

Comparação de métodos de extrapolação para cálculo de tensão de Hot Spot em uma junta soldada

Vinícius Lins de Faria; Lucas Lincoln Fonseca Soares², Valter Estevão Beal³

¹ Bolsista; Iniciação tecnológica - ANP; vinicius.faria@fbter.org.br

² Centro Universitário SENAI CIMATEC; Salvador - BA; lucas.fs@fieb.org.br

³ Centro Universitário SENAI CIMATEC; Salvador - BA; valtereb@fieb.org.br

RESUMO

Nesse artigo foram analisados métodos de cálculo da tensão na margem da solda de uma junta tubular para fins de estimar a vida em fadiga. Foram comparados os resultados usando o método de Hot Spot Stress, e Notch Stress. Além disso, três critérios de extrapolação para tensão de *Hot Spot* foram analisados variando o nível de refinamento de malha na margem da solda. Os resultados indicaram uma diferença significativa entre os métodos, sendo o Notch Stress mais conservador. Também foi observado que os critérios de extrapolação linear têm menor sensibilidade ao refino de malha. Para trabalhos futuros, pretende-se propor outros métodos de extrapolação de HSS, a fim de produzir resultados mais compatíveis com o método NS.

PALAVRAS-CHAVE: Solda, juntas tubulares, *hot spot stress*, *notch stress*, fadiga.

1. INTRODUÇÃO

A falha por fadiga em estruturas é causada por cargas cíclicas atuando ao longo do tempo, gerando e propagando trincas, e conseqüentemente levando ao colapso da estrutura. Em juntas soldadas esse fenômeno se torna ainda mais crítico, sendo difícil de ser estimado a vida em fadiga pelo fato de que essas regiões podem apresentar concentradores de tensões. Isso ocorre pois, na modelagem da solda, poderá haver uma descontinuidade geométrica, principalmente na margem da solda. Assim, devido à dificuldade de calcular numericamente as tensões nesta região, foram desenvolvidos métodos de aproximação para o cálculo das tensões nesta região crítica. Esses métodos de aproximação, conhecidos como *hot spot stress* (HSS), consistem na aplicação de critérios de extrapolação para estimar a tensão na margem da solda. Por outro lado, existe outro método conhecido como *notch stress* (NS), que consiste em modelar um filete nesta margem, e a tensão máxima principal resultante no filete é usada como parâmetro para estimar a vida em fadiga. O método de NS é mais preciso e conservador, no entanto possui um custo computacional mais elevado em relação ao método HSS. Isso ocorre porque a malha tem que ser suficientemente refinada no filete. Existem diversos trabalhos que aplicam as duas metodologias, dentre eles, vale citar os que foram as principais referências para o presente artigo: Olmo¹, Rajaganesan², Mecséri, B. J. e Kövesdi³. Sendo assim, o objetivo desse artigo é comparar o resultado da tensão na margem da solda usando alguns critérios de extrapolação do método HSS com o método NS. O caso de análise é uma junta tubular em T. Além disso, é feita uma análise dos resultados em função da variação do nível de refinamento de malha na margem da solda a fim de determinar um parâmetro que seja possível estimar a tensão de NS através do cálculo da tensão de HSS para um dado critério de extrapolação.

2. METODOLOGIA

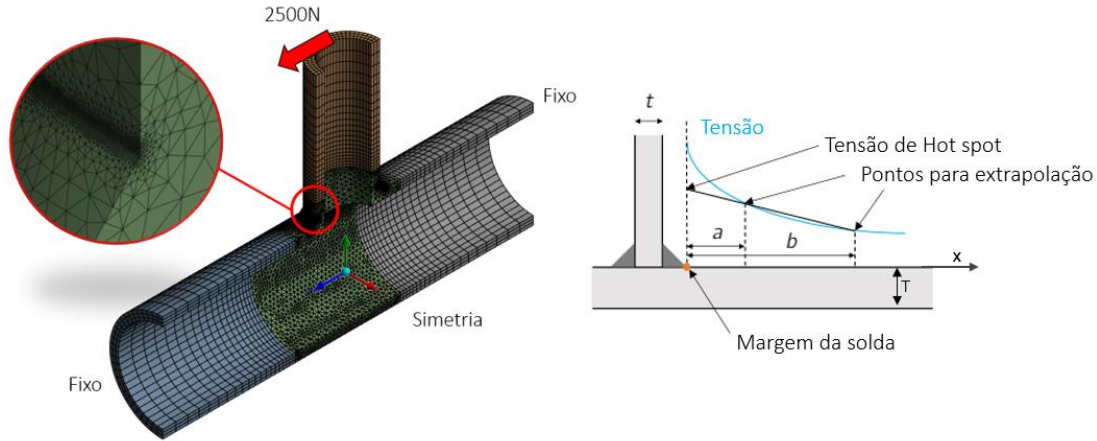
O modelo CAD da junta tubular e o modelo de elementos finitos foram feitos utilizando o *software* ANSYS *Mechanical* (Figura 1a). A Tabela 11 mostra as cotas da junta tubular considerada neste artigo, sendo a corda o tubo com maior diâmetro e o braço o tubo de menor diâmetro. Devido a simetria do carregamento, foi considerado representar apenas metade do modelo. Para fins de geração de malha, a junta tubular foi dividida em blocos. Foram aplicados elementos tetraédricos no bloco que contém a solda, e elementos hexaédricos estruturados nos blocos mais afastados. Para estudo do método de HSS, foi gerado um modelo com a margem da solda sem tratamento. Já para aplicar o método de NS, foi gerado outro modelo contendo um filete (Figura 1a). Segundo Olmo¹, um raio de filete igual a 1 mm proporciona resultados de concentradores de tensões mais próximos daqueles obtidos analiticamente. Além disso, aquele valor também é uma orientação da norma da DNV⁴ aplicada a estruturas em ambientes *offshore*.

Para geração de malha foi considerado 20 elementos com *bias factor* igual a 5 ao longo do comprimento de ambos os tubos, 15 elementos no diâmetro da corda, 30 elementos no diâmetro do braço, e 3 elementos na espessura. No bloco que contém a solda, os elementos têm tamanho padrão utilizado pelo *software*. Para o modelo com o filete, foi considerado tamanho do elemento igual a 0,25 mm na face. No modelo para o HSS, o tamanho do elemento na margem da solda foi variado em 0,25; 0,5; 1; 2 e 4 mm.

Em geral, o cálculo do HSS é feito utilizando métodos de extrapolação linear como mostrado na Figura 1b, que foi adaptada do trabalho de Olmo¹. As distâncias *a* e *b* são definidas a partir da margem da solda, e

uma tensão extrapolada que intercepta o eixo das tensões é definida como a tensão de *hot spot*. Uma outra abordagem consiste em determinar uma distância a partir da margem da solda e considerar a tensão nesse ponto como a tensão de *hot spot*. Nesse trabalho foram analisados três critérios de extrapolação, listados na Tabela 2, sendo todos recomendações da norma DNV-RP-C203⁴.

Figura 1: (a) Malha, condições de contorno e carregamentos aplicados. (b) Esquema para determinação da HSS.



Fonte: Autor.

Tabela 1 - Cotas da junta tubular.

Descrição	Dimensão (mm)
Diâmetro da corda (D)	200
Diâmetro do braço (d)	120
Espessura da corda (T)	16
Espessura do braço (t)	16
Espessura do cordão de solda (a)	12
Comprimento da corda (L)	700
Comprimento do braço (h)	250

Fonte: Autor.

Tabela 2: Distancias a e b para os critérios de extrapolação analisados.

Critérios de Extrapolação	a	b
Critério 1	$0,5t$	$1,5t$
Critério 2	$0,1\sqrt{r t}$	-
Critério 3	$0,2\sqrt{r t}$	$0,4\sqrt[4]{r t R T}$

Fonte: Autor.

O critério 1, em geral, é o menos conservador uma vez que os pontos de extrapolação se encontram mais distantes da margem da solda. Nesse critério a espessura t corresponde ao componente tubular (corda ou braço) a qual a tensão máxima na margem da solda foi calculada. No critério 2, considera-se a tensão resultante diretamente a partir da distância a , e assim como no critério 1, as dimensões r e t correspondem ao componente a qual a tensão máxima foi calculada. O critério 3 é o mais conservador, e os parâmetros correspondem ao raio e espessura da corda e braço conforme está na Tabela 1. Vale ressaltar que os critérios 2 e 3 são exclusivos para juntas tubulares, no entanto, alguns trabalhos aplicam o critério 1 uma vez que este tende a ser menos sensível a qualidade de malha. Finalmente, a tensão de *hot spot* dos critérios 1 e 3 pode ser calculada como:

$$\sigma_{HSS} = \sigma_b - \frac{b}{b-a} (\sigma_b - \sigma_a) \quad \text{Eq. (1)}$$

onde σ_a e σ_b são as tensões correspondentes aos pontos a e b , respectivamente.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 2 e a Figura 2 mostram os resultados obtidos aplicando todos os critérios apresentados e a tensão de NS. Vale ressaltar que os valores de HSS mostrados correspondem à média de todos os 5 modelos

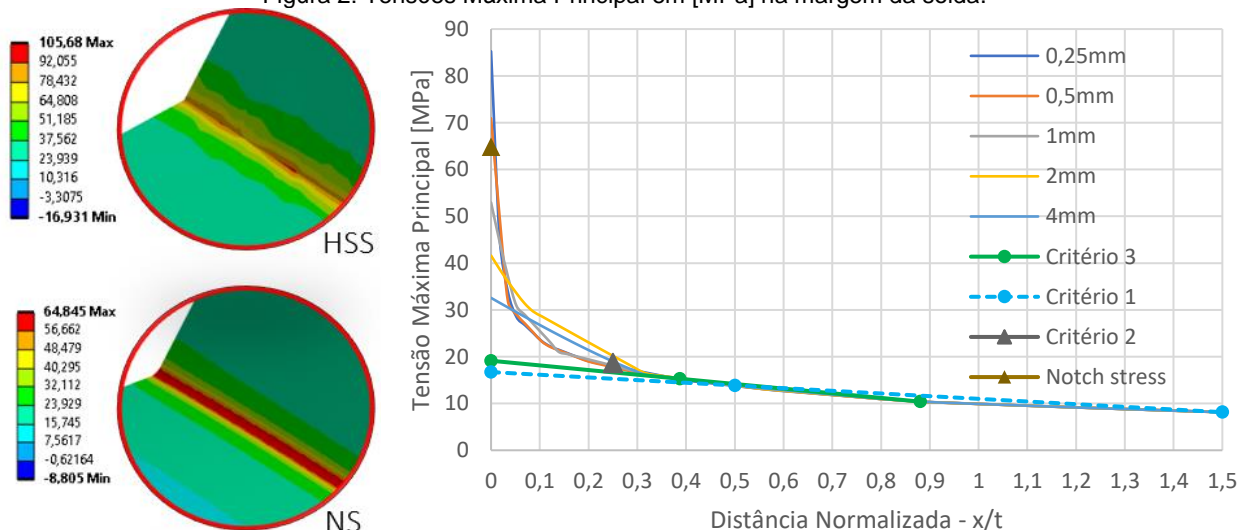
utilizados. Observa-se uma grande diferença entre os resultados de HSS e NS, em todos os casos, superior a 3 vezes, demonstrando que o resultado do método NS é mais conservador. Observa-se graficamente que para elementos menores que 2 mm a tensão na margem da solda alcança valores maiores que o NS, no entanto esses valores são caracterizados como concentradores de tensão. Comparando os critérios de extrapolação de HSS, o critério 1 foi o menos conservador, e apresentou o menor desvio padrão para os cinco níveis de refinamento de malha analisados. O critério 2 foi o que apresentou maior desvio padrão caracterizando maior sensibilidade a malha em relação aos outros critérios. O número de ciclos para falha em fadiga foi calculado usando a curva para juntas tubulares disponíveis em [4] para estruturas expostas ao ar, cujos parâmetros são: $\log \bar{a} = 16,13$ e $m = 5$ (método de HSS), e $\log \bar{a} = 17,596$ e $m = 5$ (método de NS). Finalmente, vale ressaltar que os critérios de HSS não tiveram grande disparidade, devido a malha, em razão da localização dos pontos de extrapolação não sofrerem influências da descontinuidade geométrica criada pela margem da solda.

Tabela 2 - Tensões da junta tubular

Critérios de Extrapolação	HSS [MPa]	Relação entre NS e HSS	Desvio padrão	Números de ciclos até a falha
Critério 1	16,7069	3,8815	0,1080	103,6 10 ⁸
Critério 2	18,5969	3,4946	0,9978	60,6 10 ⁸
Critério 3	19,1289	3,3901	0,1861	52,7 10 ⁸
Notch Stress	64,8450	-	-	3,44 10 ⁸

Fonte: Autor

Figura 2: Tensões Máxima Principal em [MPa] na margem da solda.



Fonte: Autor.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Determinar qual método mais apropriado para calcular a tensão na margem de juntas soldadas pode ser uma tarefa desafiadora. Neste artigo foi apresentada uma análise numérica sobre métodos de extrapolação para cálculo de tensões na solda de uma junta tubular. Com os resultados de tensão obtidos, foi observado que os critérios de extrapolação mais sensíveis ao nível de refinamento de malha tendem a ser conservadores. Por outro lado, os critérios de extrapolação linear (1 e 3), tendem a ser menos sensíveis a malha, conforme resultado do desvio padrão. Observa-se que ambos os métodos podem apresentar resultados muito distintos para o número de ciclos, sendo que o método NS apresentou resultados mais conservadores. Para trabalhos futuros, pretende-se propor métodos de extrapolação de HSS para produzir resultados mais compatíveis com o método NS. Além disso, será realizada uma análise com relação aos custos computacionais dos métodos.

5. REFERÊNCIAS

- ¹MIDDELDORP, Olmo. **The Effective Notch Stress Approach for a Tubular Joint. MSc Thesis.** Delft: Ramboll, 2023
- ²Rajaganesan, P. **Modelling, evaluation and assessment of welded joints using finite element methods.** Linköping: SIGMA industry, 2020.
- ³MECSÉRI. B. J., e KOVESDI. B. **Discussion on the Hot-Spot and Notch Stress Based Fatigue Assessment Methods Based on Test Results.** Budapest: International Journal of Steel Structures, 2020.
- ⁴DNV RP-C203: **Recommended practice fatigue design of offshore steel structure.** Høvik: DNV GL, 2016