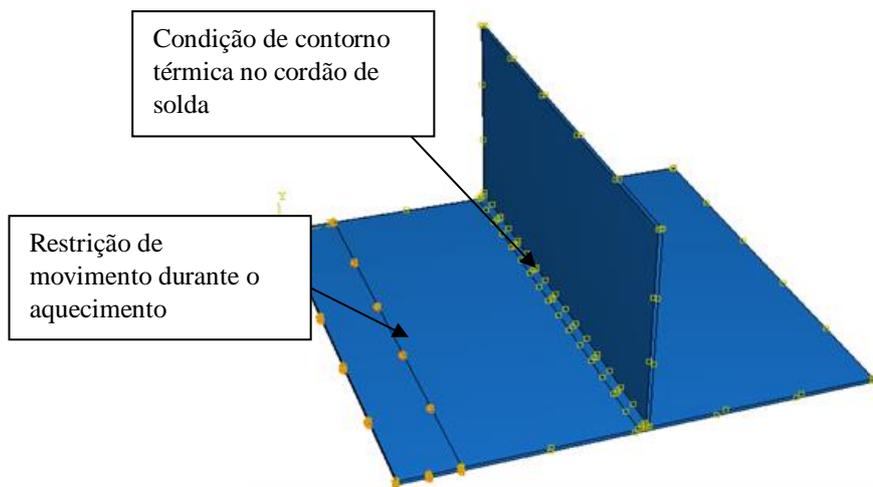


Figura 5 – Imposição de temperatura e restrição no passo inicial
Fonte: Próprio autor

O tempo total de soldagem calculado foi de 34,3 segundos e, dessa forma, cada passo teria a imposição de temperatura por 4,3 segundos. Sendo que, durante os oito primeiros passos as chapas estão presas pela extremidade do lado esquerdo, como pode ser observado na Figura 5.

Após esses oito passos, o modelo é deixado resfriar livremente durante um período de 10000 segundos. Nos ensaios experimentais, as chapas são retiradas da restrição inicial e deixadas soltas durante o resfriamento. Contudo, a simulação não permite a análise de um corpo sem restrições e, portanto, há a necessidade de impor uma nova restrição sobre o modelo, como

demonstrado na Figura 6. Essa condição reproduz o apoio da peça real sobre uma superfície e garante o mínimo de interferência na simulação.

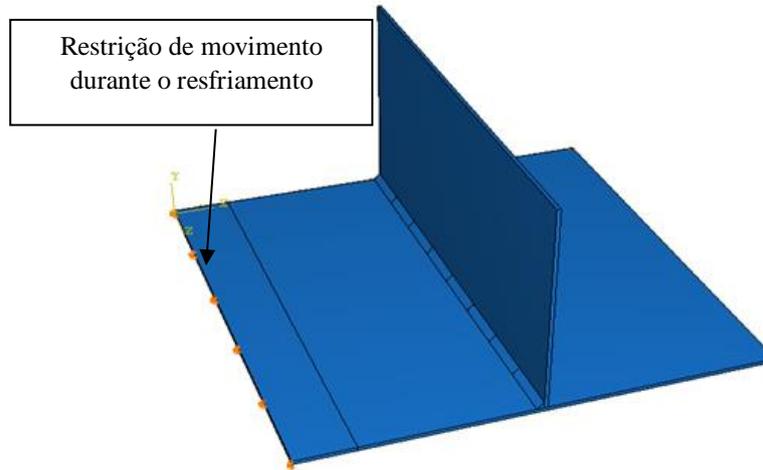


Figura 6 – Imposição da restrição para o resfriamento
Fonte: Próprio autor

Para comparar os resultados foram soldados corpos de provas no laboratório, realizado medições das máximas distorções apresentadas pelos ensaios e feito uma análise do comportamento das distorções na soldagem de juntas tipo T.

Os parâmetros de soldagem foram: corrente de 70 A, voltagem de 19 V, velocidade de soldagem de 5,83 mm/s, gás de proteção composto de 80% Argônio e 20% Gás Carbônico, eletrodo de diâmetro de 1,0 mm. Os corpos de prova foram restringidos (através de grampos) no lado esquerdo e soldados. Após a soldagem, a restrição foi retirada, aproximadamente, um minuto depois do processo e a peça foi deixada resfriar livremente em um ambiente com média de temperatura de 25 °C.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As distorções obtidas, através da soldagem dos corpos de prova e do modelo de elementos finitos, nas chapas verticais foram de intensidade baixa e, portanto, para este trabalho, preferiu-se estudar apenas a chapa horizontal. Contudo, sugere-se um estudo mais aprofundado do comportamento da chapa vertical. As Figuras 7 e 8 representam o fluxo de calor no cordão de solda e a distribuição final das tensões no modelo, respectivamente. Observa-se que a concentração de tensões ocorre no cordão de solda e, principalmente, nas restrições de movimento impostas na simulação.

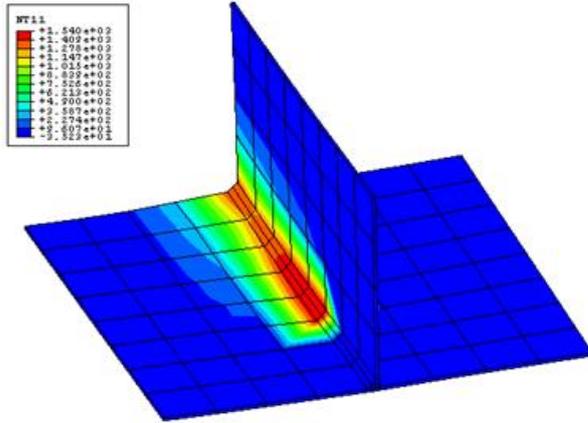


Figura 7 – Simulação do movimento do arco de soldagem
Fonte: Próprio autor

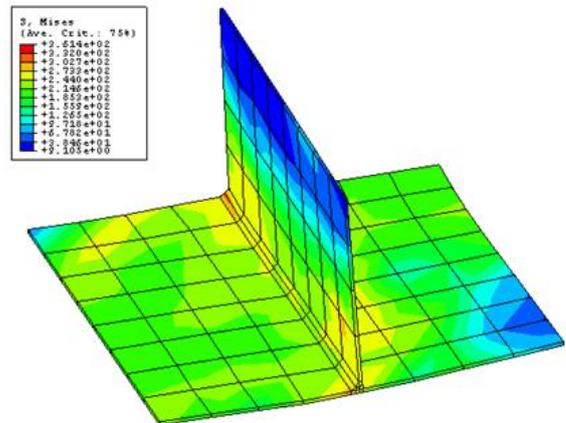


Figura 8 – Distribuição de tensões no modelo
Fonte: Próprio autor

A Figura 9 apresenta as distorções transversais no modelo, a vista representada foi da extremidade sul do modelo e nota-se uma distorção negativa no lado esquerdo resultante da contração final da terminação do cordão de solda. Sendo esta terminação a última parte da junta a receber aquecimento e resfriar. A Figura 10 representa, respectivamente, os nós estudados, designados de N e a intensidade das distorções (Dist.) em milímetros. Pelas simulações numéricas realizadas, observa-se que o valor máximo de distorção no modelo foi de 21,3 mm, no lado direito e extremidade sul (LD - Sul).

A Figura 11 representa as distorções longitudinais no modelo aumentada em duas vezes e a vista representada foi do lado direito do modelo, toda a lateral direita da chapa sobre elevação e com intensidade crescente para a parcela final da junta. Na Figura 12 são apresentados, respectivamente, os nós estudados e a intensidade das distorções. As distorções longitudinais foram, todas, de magnitude positiva e se formaram no lado contrário ao cordão de solda.

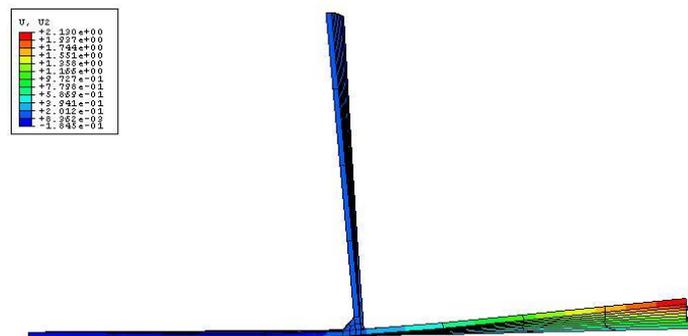


Figura 9 – Distorção transversal aumentada cinco vezes (Extremidade Sul)
Fonte: Próprio autor

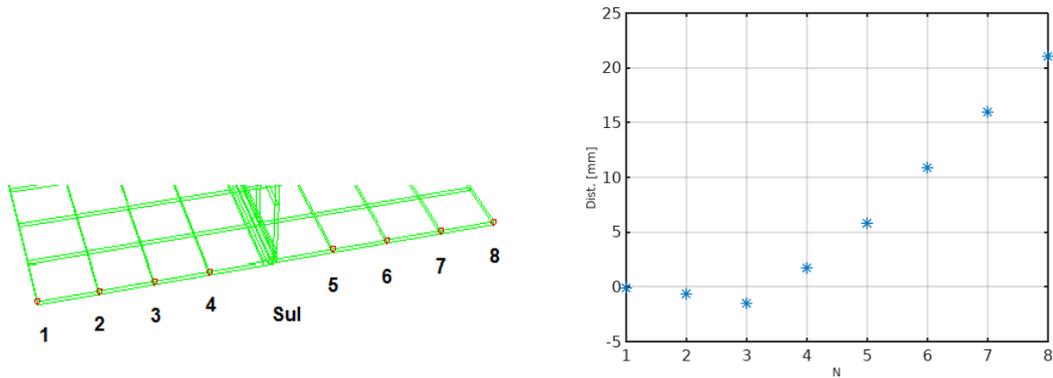


Figura 10 – Posição dos nós estudados na direção transversal
Fonte: Próprio autor

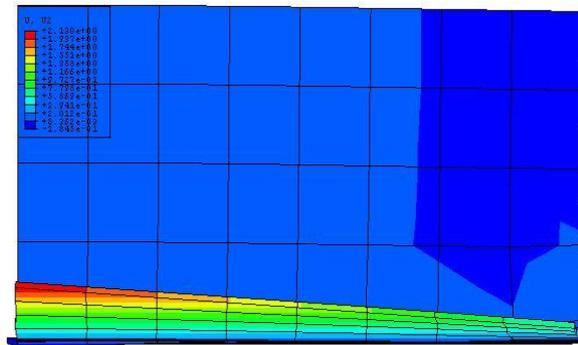


Figura 11 – Distorção Longitudinal aumentada cinco vezes (Lado Direito)
Fonte: Próprio autor

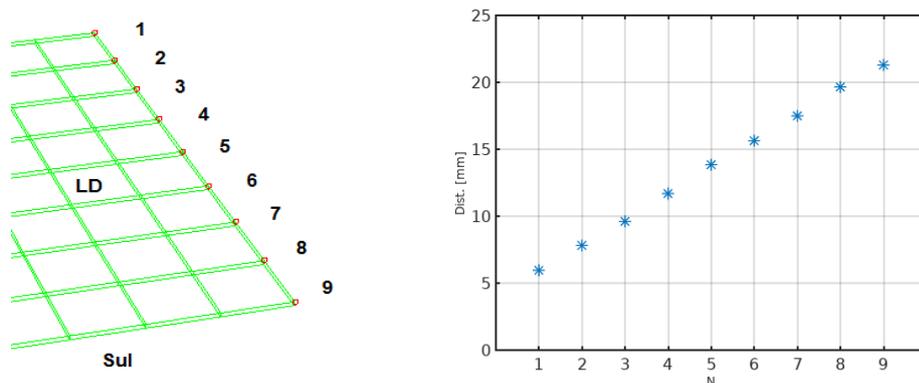


Figura 12 – Posição dos nós estudados na direção longitudinal
Fonte: Próprio autor

As Figuras 13 e 14 consistem nos resultados experimentais das soldagens dos corpos de prova. Sendo representadas, respectivamente, as distorções transversais e longitudinais. Nota-se que o comportamento da peça soldada se assemelha ao do modelo numérico simulado, com elevação do lado oposto ao cordão de solda (LD) e, principalmente, na porção final do cordão de solda.

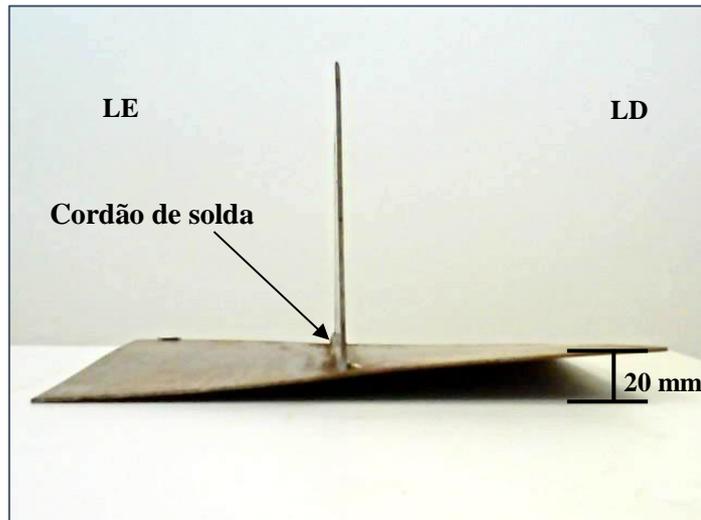


Figura 13 – Distorções transversais do ensaio prático (Extremidade Sul)
Fonte: Próprio autor

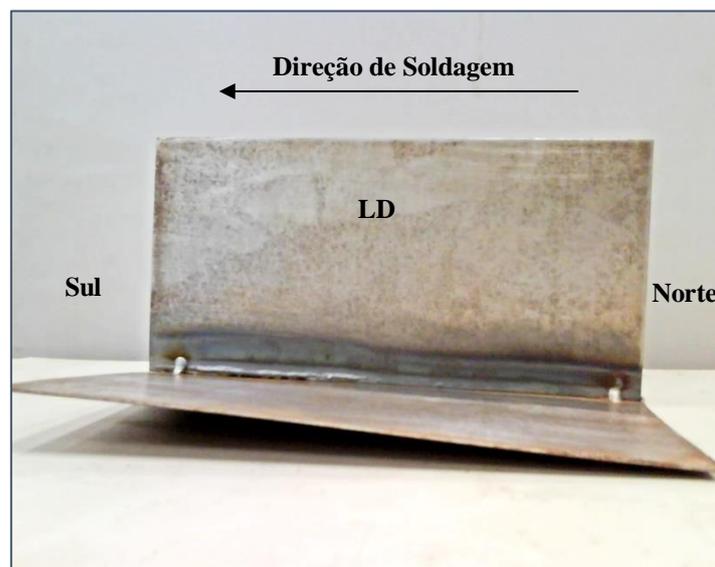


Figura 14 – Distorções longitudinais do ensaio prático
Fonte: Próprio autor

A máxima distorção obtida durante a soldagem dos corpos de prova foi de, aproximadamente, 20 mm no lado direito e extremidade sul, conforme observado na Figura 13. A análise foi repetida em outros 9 corpos de prova, com comportamento semelhante ao apresentado anteriormente mas com magnitudes de deformação máxima que divergiam e ponderou-se, por conseguinte, uma incerteza experimental de ± 2 mm.

CONCLUSÃO

O modelo de elementos finitos, utilizando uma abordagem simplificadora, obteve resultados positivos quanto à capacidade de simular distorções decorrentes de um gradiente de temperatura e à reprodução do padrão de distorção que uma chapa fina soldada em junta tipo T apresenta. Este padrão é caracterizado pela alta distorção no lado direito e extremidade sul (oposta ao ponto de início da soldagem). A não deposição de material durante a soldagem permitiu simplificação da modelagem numérica sem comprometimento dos resultados finais.

REFERÊNCIAS

- ASLE ZAEEM, M; NAMI, M.R; KADIVAR, M. H. **Prediction of welding buckling distortion in a thin wall aluminum T joint**, Computational Materials Science, vol.38, p.588-594, 2007.
- JUNG, H; TSAI, C.L. **Fundamental Studies on the Effect of Distortion Control Plans on Angular Distortion in Fillet Welded T-Joint**. Welding Journal, Miami, vol. n.7, p.213s-223s, jul. 2004.
- KIM, M.; KANG, M.; CHUNG, H. **Simplified welding distortion analysis for fillet welding using composite shell elements**. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, v. 7, 2015.
- LEE, J. M.; SEO, H. D.; CHUNG, H. **Efficient welding distortion analysis method for large welded structures**. Journal of Materials Processing Technology, v. 256, 2018.
- MA, N.; HUANG, H.; YIN, X.; GUO, E. N. **Welding distortion and inherent deformation under temporary tacking and its released states**. Science and Technology of Welding and Joining, v. 21, n. 5, p. 389-396, 2016.
- MAKHNENKO, V.I. **Thermal and deformation process in weld heat-affected zone in welding**, Kiev: Naukova Dumka Publishers, 1976.
- MANDAL, N. R. **Aluminum welding**. Elsevier Science, 2001. ISBN 9781855735972.
- MASUBUCHI, K. **Analysis of Welded Structures – Residual Stresses, Distortion, and their Consequences**. Oxford: Pergamon Press Ltda. 1980. p 642. ISBN 0-08-0261299.
- MICHALERIS, P; DeBICCARI, A. **Prediction of Welding Distortion**, Welding Journal, Miami, vol.76, n.4, p172s-181s, abr. 1997.
- RODEIRO, P.F. **Análise de temperaturas e tensões residuais em soldas do tipo ringweld**. 2002. **Tese (Mestrado)** - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo Brasil.
- ZUBAIRUDDIN, M.; ALBERT, S. K.; VASUDEVAN, M.; MAHADEVAN, S.; CHAUDHARI, V.; SURI, V. K. **Numerical simulation of multi-pass GTA welding of grade 91 steel**. Journal of Manufacturing Processes, 2017.