

ANÁLISE DE TENSÕES EM JUNTAS SOLDADAS PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Matheus Silva Proença, matheus_proenca_em@hotmail.com¹
Amarildo Tabone Paschoalini, tabone@dem.feis.unesp.br¹

¹ Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – FEIS/UNESP, Ilha Solteira (SP), CEP:15385-000.

Resumo: Os processos de soldagem possuem um amplo campo de aplicação, estando presentes na montagem, no reparo e na manutenção das mais diversas estruturas. A confiabilidade adquirida, a facilidade de uso, e os custos são os principais itens que fazem o processo de soldagem se destacar frente aos demais. Os estudos na área se tornam cada vez mais importantes, pois, embora não seja o objeto principal de uma obra estrutural, a soldagem afeta diretamente a segurança e a economia da construção. Neste campo, a modelagem computacional é, atualmente, uma das alternativas para se realizar as análises mecânicas do processo. Então, aplicando conceitos de mecânica dos sólidos e método dos elementos finitos, o presente trabalho desenvolveu um programa computacional, em linguagem aberta, a fim de implementar o elemento finito isoparamétrico, quadrilateral de quatro nós para a análise do estado plano de tensão em juntas soldadas. A distribuição de tensões foi obtida e os resultados foram assim comparados com a metodologia clássica existente e com resultados experimentais qualitativos realizados por volta da década de 40.

Palavras-chave: Método dos elementos finitos, Estado plano de tensões, Juntas soldadas.

1. INTRODUÇÃO

A busca por novos equipamentos e pela otimização daqueles já existentes alimentam, diariamente, estudos e pesquisas referentes a análises estruturais e aos processos mecânicos envolvidos no projeto. Neste meio, empregada na montagem, reparos e manutenções, a soldagem conquista uma posição de relevância devido sua versatilidade e economia.

Dentre os vários campos de aplicação, inclui-se a construção naval, estruturas civis, vasos de pressão, tubulações, sendo também aplicada como enchimentos de falhas em fundidos e depósitos superficiais de alta dureza na recuperação de ferramentas.

Felizmente, os avanços obtidos na computação, assim como o desenvolvimento de ferramentas matemáticas e técnicas de simulação numérica vêm, com o tempo, ajudando muito na elaboração de modelos para realizar as análises de interesse.

Sendo assim, diante da tamanha importância e aplicabilidade que o processo de soldagem apresenta, o presente trabalho se propõe a estudar a distribuição de tensões nas juntas soldadas, atendendo diretamente uma das áreas de interesse do processo, que consiste em determinar, por meio das tensões mecânicas, se o projeto da solda é adequado ou não.

Em grande parte da literatura, as tensões nas juntas são calculadas isolando uma porção da junção soldada como um corpo livre, resolvendo as equações de equilíbrio e encontrando a tensão maior de von Mises. Para o dimensionamento, a metodologia clássica considera a garganta como a seção resistente do cordão, na qual as tensões encontram-se uniformemente distribuídas. Esta metodologia não fornece informações detalhadas da distribuição de tensões ao longo do cordão de solda.

O método dos elementos finitos abordado neste trabalho é, então, umas das alternativas para se calcular de forma minuciosa tal distribuição.

Os resultados obtidos numericamente no trabalho foram comparados com os da literatura e com resultados experimentais qualitativos realizados por Norris (1945) e Salakian *et al.* (1937) por meio da fotoelasticidade.

O caso escolhido para estudo consiste em duas placas de aço soldadas com uma solda de filete transversal típica. Na Fig. 1 tem-se a representação esquemática do caso. É importante destacar que o material constituinte do metal base e da junta são homogêneos, isotrópicos, e possuem todas as mesmas propriedades.

A modelagem computacional foi desenvolvida em linguagem aberta de programação OCTAVE. Para fins comparativos, fez-se a implementação do problema no software comercial ANSYS, que, serviu como gerador e refinador de algumas malhas utilizadas.

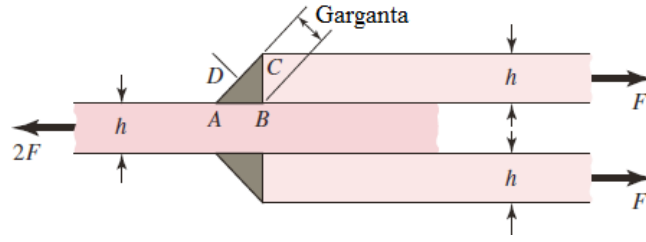


Figura 1. Representação esquemática do caso analisado.

2. PROCEDIMENTO COMPUTACIONAL

O caso analisado se enquadra no estado plano de tensões que consiste em uma análise especial de uma estrutura tridimensional, cuja geometria e carregamento se repetem indefinidamente ao longo de um dos eixos (Shigley *et al.*, 2005), no caso, ao eixo solidário a largura das placas (eixo z). Este estado de tensão é, então, representado por uma combinação de duas componentes de tensão normal e uma de tensão cisalhante que atua em quatro faces do elemento.

O carregamento inserido no modelo tracionará as chapas e estará uniformemente distribuído no plano y-z.

Como hipóteses para realizar o estudo, admitiu-se que os materiais que constituem as estruturas e as juntas soldadas são homogêneos, isotrópicos, e possuem as mesmas propriedades.

De uma forma matricial simplificada, o problema pode ser escrito como:

$$[K_g] \cdot \{u\} = \{F\}, \quad (1)$$

na qual $[K_g]$ é a matriz de rigidez global da estrutura, $\{u\}$ são os campos de deslocamentos e $\{F\}$ o vetor carregamento. A Equação (1) foi discretizada e resolvida para cada elemento.

Para se obter a matriz de rigidez utilizou-se o princípio dos trabalhos virtuais, no qual se admite que o trabalho gerado pelas solicitações externas nos deslocamentos de seus respectivos pontos de aplicação é igual ao trabalho interno das tensões nas deformações internas da estrutura (Azevedo, 2003), ou seja:

$$\int_V \delta \varepsilon^T \sigma dV = \int_L \delta u^T p dL \quad (2)$$

na qual $\delta \varepsilon$ é a deformação interna virtual, σ as tensões e p a ação exterior distribuída por unidade de comprimento. Os campos de deslocamentos virtuais δu , e a deformação virtual assumem, vantajosamente, as seguintes relações:

$$\delta u = N(x, y) \cdot \delta a(t) \quad (3)$$

$$\delta \varepsilon = B \cdot \delta a \quad (4)$$

na qual N é a matriz das funções interpoladoras, B é a matriz da derivada dessas funções e δa são os deslocamentos virtuais nodais. Abordando o método de Galerkin sabe-se que as funções peso são iguais às funções de forma.

Pela relação constitutiva, tem-se:

$$\sigma = D \cdot \varepsilon \quad (5)$$

Por termos assumido a isotropia dos materiais, a matriz de elasticidade D é caracterizada por somente duas constantes independentes, sendo elas o Módulo de Young (E) e o coeficiente de Poisson (ν). A equação (6) apresenta a rigidez elástica para um estado plano de tensões, constituído unicamente pelas tensões normais σ_x e σ_y , e a cisalhante τ_{xy} .

$$D = \begin{bmatrix} \frac{E}{1-\nu^2} & \frac{E\nu}{1-\nu^2} & 0 \\ \frac{E\nu}{1-\nu^2} & \frac{E}{1-\nu^2} & 0 \\ \text{sim} & \text{sim} & \frac{E}{2(1+\nu)} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Substituindo adequadamente na Eq. (2) as relações citadas, sabendo que $dV=h \cdot dS$ (na qual h corresponde a espessura e dS do elemento de superfície $dx \cdot dy$), e que os deslocamentos nodais δa não dependem das coordenadas, então, chega-se a:

$$\delta a^T \int_S B^T D B h dS \cdot a = \delta a^T \int_L N^T p dL \quad (7)$$

Observando que o semblante da Eq. (1) pode ser facilmente confirmado pela relação obtida na Eq. (7). Aplicando a transformação de coordenadas (x,y) para (s_1,s_2) por meio da matriz jacobiana, com o intuito de facilitar a implementação do método numérico de resolução das integrais, obteve-se a seguinte relação final para a matriz de rigidez:

$$\underline{K} = \iint_{-1}^{+1} \underline{B}^T \underline{D} \underline{B} h J ds_1 ds_2 \quad (8)$$

A quadratura de Gauss é frequentemente utilizada neste contexto, pois tem como vantagem ser facilmente incluída na programação (Cook *et al.*, 2002).

Todo código computacional foi desenvolvido em linguagem de programação OCTAVE, código aberto. Em tal programa implementou-se, especificamente, a formulação do elemento finito quadrilateral, isoparamétrico de quatro nós, para a análise das tensões.

Para compor o programa principal foram criadas várias sub-rotinas específicas. Na etapa de pré-processamento é necessário informar para o algoritmo alguns parâmetros; são eles: o número de nós e de elementos que se deseja trabalhar, o número de pontos de Gauss para a aplicação da quadratura, as coordenadas nodais (x,y) , e os nós que constituem cada elemento (conectividade). Por fim, indica-se qual o grau de liberdade de cada nó, os pontos de aplicação da força externa e as propriedades do material utilizado (Coeficiente de Poisson e Módulo de Young).

Para facilitar a obtenção de aspectos geométricos, como as coordenadas dos nós e a conectividade dos elementos, desenvolveu-se dentro do programa a capacidade de importação de dados .txt, permitindo com que o desenho da estrutura, a geração e o refino da malha fossem feitos em um outro software. Desta forma, utilizou-se como gerador de malhas o programa comercial ANSYS.

É importante destacar que, embora muito útil, a importação dos dados possui um limite a ser respeitado, advindo da memória de importação do software no qual foi desenvolvido o algoritmo.

Abordar-se-á neste trabalho as juntas submetidas a esforços normais, como a solda de filete transversal típica. Tem-se na Fig. 2 a representação esquemática do modelo que foi implementado, e as condições de contorno adotadas.

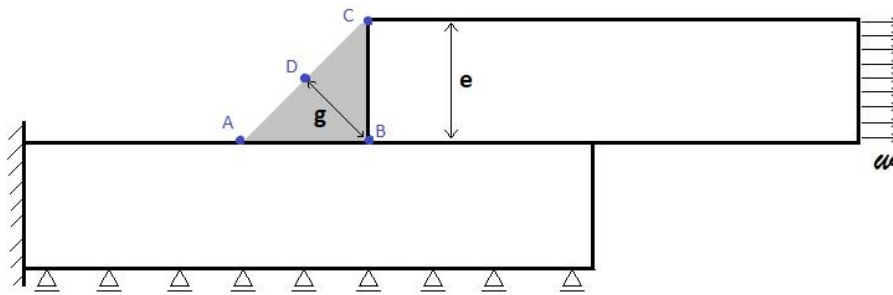


Figura 2. Representação esquemática do modelo estudado.

Nos resultados e discussão deste trabalho buscou-se, além de encontrar os pontos críticos, que comumente são usados para o dimensionamento do cordão de solda, reproduzir as distribuições de tensões ao longo dos lados e da garganta da junta. Tais distribuições puderam ser comparadas com os resultados experimentais qualitativos realizados por Norris (1945) e, Salakian *et al.* (1937).

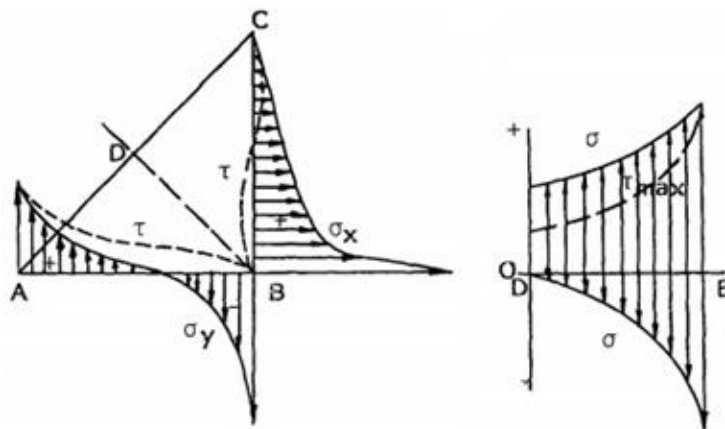


Figura 3. Distribuição de tensões ao longo do filete de solda.

Isolando, por fim, uma porção da junção soldada como um corpo livre, como mostrado na Fig. 4, e resolvendo as equações de equilíbrio é possível obter as tensões nominais atuantes no cordão e, em seguida, encontrar a tensão maior de von Mises para o caso abordado (Shigley *et al.*, 2005).

Uma das considerações importantes feitas pela “*International Institute of Welding*” (1976) é admitir a garganta como a seção resistente do cordão de solda, na qual as tensões encontram-se uniformemente distribuídas. Tem-se abaixo a representação de parte da junção soldada como um corpo livre e a decomposição da força F em esforços de reação na seção da garganta, $\overline{DB}$.

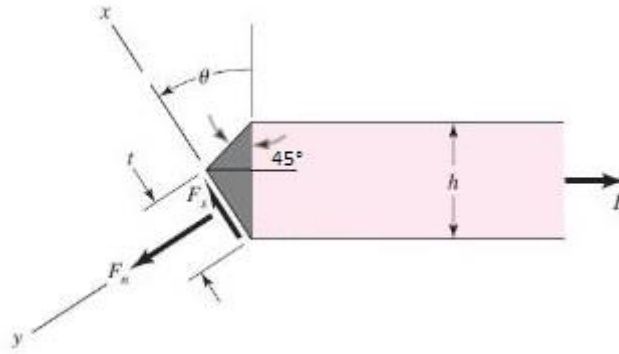


Figura 4. Diagrama de corpo livre da junção soldada.

Analisando a distribuição de forças envolvidas e fazendo todo o desenvolvimento para um certo ângulo θ escolhido, tem-se que a tensão de von Mises σ_{vm} é igual à:

$$\sigma_{vm} = (\sigma^2 + 3\tau^2)^{0,5} = \frac{F}{hl} [(\cos^2 \theta + \sin \theta \cos \theta)^2 + 3(\sin \theta \cos \theta + \sin^2 \theta)^2]^{0,5} \quad (9)$$

sendo l a largura das placas e h a espessura.

Pelas relações trigonométricas existentes, a maior tensão de von Mises ocorre em $\theta = 62,5^\circ$, com magnitude correspondente de $\sigma_{vm} = 2,164 \cdot F/(hl)$.

Logicamente, antes de abordar os casos de interesse, foi necessário validar o algoritmo construído. Tal procedimento foi feito utilizando casos clássicos da literatura cuja solução analítica é conhecida.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após validado, o suporte computacional desenvolvido pôde ser utilizado para casos cuja solução analítica exata é desconhecida. Estes casos compõem a esmagadora maioria dos projetos realizados, e o presente trabalho, destaca dentro destes, as juntas soldadas.

As dimensões escolhidas para o exemplo a ser estudado são: espessura $e = 10$ mm; comprimento $c = 30$ mm, largura $L = 20$ mm, material aço ($E = 2,1 \cdot 10^{11}$ N/m² e $\nu = 0,3$) e carga distribuída $w = 600$ kN/m.

Para que o evento fosse representado, adotou-se como condição de contorno o engaste da extremidade esquerda de uma das placas, e admitiu-se também que não haveria deslocamento em y na face inferior da placa debaixo e na seção de contato entre elas (Fig. 2).

O maior deslocamento encontrado para o caso foi de $0,7964 \cdot 10^{-5}$ m, já a máxima tensão e deformação, por von Mises, foi de 119,22 MPa, e $0,738 \cdot 10^{-3}$, respectivamente. A malha em questão possui 828 elementos, 924 nós, e pode ser vista na Fig. 5.

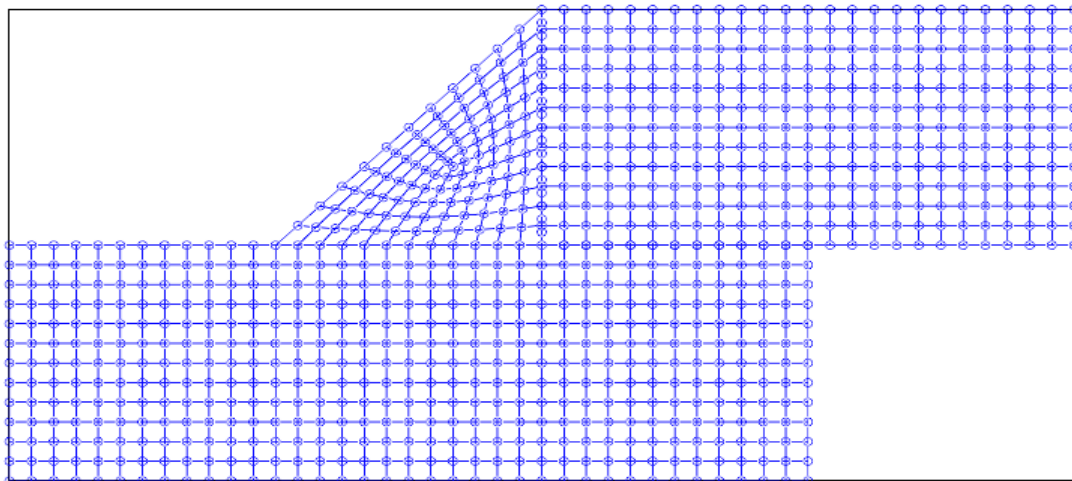


Figura 5. Malha de elementos finitos com nós e elementos.

Com os resultados das tensões calculados, utilizou-se o software Tecplot360 para realizar o pós-processamento dos dados, obtendo assim, por meio de interpolações, a distribuição visual destes valores. Na Figura 6 encontra-se a distribuição obtida para as tensões por von Mises.

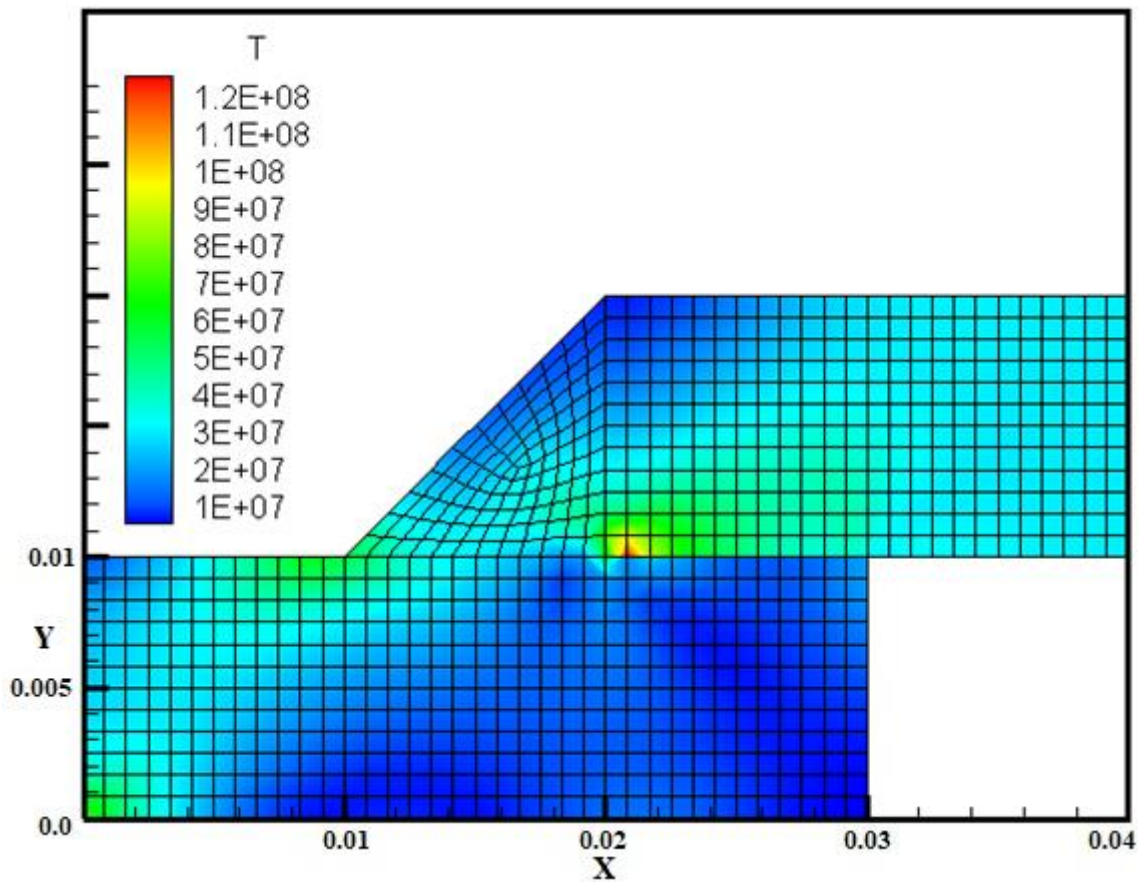


Figura 6. Distribuição de tensões na região da junta.

Para efeitos de curiosidade, implementou-se o mesmo caso no software ANSYS e comparou-se as tensões máximas obtidas com as anteriormente calculadas. Na etapa de pré-processamento deste software fixou-se o elemento “PLANE182” com as opções “full integration”, plane stress with thickness” e “pure displacemnt”.

Veja os resultados na Tab. 1.

Tabela 1. Tensões encontradas para o caso.

TENSÕES	ANSYS 14.5	ALGORITMO
σ_x	116,66 MPa	152,14 MPa
σ_y	36,62 MPa	47,28 MPa
τ_{xy}	46,91 MPa	50,65 MPa
von-Mises	119,22 MPa	134,87 MPa

Esta diferença de valores existente é devida ao número de pontos de integração utilizados no programa.

Com o objetivo de se comparar os resultados qualitativos obtidos por Norris (1945) em seus estudos fotoelásticos, coletou-se, então, os valores nodais ao longo do lado $\overline{AB}$ referentes as tensões σ_y e ao longo do lado $\overline{BC}$ referentes as tensões σ_x . Tais resultados foram apresentados nas Fig. 7.

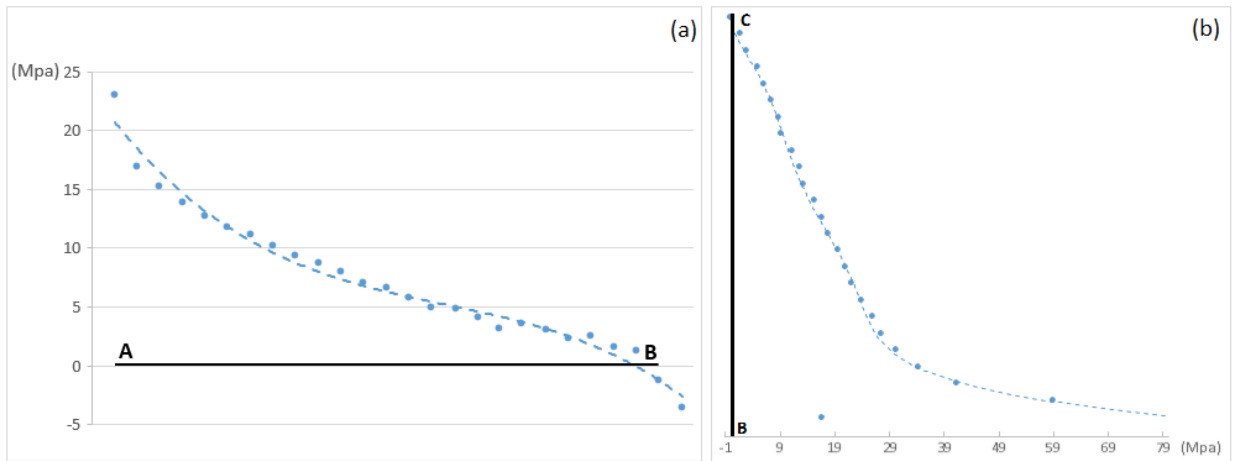


Figura 7. Distribuição das tensões. (a) σ_y ao longo do lado $\overline{AB}$; (b) σ_x ao longo do lado $\overline{BC}$.

Os resultados nodais para as tensões cisalhantes τ_{xy} também foram recolhidos e analisados graficamente.

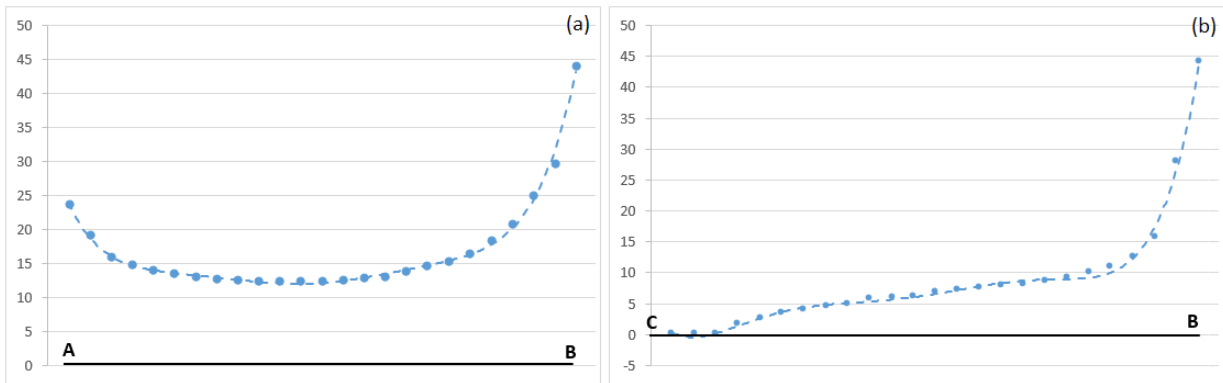


Figura 8. Distribuição das tensões cisalhantes τ_{xy} . (a) ao longo do lado $\overline{AB}$; (b) lado $\overline{BC}$.

Utilizando as distribuições coletadas e expostas na Fig. 7, construiu-se a Fig. 9. Observa-se que o comportamento obtido para as tensões nas pernas da junta se assemelha muito com os resultados obtidos por Norris (1945).

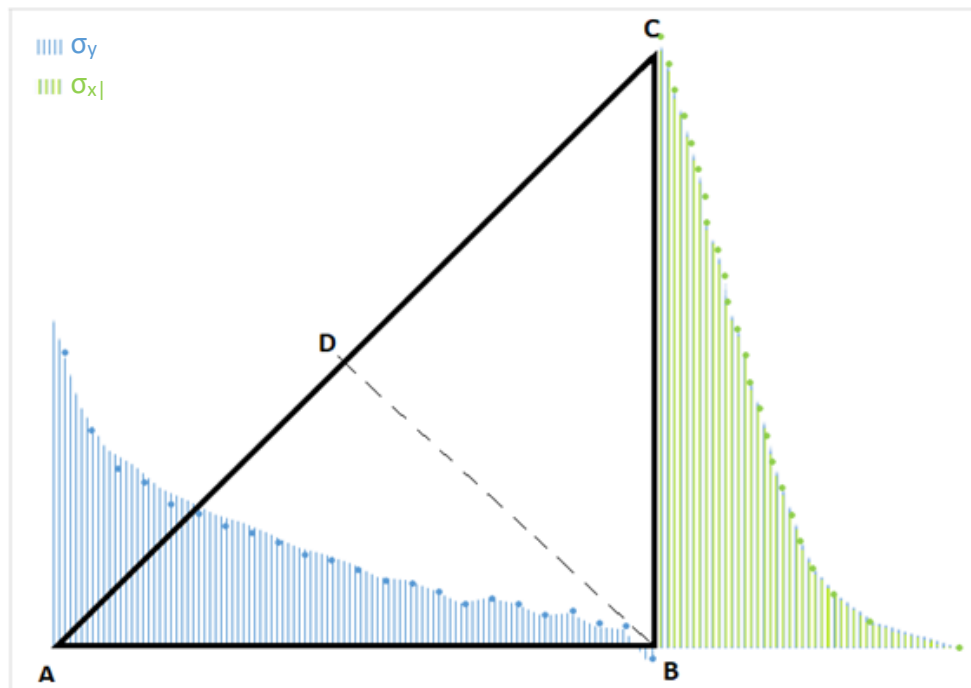


Figura 9. Distribuição de tensões ao longo dos lados $\overline{AB}$ e $\overline{BC}$ da junta soldada.

A seção da garganta ($\overline{BD}$), a 45° com a vertical, foi também analisada. Coletou-se para esta as tensões principais e de cisalhamento máximo, e, como pode ser visto na Fig. 10, o comportamento apresentado pelas distribuições se assemelha muito com os resultados obtidos por Salakian *et al.* (1937).

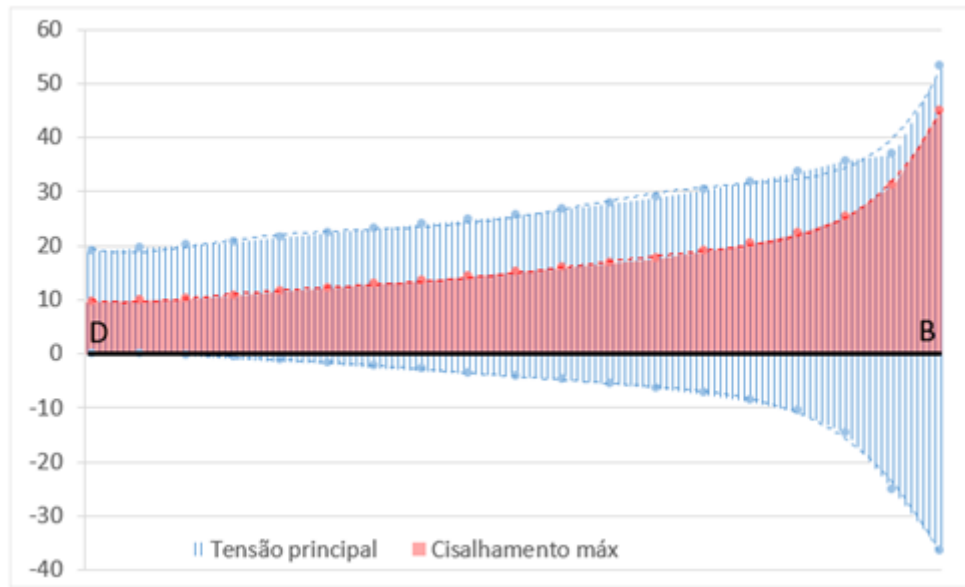


Figura 10. Distribuição das tensões principais e de cisalhamento máximo ao longo do lado $\overline{BD}$.

Como já foi dito, a metodologia clássica de dimensionamento da junta faz da garganta a seção resistente do cordão, e considera que as tensões nesta se encontram uniformemente distribuídas.

Sendo assim, pelo diagrama de corpo livre desta, e pelas relações trigonométricas existentes, a maior tensão de von Mises encontra-se na seção localizada a $62,5^\circ$ em relação a vertical e possui, para este caso, a magnitude de 43,3 MPa, enquanto que pelo MEF a seção mais crítica reproduziu a média de 41,2 MPa, e está mais próxima dos 90° . Na seção a 45° , $\sigma_{vm} = 40,0$ MPa, já pelos resultados fornecidos pelo MEF $\sigma_{vm} = 38,33$ MPa.

Para obter estes resultados e esta comparação, fez-se a média dos valores nodais de tensão da seção de interesse. Para facilitar a coleta dos dados, na construção da nova geometria, inseriu-se uma linha intermediária a 45° na junta. Esta nova geometria trabalhada possui $c=100\text{mm}$ e $L=30\text{mm}$, mantendo a mesma espessura e carregamento.

O resumo dos resultados foi organizado na Tab. 2 abaixo:

Tabela 2. Valores das tensões nas seções da garganta.

SESSÃO	METODOLOGIA CLÁSSICA	MEF	ERRO
A 45°	40,0 MPa	38,3 MPa	4,18 %
Crítica	43,3 MPa	41,2 MPa	4,85 %

É interessante destacar que refinando mais a malha trabalhada, caminhando rumo à convergência total dos valores, a média da tensão em uma seção escolhida não se altera, embora a distribuição de tensão ainda mude localmente. Ou seja, enquanto algumas regiões menos solicitadas da garganta têm seu valor de tensão ajustado para baixo, as regiões mais críticas se ajustam de tal forma que a média final obtida tem valor praticamente inalterado.

Algumas outras malhas foram feitas para se observar o efeito descrito, e os resultados encontram-se dispostos na Tab. 3.

Tabela 3. Tensões médias obtidas em função do refino de malha empregado.

SEÇÃO DA GARGANTA ESCOLHIDA PARA ANÁLISE: $\theta = 45^\circ$		
Número de nós existentes na malha empregada:	Tensão máxima existente	Tensão média da seção (von Mises)
1334 nós	102 MPa	38,33 MPa
5095 nós	147 MPa	39,28 MPa
21677 nós	179 MPa	39,55 MPa

4. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos na implementação do elemento finito isoparamétrico, quadrilateral de quatro nós para a análise do estado plano de tensões em juntas soldadas foram satisfatórios.

As distribuições encontradas ao longo dos lados das juntas se assemelham muito com as obtidas experimentalmente por Norris (1945) e Salakian *et al.* (1937) em seus experimentos de fotoelasticidade.

Apesar da linguagem de programação apresentar limitações na importação dos dados no pré-processamento, delimitando, consequentemente, o refino de malha, as implementações feitas demonstram a eficiência do programa desenvolvido para o cálculo dos deslocamentos e tensões.

Coletando os valores de tensão obtidos pelo MEF para cada nó presente na seção da garganta e fazendo uma média destes foi possível apreciar praticamente os mesmos valores obtidos teoricamente. Desta forma, analisou-se a seção a 45° e a seção mais crítica da junta.

5. REFERÊNCIAS

- [1] Azevedo, A. F. M., 2003, “Método dos Elementos Finitos”, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- [2] Cook, R. D., Malkus, D. S., Plesha, M. E., Witt, R. J., 2002, “Concepts and Applications of Finite Element Analysis, 4. Ed. John Wiley & Sons, Inc.
- [3] IIW - International Institute of Welding, 1976, “Design Rules for Arc Welded Connections in Steel Submitted to Static Loads”, *Welding in the World*, n°5/6.
- [4] Norris, C. H., 1945, "Photoelastic Investigation of Stress Distribution in Transverse Fillet Welds", *Welding*, vol. 24.
- [5] Quarteroni, A., Saleri, F., 2007, “Cálculo Científico com Matlab e Octave”, Springer Milan.
- [6] Salakian, A. G. e Claussen, G. E., 1937, "Stress Distribution in Fillet Welds: A Review of the Literature", *Welding J.*, vol. 16.
- [7] Shigley, J. E., Mischke, C. R., Budynas, R. G., 2005, “Projeto de Engenharia Mecânica”, Editora Bookman, 7ed.

6. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Fica afirmado que os autores Matheus Silva Proença e Amarildo Tabone Paschoalini são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

STRESSES ANALYSIS IN WELDED JOINT BY FINITE ELEMENTS METHOD

Matheus Silva Proença, matheus_proenca_em@hotmail.com¹

Amarildo Tabone Paschoalini, tabone@dem.feis.unesp.br¹

¹Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – FEIS/UNESP, Ilha Solteira (SP), Brazil. CEP:15385-000.

Abstract. *The welding processes have a wide field of application, being present in the mounting, repair and maintenance of the most various structures. The acquired reliability, the ease of use, and costs are the main items that make the welding process stand out in compare from others. Studies in the field have become increasingly important because, although welding is not the main object of a structural work, it directly affects the security and savings of construction. In this sphere, computational modeling is currently one of the alternatives to perform this mechanical analysis of process. So, applying concepts of solids mechanics and finite element method, the present work developed a computational program, open source, in order to implement the isoparametric, quadrilateral element, with four nodes, for the analysis of the plane state of tension in welded joints. The stresses distribution was obtained and the results were compared with the existing classical methodology and with qualitative experimental results performed around the 1940s.*

Keywords: *Finite element method, Plane stress state, welded joint.*