

FADIGA EM ESTRUTURAS METÁLICAS TUBULARES¹

*Carmem Miranda Lage²
Marcílio Sousa da Rocha Freitas³
Arlene Maria Sarmanho Freitas⁴*

Resumo

O fenômeno da fadiga é caracterizado pelo crescimento de trincas em estruturas submetidas a cargas que variam no tempo – cargas cíclicas – seguido de eventual falha. Devido as excelentes propriedades que apresentam, os perfis tubulares estruturais (circulares e retangulares) são utilizados em muitas aplicações de engenharia sujeitas a esse fenômeno, tais como pontes, plataformas *offshore*, torres de comunicação. Quando se trata de estruturas soldadas, a iniciação e propagação das trincas são bastante facilitadas pelo cordão de soldagem ou por defeitos de soldagem, pois produzem zonas de concentração de tensão. Neste trabalho será feita uma revisão do fenômeno da fadiga e do comportamento à fadiga de estruturas tubulares soldadas, serão analisados os procedimentos adotados em algumas normas de dimensionamento de estruturas metálicas para a verificação da fadiga e a aplicação destes em um exemplo prático de estrutura tubular.

Palavras-chave: Estruturas metálicas; Perfis estruturais tubulares; Fadiga.

FATIGUE IN TUBULAR STEEL STRUCTURES

Abstract

The phenomenon of fatigue is characterized by the growth of cracks in structures subjected to varying loads - cyclic loading - followed by eventual failure. Given the excellent properties of structural hollow sections (circular and rectangular), they are used in many engineering applications subject to this phenomenon, such as bridges, offshore platforms, towers of communication. In welded structures, the initiation and propagation of cracks are quite facilitated by weld defects because they produces areas of stress concentration. This work makes a review study of the phenomenon of fatigue and the fatigue behavior of welded tubular structures, and it analyses the procedures adopted in some design codes of steel structures to the verification of fatigue and finally a practical example of tubular structure is presented and verified.

Key words: Steel structures; Hollow structural sections; Fatigue

¹ *Contribuição técnica ao 63º Congresso Anual da ABM, 28 de julho a 1º de agosto de 2008, Santos, SP, Brasil*

² *Aluna de mestrado; Dep. Eng. Civil – Escola de Minas/UFOP; carmemmirandalage@yahoo.com.br;*

³ *Engº Civil; Professor Doutor; Dep. Eng. Civil – Escola de Minas/UFOP; marcilio@em.ufop.br;*

⁴ *Engª Civil; Professora Doutora; Dep. Eng. Civil – Escola de Minas/UFOP; arlene@em.ufop.br*

1 INTRODUÇÃO

As ligações de estruturas metálicas tubulares, tais como estruturas treliçadas de pontes, passarelas, plataformas *offshore*, condutores de fluidos, são geralmente feitas por meio de solda. No que diz respeito à ligação, alguns dos fatores que exercem influência na vida à fadiga são o tipo de ligação; carregamento e detalhe estrutural; material de base e de soldagem; defeitos de soldagem e gravidade desses defeitos. Em ligações há ainda a considerar o fato do cordão de solda facilitar bastante à iniciação e propagação de trincas devido à intensificação de tensões.

O dimensionamento à fadiga de estruturas metálicas já está previsto em diversas regras de cálculo de códigos e especificações ou normas, tais como CIDECT;⁽¹⁾ Eurocode 3;⁽²⁾ AISC;⁽³⁾ NBR 8800⁽⁴⁾ e AWS.⁽⁵⁾ O CIDECT⁽¹⁾ foi um dos primeiros organismos a investigar o comportamento à fadiga, em especial das estruturas tubulares, que surgiram na Europa na década de 80, conduzindo ao desenvolvimento de códigos europeus, tais como o Eurocode 3.⁽²⁾ O CIDECT⁽¹⁾ e Eurocode 3⁽²⁾ foram escolhidos entre os demais para o cálculo referente à avaliação da vida útil de uma estrutura tubular soldada que será apresentado neste trabalho.

2 METODOLOGIA PARA VERIFICAÇÃO DA FADIGA EM ESTRUTURAS METÁLICAS TUBULARES

Vários métodos, fundamentados em formas diferentes de avaliação, têm sido desenvolvidos para determinar a resistência à fadiga de ligações soldadas de perfis tubulares estruturais. Segundo van Wingerde et al.⁽⁶⁾ os métodos comumente utilizados são baseados em uma representação de distribuições de tensões no pé da solda a diferentes graus de precisão. Estas abordagens, baseadas em tensão nominal (método da classificação), tensão *hot spot* (método da tensão geométrica), tensão de entalhe e mecânica da fratura são agrupadas, uma vez que uma pode ser considerada refinamento da outra.

Neste trabalho será apresentado o desenvolvimento do cálculo de uma estrutura baseado no método da classificação e tensão geométrica, que são os métodos descritos no CIDECT⁽¹⁾ e Eurocode 3.⁽²⁾ A metodologia utilizada para analisar o comportamento à fadiga por estes métodos é a das curvas S-N (*Stress versus Number of cycles*) ou “curvas de Wöhler”. Esta compara a iniciação de trincas por fadiga de componentes reais com os dados obtidos de testes experimentais para corpos de prova padronizados sob carregamentos de amplitude constante. Estes dados, apresentados sob a forma de gráficos, representam uma relação quantitativa entre a amplitude de tensão aplicada e o número de ciclos para a falha.

2.1 Método Baseado na Tensão Nominal (Método da Classificação)

De acordo com o Eurocode 3,⁽²⁾ cada tipo de ligação ou elemento estrutural é classificado por meio de uma tabela numa dada categoria de detalhe, $\Delta\sigma_C$, que representa o limite de resistência à fadiga referente a dois milhões de ciclos – ponto 1 na curva S-N da figura 1. $\Delta\sigma_D$ é o valor limite de tensão à fadiga para amplitude constante para um dado número de ciclos N_D e $\Delta\sigma_L$ é o limite de tensão, para um dado número de ciclos N_L , abaixo do qual não há contribuição para o acúmulo de danos de fadiga – pontos 1 e 2 respectivamente da Figura 1. $\Delta\sigma_D$ e $\Delta\sigma_L$ podem ainda ser obtidos pelas equações 1 e 2 respectivamente.

As tensões nominais, σ_n , numa ligação soldada são aquelas obtidas de solicitações axiais e de flexão de acordo com a análise estrutural, excluindo as tensões geradas excepcionalmente pelo cordão de solda. De acordo com o Eurocode 3,⁽²⁾ na ausência de uma análise rigorosa da ligação, deve ser aplicado um fator de majoração nas ações axiais, que leva em conta os momentos devidos a efeitos secundários, tais como os ocasionados pela rigidez das ligações de vigas treliçadas. As etapas para o cálculo da vida útil à fadiga são basicamente as seguintes: escolha da categoria de detalhe, $\Delta\sigma_C$; cálculo da tensão nominal, σ_n , cálculo de $\Delta\sigma_D$ e $\Delta\sigma_L$ e cálculo do número de ciclos para falha, N_f , por meio da curva S-N da Figura 1, para a categoria de detalhe correspondente.

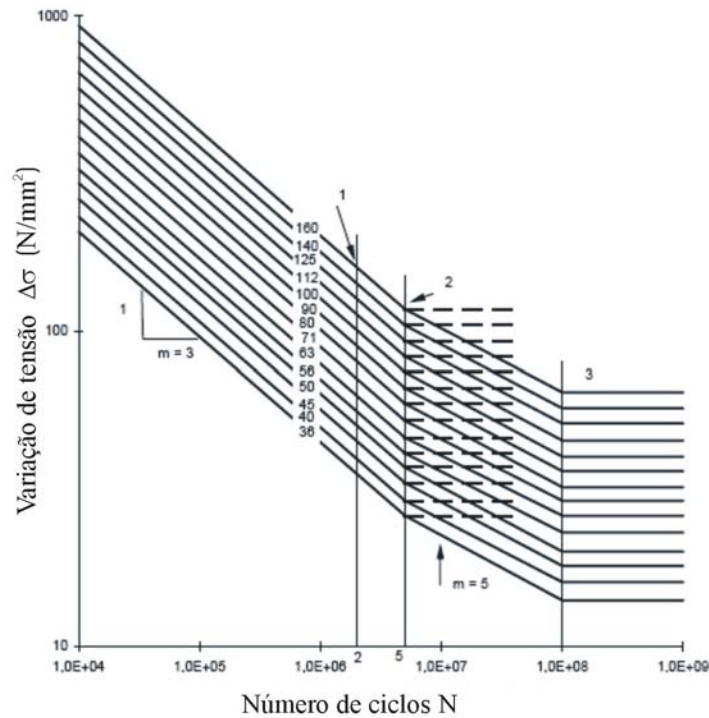


Figura 1 – Curvas S-N.⁽²⁾

$$\Delta\sigma_D = \left(\frac{2}{5}\right)^{1/3} \Delta\sigma_C = 0,737\Delta\sigma_C \quad (1)$$

$$\Delta\sigma_L = \left(\frac{5}{100}\right)^{1/5} \Delta\sigma_D = 0,549\Delta\sigma_D \quad (2)$$

O número de ciclos para a falha também pode ser obtido pelas equações 3 e 4 correspondentes as curvas S-N dadas pela Figura 1.

$$\text{Se } \gamma_{Ff}\Delta\sigma_n \geq \frac{\Delta\sigma_D}{\gamma_{Mf}}; N_f = 5 \cdot 10^6 \cdot \left[\frac{\Delta\sigma_D/\gamma_{Mf}}{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_n} \right]^3 \quad (3)$$

$$\text{Se } \frac{\Delta\sigma_D}{\gamma_{Mf}} > \gamma_{Ff}\Delta\sigma_n \geq \frac{\Delta\sigma_L}{\gamma_{Mf}}; N_f = 5 \cdot 10^6 \cdot \left[\frac{\Delta\sigma_D/\gamma_{Mf}}{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_n} \right]^5 \quad (4)$$

onde γ_{Ff} e γ_{Mf} são fatores de segurança parciais. O Eurocode 3⁽²⁾ recomenda γ_{Ff} igual à unidade e γ_{Mf} de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1 – Fatores de segurança parciais γ_{Mf}

Filosofia de projeto	Conseqüência da falha	
	Baixa	Alta
Danos toleráveis	1,00	1,15
Vida garantida	1,15	1,35

Segundo Branco et al.,⁽⁷⁾ as normas de dimensionamento adotam uma ou mais das filosofias a seguir para o cálculo da vida à fadiga: filosofia *safe-life* ou vida garantida; filosofia *fail-safe* ou colapso controlado e filosofia *damage tolerant* ou danos toleráveis. A filosofia de vida garantida deve ser aplicada nos casos em que a formação de trincas levaria a falha de um elemento ou de toda a estrutura. As filosofias de colapso controlado e danos toleráveis são semelhantes. Ambas devem proporcionar um nível aceitável de confiabilidade de que a estrutura irá ter um desempenho satisfatório durante a vida de projeto, sendo possível detectar e reparar danos que possam vir nela ocorrer.

2.2 Método baseado na tensão geométrica (tensão “hot spot”)

Segundo Branco,⁽⁷⁾ a tensão geométrica, σ_{rhs} , é a tensão crítica que ocorre na superfície exterior do pé do cordão de solda. Pode ser obtida da análise por elementos finitos ou formulações paramétricas. Neste caso é determinada majorando-se a tensão nominal por um fator de concentração de tensões (SCF), segundo a equação 5

$$(\sigma_{rhs})_{i,j} = (SCF)_{i,j} \times (\sigma_n)_{i,j} \quad (5)$$

onde i é o tipo de barra: diagonal (brace) ou banzo (chord) e j é o tipo de carregamento. De acordo com o CIDECT⁽¹⁾ o número de ciclos para a falha pode ser obtido diretamente das equações 6 e 7 abaixo ou das curvas S-N da Figura 2.

$$\text{Para } 10^3 < N_f < 5 \cdot 10^6, \quad \log(N_f) = \frac{12,476 - 3 \cdot \log(\sigma_{rhs})}{1 - 0,18 \cdot \log\left(\frac{16}{t}\right)} \quad (6)$$

$$\text{Para } 5 \cdot 10^6 < N_f < 10^8, \quad \log(N_f) = 16,327 - 5 \cdot \log(\sigma_{rhs}) + 2,01 \cdot \log\left(\frac{16}{t}\right) \quad (7)$$

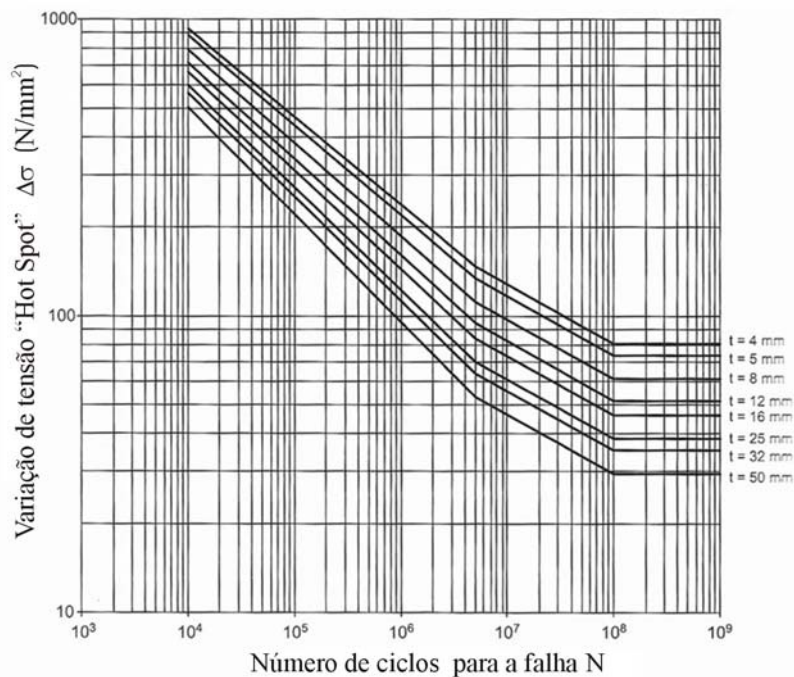


Figura 2 – Curvas S-N.⁽¹⁾

3 EXEMPLO DE AVALIAÇÃO DE VIDA ÚTIL À FADIGA

A figura a seguir se refere a uma viga treliçada uniplanar com ligações do tipo “K”. A excentricidade “e” das ligações é zero. O carregamento varia com uma amplitude constante, de um valor zero ao carregamento indicado na Figura 3. A treliça foi dimensionada para a carga estática de acordo com as prescrições do Eurocode 3.⁽⁸⁾ A treliça é composta de perfis de seção circular (CHS – *circular hollow sections*), tanto no banzo quanto diagonais, estando as suas propriedades geométricas dadas na Tabela 2. As dimensões da Figura 3 estão em milímetros.

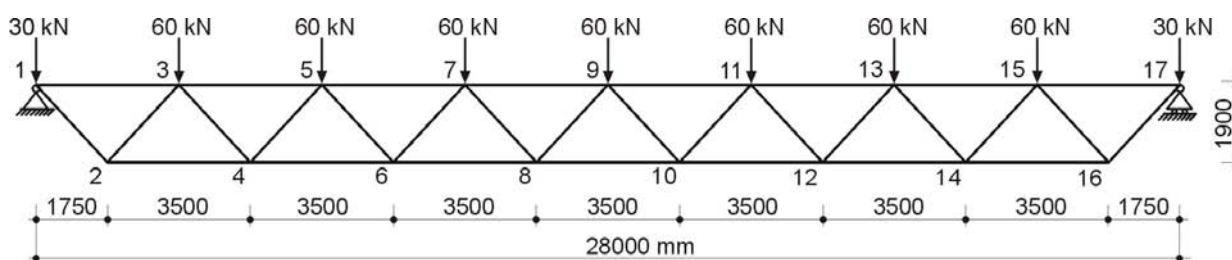


Figura 3 – Treliça uniplanar submetida a um carregamento de amplitude constante

O problema consiste em avaliar a vida útil à fadiga da ligação de número 8 da viga treliçada, aplicando o método baseado na tensão geométrica e o método baseado na tensão nominal.

Tabela 2 – Seções e propriedades geométricas dos perfis

Barra	Seção	Área (mm ²)	Módulo elástico resistente à flexão (mm ³)
Diagonais	CHS 141,3 x 5,6	2370	77400
Banzo	CHS 273,0 x 7,8	6500	419000

As ligações da treliça são semelhantes à ilustrada na Figura 4, onde d_0 e d_1 são os diâmetros exteriores dos perfis do banzo e diagonais, respectivamente. Da mesma forma t_0 e t_1 referem-se às espessuras. A distância g (*gap*) é a separação entre os tubos que se interceptam no nó; a excentricidade “ e ” é a distância entre o eixo do banzo e o ponto de interseção dos eixos das diagonais com o eixo do banzo e “ θ ” é o ângulo entre o eixo do banzo e diagonal.

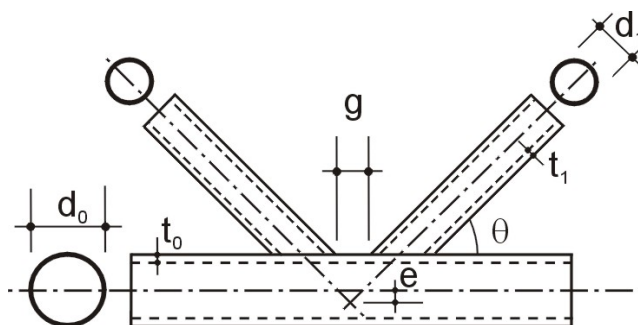


Figura 4 – Ligação “K”

3.1 Aplicação do Método Baseado na Tensão Nominal (Método da Classificação)

Este método apresenta algumas limitações. Quando aplicado segundo o Eurocode 3,⁽²⁾ no que diz respeito a vigas treliçadas, a classificação por categoria de detalhe é feita somente para ligações do tipo “K” ou “N”. Além disso, para estes tipos de ligações, alguns parâmetros dimensionais e não-dimensionais estão contidos num intervalo de validade. A treliça do exemplo foi dimensionada seguindo estas limitações. Isto está explicitado na Tabela 3, onde $\beta = d_1/d_0$ e $\gamma = d_0/2 \times t_0$.

Tabela 3 – Seções e propriedades geométricas dos perfis

Parâmetros	Parâmetros do exemplo	Faixa de validação segundo Eurocode 3(3)
β (beta)	0,50	$0,25 \leq \beta \leq 1,0$
γ (gama)	17,5	$5 \leq 2\gamma \leq 25$
θ (teta)	47,4°	$35^\circ \leq \theta \leq 50^\circ$
g (gap)	59,3	$g \geq 13,4$
t (espessura)	$t_1 = 5,6$ mm e $t_0 = 7,8$ mm	$t \leq 8$ mm
d (diâmetro)	$d_1 = 141,3$ mm e $d_0 = 273$ mm	$d \leq 300$ mm

Segundo o Eurocode 3,⁽²⁾ a razão t_0/t_1 é levada em consideração na escolha da categoria. Para valores intermediários deve ser feita uma interpolação linear entre as categorias de detalhes. A categoria de detalhe, $\Delta\sigma_C$, obtida por interpolação foi de 63,0 N/mm² para $t_0/t_1 = 1,4$.

A análise estrutural adotada neste exemplo é feita assumindo a treliça como um pórtico segundo prescrições do CIDECT.⁽¹⁾ Forças axiais e momentos fletores nas barras podem ser determinados assumindo na análise estrutural continuidade do banzo e diagonais rotuladas. Os esforços encontrados na ligação 8 são apresentados na Figura 5. Estes podem ser tratados com uma combinação das duas condições de carregamento conforme ilustra a Figura 6. A condição 1 trata de um carregamento axial balanceado e a condição 2 de um carregamento no banzo (axial e flexão).

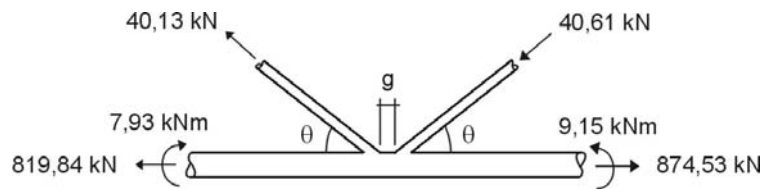


Figura 5 – Força axial e momento fletor na ligação 8.

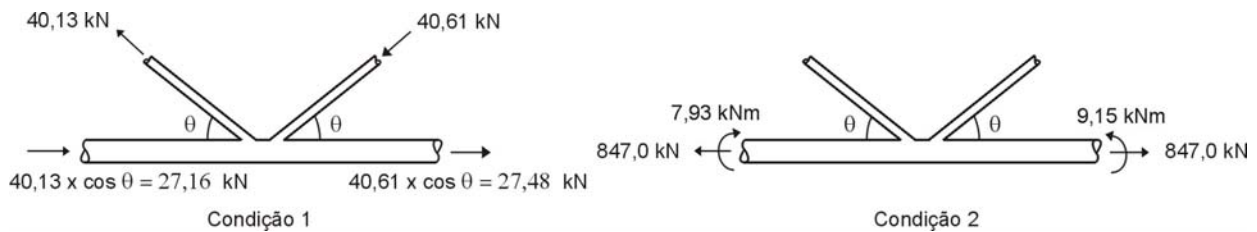


Figura 6 – Condições de carregamento 1 e 2

Da resistência dos materiais, o cálculo da tensão nominal para as condições de carregamento 1 e 2 é dado pelas equações 8 e 9 respectivamente

$$(\sigma_n)_{\text{brace,ax}} = MF \cdot \frac{P_{\text{ax}}}{A} = 1,3 \cdot \frac{40,61 \cdot 10^3}{2370} = 22,3 \text{ N/mm}^2 \quad (8)$$

$$(\sigma_n)_{\text{chord,ch}} = (\sigma_n)_{\text{chord,ax}} + (\sigma_n)_{\text{chord,ipb}} = MF \cdot \frac{P_{\text{ax}}}{A} - \frac{M_{\text{ipb}}}{W_{\text{ipb}}} = 1,5 \cdot \frac{847,0 \cdot 10^3}{6500} - \frac{9,15 \cdot 10^6}{419000} = 173,6 \text{ N/mm}^2 \quad (9)$$

onde $\sigma_{n,ax}$ é a tensão nominal devido à carga axial P_{ax} na barra; MF é um fator de majoração das cargas axiais, que leva em conta os momentos devido a efeitos secundários, tais como os ocasionados pela rigidez da ligação de vigas treliçadas; $\sigma_{n,ipb}$ é a tensão nominal devido à flexão no plano (*in plane bending*) e M_{ipb} e W_{ipb} são respectivamente o momento fletor no plano e o módulo elástico da seção. Segundo o Eurocode 3⁽²⁾, os valores dos fatores “MF” para uma ligação do tipo “K” com *gap* são 1,5 e 1,3 para banzo e diagonal respectivamente. Assim, os valores das tensões nominais para banzo e diagonais são 173,6 N/mm² e 22,3 N/mm², respectivamente.

O cálculo de $\Delta\sigma_D$ e $\Delta\sigma_L$ é feito pelas equações 1 e 2 apresentadas anteriormente. Assim, os valores calculados foram: $\Delta\sigma_D = 46,4 \text{ N/mm}^2$ e $\Delta\sigma_L = 25,5 \text{ N/mm}^2$. O número de ciclos para a falha obtido por meio das equações 3 e 4 e curva S-N (figura 1) apresentadas anteriormente, adotando os valores de $\gamma_{Ff} = 1,0$ e $\gamma_{Mf} = 1,15$ (para este exemplo assumiu-se que a filosofia de projeto adota foi a de danos toleráveis com alta consequência de falha. Da Tabela 1, o fator de segurança parcial é 1,15), segundo prescrições do Eurocode 3,⁽²⁾ foram de 62774 ciclos para o banzo. Quanto a diagonal, nenhum dano à fadiga nela ocorre, visto que a tensão nominal de 22,3 N/mm² para uma espessura de 5,6 mm está abaixo do valor limite de tensão para amplitude constante segundo prescrições do Eurocode 3.⁽²⁾ Então, a vida à fadiga esperada para a ligação 8 da treliça é de 62774 ciclos, com falha no banzo.

3.2 Aplicação do Método Baseado na Tensão Geométrica (Tensão *Hot Spot*)

De acordo com o Eurocode 3,⁽²⁾ os valores de SCF devem ser adotados de manuais ou calculados por elementos finitos. Neste trabalho, o cálculo dos SCF é baseado no trabalho de Karamanos, Romeijn e Wardenier.⁽⁹⁾ A equação geral para uma ligação uniplanar CHS do tipo “K” com *gap*, é expressa pela equação 10 para a condição 1 de carregamento e pela equação 11 para a condição 2.

$$SCF = \left(\frac{\gamma}{12}\right)^{\chi_1} \cdot \left(\frac{\tau}{0,5}\right)^{\chi_2} \cdot SCF_0(\beta, \theta) \quad (10)$$

$$SCF = 1,2 \left(\frac{\tau}{0,5}\right)^{0,3} \cdot (\sin\theta)^{-0,9} \quad (11)$$

Nas equações acima, γ e τ ($\tau = t_1/t_0$) são os parâmetros geométricos da seção. Os expoentes χ_1 e χ_2 dependem do tipo de carregamento e local de interesse para o cálculo da tensão geométrica. De acordo com Karamanos, Romeijn e Wardenier,⁽⁹⁾ os valores comumente adotados para estes expoentes são os apresentados na tabela IV, correspondentes às regiões mais críticas desse tipo de ligação. Os valores de SCF_0 foram obtidos dos ábacos do apêndice “D” do CIDECT,⁽¹⁾ por interpolação para $\beta = 0,5$ e $\theta = 47,4^\circ$. O cálculo dos SCF para banzo e diagonal é apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 – Cálculo dos fatores de concentração de tensão - SCF

Barra	Condição de carregamento	SCF ₀	χ_1	χ_2	SCF
Diagonal	1	2,27	0,5	0,5	3,29
Banzo	1	2,96	0,4	1,1	5,14
Banzo	2	2,0	-	-	2,0

Os valores das tensões nominais são os mesmos obtidos pelo método anterior. Assim, o cálculo das tensões geométricas é mostrado na Tabela 5, assumindo superposição de efeitos das condições de carregamento 1 e 2.

Tabela 5 – Cálculo da tensão geométrica

Barra	Tensão Geométrica Condição 1 (N/mm ²)	Tensão Geométrica Condição 2 (N/mm ²)	γ_{Mf}	Tensão Geométrica Final (N/mm ²)
Diagonal	73,3	-	1,15	84,2
Banzo	114,4	347,2	1,15	399,3

A equação 6 apresentada anteriormente é utilizada para o cálculo do número de ciclos para a falha. Sendo assim, o número de ciclos para a falha, N_f do banzo para uma espessura, t , de 7,8 mm e tensão geométrica de 399,3 N/mm² é igual a $10^{4,95}$ (89150 ciclos). Quanto a diagonal, nenhum dano à fadiga nela ocorre, visto que a tensão geométrica de 84,2 N/mm² para uma espessura de 5,6 mm está abaixo do valor limite de tensão para amplitude constante segundo prescrições do Eurocode 3.⁽²⁾ Então, a vida à fadiga esperada para a ligação 8 da treliça é de 89150 ciclos, com falha no banzo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Devido as excelentes propriedades dos perfis tubulares, estes têm sido largamente utilizados na construção civil e engenharia mecânica, tais como plataformas *offshore*, vigas treliçadas de pontes rodoviárias etc. Há anos o comportamento à fadiga de tais estruturas é foco de estudos de muitos pesquisadores e várias regras de cálculo de códigos ou normas de vários países já incluem este fenômeno no dimensionamento.

Este trabalho faz um resumo dos conceitos fundamentais do fenômeno da fadiga. Além disso, o procedimento de cálculo de dois métodos de avaliação da vida útil à fadiga (método baseado na tensão geométrica e método baseado na tensão nominal), indicados no Eurocode 3⁽²⁾ e CIDECT⁽¹⁾ são apresentados e aplicados à um exemplo prático de uma ligação soldada de uma viga treliçada.

Ambos os métodos tem por base de cálculo as curvas S-N. No método baseado na tensão nominal – método mais simples de ser aplicado –, o fator preponderante para o cálculo é o detalhe da ligação (tipo e geometria). Sabe-se que a geometria da ligação é inerente à distribuição de tensões. Assim este método apresenta como desvantagem principal o fato de agrupar numa mesma categoria de detalhe ligações submetidas à uma escala grande de tensões. Então, para os tipos de detalhe em que o comportamento à fadiga não é exclusivamente dependente da geometria exata das ligações este método é perfeitamente aceitável.

No método baseado na tensão geométrica o fator de concentração de tensão e fatores secundários, tais como rigidez e excentricidade da ligação, influenciam no cálculo da vida em fadiga. Sabe-se que em torno do perímetro de ligações de perfis tubulares soldados, tais como o do exemplo, existe uma variação muito grande das tensões, portanto este método por levar isto em consideração é mais adequado de ser aplicado em relação ao método baseado na tensão nominal.

5 CONCLUSÕES

A vida útil à fadiga da ligação de número 8 da viga treliça avaliada pelo método da tensão nominal e método da tensão geométrica foram de 62774 ciclos e 89150 ciclos respectivamente com falha ocorrendo no banzo em ambos os métodos. Assim, embora estes métodos se amparem em base de cálculo diferenciadas verificou-se que os resultados foram de mesma ordem de grandeza.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq, FAPEMIG, Fundação Gorceix e a empresa V&M do Brasil, pelo financiamento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 COMITÉ INTERNATIONAL POUR LE DÉVELOPPEMENT ET L'ÉTUDE DE LA CONSTRUCTION TUBULAIRE. "Design guide for circular and rectangular hollow section welded joints under fatigue loading". CIDECT 8, Köln:Verlag. TÜV Rheinland, 2001.
- 2 EUROCODE 3: "Design of steel structures": Part 1.9: Fatigue. BS EN 1993-1-9. CEN, European Committee for Standardisation, Brussels, 2005.

- 3 AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. "Specification for Structural Steel Buildings"; Appendix 3: Design for Fatigue. ANSI/AISC 360-05, Chicago, 2005.
- 4 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. "Projetos de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios"; Anexo L: Fadiga. NBR8800, Projeto de revisão – versão: janeiro/2007. Rio de Janeiro, 2007.
- 5 AMERICAN WELDING SOCIETY. "Structural welding code-steel". AWS D1.1/D1.1M: 19th ed, Miami, USA, 2004.
- 6 van WINGERDE, A. M., PACKER, J. A., WARDENIER, J. Criteria for the fatigue assessment of hollow structural section connections. Journal of Constructional Steel Research, 35 (1995), 71-115.
- 7 BRANCO, M. C. Fadiga de Estruturas Soldadas. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1999.
- 8 EUROCODE 3: "Design of steel structures": Part 1.8: Design of Joints. EN 1993-1-8. CEN, European Committee for Standardisation, Brussels, 2002.
- 9 KARAMANOS, S. A., ROMEIJN, A. E WARDENIER, J. "Stress Concentrations in Tubular Gap K-Joints: Mechanics and Fatigue Design". Engineering Structures, vol.22 , pp 4-14, 2000.