

Análise numérica de distorções em chapas finas soldadas por junta tipo t através de processo GMAW**Numerical analysis of distortions in fin sheets welded by t-joint GMAW process**

DOI:10.34117/bjdv6n7-192

Recebimento dos originais: 03/06/2020

Aceitação para publicação: 09/07/2020

Gilmara Machado Rabelo

Doutoranda em Engenharia Mecânica e de Materiais pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Instituição: Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Endereço: R. Deputado Heitor Alencar Furtado, 5000 – Ecoville, Curitiba – PR, Brasil

E-mail: gilmara.rabelo1@gmail.com

André Issao Sato

Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual de Campinas

Instituição: Universidade Federal do Oeste da Bahia

Endereço: Av. Dr. Manoel Novaes, 1064 – Centro, Bom Jesus da Lapa – BA, Brasil.

E-mail: andre.sato@ufob.edu.br

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. Neste trabalho, a simulação foi realizada através de um modelo computacional no programa de elementos finitos Abaqus® 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 os resultados esperados.

Palavras-chave: Análise computacional, elementos finitos, distorções, soldagem.**ABSTRACT**

The use of the welding process in industries has been constantly expanding during the various stages of production and, consequently, the resistance as well as the quality of the welded parts must accompany such progress. Therefore, it is crucial to prevent the occurrence of problems related to welding, such as distortions, to enable the use of this technology in the current manufacture and the simple use of practical methodologies for the prevention and reduction of distortions in welded parts does not guarantee sufficient control over such failures. In this work, the simulation was performed using a computational model in the finite element program Abaqus® and using a thermal and

mechanical analysis approach subject to temperature gradients. The validation of the computational model was carried out by comparing results obtained by experimental welding tests and comprised: the model's ability to represent the appearance of distortions, the achievement of relevant distortion behavior with the practical results and the comparison of the deformation intensity. It concluded that the model achieved the expected results.

Keywords: Computational analysis, finite elements, distortions, welding.

1 INTRODUÇÃO

Segundo Manual ESAB (2005), o processo de soldagem com arco elétrico e gás de proteção (processo MIG/MAG ou GMAW) consiste na união de duas peças através da deposição de um consumível na forma de arame, o qual se funde quando um arco elétrico é estabelecido entre a poça de fusão e o consumível; sendo que este é constantemente fundido e depositado na poça de fusão protegida por um gás inerte, no processo MIG, e/ou ativo, no processo MAG. Os constantes avanços e melhorias da soldagem MIG/MAG tornaram o processo aplicável à soldagem de todos os metais comercialmente importantes, como a maioria dos aços, grande quantidade de ligas de alumínio, aços inoxidáveis, ligas de cobre e outros.

Contudo, para a obtenção de resultados satisfatórios nas peças soldadas, o processo de soldagem envolve uma série de variáveis, as quais têm (individualmente ou em conjunto) grande importância nas propriedades químicas, físicas e mecânicas da peça. Segundo Goldak e Akhlaghi (2005), dentre os diversos problemas mecânicos que a peça soldada está sujeita, destacam-se: trincas, buckling e distorções. Muitas pesquisas, principalmente no campo prático, foram realizadas para se obter mecanismos e conhecimentos empíricos que reduzissem ou controlassem a ocorrência de falhas mecânicas em peças soldadas. Tal fato permitiu a criação de metodologias para controle de distorções decorrentes do processo de soldagem, conforme estudados por Anderson (2003) e The Lincoln Electric Company (2001).

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 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 multi passe 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 varáveis 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.

A falta de pesquisa, análises computacionais dos esforços induzidos pela soldagem, no âmbito nacional, bem como o crescimento da utilização do processo de soldagem nas indústrias e, conseqüentemente, a necessidade de melhores estudos quanto às distorções nas soldas, são também justificativas para esta pesquisa.

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.

2 PROCESSO DE SOLDAGEM

A soldagem pode ser estudada sob o contexto de processo mecânico de união entre peças, mas, também, como um processo térmico que gera gradientes de temperatura durante e após a realização da solda. Para compreender o surgimento de tensões térmicas, tensões residuais e distorções tornam-se necessário abordar alguns conceitos fundamentais.

2.1 SOLDAGEM COMO PROCESSO MECÂNICO

Mandal (2001) define soldagem como um processo de união onde duas partes separadas podem ser unidas em uma peça. Idealmente, a soldagem deve proporcionar continuidade completa entre as peças unidas e a junta soldada deve ser indistinguível do material adjacente. Essencialmente, todos os processos de soldagem devem satisfazer quatro requisitos básicos:

- Uma fonte de energia para a união por fusão e pressão.
- Mecanismo para a remoção de contaminação superficial das faces da junta.
- Proteção da junta contra contaminantes atmosféricos.
- Controle da metalurgia da solda.

2.2 SOLDAGEM COMO PROCESSO TÉRMICO

Compreender a natureza do processo de soldagem é de vital importância, quando se deseja analisar as distorções e tensões residuais resultantes em peças soldadas, pois estas falhas estão intimamente relacionadas aos efeitos produzidos pela expansão e contração volumétrica, e deformações elásticas, plásticas e falhas repentinas; tais fatores são resultantes da variação de temperatura, no metal base e de adição, durante o processo térmico de soldagem. Portanto a análise térmica do processo deve ser realizada, quando se deseja prever a ocorrência, ou não, de distorções e estudos fundamentais podem ser destacados no pioneirismo das pesquisas em distorções de soldagem, como Asle Zaeem (2007), Michaleris e DeBiccari (1997), Rodeiro (2002) e Jung e Tsai (2004).

Conforme definido por Makhnenko (1976) em estudo fundamentador do processo de soldagem, denomina-se processo térmico, todo processo que cause mudança de temperatura na peça de trabalho, bem como no material de adição, no caso da soldagem: devido à fonte de calor, propagação de calor na peça de trabalho e sua dissipação para o meio que o rodeia. A mudança de temperatura provoca transformações estruturais, mudanças volumétricas, surgimento de tensões elásticas e plásticas etc. Afetando, decisivamente, a qualidade da junta soldada e da estrutura. Sendo a soldagem de passe simples denominado de ciclo térmico simples, onde as variáveis principais são: temperatura máxima, velocidade de aquecimento e resfriamento, e tempo de exposição à temperatura máxima.

2.3 TENSÕES TÉRMICAS E RESIDUAIS, E DISTORÇÕES

Para Masubuchi (1980), quando o metal de adição se funde com o metal base, este está em sua forma expandida máxima. Devido ao resfriamento da solda, a poça de fusão solidifica-se e tende a contrair-se a um volume que ocuparia em baixas temperaturas, porém, esta contração é restringida pelo metal adjacente ao cordão de solda. Tal restrição provoca uma tensão entre a solda e o metal adjacente, denominada de tensão térmica, pois é resultante do ciclo térmico da soldagem, ao invés de um fator externo. As tensões térmicas que ultrapassam o limite de resistência elástica do material provocam deformações permanentes na peça as quais resultam no alívio das tensões internas e são denominadas de deformações plásticas. Enquanto as tensões que não atingem o limite elástico permanecem atuando entre a solda e o metal adjacente mesmo sem carregamentos externos e são denominadas de tensões residuais, as quais provocam deformações elásticas na peça.

O aparecimento das distorções na peça soldada sofre influência direta das deformações plásticas resultantes das tensões térmicas de soldagem e devido ao efeito de fluência do material, entre outros. Existem duas causas para os erros geométricos em estruturas soldadas. A primeira é a contração local devido ao rápido aquecimento e resfriamento na região soldada. Basicamente, encolhimento local pode ser dividido em três categorias: Redução longitudinal, transversal e distorção angular. Estes três tipos de deformações podem ser considerados deformações inerentes ao processo. Eles são extremamente influenciados pelo calor aplicado, profundidade de penetração, largura da chapa e tipo de junta. A segunda é a folga na região de raiz da solda e desalinhamento produzido antes ou durante o processo de soldagem. Fatores que contribuem para estes são erros geométricos iniciais, sequência de soldagem, posicionamento, restrições e “ponteamto”. Todos estes fatores devem ser levados em consideração, caso se deseje, precisamente e de maneira viável, prever a ocorrência de distorções em estruturas soldadas.

Pode-se afirmar com as pesquisas de Mandal (2001) que a magnitude das tensões térmicas e residuais, e distorções são função de diversos parâmetros do processo de soldagem, do material e da estrutura a ser soldada, e da relação entre os parâmetros de soldagem, juntamente com as geometrias de juntas. Esses parâmetros são as variáveis do processo que controlam a taxa de deposição e a qualidade da solda, sendo elas:

- Corrente de soldagem.
- Voltagem do arco.
- Velocidade de soldagem.
- Velocidade de alimentação da soldagem.
- Extensão do eletrodo.
- Diâmetro do eletrodo.
- Geometria da junta.

3 SIMULAÇÃO NA SOLDAGEM

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.

Estudos da energia introduzida pelo arco durante o processo de soldagem também foram desenvolvidos auxiliando o desenvolvimento de modelos melhores por Kamala e Goldak (1993), nos quais, dado a natureza do processo de soldagem, a solução computacional deve ser obtida utilizando a análise combinada térmica e mecânica. Contudo, devido à complexidade da modelagem empregada para tal análise, pode ser adotada a hipótese de o fenômeno térmico predominar sobre o fenômeno mecânico, ou seja, as deformações não causariam uma modificação das temperaturas, mas apenas as temperaturas influenciariam o campo de deformações.

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).

A solução, da análise térmica transiente não linear, envolve um somatório de vários pequenos incrementos temporais. A solução durante um incremento de tempo é obtida utilizando-se a solução do incremento anterior fixado como condição inicial. A subsequente análise de tensões é baseada em três formulações básicas, a de Lagrange, a de Euler e a formulação em regime permanente; sendo esta a mais utilizada, atualmente, para a análise de tensões de origens térmicas, onde se considera a soldagem como um processo quase-estático, em uma ordem de Lagrange.

Dado a natureza do processo de soldagem, variáveis adicionais estão presentes na simulação do processo, como as propriedades do material soldado. Sendo a escolha da análise computacional para a simulação de distorções, bem como a precisão dos resultados obtidos, é limitada pelo custo computacional, para a realização da simulação, a necessidade e a importância estrutural da soldagem.

3.1 TRANSFERÊNCIA DE CALOR NA SOLDAGEM

A transferência de calor na solda, na maioria dos estudos apresentados anteriormente, é considerada concordante com as leis de condução e radiação de calor, apesar da convecção no material líquido exercer certa influência na transferência de calor perto da poça de fusão.

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).

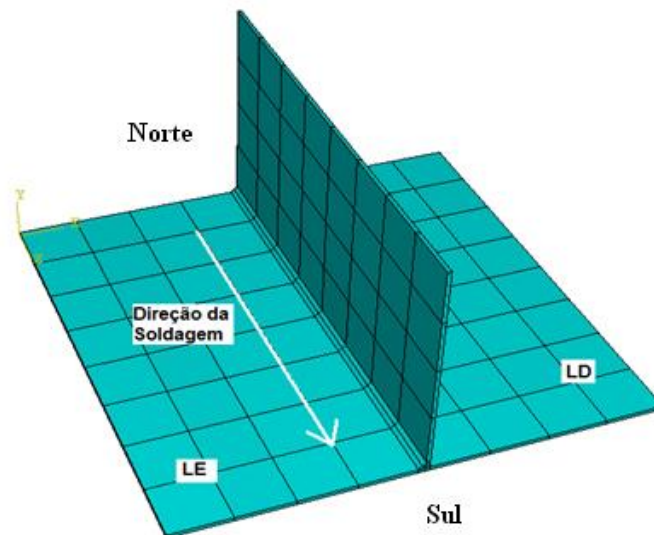
$$k_n \frac{\partial cT}{\partial n} + Q + h(T - T_0) + \sigma \varepsilon (T^4 - T_0^4) = 0 \quad (2)$$

Sendo k_n a condutividade térmica na direção n , h a coeficiente de convecção, T_0 a temperatura ambiente, s a constante de Stefan-Boltzmann e e a emissividade.

3.2 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 e 1,2 mm de espessura (perfazendo um total de 200x200x1,2 mm). O modelo é representado na Figura 1.

Figura 1 – Modelo de Elementos Finitos



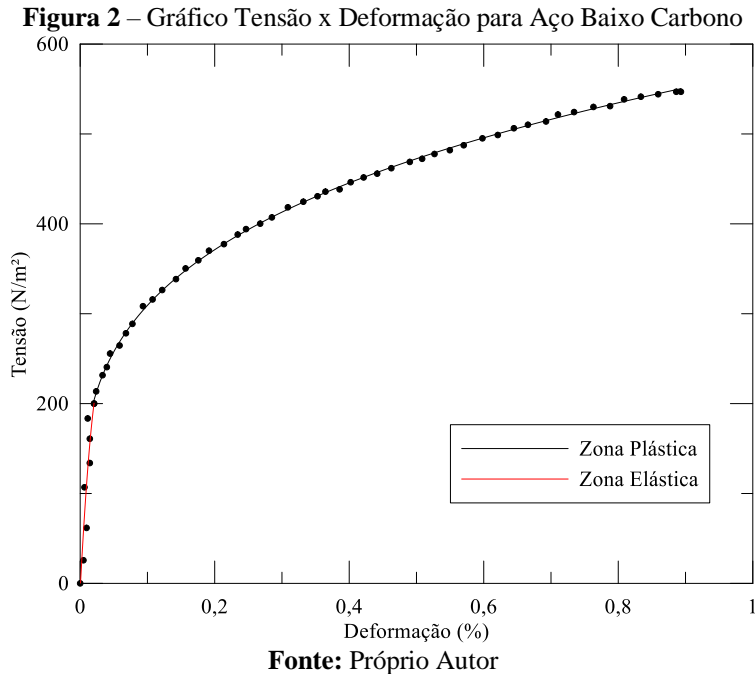
Fonte: Próprio autor.

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*®.



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

Fonte: Próprio Autor

3.3 COEFICIENTES DE CONVECCÃO

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).

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

Onde o número de Rayleigh é dado pela Equação (6).

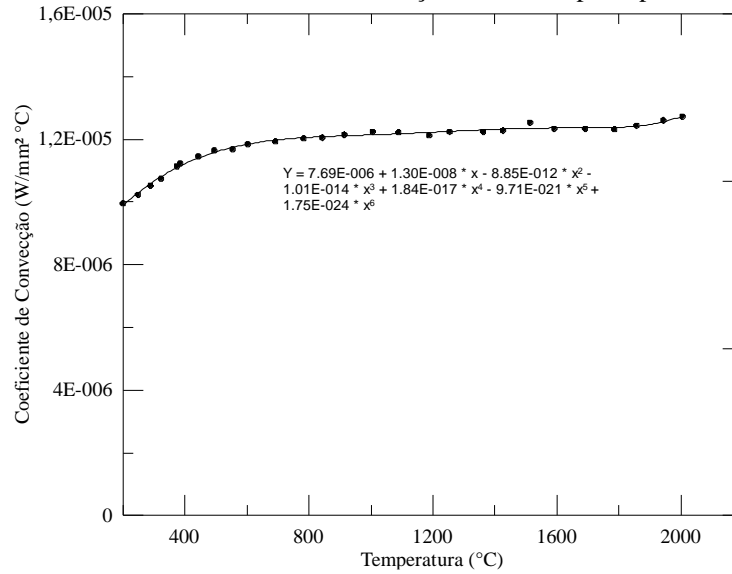
$$Ra_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\alpha\nu} \quad (6)$$

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/mK).

Os valores do coeficiente de convecção médio foram representados graficamente através de uma planilha de cálculo. Estes valores estão expressos na Figura 3.

Para a placa plana vertical, Nusselt é função de Rayleigh através da formulação na Equação (7) e, novamente, os valores do coeficiente de convecção médio foram representados graficamente. Estes valores estão expressos na Figura 4.

Figura 3 – Gráfico do coeficiente de convecção sobre uma placa plana horizontal

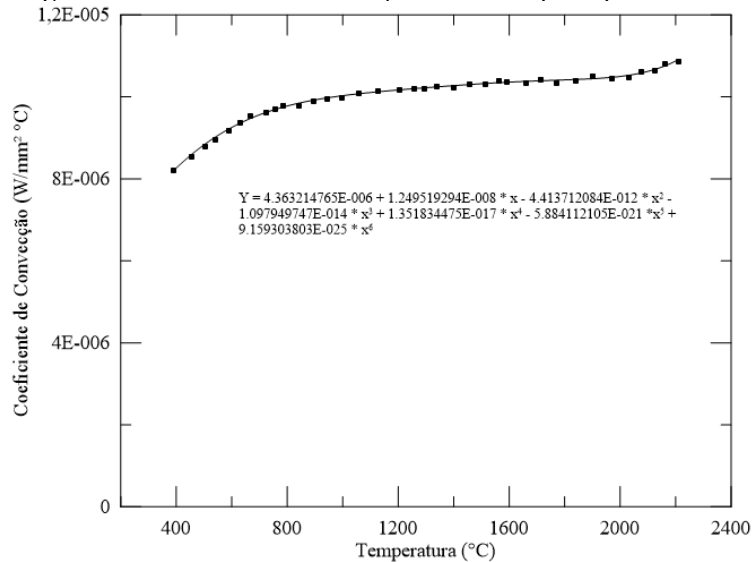


Fonte: Próprio autor

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

Onde Pr é o número de Prandtl.

Figura 4 – Coeficiente de convecção sobre uma placa plana vertical



Fonte: Próprio autor

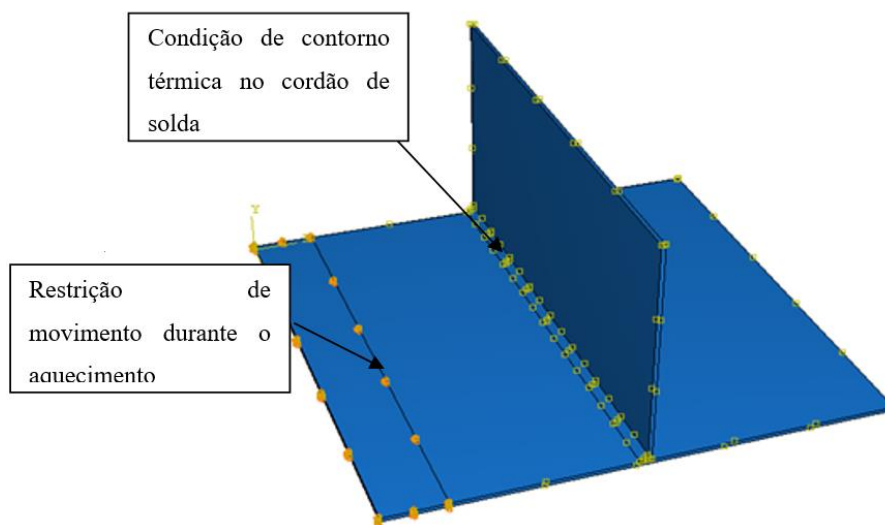
O valor adotado para o coeficiente de convecção para placa plana horizontal foi o valor médio da Figura 3. Sendo este igual a $11,9 \times 10^{-6} \text{ W/mm}^2\text{K}$. O valor adotado para o coeficiente de convecção da placa plana vertical foi o valor médio da Figura 4. Sendo este igual a $9,9 \times 10^{-6} \text{ W/mm}^2\text{K}$.

3.4 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



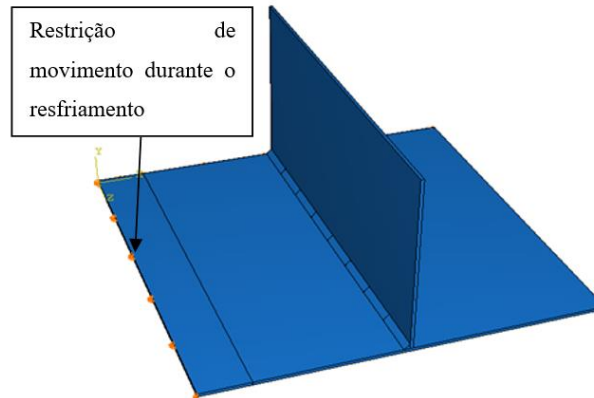
Fonte: Próprio autor

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

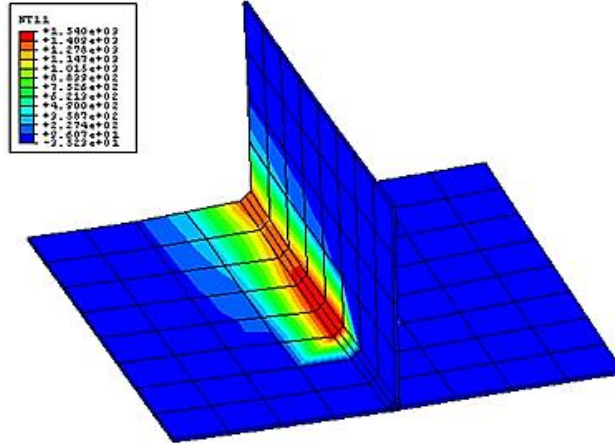
Para comparar os resultados foram soldados corpos de provas no laboratório, realizado medições das máximas distorções apresentadas pelos ensaios e feito uma análise do comportamento das distorções na soldagem de juntas tipo T.

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.

4 RESULTADOS

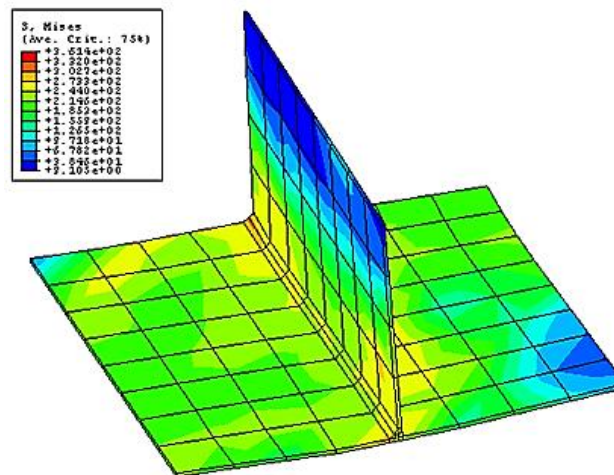
As distorções obtidas, através da soldagem dos corpos de prova e do modelo de elementos finitos, nas chapas verticais foram de intensidade baixa e, portanto, para este trabalho, preferiu-se estudar apenas a chapa horizontal. Contudo, sugere-se um estudo mais aprofundado do comportamento da chapa vertical. 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

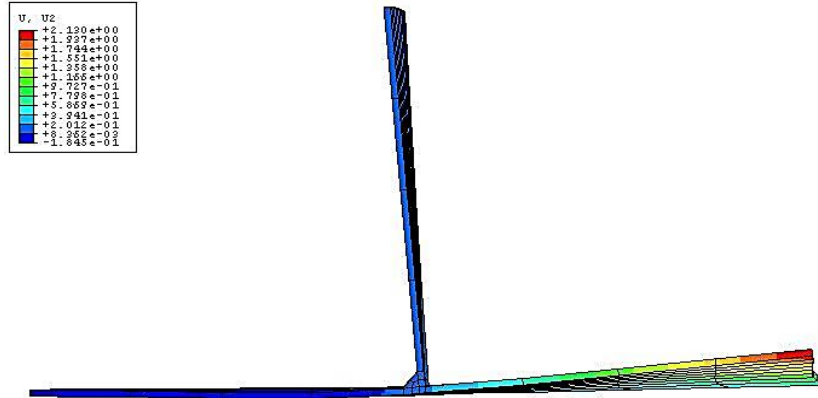
Figura 8 – Distribuição de tensões no modelo



Fonte: Próprio autor

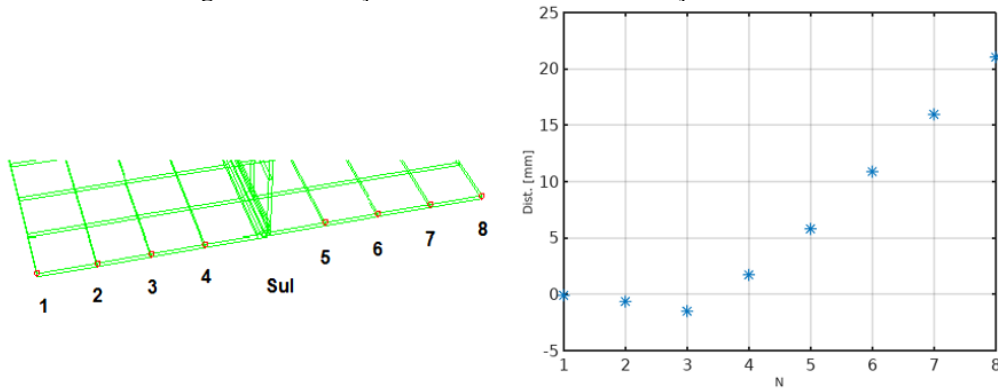
A Figura 9 apresenta as distorções transversais no modelo, a vista representada foi da extremidade sul do modelo e nota-se uma distorção negativa no lado esquerdo resultante da contração final da terminação do cordão de solda. Sendo esta terminação a última parte da junta a receber aquecimento e resfriar. 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).

Figura 9 – Distorção transversal aumentada cinco vezes (Extremidade Sul)



Fonte: Próprio autor

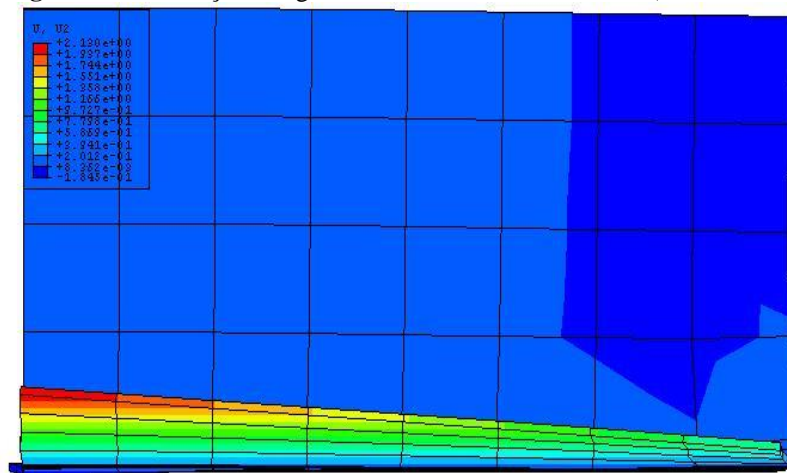
Figura 10 – Posição dos nós estudados na direção transversal



Fonte: Próprio autor

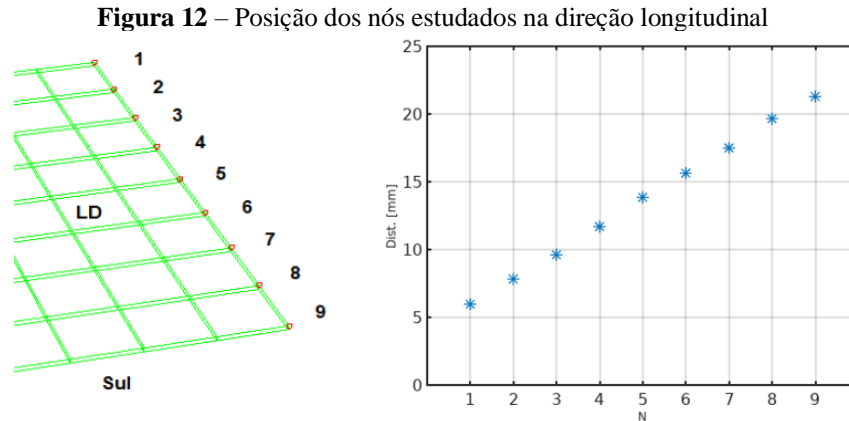
A Figura 11 representa as distorções longitudinais no modelo aumentada em duas vezes e a vista representada foi do lado direito do modelo, toda a lateral direita da chapa sobre elevação e com intensidade crescente para a parcela final da junta.

Figura 11 – Distorção Longitudinal aumentada cinco vezes (Lado Direito)



Fonte: Próprio autor

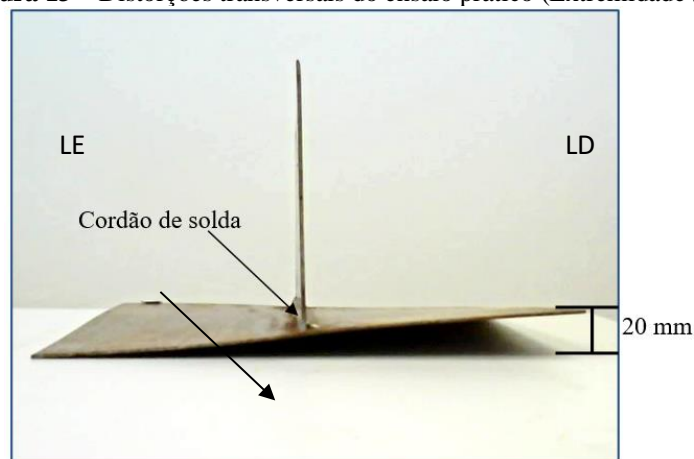
Na Figura 12 são apresentados, respectivamente, os nós estudados e a intensidade das distorções. As distorções longitudinais foram, todas, de magnitude positiva e se formaram no lado contrário ao cordão de solda.



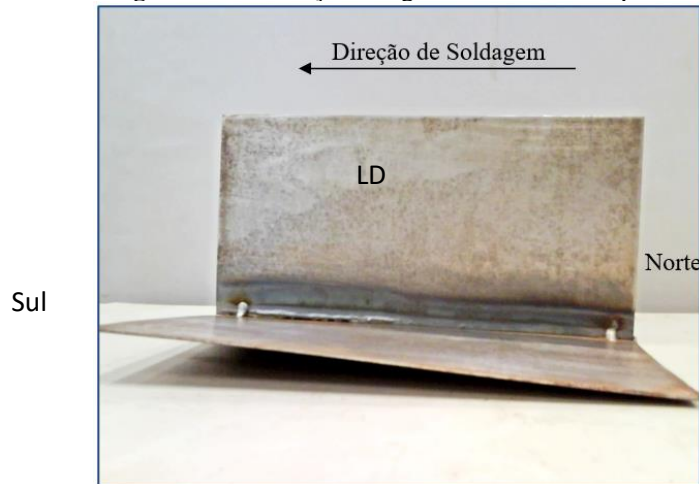
Fonte: Próprio autor

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. A chapa tinha da base tinha 200x200x1,2 mm e a chapa em T tinha 200x100x1,2 mm.

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 ± 5 mm.

5 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). Contudo, o modelo não reproduziu a intensidade máxima de distorção apresentada pelos corpos de prova; resultados mais acurados, quanto à intensidade de distorções, poderiam ser alcançados através de um refinamento do modelo utilizado e cabe observar que alguns erros da simulação estão relacionados com o processo de restrição diferente dos corpos de prova experimentais. A não deposição de material durante a soldagem permitiu simplificação da modelagem numérica sem comprometimento dos resultados.

REFERÊNCIAS

- ANDERSON, T. THERMAL DISTORTION IN ALUMINUM WELDED STRUCTURES, WELDING JOURNAL, MIAMI, VOL. 82, N. 2, P. 28-30, 2003.
- 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, N. 4, P. 588-594, 2007.
- GOLDAK, J.A; AKHLAGHI, M. COMPUTATIONAL WELDING MECHANICS. NOVA IORQUE: SPRINGER, 2005.
- 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.213-223, JUL. 2004.
- KAMALA, V.; GOLDAK, J. A. ERROR DUE TO TWO DIMENSIONAL APPROXIMATION IN HEAT TRANSFER ANALYSIS OF WELDS. WELDING RESEARCH SUPPLEMENT, P. 440-446, SET., 1993.
- 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, N. 3, P. 452-465, MAI., 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, P. 36-50, JUN., 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., 2013. ISBN 0-08-0261299.
- MICHALERIS, P; DEBICCARI, A. PREDICTION OF WELDING DISTORTION, WELDING JOURNAL, MIAMI, VOL. 76, N. 4, P. 172-181, ABR., 1997.
- RODEIRO, P.F. ANÁLISE DE TEMPERATURAS E TENSÕES RESIDUAIS EM SOLDAS DO TIPO *RING WELD*. TESE (MESTRADO) - ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, SÃO PAULO BRASIL, 2002.
- THE LINCOLN ELETRIC CO. PREVENTION AND CONTROL OF WELD DISTORTION, WELDING JOURNAL, VOL. 80, N. 10, P. 97-100, OUT., 2001.
- 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, VOL. 27, P. 87-97, JUN., 2017.