



## **ANÁLISE NUMÉRICA DA INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE SOLDA EM VASOS DE PRESSÃO CILÍNDRICOS**

**Fernanda Figueredo Santos, ffernaand@gmail.com<sup>1</sup>**  
**Alan Maiko Santos Barbosa, amsbarbosa09@gmail.com<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> UFBA, R. Prof. Aristίδes Novis, 2 - Federação, Salvador.

<sup>2</sup>Unijorge, Av. Luís Viana, 6775 - Paralela, Salvador.

**Resumo.** *Este trabalho tem como objetivo a determinação das tensões residuais de vasos de pressão cilíndricos submetidos a reparos por solda via análise numérica. No reparo por soldagem, a luva é anexada ao vaso de pressão através de duas soldas longitudinais e duas circunferenciais. Foi realizada a modelagem do vaso de pressão, do reparo e das soldas de acordo com a norma. Os parâmetros do cordão de solda foram adotados com base com o que acontece na prática, e com isso foram feitas as análises das tensões residuais variando a velocidade do cordão de solda. A partir disso, foram analisadas as tensões residuais nas regiões da solda para verificar o comportamento dos resultados após o período de resfriamento pelo Método dos Elementos Finitos.*

**Palavras chave:** *Método dos Elementos finitos, vaso de pressão, soldagem.*

### **1. INTRODUÇÃO**

Os vasos de pressão são equipamentos presentes e importantes em muitas indústrias químicas e petroquímicas, usinas de açúcar e etanol, farmacêuticas dentre outras, também são bastantes utilizados para os processos industriais que envolvam fluidos ou gases, que operam com pressões internas diferente da pressão atmosférica. Ou conforme a NR-13 de 2014, vasos de pressão são equipamentos que contêm fluidos sob pressão interna ou externa, diferente da atmosférica.

Os vasos de pressão, em sua grande maioria, são fabricados a partir da união de chapas de aço utilizando o processo de soldagem. Porém, esse processo provoca distorções no material base. Distorções estas que podem levar o equipamento a falhar. Por conta disto é importante tomar a máxima cautela durante o processo de escolha dos parâmetros do cordão de solda, assim como devem ser seguidos os procedimentos estabelecidos nas normas para seu reparo ou fabricação, pois desta maneira são garantidas as etapas necessárias para manter a integridade estrutural do vaso de pressão e não provocar danos ao meio envolvido.

Os engenheiros realizam estudos sobre a avaliação da integridade estrutural em diversas situações, como reparar, projetar ou até mesmo avaliar se o equipamento está de acordo com as normas e é amplamente utilizada em paradas para manutenção para avaliar se os equipamentos podem ou não continuar em operação. Essas avaliações podem ser realizadas por diversos Softwares, como: ANSYS, COSMOS/M, NASTRAN, ABAQUS, entre outros, que utilizam análise numérica com base no método dos elementos finitos (MEF).

O presente trabalho tem por objetivo obter resultados, via método dos elementos finitos, como tensões residuais e fluxo de calor total, por meio da realização de análises transiente térmica e estrutural para a determinação das tensões residuais no vaso de pressão ocasionadas pela variação da velocidade de soldagem no vaso de pressão.

### **2. METODOLOGIA**

O vaso de pressão em questão é utilizado em uma indústria petroquímica, que apresenta perda de espessura causada pela corrosão, utilizado como filtro de carvão ativado conforme mostrado na Figura (1). Por questão de exigência técnica de projeto e construção, esse vaso é constituído de aço ASTM A516 Grau 70 (aço inoxidável austenítico do tipo não sensitizável de baixo teor de carbono). Esse material é muito utilizado para construção de vasos de pressão, pois possui boa capacidade de absorver energia quando uma falha está presente e alta resistência a corrosão.

Figura 1 – Fotografia do filtro de carvão ativado estudado.

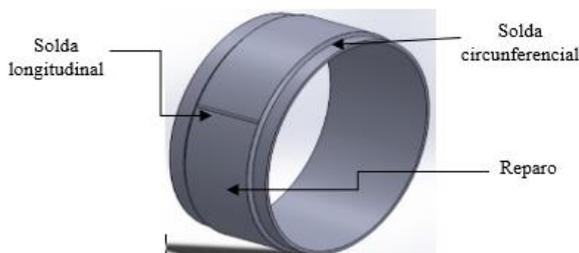


Fonte: Autores (2017).

As seguintes características de trabalho do vaso de pressão são: pressão de trabalho de 2,07 MPa; temperatura de trabalho de 177 °C; diâmetro interno de 1,22 m; espessura: 19,05 mm; tensão admissível de 137,70 MPa.

O passo a passo do modelo geométrico do conjunto do vaso de pressão-reparo-solda está descrito em (Almeida, 2017). A Figura (2) mostra o resultado da modelagem.

Figura 2 – Modelagem completa do conjunto vaso de pressão-reparo-solda.



Fonte: Autores (2017).

Na Figura (3) é apresentado as propriedades mecânicas do conjunto vaso de pressão.

Figura 3 - Propriedades Mecânica para o aço ASTM A516 Grau 70.

ASTM A516 Gr. 70		Propriedades	
Densidade (Kg/m <sup>3</sup> )	7960		
Condutividade térmica (W/m.K)	58		
Calor específico (J/kg.K)	521		
Coeficiente de expansão térmica (1/°C)	100°C	1,31e-6	
	200°C	1,37e-6	
	300°C	1,41e-6	
	400°C	1,43e-6	
	450°	1,44e-6	
Módulo de Young (10 <sup>3</sup> MPa)	20°C	206,8	
	300°C	201,3	
	400°C	196,7	
	450°C	194,3	
Limite de escoamento(MPa)	20°C	262	
	300°C	234	
	400°C	230	
	450°C	226	
Módulo tangente (MPa)	431,4		
Resistência última a tração (MPa)	482,6		
Coeficiente de Poisson	0,303		

Fonte: Almeida (2017).

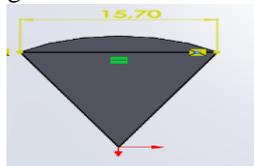
O modelo de plasticidade adotada foi a elastoplástica com encruamento linear e a temperatura de fusão do material é de 1873 °C. O diagrama de tensão do material x deformação pode ser encontrado em Almeida, 2017.

## 2.1. Geração da malha

No caso deste trabalho, foi utilizado como parâmetro de entrada 7 mm como tamanho do elemento para geração da malha. Esse valor foi selecionado adotando de forma aleatório, porém de modo esse valor fosse inferior a menor distância existente no conjunto vaso de pressão, que nesse caso é 15,70 mm, correspondente à superfície superior da solda longitudinal, como mostra a Figura (4), para que possam resultar das análises nessa região.

Um menor valor do tamanho de elemento mencionada acima poderia gerar problemas durante a convergência dos resultados, além de gerar uma quantidade maior de dados para serem processados, exigindo melhores computadores para o processamento.

Figura 4 - Largura do cordão de solda longitudinal.



Fonte: Autores, 2018

Com base nesses dados, foram gerados no total 46898 elementos e 124206 nós. Composta também por elementos tetraédricos de 10 nós e elementos hexaédricos de 20 nós. Essa escolha de composição é realizada pelo próprio programa, baseado na complexidade da geometria.

### 2.1.1. Condições de contorno para a análise transiente térmica

Na análise transiente térmica foi utilizado a convecção e radiação do ambiente como condições de contorno para solução numérica.

A Figura (5) mostra as superfícies externas do vaso de pressão e reparo, e as superfícies externas das soldas longitudinais e circunferenciais nas quais foram impostas as condições de convecção determinadas abaixo, regida pela chamada Lei de Resfriamento de Newton dada pela Equação (1):

$$Q=A.h(T_s-T_\infty) \quad (1)$$

Em que:

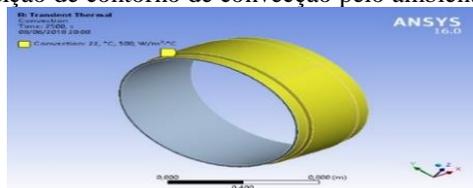
Q – Taxa de transferência de calor [W/mm<sup>2</sup>];

h – Coeficiente convectivo;

T<sub>s</sub> – Temperatura da superfície [°C];

A – Área de transferência de calor;

Figura 5 – Condição de contorno de convecção pelo ambiente nas superfícies.



Fonte: Autores.

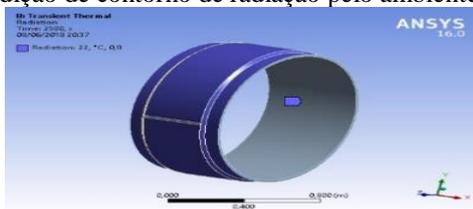
De acordo com INCROPERA, et al., (2008):

h=0,0005 W/m<sup>2</sup> °C

T<sub>∞</sub>=22°C

Analogamente, a condição de contorno de radiação foi aplicada nas superfícies externas do vaso de pressão e do reparo, conforme mostra a Figura (6).

Figura 6 – Condição de contorno de radiação pelo ambiente nas superfícies.



Fonte: Autores.

De acordo com INCROPERA, et al., (2008) e a chamada Lei de Stefan Boltzmann dada pela Equação (2), temos:

$$Q = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{viz}^4) \quad (2)$$

Em que:

$\varepsilon$  – Emissividade -  $\varepsilon = 0,8$

$\sigma$  – Constante de Stefan-Boltzmann =  $5,67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ .

$T_s$  – Temperatura da superfície [°C];

$T_{viz}$  - Temperatura do ambiente;

Por fim, ainda para esta análise, foi necessário estabelecer alguns dados de entrada, como velocidade do cordão de solda e intensidade da fonte de calor, que serão descritas abaixo.

### 2.1.2. Velocidade do cordão de solda

Este trabalho usa a largura do chanfro V de 15,70 mm encontrado em (Almeida, 2017). Partindo desta informado e de acordo com FANOUS, YOUNAN, et al. (2011) foi escolhido o raio do eletrodo como 25 mm, visto que a zona termicamente afetada atinge o reparo além do chanfro formado.

Para cada velocidade escolhida foi necessário a determinação do tempo inicial e tempo final para duas soldas longitudinais e circunferenciais. Para a primeira solda longitudinal, tomando a velocidade de solda de 6 mm/s e o comprimento da solda de 368,3 mm, mesmo comprimento do reparo, é possível calcular utilizando a Equação (3):

$$V = \Delta s / \Delta t \Rightarrow \Delta t = 368,3 / 6 \Rightarrow t = 61,38 \text{ s} \quad (3)$$

É dado para cada término de solda um tempo de preparação para a próxima solda de 20 s. Para primeira solda longitudinal também foi dado um intervalo de tempo de 20 s antes do início da soldagem. A Tabela (1) mostra o tempo para primeira solda.

Tabela 1 - Dados de entrada de tempo para a terceira carga térmica.

Tempo inicial da solda	182,76 segundos
Tempo final da solda	841,08 segundos

Analogamente foi feito o mesmo para segunda solda circunferencial, sempre utilizando o tempo de preparação da solda e o mesmo sentindo de soldagem da primeira solda circunferencial. A Tab. (2) mostra os tempos para a segunda solda circunferencial:

Tabela 2 - Dados de entrada de tempo para a quarta carga térmica.

Tempo inicial da solda	861,08 segundos
Tempo final da solda	1519,4 segundos

É considerado ao fim do processo de soldagem do vaso de pressão-reparo um tempo de resfriamento, portanto será utilizado 2200 s ao invés de 1519,4 s.

Analogamente, é feito o mesmo para calcular os tempos de soldagem para velocidades de 7 mm/s e 8 mm/s, mostrados na Tabela (3), como intuito de melhor observar o comportamento da variação da velocidade de soldagem.

Tabela 3 - Dados de entrada de tempo para carga térmica para velocidades a) 7 mm/s e b) 8 mm/s.

a)		b)	
Velocidade 7 mm/s		Velocidade 8 mm/s	
Tempo para solda longitudinal	52,61 s	Tempo para solda longitudinal	46,04 s
Tempo de solda longitudinal 1		Tempo de solda longitudinal 1	
Inicial	20 s	Inicial	20 s
Final	72,61 s	Final	66,04 s
Tempo de solda longitudinal 2		Tempo de solda longitudinal 2	
Inicial	92,61 s	Inicial	86,04 s
Final	145,22 s	Final	132,07 s
Tempo para solda circunferencial	658,31 s	Tempo para solda circunferencial	493,73 s
Tempo de solda circunferencial 1		Tempo de solda circunferencial 1	
Inicial	165,22 s	Inicial	152,07 s
Final	729,50 s	Final	645,81 s
Tempo de solda circunferencial 2		Tempo de solda circunferencial 2	
Inicial	749,50 s	Inicial	665,81 s
Final	1313,77 s	Final	1159,55 s
Tempo final com resfriamento	2000 s	Tempo final com resfriamento	1800 s

Todos esses dados de tempo do cordão de solda foram inseridos em uma extensão do ANSYS 16.0, chamada Moving Heat Flux, que simula a passagem de um cordão de solda em um material.

### 2.1.3. Intensidade da fonte de solda

Na última etapa, existe a carga térmica essencial necessária para intensidade da fonte de calor. Essa carga térmica depende de três fatores: corrente elétrica, tensão e eficiência da solda. Esses parâmetros foram selecionados com base em FANOUS, YOUNAN, et al., (2003), com isso, foi encontrado a intensidade de 15,3 W/mm<sup>2</sup>. Como a velocidade adotada nesse trabalho é menor que 1 m/min, de acordo com Schwedersky et al., 2011, não é necessário o aumento da corrente de soldagem.

### 2.2.1. Condições de contorno para a análise transiente estrutural

Para a análise transiente estrutural, foi utilizada como condição de contorno a restrição fixa (bonded) nas duas extremidades do vaso de pressão que impede o movimento nos seis graus de liberdade como é mostrado na Figura (7).

Figura 7 – Condição de contorno de restrição fixa nas extremidades do vaso de pressão.



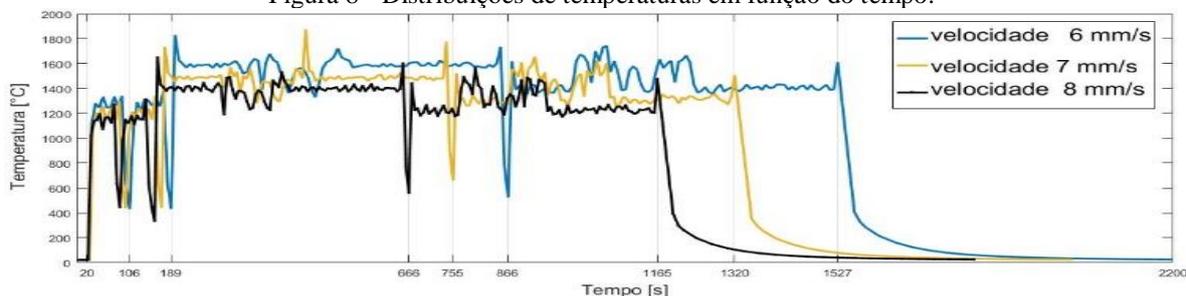
Fonte: Autores.

## 3. RESULTADOS

### 3.1. Distribuição de temperatura no conjunto vaso de pressão

A Figura (8) apresenta a distribuição de temperatura em função do tempo durante o processo de soldagem de acordo com cada velocidade, como é mostrado na legenda do gráfico.

Figura 8 - Distribuições de temperaturas em função do tempo.



Fonte: Autores.

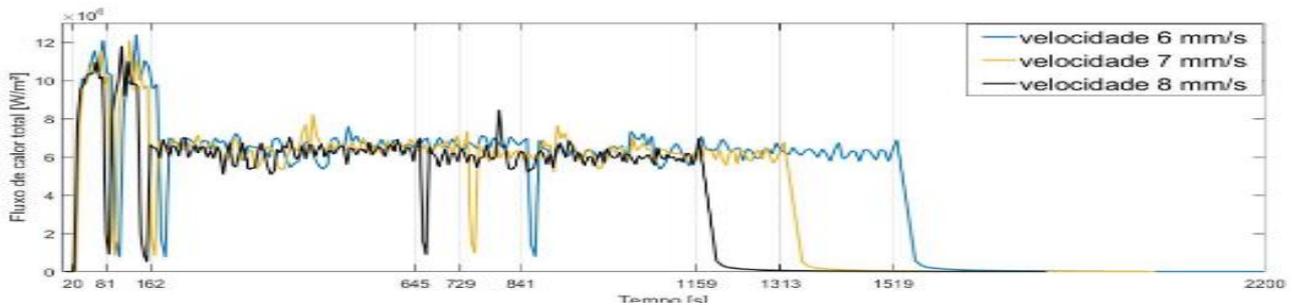
Nota-se através do gráfico, que mesmo com a diferença de velocidade, conseqüentemente de tempo, existe um comportamento padrão seguido pelas três curvas representadas, com a existência da diferença de temperatura decorrente da mudança de velocidade, que diminui com o aumento da velocidade. Portanto, essa característica nos permite dividir o gráfico em cinco regiões para todas as velocidades, que podem ser descritas conforme segue abaixo:

- Primeira região: compreende o intervalo de 0 a 20 segundos, que pode ser descrita como tempo de preparação para a soldagem mantendo a temperatura ambiente em torno de 22 °C. Além do início da primeira solda longitudinal, percebe-se um aumento rápido de temperatura (primeiro pico de temperatura).
- Segunda região: esta região é semelhante a primeira região, caracterizada pelo início da segunda solda longitudinal, na qual existe uma diminuição de temperatura, resfriamento, referente aos 20 segundos de preparação da solda e em seguida é iniciada a segunda solda longitudinal, apresentando o segundo pico de temperatura no gráfico.
- Terceira região: esta região corresponde a primeira solda circunferencial, iniciada com a preparação da solda, correspondente a 20 segundos. No gráfico este início é representado pela segunda região de resfriamento. Em seguida é iniciado o processo da primeira solda circunferencial, em que é possível observar o terceiro pico de temperatura devido ao início do aquecimento, somado ao calor já absorvido nas soldas longitudinais realizadas. Além de apresentar uma região de tempo maior do que as anteriores, devido ao maior caminho percorrido durante o processo de soldagem.
- Quarta região: esta região corresponde a segunda solda circunferencial, semelhante a terceira região. Iniciada com os 20 segundos de preparação da solda, sendo representado pela terceira região de resfriamento. Logo em seguida é apresentado o quarto pico de temperatura, conseqüência do início do processo de soldagem, apresentando características descritas na terceira região.
- Quinta região: é a região de resfriamento para todas as velocidades, caracterizada pelo decaimento de temperatura, apresentando uma temperatura final próxima a ambiente, 22 °C, decorrente a convecção e radiação.

### 3.2. Distribuição do fluxo de calor total no conjunto vaso de pressão

A Figura (9) apresenta os dados da distribuição de fluxo de calor total resultante da análise transiente térmica, conforme cada velocidade.

Figura 9 - Distribuições de fluxo de calor total em função do tempo.



Fonte: Autores.

Comparando a Figura (8) ao gráfico anterior da distribuição da temperatura no conjunto do vaso de pressão, é possível notar um comportamento semelhante decorrente da proporcionalidade existente entre fluxo de calor e temperatura. Por conta dessa mesma proporcionalidade, pode ser explicado em relações as curvas do gráfico, o aumento do fluxo de calor com a diminuição da velocidade.

Dado pela Equação (4), o fluxo de calor através de uma superfície é fornecido pela relação entre a quantidade de calor Q que atravessa a superfície e o intervalo de tempo decorrido.

$$\phi = Q/\Delta t \quad (4)$$

O valor de Q pode ser calculado pelas equações abaixo, ressaltando que a predominância para a soldagem é do fluxo de calor são convecção e condução, respectivamente.

$$Q = h(T_s - T_\infty) \quad (5)$$

$$Q = -k(dT/dx) \quad (6)$$

Observando a região de fluxo de calor total com maiores picos, Figura (9), encontra-se, para todas as velocidades, as regiões das soldas longitudinais diferentemente do que pode ser observado na distribuição da temperatura, pois existe

uma mudança de geometria e chanfro na solda, que afeta o coeficiente de convecção, já que o mesmo é influenciado geometria, regime do escoamento e o tipo de fluido.

### 3.3. Distribuição das tensões de von mises no conjunto vaso de pressão

A Figura (10a), Figura (10b) e Fig (10c) mostra as tensões von Mises na estrutura para velocidades 6 mm/s, 7 mm/s e 8mm/s, respectivamente.

Figura 10a - Distribuição das tensões de von Mises na estrutura para velocidade 6 mm/s.



Figura 10b - Distribuição das tensões de von Mises na estrutura para velocidade 7 mm/s.

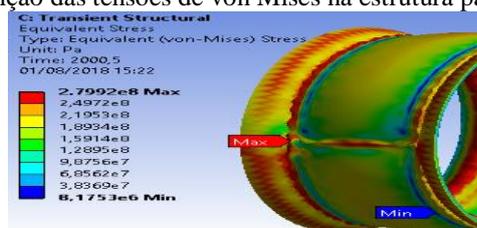
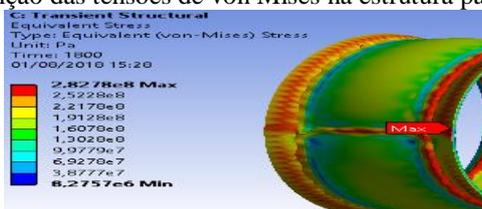


Figura 10c - Distribuição das tensões de von Mises na estrutura para velocidade 8 mm/s.

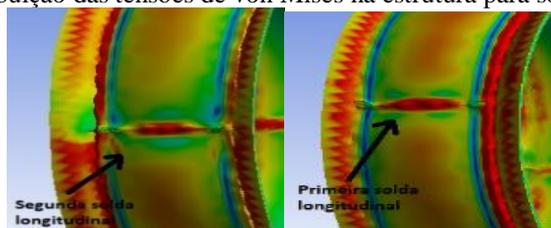


Fonte: Autores.

É possível concluir através das Figura (10a), (10b) e (10c) que as maiores tensões de von Mises observadas ocorrem na região central e nas proximidades das soldas longitudinais e circunferenciais, observadas pelas regiões na cor vermelha. Comparando as três figuras verifica-se também que existe um aumento da tensão de von Mises acompanhada do aumento de velocidade.

Ainda analisando as imagens térmicas anteriores, Figura (10a), (10b) e (10c), com a Figura (11) é possível afirmar ainda, pela formação da região na cor vermelha, que a área mais crítica observada em relação as soldas longitudinais, é a primeira solda longitudinal para todas as velocidades, causadas também pela soma dos efeitos térmicos causado pelas soldas posteriores e tempo de resfriamento.

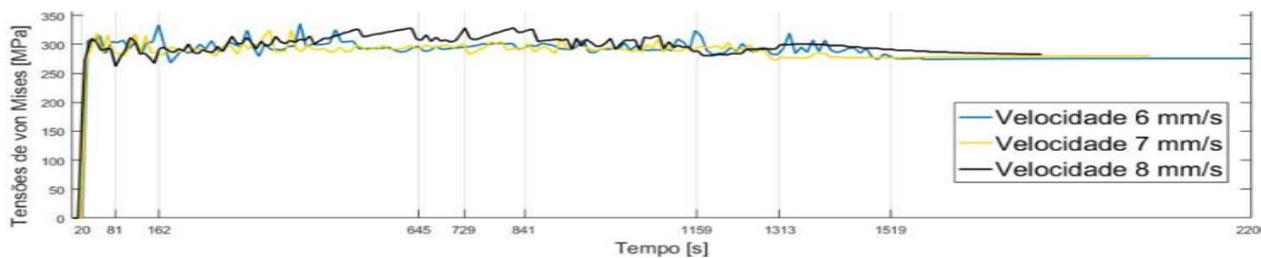
Figura 11 - Distribuição das tensões de von Mises na estrutura para soldas longitudinais.



Fonte: Autores.

Conforme a Figura (12) é possível observar na distribuição das tensões von Mises que quando o valor da velocidade aumenta tende a aumentar os picos das tensões von Mises, devido ao menor tempo de resfriamento existente entre os passes das soldas circunferenciais e longitudinais. Ainda é possível notar maiores picos de tensões situadas nas proximidades do encontro entre a primeira solda circunferencial e a primeira solda longitudinal, para todas as velocidades estabelecidas para soldagem, situadas nas regiões entre 162 segundos e 841 segundos.

Figura 12 - Distribuição das tensões von Mises no conjunto vaso de pressão.

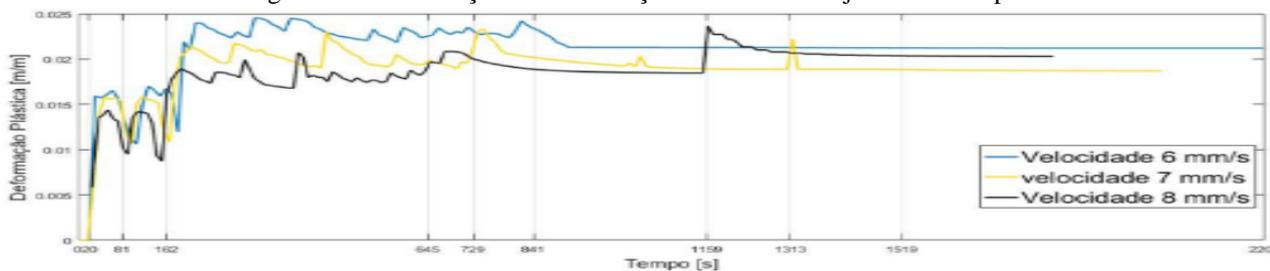


Fonte: Autores.

### 3.4. Distribuição das tensões de von mises no conjunto vaso de pressão

Na Figura (14) é possível notar uma proporcionalidade em relação a Figura (8). Na distribuição da deformação plástica é possível notar que as duas primeiras regiões bem definidas, referentes as duas soldas longitudinais, se apresentam em um menor período do gráfico comparando com as demais áreas e possui menores valores decorrente do menor percurso soldado. A região seguinte é apresentada por ter valores bem maiores decorrente do maior percurso, consequente maior tempo e maiores deformações plásticas serão obtidas durante o processo de soldagem.

Figura 14 - Distribuição da Deformação Plástica no conjunto vaso de pressão.



Fonte: Autores.

Em relação a cada curva é perceptível a diminuição da deformação plástica com o aumento da velocidade, causado pela diminuição do tempo de acordo com a velocidade e assim diminuição da energia do processo de soldagem em cada ponto.

## 4. CONCLUSÃO

Conforme os resultados obtidos através do método abordado, pode-se verificar que apesar da pequena variação, apenas 1mm/s da velocidade de soldagem, obteve-se resultados significativos nos campos das tensões von Mises, temperatura, fluxo de calor total e deformações plásticas, além de possibilitar a discussão do comportamento e causas dos resultados obtidos para cada velocidade de soldagem, nos quais devem ser considerados uma série de fatores, como geometria e tempo. Proporcionando também resultados que possibilitam o estudo com outros parâmetros de soldagem para se obter o ponto ideal do processo.

## 5. REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, J.I.L., 2017, “Determinação das tensões residuais via análise numérica transiente térmica de vasos de pressão submetidos a reparos por soldagem”, Tese – Universidade Federal da Paraíba.
- BAKER, A.J., 2012, “Finite Elements: Computational Engineering Sciences”, 1o Edition, John Wiley & Sons, Ltd, USA.
- HARVEY, J.F., “Theory and Design of Modern Pressure Vessels”, Van Nostrand Reinhold Co, New York, 1974.
- INCROPERA [et al.], “Fundamentos de transferência de calor e de massa”, 6ª Edição LTC, Rio de Janeiro.
- PAIVA, V.E.L., “Simulação de tensões residuais de soldagem e seu alívio por teste hidrostático”, Puc-Rio, 2015.
- SAVAGE, W. F.; NIPPES, E. F.; AGUSA, K. “Effect of Arc Force on Defect Formation in GTA Welding” Welding Journal, jul. 1979. 212s-224s.
- SCHWEDERSKY, M.B., Dutra, J.C., Okuyama, M.P., Silva, R.H.G., “High Productivity TIG Welding: Influence of Shielding Gases on the Limit Speed for Defect Formation”, Santa Catarina, Brasil, 2011.

## 6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.