III CONGRESSO INTERNACIONAL DE **GESTÃO E TECNOLOGIAS** COINTER - PDVGT 2019

DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE PARA DETERMINAÇÃO DO CONCENTRADOR DE TENSÕES EM JUNTAS DE AÇO SOLDADAS POR PROCESSOS A ARCO ELÉTRICO

DESARROLLO DE SOFTWARE PARA DETERMINAR EL CONCENTRADOR DE TENSIONES EN UNIONES DE ACERO SOLDADAS POR PROCESOS DE ARCO ELÉCTRICO

SOFTWARE DEVELOPMENT FOR DETERMINING STRESS CONCENTRATION FACTOR IN JOINTS WELDED BY ELECTRIC ARC PROCESSES

Apresentação: Comunicação Oral

Marcos Antonio Souza do Nascimento Segundo¹; Rodrigo Yoshio Ferreira Hiramine²; José Dásio de Lira Junior³ Tiago de Sousa Antonino⁴; Pablo Batista Guimarães⁵

DOI: <https://doi.org/10.31692/2358-9728.VICOINTERPDVG.2019.0021>

Resumo

O principal processo para unir peças metálicas e não metálicas na indústria é a soldagem. Esse processo industrial surgiu no final do século XVIII com a soldagem por arco elétrico, utilizando um eletrodo de grafite e posteriormente foi substituído por um arame metálico. Hoje o arco elétrico é o processo de soldagem mais popular nas indústrias, ele é utilizado tanto para unir quanto para recuperar e cortar peças, essa popularidade é dada devido a facilidade no controle, baixo custo e boa concentração de energia para a fusão localizada. Apesar, de ser um processo simples, a soldagem envolve uma série de equações complexas. Por exemplo, determinar a tensão normal em uma peça sem nenhum concentrador de tensão (sem furos, solda, entre outros...) é relativamente fácil, mas quando essa peça conta com alguma descontinuidade geométricas há um fator de concentrador de tensão que precisa ser considerado no cálculo, tornando bem mais complexo obter essa tensão. As tensões em uma junta soldada pode ser determinada analiticamente ou numericamente via elementos finitos. Sendo assim, um dos objetivos desse trabalho foi a criar o programa computacional SCFW SOFTWARE, desenvolvido no âmbito desta pesquisa, para facilitar o cálculo dessas tensões analiticamente. A resolução das equações é realizada através de um programa criado na linguagem Matrix Laboratory (MATLAB), um software interativo de alta performance voltado para computação matemática e cálculo numérico. O software consiste em uma interface gráfica com 4 (quatro) equações: fator de concentrador de tensão (em junta de topo e em ângulo), tensão normal e força máxima suportada numa junta de topo soldada considerando o fator de concentrador de tensão.

¹ Engenharia Mecânica, IFPE, marcosouzasegundo@gmail.com

² Engenharia Mecânica, IFPE, rodrigo.hiramine@gmail.com

³ Professor Doutor, IFPE, josedasio@recife.ifpe.edu.br

⁴ Professor Doutor, IFPE, tiagoantonino@recife.ifpe.edu.br

⁵ Professor Doutor, IFPE, pabloguimaraes@recife.ifpe.edu.br

Palavras-Chave: Soldagem; Arco elétrico; Software; Concentrador de Tensão;

Resumen

El proceso principal para unir piezas metálicas y no metálicas en la industria es la soldadura. Este proceso industrial surgió a fines del siglo XVIII con la soldadura por arco con un electrodo de grafito y luego fue reemplazado por un alambre de metal. Hoy en día, el arco eléctrico es el proceso de soldadura más popular en la industria, se utiliza para unir, así como para recuperar y cortar piezas, esta popularidad se debe a la facilidad de control, el bajo costo y la buena concentración de energía para la fusión localizada. Aunque es un proceso simple, la soldadura involucra una serie de ecuaciones complejas. Por ejemplo, determinar la tensión normal en una parte sin ningún concentrador de tensión (sin agujeros, soldadura, etc.) es relativamente fácil, pero cuando esa parte tiene cierta discontinuidad geométrica hay un factor concentrador de tensión que debe ser considerado en el cálculo, lo que hace que sea mucho más complejo obtener esta tensión. Las tensiones en una unión soldada se pueden determinar analíticamente o numéricamente a través de elementos finitos. Por lo tanto, uno de los objetivos de este trabajo fue crear el programa informático SCFW SOFTWARE, desarrollado dentro del alcance de esta investigación, para facilitar el cálculo de estas tensiones analíticamente. La ecuación se resuelve utilizando un programa creado en el lenguaje Matrix Laboratory (MATLAB), un software interactivo de alto rendimiento centrado en el cálculo matemático y el cálculo numérico. El software consta de una interfaz gráfica con 4 (cuatro) ecuaciones: factor concentrador de tensión (unión superior y en ángulo), tensión normal y fuerza máxima soportada en una junta a tope soldada considerando el factor concentrador de tensión.

Palabras Clave: Soldadura; Arco eléctrico; Software de computadora; Concentrador de tensión;

Abstract

The main process for joining metal and non-metal parts in the industry is welding. This industrial process emerged in the late eighteenth century with arc welding using a graphite electrode and was later replaced by a metal wire. Today the electric arc is the most popular welding process in the industry, it is used for joining as well as recovering and cutting parts, this popularity is given due to the ease of control, low cost and good concentration of energy for localized fusion. Although it is a simple process, welding involves a series of complex equations. For example, determining the normal stress on a part without any stress concentrator (without holes, welding, etc.) is relatively easy, but when that part has some geometric discontinuity there is a stress concentrator factor that needs to be considered in the calculation, making it much more complex to obtain this tension. The stresses in a welded joint can be determined analytically or numerically via finite elements. Thus, one of the objectives of this work was to create the computer program SCFW SOFTWARE, developed within the scope of this research, to facilitate the calculation of these stresses analytically. The equation is solved using a program created in the Matrix Laboratory (MATLAB) language, a high performance interactive software focused on mathematical computation and numerical calculus. The software consists of a graphical interface with 4 (four) equations: stress concentrator factor (top and angled joint), normal stress and maximum force supported on a welded butt joint considering the stress concentrator factor.

Keywords: Welding; Electric arc; Computer software; Tension concentrator;

Introdução

As tensões de uma junta soldada podem ser determinadas analiticamente ou numericamente via elementos finitos a partir do campo de temperatura gerado durante a soldagem. Dimensionar corretamente uma junta soldada sobre estruturas pode evitar falhas, além de reduzir significativamente o custo de um projeto. (GUIMARÃES,2011; ROSENTHAL,1941)

Este trabalho teve o objetivo de utilizar métodos analíticos para calcular tensões normais e concentradores de tensão geradas pela soldagem em juntas utilizando os processos a arco elétrico para amenizar custos e aumentar a segurança em projetos e além disso, criar o programa computacional SCFW Software, visando otimizar o processo de soldagem na indústria.

Fundamentação Teórica

A soldagem é um processo industrial definido como uma operação para unir duas ou mais peças produzida pelo aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a utilização de pressão e de material de adição ou também para realizar deposição de material sobre uma superfície, visando a recuperação de peças desgastadas ou a formação de um revestimento com características especiais. Sendo o processo mais importante de união de peças utilizado na indústria hoje, a soldagem é usada desde a fabricação de estruturas simples, como portões e grades até a fabricação de grandes estruturas e equipamentos, como navios, aviões e pontes. (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2017).

Hoje, no mercado há uma variedade muito grande de processos de soldagem, os de maior importância industrial são os que usam como fonte de energia o arco elétrico, por exemplo, Soldagem com Eletrodo Revestido, MIG/MAG e TIG. Essa importância é devido a facilidade de controle, baixo custo e boa concentração de energia para fusão localizada.

A soldagem por fusão busca garantir a fusão localizada do metal de base na região adjacente à área de contato, antes que o calor se difunda em grande quantidade para o restante da peça. (GUIMARÃES, 2010).

O arco elétrico consiste em uma descarga elétrica, sustentada através de um gás ionizado, a alta temperatura, conhecido como plasma, podendo produzir energia térmica suficiente para ser usado em soldagem, pela fusão localizada das peças a serem unidas. (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2017)

As discontinuidades na geometria (orifícios, cortes, chanfros, falhas na soldagem, dentre outros) ou metalúrgicas(solda) afetam a distribuição da tensão em uma estrutura,

resultando em um aumento da tensão na vizinhança da descontinuidade. Esse aumento na tensão é chamado de concentração de tensão. (DE MENDONÇA; ELLWANGER, 2016)

Esse fenômeno é ilustrado na Figura 1 por meio das linhas de força na placa. Nas extremidades da placa ocorre uma distribuição uniforme das linhas, porém ao se aproximarem da descontinuidade da placa as linhas se aproximam umas das outras gerando uma concentração de tensão. Deste modo, a tensão neste local é muito maior do que nas partes onde não há descontinuidade, necessitando de um fator de concentração de tensão (K_t) para ajustar a tensão no local.

Figura 1 – Distribuição de tensões em peça com entalhe.

Fonte: (Det Norske Veritas, 2014)

Esse fator de concentração de tensão é utilizado em cálculos analíticos para dimensionar cordões de solda e assegurar que não aconteça nenhuma falha no projeto.

Metodologia

• CÁLCULO ANALÍTICO DO CONCENTRADOR DE TENSÃO

Inicialmente foram feitos estudos na área de concentradores de tensão, onde foi encontrado a equação empírica dos japoneses K. Iida e T. Uemura para calcular o fator de concentrador de tensão. A equação apresentou ser a mais eficiente em comparação com outras quando verificadas pelo método dos elementos finitos (MEF). (CHATTOPADHYAY et al., 2011)

1. FATOR DE CONCENTRADOR DE TENSÃO PARA UMA SOLDA DE TOPO SOB CARGA AXIAL DE TRAÇÃO

Figura 2 – Representação de uma solda de topo sob carga de tração.

Fonte: (Autor, 2019)

$$W = t + 2 * h + 0,6 * l$$

$$Kt = 1 + \frac{1 - \exp\left(-0,9 * \theta * \sqrt{\frac{W}{2 * h}}\right)}{1 - \exp\left(-0,45 * \pi * \sqrt{\frac{W}{2 * h}}\right)} * 2 * \left[\frac{1}{2,8 * \left(\frac{W}{t}\right) - 2} * \frac{h}{r} \right]^{0,65}$$

Onde t, h, l, r (todos eles em mm) e θ (rad) são parâmetros geométricas da junta soldada necessárias para calcular o fator de concentrador de tensão no cordão de soldam, representados na figura 2.

2. FATOR DE CONCENTRADOR DE TENSÃO PARA UMA SOLDA EM ÂNGULO SOB CARGA AXIAL DE TRAÇÃO

Figura 3– Representação de uma solda em ângulo sob carga de tração.

Fonte: (Autor, 2019)

$$W = (t1 + 2 * h) + 0,3(t2 + 2 * l)$$

$$Kt = 1 + \frac{1 - \exp\left(-0,9 * \theta * \sqrt{\frac{W}{2 * h}}\right)}{1 - \exp\left(-0,45 * \pi * \sqrt{\frac{W}{2 * h}}\right)} * \left[\frac{1}{2,8 * \left(\frac{W}{t}\right) - 2} * \frac{h}{r} \right]^{0,65}$$

Onde t1, t2, h, l, r (todos em mm) e θ (rad) são parâmetros geométricos da junta em ângulo representados na figura 3.

• CRIAÇÃO DO SOFTWARE

As equações foram utilizadas para o desenvolvimento do software utilizando o auxílio do Matrix Laboratory (MATLAB), um software interativo de alta performance voltado para a computação matemática.

Foi criado uma interface gráfica para facilitar a utilização do software. O programa consiste de 4 equações: fatores de concentrador de tensão (em juntas de topo e em ângulo), tensão normal e força máxima suportada numa junta de topo soldada considerando o fator de

concentrador de tensão. A representação esquemática do software e das suas opções de cálculo encontrasse no fluxograma na Figura 4.

Figura 4– Representação esquemática do software.

Fonte: (Autor, 2019)

Resultados e Discussão

• DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE

O programa foi desenvolvido no MATLAB por meio de criação de códigos, funções e interface gráfica utilizando a função GUIDE e outras do próprio MATLAB para tornar mais prático o cálculo do fator de concentrador de tensão e a tensão suportada numa junta soldada, conforme mostrado na Figura 14 a 19.

Figura 5 – Página inicial do software

Fonte: (Autor, 2019)

Na Figura 5, apresenta a página inicial do programa, onde há informações sobre o objetivo do software e informações dos desenvolvedores.

Figura 6 – Menu do software

Fonte: (Autor, 2019)

Na Figura 6, apresenta a tela “Menu” do programa onde há duas opções: junta de topo ou junta em ângulo.

Nas Figura 7 e 8, são mostradas sub-telas do “Menu” com as opções que o software tem para calcular.

Figura 7 – Tela com opções de cálculo para solda de topo

Fonte: (Autor, 2019)

Figura 8 – Tela com opções de cálculo para solda em ângulo

Fonte: (Autor, 2019)

As Figuras de 9 a 12 apresentam as telas para calcular, com espaços para os parâmetros de entrada serem preenchidos e espaços para retornar os parâmetros de saída.

Figura 9 – Tela para calcular o fator de concentrador de tensão para solda de topo

The screenshot shows a software window titled "Fator de concentrador de tensão para solda de topo". It contains five input fields for the following parameters: "Espessura da chapa(em mm):", "Altura do reforço da solda(em mm):", "Ângulo entre a chapa e o reforço da solda(em graus):", "Largura da solda(em mm):", and "Raio de adoçamento(em mm):". To the right of these fields is a red button labeled "CALCULAR". Below the input fields, there is a text label "O fator de concentrador de tensão na junta de topo é:" followed by an empty output field. At the bottom of the window are two buttons: "VOLTAR" on the left and "AJUDA" on the right.

Fonte: (Autor, 2019)

Figura 10 – Tela para calcular tensão normal na junta de topo

The screenshot shows a software window titled "Tensao". It contains seven input fields for the following parameters: "Força aplicada na chapa(em N):", "Comprimento do cordão de solda(em mm):", "Espessura da chapa(em mm):", "Altura do reforço da solda(em mm):", "Ângulo entre a chapa e o reforço da solda(em graus):", "Largura da solda(em mm):", and "Raio de adoçamento(em mm):". To the right of these fields is a red button labeled "CALCULAR". Below the input fields, there are two text labels with corresponding output fields: "O fator de concentrador de tensão(Kt), é:" and "A tensão na junta soldada considerando o concentrador de tensão é(MPa):". At the bottom of the window are two buttons: "VOLTAR" on the left and "AJUDA" on the right.

Fonte: (Autor, 2019)

Figura 11 – Tela para calcular a força máxima suportada pela junta de topo

The screenshot shows a software window titled "Forca_maxima". It contains the following elements:

- A dropdown menu labeled "Escolha o material utilizado" with a dashed line and a downward arrow.
- A text input field for "Caso o material utilizado não esteja na lista, informar a tensão de escoamento dele".
- Input fields for "Comprimento do cordão de solda(em mm):", "Espessura da chapa(em mm):", "Altura do reforço da solda(em mm):", "Ângulo entre a chapa e o reforço da solda(em graus):", "Largura da solda(em mm):", and "Raio de adoçamento(em mm):".
- A red "CALCULAR" button.
- A text input field for "O fator de concentrador de tensão(K_t), é:". Below it, a label states: "A força máxima suportada pela solda de topo, considerando o concentrador de tensão, é(em kN):".
- A "VOLTAR" button at the bottom left and an "AJUDA" button at the bottom right.

Fonte: (Autor, 2019)

Figura 12 – Tela para calcular fator de concentrador de tensão na junta em ângulo

The screenshot shows a software window titled "Fator_de_concentrador_de_tensao_para_solda_em_angulo". It contains the following elements:

- Input fields for "Espessura da chapa horizontal(em mm):", "Espessura da chapa vertical(em mm):", "Ângulo entre a chapa e o reforço da solda(em graus):", "Altura da solda(em mm):", "Largura da solda(em mm):", and "Raio de adoçamento(em mm):".
- A red "CALCULAR" button.
- A text input field for "O fator de concentrador de tensão na junta em angulo é:". Below it, a label states: "O fator de concentrador de tensão na junta em angulo é:". (Note: The label text is partially obscured by the input field).
- A "VOLTAR" button at the bottom left and an "AJUDA" button at the bottom right.

Fonte: (Autor, 2019)

Figura 13 – Parâmetros geométricos utilizados para calcular o fator de concentrador de tensão numa junta de topo

Espessura da chapa (t)	20mm
Altura do reforço (h)	3,5mm
Largura do cordão de solda (l)	23mm
Raio de adoçamento (r)	0,8mm
Ângulo entre a chapa e o reforço (θ)	18°

Fonte: (Autor, 2019)

Figura 14 – Resultado obtido pelo software

Fator_de_concentrador_de_tensao_para_solda_de_topo

Espessura da chapa(em mm): 20

Altura do reforço da solda(em mm): 3.5

Ângulo entre a chapa e o reforço da solda(em graus): 18

Largura da solda(em mm): 23

Raio de adoçamento(em mm): 0.8

CALCULAR

O fator de concentrador de tensão na junta de topo é: 2.14

VOLTAR AJUDA

Conclusões

O software escrito no MATLAB com funções para calcular o fator de concentrador de tensão numa junta soldada de topo e filete, a tensão normal e força máxima suportada numa solda de topo levando em consideração o fator de concentrador de tensão teve como objetivo

geral aumentar a eficiência, reduzir custos e desperdícios em um projeto que envolva a soldagem, além de facilitar o cálculo do fator de concentrador de tensão, visto que a equação é muito extensa.

Através do SCFW Software foi calculado o Fator de Concentrador de Tensão para o exemplo da figura 13 e foi obtido que o $K_t=2,14$, mostrado na figura 14.

Referências

CHATTOPADHYAY, A. et al. Stress Analysis and Fatigue of welded structures. **Welding in the World**, v. 55, n. 7–8, p. 2–21, 19 jul. 2011.

DE MENDONÇA, É. M.; ELLWANGER, G. B. **Análise de concentração de tensões e fadiga em uma junta soldada** Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro., 2016.

Iida K. and Uemura T.: **Stress concentration factor formulas widely used in Japan**, IIW Doc. XIII-1530-94, 1994.

GUIMARÃES, P. B.; BARBOSA, P. M. A.; YADAVA, Y. P.; SIQUEIRA FILHO, A. V.; BARBOSA, J. M. A.; FERREIRA, R. A. S. **Comparative Study of Levels of Residual Stresses Obtained Numerically as a Function of Welding Current**. Anais... 21st International Congress of Mechanical Engineering – COBEM, Natal – RN. Pp. 1-8, 2011

GUIMARÃES, P. B. **Estudo do Campo de Temperatura Obtido Numericamente para Posterior Determinação das Tensões Residuais numa Junta Soldada de Aço ASTM AH36**. Tese de doutorado. Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Engenharia Mecânica. 2010.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **14 - Soldagem: fundamentos e tecnologia**. 4. ed. [s.l: s.n.].

ROSENTHAL, D. **Mathematical theory of heat distribution during welding and cutting**, **Weld. J.** vol. 20, p.220-234, 1941.