

Análise de fadiga de ligações soldadas de barras de aço tubulares

*Carmem Miranda Lage⁽¹⁾, Arlene Maria Sarmanho Freitas⁽²⁾,
Marcílio Sousa da Rocha Freitas⁽³⁾*

Resumo

Nesse trabalho é apresentada uma análise de fadiga de ligações soldadas formadas por perfis estruturais tubulares de aço. É apresentado o procedimento de estimativa de vida útil à fadiga dessas ligações por meio dos métodos da tensão geométrica e da tensão nominal, estabelecidos no CIDECT 8 e Eurocode 3, com abordagem baseada em ciclos de tensão (curvas S-N). A filosofia de projeto associada a esta abordagem é a de vida garantida, que deve proporcionar um nível aceitável de confiabilidade da estrutura sem inspeções periódicas. O modelo analisado foi o de uma ponte metálica treliçada, sendo apresentada uma discussão entre esses dois métodos abordando vantagens e limitações. Os resultados obtidos permitiram determinar qual método é melhor aplicável para uma dada situação de projeto.

Palavras-chave: Fadiga. Perfis tubulares. Ligações tubulares. Estruturas de aço. Aço.

¹ Engenheira Civil, Mestre, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Escola de Minas, UFOP. E-mail: carmemmirandalage@yahoo.com.br

² Engenheira Civil, Professora Doutora, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Escola de Minas, UFOP. Campus Universitário Morro do Cruzeiro, 35400-000, Ouro Preto, MG, Brasil. E-mail: arlene@em.ufop.br

³ Engenheiro Civil, Professor Doutor, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Escola de Minas, UFOP. Campus Universitário Morro do Cruzeiro, 35400-000, Ouro Preto, MG, Brasil. E-mail: marcilio@em.ufop.br (enviar correspondência para este autor)

1 Introdução

Na busca por projetos de ponte inovadores, engenheiros e arquitetos têm empregado perfis tubulares em configurações anteriormente consideradas excessivamente complicadas e dispendiosas.

Devido às características geométricas de suas seções aliados a alta tecnologia, os perfis tubulares – circulares e retangulares – proporcionam vantagens no comportamento estrutural, acrescentando benefícios econômicos e estéticos: contribuem para a redução do peso efetivo e visual das estruturas. Entre os processos de fabricação das ligações de perfis tubulares, o de soldagem é um dos mais utilizados.

As estruturas de pontes são submetidas em serviço a carregamentos cíclicos. Dependendo da amplitude e número de ciclos de carga aplicada, somado a outros fatores, pode ocorrer na estrutura um processo de alteração estrutural permanente, progressivo e localizado. Este é caracterizado pela iniciação e propagação de trincas, seguido de uma falha estrutural, o que representa o fenômeno da fadiga. Em se tratando de estruturas soldadas, o próprio cordão de solda ou defeitos advindos da soldagem produz zonas de concentração de tensões elevadas, induzindo a nucleação de trincas (Branco et al, 1999). Assim, as ligações dessas estruturas representam um ponto crítico e a sua verificação a fadiga é de fundamental importância.

As normas brasileiras referentes a estruturas de aço não contemplam o cálculo de ligações de perfis tubulares estruturais, entretanto, um grupo de pesquisas coordenado pela V & M do Brasil está elaborando um texto base para ser apresentado à ABNT, sobre a Norma Brasileira de Perfis Tubulares de Aço (Freitas et al, 2009). Ainda no Brasil, algumas empresas e universidades, com destaque para o convênio formado pela Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) e V & M do Brasil têm realizado análises estáticas em ligações tipo T, K e KT de treliças planas, a nível numérico e experimental.

Internacionalmente, tem havido desde o início dos anos 90, uma grande consolidação de conhecimentos do projeto de estruturas tubulares, em especial as soldadas, apresentados em normas, códigos e regras de cálculo. Isto pode ser considerado em parte mérito do CIDECT (*Comité International pour le Développement et L'Étude de la Construction Tubulaire*) e do IIW (*International Institute of Welding*) – *Subcommision XV-E*. O CIDECT produziu diversas publicações em relação ao dimensionamento estático e estudos de fadiga. Finalmente os esforços do CIDECT foram bem sucedidos com a aceitação de suas recomendações de projeto para perfis tubulares pelo Eurocode 3. Nesse contexto, o presente trabalho apresenta uma estimativa da vida útil à fadiga de ligações tubulares de uma ponte treliçada por meio dos métodos da tensão geométrica e da tensão nominal, estabelecidos no CIDECT 8 (2000) e Eurocode 3 (2005). Apresenta ainda uma discussão entre estes dois métodos propostos.

2 Métodos de cálculo

Cada norma contempla um ou mais métodos para avaliação da vida útil à fadiga. O CIDECT 8 (2000) considera os métodos da tensão geométrica e da tensão nominal (também conhecido como método da classificação) e o Eurocode 3 (2005) considera apenas este último. Em ambos os métodos a abordagem é baseada em ciclos de tensão (curvas S-N). A filosofia de projeto associada a este é a de vida garantida (*safe-life*), que deve proporcionar um nível aceitável de confiabilidade da estrutura sem inspeções periódicas.

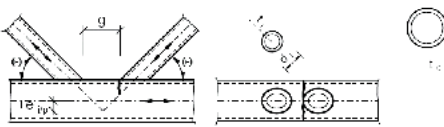
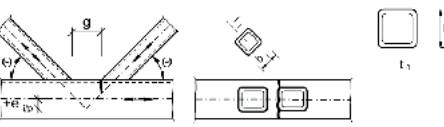
2.1 Método baseado na tensão nominal

Este método é bastante simples de ser utilizado e compreende as seguintes etapas:

Etapa 1: determinação da categoria de detalhe, $\Delta\sigma_c$. Esta é representada por um número (36, 40,..., 160), que por sua vez corresponde a um valor limite de variação de tensão referente a dois milhões de ciclos (tabela 1). A escolha de $\Delta\sigma_c$ é feita em função da geometria da ligação (limitado a ligações planares tipo K e N), seção do perfil (circular ou retangular) e razão da espessura do banzo pela espessura da diagonal (t_0/t_1). O seu uso é limitado em termos da configuração da ligação - se sobreposta (*overlap*) ou afastadas (*gap*) -, e parâmetros geométricos: ângulo entre barras, dimensões dos perfis - b_0 se retangular e d_0 se circular-.

Etapa 2: cálculo da tensão nominal, σ_n . Esta é obtida de solicitações axiais e de flexão - equações (1) e (2)-, no regime elástico não levando em conta os efeitos localizados de ordem geométrica de concentração de tensões. De acordo com o Eurocode 3 (2005), na ausência de uma análise rigorosa deve ser aplicado um fator de majoração nas ações axiais (MF), que leva em conta os momentos devidos a efeitos secundários, tais como os ocasionados pela rigidez das ligações de vigas treliçadas (Tabela 2).

Tabela 1: Classes de detalhe e exigências

Detail category		Constructional detail	Requirements
90 m=5	$\frac{t_0}{t_i} \geq 2,0$	Gap joints: Detail 1): K and N joints, circular structural hollow sections: 	Details 1) e 2): - Separate assessments needed for the chords and the braces. - For intermediate values of the ratio t_0/t_i interpolate linearly between detail categories. - Fillet welds permitted for braces with wall thickness $t \leq 8$ mm. - t_0 and $t_i \leq 8$ mm - $35^\circ \leq \theta \leq 50^\circ$ - $b_0/t_0 \times t_0/t_i \leq 25$ - $d_0/t_0 \times t_0/t_i \leq 25$ - $0,4 \leq b/b_0 \leq 1,0$ - $0,25 \leq d/d_0 \leq 1,0$ - $b_0 \leq 200$ mm - $d_0 \leq 300$ mm - $-0,5 h_0 \leq e_{ip} \leq 0,25 h_0$ - $-0,5 d_0 \leq e_{ip} \leq 0,25 d_0$ - $e_{op} \leq 0,02 b_0$ or $\leq 0,02 d_0$ - [e_{op} is out-of-plane eccentricity] Detail 2): $0,5 (b_0 - b_i) \leq g \leq 1,1 (b_0 - b_i)$ and $g \geq 2t_0$
45 m=5	$\frac{t_0}{t_i} = 1,0$		
71 m=5	$\frac{t_0}{t_i} \geq 2,0$	Gap joints: Detail 2): K and N joints, rectangular structural hollow sections: 	Details 1) e 2): - Separate assessments needed for the chords and the braces. - For intermediate values of the ratio t_0/t_i interpolate linearly between detail categories. - Fillet welds permitted for braces with wall thickness $t \leq 8$ mm. - t_0 and $t_i \leq 8$ mm - $35^\circ \leq \theta \leq 50^\circ$ - $b_0/t_0 \times t_0/t_i \leq 25$ - $d_0/t_0 \times t_0/t_i \leq 25$ - $0,4 \leq b/b_0 \leq 1,0$ - $0,25 \leq d/d_0 \leq 1,0$ - $b_0 \leq 200$ mm - $d_0 \leq 300$ mm - $-0,5 h_0 \leq e_{ip} \leq 0,25 h_0$ - $-0,5 d_0 \leq e_{ip} \leq 0,25 d_0$ - $e_{op} \leq 0,02 b_0$ or $\leq 0,02 d_0$ - [e_{op} is out-of-plane eccentricity] Detail 2): $0,5 (b_0 - b_i) \leq g \leq 1,1 (b_0 - b_i)$ and $g \geq 2t_0$
36 m=5	$\frac{t_0}{t_i} = 1,0$		

Fonte: Eurocode 3, 2005, p. 27.

$$\sigma_{n,ax} = MF \cdot \frac{P_{ax}}{A} \quad (1)$$

$$\sigma_{n,ipb} = \frac{M_{ipb}}{W_{ipb}} \quad (2)$$

onde $\sigma_{n,ax}$ é a tensão nominal devido à força axial P_{ax} na barra; $\sigma_{n,ipb}$ 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.

Tabela 2: Fator de majoração que leva em conta momentos secundário em ligações de perfis circulares em vigas treliçadas

Type of joint		Chords	Braces (vertical members)	Braces (diagonal members)
Gap joints	K	1,5	-	1,3
	N		1,8	1,4
Overlap joints	K		-	1,2
	N		1,65	1,25

Fonte: CIDECT 8, 2000

Etapa 3: cálculo de $\Delta\sigma_D$ e $\Delta\sigma_L$. $\Delta\sigma_D$ é o valor de tensão limite 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 (figura 1). O cálculo de $\Delta\sigma_D$ e $\Delta\sigma_L$ pode ainda ser obtido de acordo com o Eurocode 3 (2005) pelas equações (3) e (4) respectivamente:

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

$$\Delta\sigma_L = \left(\frac{5}{100}\right)^{1/5} \Delta\sigma_D = 0,594\Delta\sigma_D \quad (4)$$

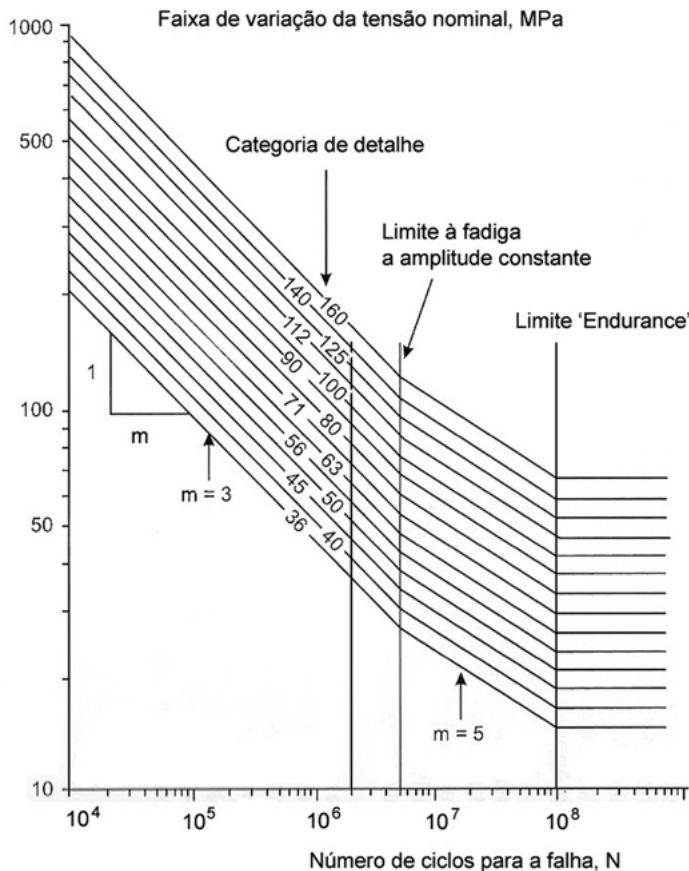


Figura 1: Curvas S-N para conexões simples sob faixa normal de tensão

Fonte: Adaptação de CIDECT 8, 2000

Etapa 4: cálculo do número de ciclos para a falha, N_f . Isto pode ser feito por meio das curvas S-N da figura 1 ou equações (5) e (6) correspondentes a essas curvas:

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

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

onde γ_{Ff} e γ_{Mf} são fatores parciais de segurança. O valor de γ_{Ff} recomendado pelo Eurocode 3 (2005) é igual à unidade para o caso de fadiga e γ_{Mf} de acordo com a Tabela 3.

Tabela 3: Fatores de segurança parcial γ_{Mf}

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

Fonte: Eurocode 3, 2005

2.2 Método baseado na tensão geométrica

Este método leva em consideração os efeitos de ordem geométrica de concentração de tensão e compreende as seguintes etapas:

Etapa 1: cálculo da tensão nominal, σ_n , conforme apresentado no item 2.1.

Etapa 2: cálculo da tensão geométrica, σ_{rhs} . Em se tratando de ligações soldadas, a tensão geométrica 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 (adimensional) de concentração de tensão (SCF) segundo a equação (7)

$$(\sigma_{rhs})_{i,j} = (SCF)_{i,j} \times (\sigma_n)_{i,j} \quad (7)$$

onde i é o tipo de barra, diagonal (*brace*) ou banzo (*chord*) e j é o tipo de carregamento.

O SCF pode ser determinado por testes experimentais, simulação por elementos finitos, fórmulas paramétricas ou por gráficos. O CIDECT 8 (2000) dispõe de fórmulas e gráficos semelhantes ao da figura 2 para as seguintes ligações: uniplanares (tipo K, T, Y e X) e multiplanares (tipo XX e KK) de perfis circulares e ligações uniplanares (tipo K, T e X) e multiplanares (tipo KK) de perfis retangulares. As curvas a serem utilizadas são definidas em função do tipo de carregamento e parâmetros (adimensionais) da ligação, a saber, γ , τ e β , dados pelas equações (8), (9) e (10)

$$\gamma = d_0 / 2 \cdot t_0 \quad (8)$$

$$\tau = t_i / t_0 \quad (9)$$

$$\beta = d_i / d_0 \quad (10)$$

onde d_0 , d_i e t_0 , t_i são diâmetros e espessura do banzo e diagonal respectivamente. De posse dos valores desses parâmetros consegue-se obter o SCF.

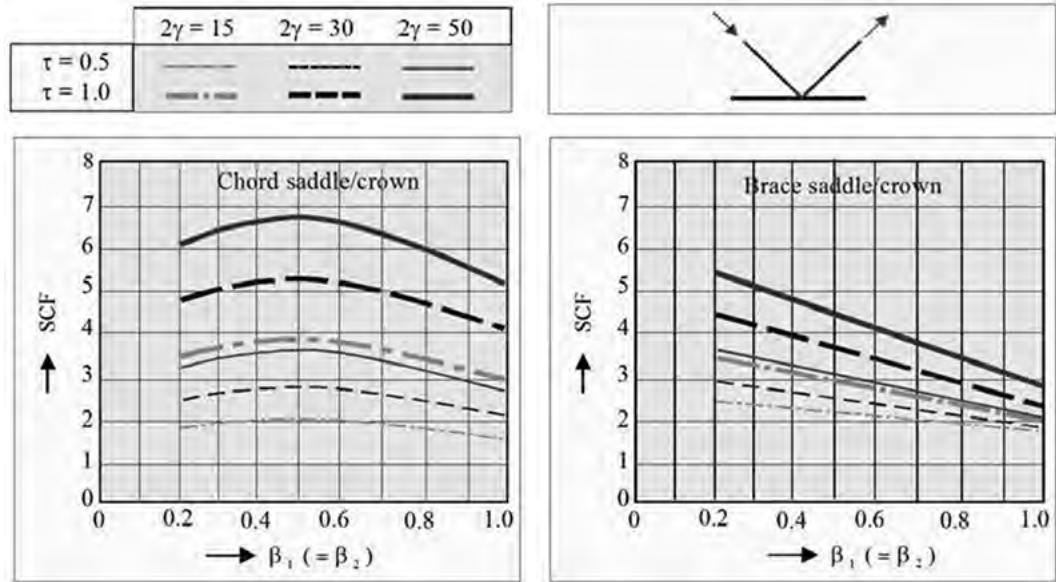


Figura 2: SCF para ligações tipo K

Fonte: Wardenier, 2000

Para alguns casos específicos de carregamento e tipo da ligação, a saber, ligação tipo K uniplanar e carregamento combinado (cargas axial e flexão) no banzo, o CIDECT 8 (2000) por meio do Apêndice D recomenda um valor mínimo de dois para o fator de concentração de tensão ($SCF = 2,0$). Entretanto, pesquisas recentes (Nussbaumer et al, 2008; Nussbaumer et al, 2006 e Schumacher, 2003) tem demonstrado que este valor

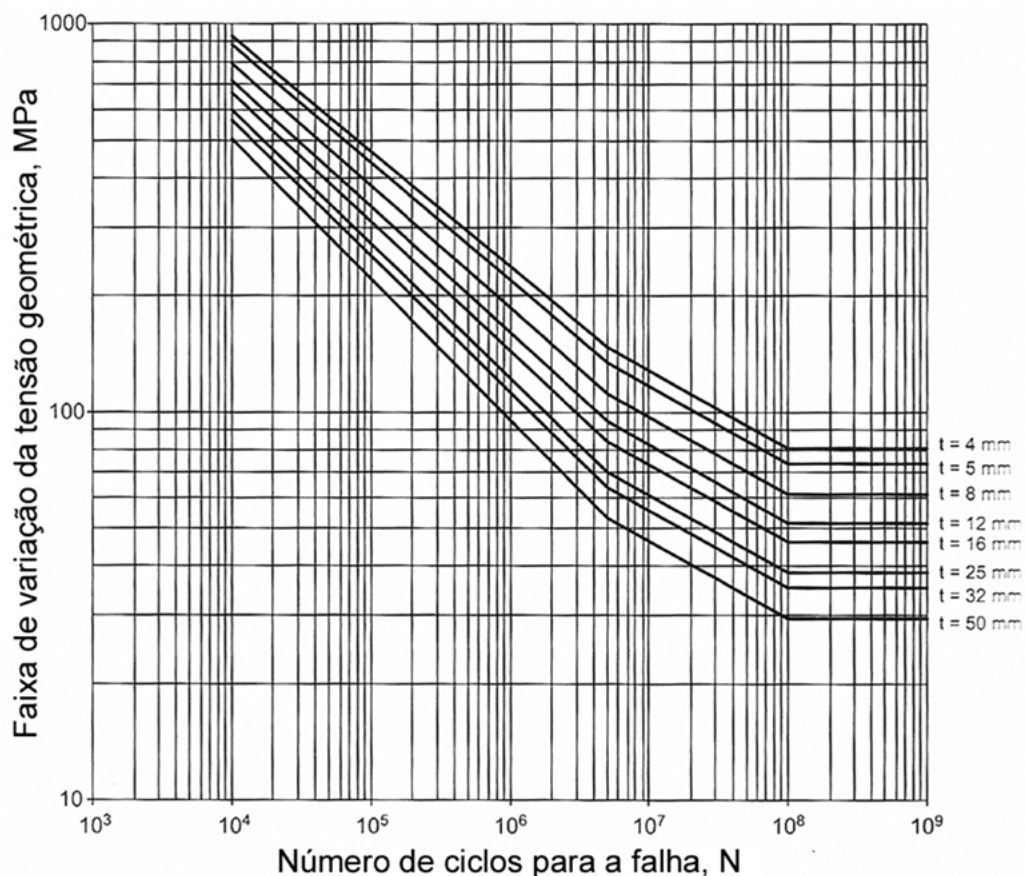


Figura 3: Curvas de resistência à fadiga para o método da tensão geométrica

Fonte: Adaptação de CIDECT 8, 2000

Etapa 3: cálculo do número de ciclos para a falha, N_f . Este é determinado segundo o CIDECT 8 (2000) diretamente das curvas S-N (figura 3) ou equações (11) e (12), sendo esta última válida apenas para carregamento de amplitude variável.

$$\text{Para } 10^3 < N_f < 5 \cdot 10^6, \quad \log(N_f) = \frac{12,476 - 3 \cdot \log(\sigma_{\text{rhs}})}{1 - 0,18 \cdot \log\left(\frac{16}{t}\right)} \quad (11)$$

$$\text{Para } 5 \cdot 10^6 < N_f < 10^8, \quad \log(N_f) = 16,327 - 5 \cdot \log(\sigma_{\text{rhs}}) + 2,01 \cdot \log\left(\frac{16}{t}\right) \quad (12)$$

3 Estudo de caso: ponte tubular treliçada

3.1 Descrição da estrutura

Trata-se de uma ponte ferroviária para vias sujeitas exclusivamente ao transporte de passageiros em regiões metropolitanas ou suburbanas no Brasil. A ponte ferroviária é formada de quatro trechos de 30,8 m (ver Figura 4). Os elementos principais são duas vigas treliçadas (plano xz), com ligações do tipo K de perfil tubular circular, conforme ilustra a figura 5. Os esforços são resistidos lateralmente por contraventamento horizontal inferior (tipo KT) formado por perfil tubular circular (diagonais) e tubular retangular (montante) e superior no plano xy, formado por perfil tubular circular. A estrutura ainda é formada por duas longarinas contraventadas no plano xy, sendo que ambos, longarinas e contraventamento são constituídos de perfil tubular retangular. A bitola da linha (figura 5) é de 1,00 m (bitola métrica). Todo o aço da estrutura da ponte é de material VMB 350 cor.

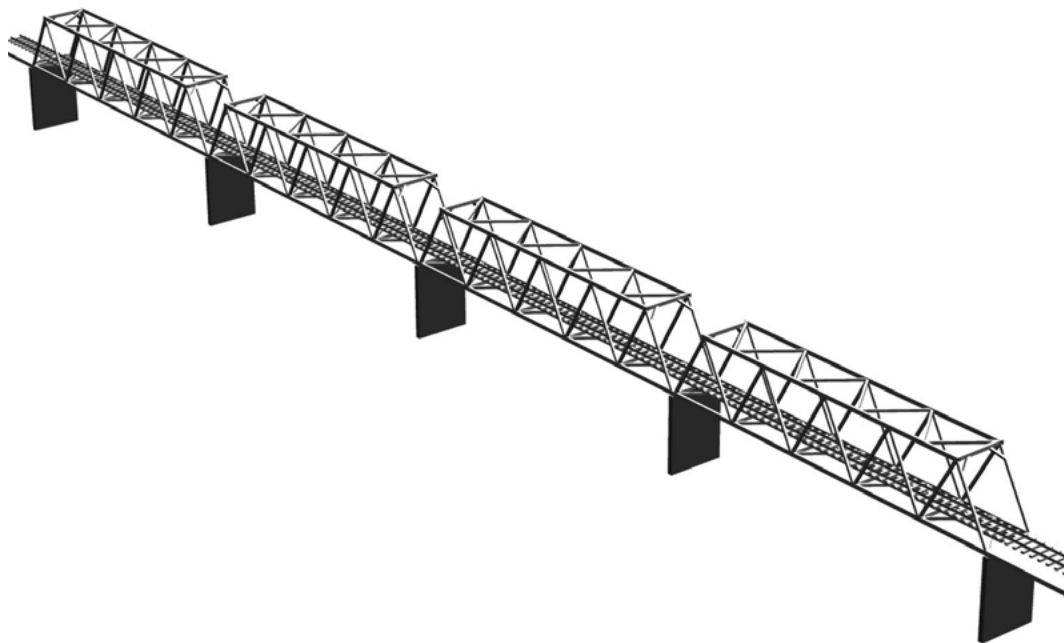


Figura 4: Visão geral da ponte ferroviária

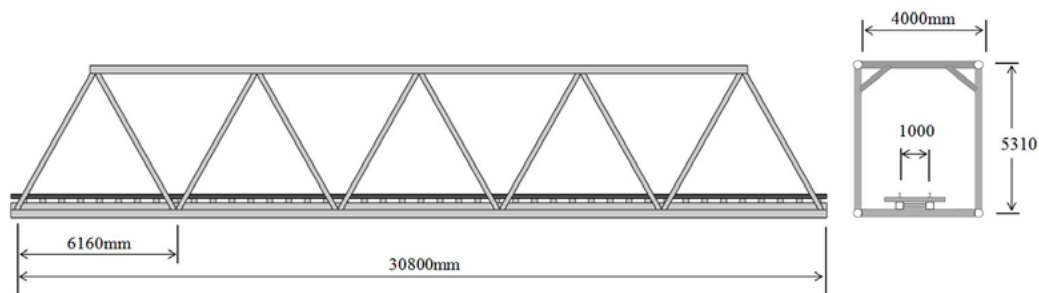


Figura 5: elevação lateral e seção transversal da ponte

As dimensões dos perfis da estrutura principal (treliça espacial) são dadas na tabela 4 abaixo. A descrição detalhada é apresentada em Lage (2008).

Tabela 4: Dimensões dos perfis que compõe a estrutura principal da ponte

Plano	Barra	Tipo de perfil	Dimensões (mm)
x-z ($y = 2 \text{ m}$) / x-z ($y = - 2 \text{ m}$)	diagonais banzo sup. e inf.	circular circular	168,3 x 22,2 368 x 36
x-y ($z = 0$)	diagonais montantes	circular retangular	168,3 x 22,2 350 x 350 x 16
x-y ($z = 5,31 \text{ m}$)	diagonais montantes	circular circular	168,3 x 22,2 355,6 x 25,4
x-y ($z = 0,265 \text{ m}$)	longarinas diagonais	retangular retangular	160 x 160 x 17,5 300 x 200 x 17,5

3.2 Ações na estrutura

Carga permanente:

- peso próprio do aço (calculado pelo programa SAP 2000)
- peso dos dormentes e trilhos é igual a 3kN/m distribuídos nas duas longarinas.

Carga móvel:

As normas BS 5400 (1980), Eurocode 3 (1993) e AREMA (2000) especificam trem-tipo para carregamento de fadiga de pontes metálicas ferroviárias. Já a norma brasileira ABNT NBR 7189:1985 não especifica nenhum trem-tipo para carregamento à fadiga. Apesar disso, como a estrutura proposta é para vias brasileiras sugeriu-se utilizar o trem tipo TB 170 desta norma para vias sujeitas exclusivamente ao transporte de passageiros. As características geométricas e cargas deste e dos outros trens-tipo desta norma são dadas pela figura 6 e tabela 5.

As cargas de trilho, dormente e carga móvel são diretamente aplicadas nas longarinas.

Na Figura 6, Q é a carga por eixo, q e q' são as cargas distribuídas na via, simulando, respectivamente, vagões carregados e descarregados (ver tabela 5).

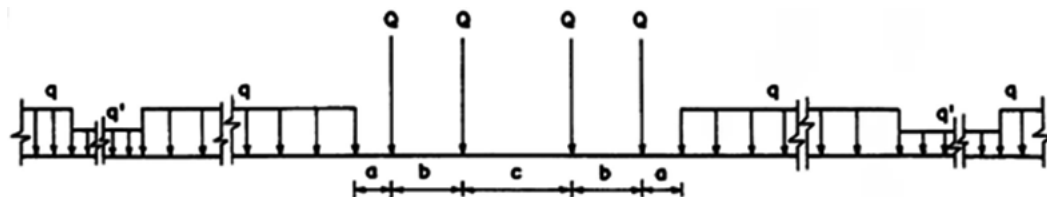


Figura 6: Características geométricas e cargas dos trens-tipo

Fonte: ABNT NBR 7189:1985.

Tabela 5: Cargas dos trens-tipo

TB	Q (kN)	q (kN/m)	q' (kN/m)	a (m)	b (m)	c (m)
360	360	120	20	1,00	2,00	2,00
270	270	90	15	1,00	2,00	2,00
240	240	80	15	1,00	2,00	2,00
170	170	25	15	11,00	2,50	5,00

Fonte: ABNT NBR 7189:1985

3.3 Análise da estrutura

A análise da estrutura foi feita por meio do programa SAP 2000 (SAP – *Structural Analysis Program*), que é baseado no Método dos Elementos Finitos. Inicialmente foram definidas as dimensões dos perfis que compõem a estrutura e o tipo de material (aço VMB 350 cor).

Com os perfis definidos, fez-se a modelagem da estrutura. As seções transversais de cada barra são dadas na tabela 4 anterior. Em seguida definiram-se as condições de apoio da estrutura e as vinculações no plano das treliças e contraventamentos. A estrutura foi modelada com continuidade do banzo e diagonal rotulada. Considerou-se o eixo da estrutura no centro da seção transversal do plano xy.

Terminada a modelagem da estrutura, foram definidos os tipos de carregamento e tipos de análise que viriam a ser aplicados na estrutura. Uma carga de 1,5 kN/m (carga permanente de trilhos e dormentes) foi aplicada em cada uma das longarinas, no sentido da força de gravidade. A carga móvel (trem-tipo TB 170) foi aplicada na estrutura nas linhas de influência das duas longarinas.

3.4 Análise da ligação soldada

A escolha da ligação a ser verificada à fadiga deu-se em função de ser a mais solicitada da estrutura (ligação 32 do plano xz posterior) e por corresponder a uma ligação do tipo K (há mais estudos relacionados a este tipo de ligação). Essa ligação pode ser mais bem visualizada na figura 7.

Para a verificação a fadiga o cálculo deve ser feito utilizando a “diferença” de carga obtida das análises: (carga permanente + móvel) – (carga permanente). Entretanto por simplificação de análise, utilizaram-se os valores máximos obtidos da análise de carga permanente + móvel. Considerou-se um ciclo de amplitude constante com as cargas variando de um valor zero (ponte completamente descarregada) até esses valores máximos. O interesse neste exemplo é meramente ilustrar os procedimentos relativos aos métodos de análise de fadiga, daí se ter adotado tal consideração.

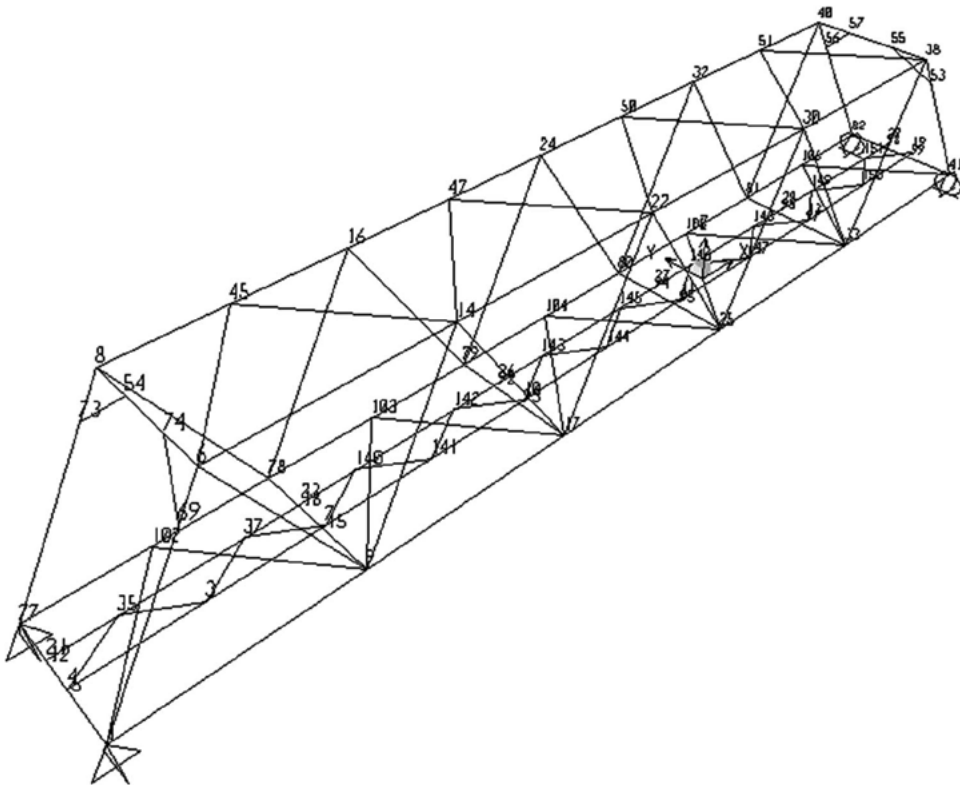


Figura 7: Localização da ligação 32

3.4.1 Análise pelo método da tensão geométrica

A análise será feita de acordo com as recomendações do CIDECT 8 (2000). O cálculo dos parâmetros geométricos da ponte é apresentado na tabela 6, com respectivas faixas de validade segundo o CIDECT 8 (2000). Esses parâmetros são válidos para ligações planares do tipo 'K' de perfis tubulares circulares (banzo e diagonal).

Tabela 6: Parâmetros geométricos e faixa de validação segundo o CIDECT 8 (2000)

Parâmetro	Calculado	Faixa de validação
β (beta) = d/d_0	0,50	$0,3 \leq \beta \leq 0,6$
γ (gama) = $d_0/2x t_0$	5,1	$12 \leq \gamma \leq 30$
θ (teta)	$59,8^\circ$	$30^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$
$\tau = t_0/t_1$	1,62	$0,25 \leq \tau \leq 1,0$

O tipo de análise estrutural para o dimensionamento da ponte assume continuidade do banzo e barras diagonais rotuladas. O cálculo será feito considerando a ligação no plano xz ($y = -2$).

Os esforços, força axial e momento fletor, encontrados na ligação 32 (mais solicitada) são apresentados na figura 8. Estes podem ser tratados com uma combinação das duas condições de carregamento conforme ilustra a figura 9. A condição 1 trata de um carregamento axial balanceado e a condição 2 de um carregamento no banzo (axial e flexão).

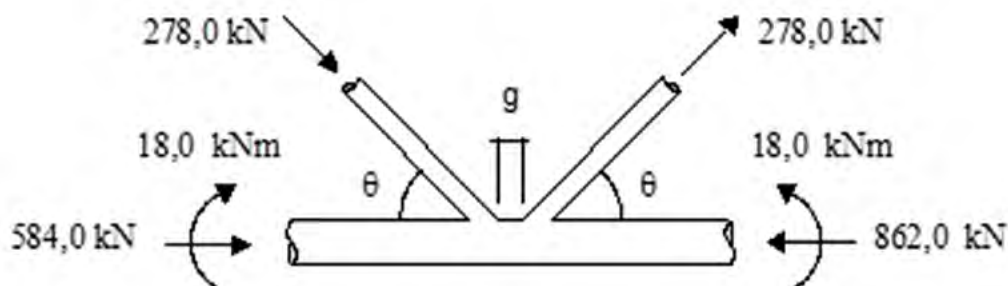


Figura 8: Esforços na ligação 32

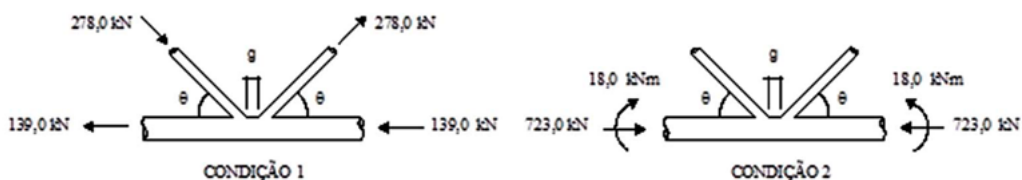


Figura 9: Esforços nas barras para as condições de carregamento 1 e 2

Segundo o Eurocode 3 (2005), os valores dos fatores 'MF' para uma ligação do tipo 'K' com *gap* são 1,5 e 1,3 para banzo e diagonal respectivamente (ver tabela 2). Assim, utilizando as equações (1) e (2) dadas anteriormente, as tensões nominais na ligação 32, para as condições 1 e 2 são aproximadamente 36 MPa e 84 MPa para diagonal e banzo respectivamente. Os valores de SCF (resumidos na tabela 7) foram obtidos de ábacos e formulações paramétricas do tipo a equação (13)

$$SCF = \text{fatores de correção} \cdot SCF_0 \quad (13)$$

onde um fator de concentração de tensão inicial (SCF_0) é majorado por fatores de correção que levam em consideração o tipo de carregamento, local da solda etc. Ainda, esses valores foram obtidos por interpolação para $\beta = 0,5$ e $\alpha \cong 60^\circ$. Para o banzo na condição 2 de carregamento, um valor mínimo de SCF igual a dois foi adotado segundo recomendações do CIDECT 8 (2000).

Tabela 7: Fatores de concentração de tensão - SCF

Barra	Condição de carregamento	SCF_0	SCF_{min}	SCF
Diagonal	1	2,20	1,60	2,20
Banzo	1	3,30	-	2,97
Banzo	2	1,45	2,00	2,00

O cálculo das tensões geométricas é apresentado na tabela 8, assumindo superposição de efeitos das condições de carregamento 1 e 2. Para este estudo de caso assumiu-se que a filosofia de projeto adotada foi a de vida garantida com alta consequência de falha. Da tabela 3, o fator de segurança parcial é 1,35.

Tabela 8: Valores da tensão geométrica

Barra	Tensão Geom. Cond. 1 (MPa)	Tensão Geom. Cond. 2 (MPa)	γ_{MF}	Tensão Geom. Final (MPa)
Diagonal	79,2	-	1,35	107,0
Banzo	107,0	168,0	1,35	371,0

A equação (11) 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 36,0 mm e tensão geométrica de 371,0 MPa é igual a 104,48 (30.200) ciclos. Já o número de ciclos para a falha (N_f) da diagonal, para uma espessura (t) de 22,2 mm e tensão geométrica de 103,0 MPa é igual a 106,23 (1.698.243) ciclos. Então, a vida à fadiga esperada para a ligação 32 é de 30.200 (trinta mil e duzentos) ciclos, com falha no banzo.

3.4.2 Análise pelo método da tensão nominal

A análise será feita de acordo com as recomendações do CIDECT 8 (2000) e Eurocode 3 (2005). As limitações de parâmetros geométricos impostas pelo CIDECT 8 (2000) e Eurocode 3 (2005) e respectivo cálculo dos parâmetros da ligação da ponte em estudo - ligação do tipo K com *gap* -, com banzo e diagonais de perfis tubulares circulares são dados na tabela 9.

Para a escolha da categoria de detalhe deve-se proceder ao cálculo da razão de espessura do banzo e diagonal (t_o/t_i). Para valores intermediários aos dados na tabela 1 - que é o que acontece neste caso -, onde $t_o/t_i = 1,62$, deve-se proceder a uma interpolação linear. Assim a categoria de detalhe, $\Delta\sigma_c$, obtida por interpolação de acordo com os dados do detalhe (1) daquela tabela foi de 72,90 MPa para $t_o/t_i = 1,62$.

Tabela 9: Faixa de validade para utilização das prescrições

Parâmetro	Calculado	Faixa de validação CIDECT 8 e Eurocode 3	Status
β (beta)	0,50	$0,30 \leq \beta \leq 0,60$	ok
γ (gama)	5,10	$12 \leq \gamma \leq 30$	Não ok
θ (teta)	59,8°	$30^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$ (ver nota 1)	ok
τ	0,62	$0,25 \leq \tau \leq 1,00$	ok
		$\geq 2 t_o = 72 \text{ mm}$	
g	18,89 mm	$0,5 (b_o - b_i) \leq g \leq 1,1 (b_o - b_i)$	Não ok
		$99,85 \leq g \leq 219,67$	
-	16,57	$b_o/t_o \times t_o/t_i \leq 25$	ok
d_o	368 mm	$d_o \leq 300 \text{ mm}$	Não ok
t_o e t_i	$t_o = 36 \text{ mm}$ e $t_i = 22,2 \text{ mm}$	t_o e $t_i \leq 8 \text{ mm}$	Não ok

Nota 1: no Eurocode 3 (2005) o ângulo θ é limitado em 50°.

Verifica-se na Tabela 9 que alguns dos parâmetros geométricos da estrutura estão fora da faixa de validade para utilização das prescrições do CIDECT 8 (2000) e Eurocode 3 (2005).

O cálculo da tensão nominal é semelhante ao feito para o método da tensão geométrica. Assim os valores da tensão nominal no banzo e diagonal são 84,0 MPa e 36,0 MPa respectivamente. O cálculo de $\Delta\sigma_D$ e $\Delta\sigma_L$ é feito pelas equações (3) e (4) dadas anteriormente. Assim, os valores calculados foram: $\Delta\sigma_D = 53,72 \text{ MPa}$ e $\Delta\sigma_L = 29,5 \text{ MPa}$.

O número de ciclos para a falha obtido por meio das equações (5) e (6) e Figura 1 apresentadas anteriormente, adotando os valores de $\gamma_{FF} = 1,0$ e $\gamma_{MF} = 1,35$ segundo prescrições do Eurocode 3 (2005), foram de 531.544 ciclos para o banzo e 6.752.572 ciclos para diagonal. Então, o número de ciclos para a falha da ligação levando em consideração esse método ocorre no banzo para 531.544 ciclos.

Considerando os dois métodos, a vida à fadiga esperada para a ligação 32 é de 30.200 ciclos, com falha no banzo pelo método da tensão geométrica.

4 Conclusões

Na análise de fadiga da ponte ferroviária, a falha da ligação deu-se no banzo para os dois métodos de análise – método da tensão geométrica e método da tensão nominal -, sendo que os resultados obtidos para o número de ciclos para a falha apresentaram valores mais conservadores pelo método da tensão geométrica.

A resistência à fadiga de estruturas soldadas é influenciada por diversos parâmetros (qualidade da solda, processo de soldagem, material etc). Durante o processo de fabricação, imperfeições podem ser introduzidas, advindas do processo de soldagem. Essas questões são consideradas parcialmente nas recomendações do CIDECT 8 (2000) e Eurocode 3 (2005). Assim, valores altos de SCF ($SCF_{min}=2,0$) recomendados por estas normas foram utilizados, o que propiciou uma redução significativa no número de ciclos para a falha pelo método da tensão geométrica. Trabalhos anteriores (Nussbaumer et al, 2008; Nussbaumer et al, 2006 e Schumacher, 2003) têm demonstrado um alto grau de conservadorismo do fator de concentração de tensões (SCF) adotado nessas normas quando utilizado para ligações típicas de pontes tubulares, como também verificado neste trabalho. Além disso, ainda na determinação dos Fatores de Concentração de Tensão (SCF) para ligações tipo K, no Eurocode 3 (2005) as formulações paramétricas não podem ser extrapoladas para valores baixos de gama ($\gamma \leq 12$), que é um caso comum em estruturas de ponte - com perfis de dimensões robustas.

No método da tensão nominal, os estudos publicados pelo CIDECT 8 (2000) e Eurocode 3 (2005) limitam os parâmetros geométricos, principalmente no que diz respeito a dimensões (largura e diâmetro), espessura dos perfis e tipos de ligação. No caso do Eurocode 3, os estudos são limitados a ligações uniplanares tipo K e N. Já no CIDECT 8 (2000) estes estudos abrangem ligações uniplanares tipo K, T, X e Y e ligações tipo KK e XX multiplanares. Para o caso de análise da ponte ferroviária, metade dos parâmetros geométricos ficou fora da faixa de validade daquelas recomendações. Além disso, um número elevado de variações dos parâmetros geométricos é agregado numa mesma faixa de tensão (classe de detalhe).

Este estudo indica que para uma aplicação mais ampla, as normas apresentadas – CIDECT 8 (2000) e Eurocode 3 (2005) -, devem ser ajustadas à situação específica de estruturas de ponte, por exemplo: ampliando a variação dos parâmetros dos Fatores de Concentração de Tensão (SCF) ou fornecendo valores para a resistência à fadiga de estruturas com perfis de espessuras maiores.

5 Agradecimento

Os autores agradecem ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais) e a empresa V & M do Brasil.

Referências

- American Railway Engineering and maintenance of way association – AREMA (2000). *Manual of Railway Engineering*. AREMA. Maryland.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (1985). *Cargas móveis para projeto estrutural de obras ferroviárias*. NBR 7189. Rio de Janeiro.
- Branco, C. M., Fernandes, A. A. e Castro, P. M. S. T. (1999). *Fadiga de Estruturas Soldadas*. 2. ed. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa.
- British Standards Institution (1980). *Steel, Concrete and Composite Bridges, Part 10: Code of practice for fatigue*. BS5400. London.
- Computer and Structures Inc. (1995). SAP 2000. *Static and Dynamic Finite Element Analysis of Structures*. University Ave, Berkley, USA.
- European Committee for Standardization (1993). ENV 1993-1-1: Eurocode 3: *General rules and rules for Buildings. Part 1.1: General Rules and Rules for Buildings*. British Standards Institution, London, United Kingdom.
- European Committee for Standardization (2005). BS EN 1993-1-9: Eurocode 3: *Design of steel structures. Part 1.9: Fatigue*. CEN, European Committee for Standardization, Brussels.
- Freitas, A. M. S. et al (2009). *Estruturas metálicas tubulares de aço*. Revista Construção Metálica, Edição 93, p. 20-24.
- Lage, C. M. (2008). *Fadiga em estruturas metálicas tubulares soldadas*. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto – Ouro Preto.
- Nussbaumer, A.; Sturm, S.; Schumacher, A. (2006). *Fatigue of bridge joints using welded tubes or cast steel solutions*. Tubular Structures XI. Proceedings of the 11th International Symposium on Tubular Structures, pp. 61-68, Québec, Canada.
- Nussbaumer, A; Borges, L. (2008). *Experimental determination of stress intensity factors on large-scale tubular trusses fatigue tests*. Tubular Structures XII. Proceedings of the 12th International Symposium on Tubular Structures, Shanghai.
- Schumacher, A. (2003). *Fatigue Behaviour of welded circular hollow section joints in bridges*. Tese de doutorado, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Switzerland.
- Zhao, X. L.; Herion, S.; Packer, J. A.; Puthli, R. S.; Sedlacek, G.; Wardenier, J.; Weynand, K.; van Wingerde, A. M.; Yeomans, N. F. (2000). *Design guide for circular and rectangular hollow section welded joints under fatigue loading*. CIDECT, N° 8, Köln: TUV Verlag Rheinland, Germany.
- Wardenier, J. (2000). *Hollow sections in structural applications*. CIDECT. Delft University of Technology, Netherlands.

Fatigue analysis of steel hollow section welded joints

Abstract

A fatigue analysis of the welded tubular joints in a metallic trussed bridge is presented herein. The fatigue life of these joints was achieved by means of geometric and nominal stress methods established by the CIDECT 8 (2000) and Eurocode 3 (2005) standards, with an approach based on tension cycles (curves S-N). In addition, a comparative discussion of these two methods is presented; their advantages, limitations, etc. The results demonstrate which method is best applicable for the given situation of the project.

Keywords: Fatigue. Hollow sections. Tubular connections. Steel structures. Steel.

1 Introduction

In search of new and innovative bridge designs, engineers and architects are employing hollow sections in configurations previously considered prohibitively complicated and uneconomical.

Due to the geometrical characteristics of its sections, together with high technology, the tubular profiles – circular and rectangular – proportion advantages in structural behavior, increasing economical and esthetical benefits: contribute to effective weight reduction and visual appearance of the structures. Among the manufacturing processes for a tubular profile connection, welding is the most applied.

Bridge structures are submitted to load cycles while in use. Along with other factors, depending on the amplitude and number of load cycles to which they are subjected, their structures can suffer permanent structural alterations that are progressive and localized. This is characterized by the initiation and propagation of cracks, followed by a structural failure; in other words, the fatigue phenomenon. In welded structures, the welded chord, itself, or defects in the welding process can produce zones of highly concentrated tension that induce cracking (Branco et al, 1999). As such, the connections of these structures represent critical points and their inspection for fatigue is of fundamental importance. The existing Brazilian standards for steel bridges do not contemplate calculations for the connections of tubular profiles in these structures. However, some studies have been performed related to the static analyses, both numerical and experimental, of type T, K, and KT connections for trussed planes.

Internationally, since the early 90's, there has been a great consolidation of knowledge related to welded tubular structures, that has generated standards, building codes and calculation rules. In part, credit must be given to CIDECT (Comité International pour le Développement et L'Étude de la Construction Tubulaire) and to IIW (International Institute of Welding) – Subcommission XV-E. CIDECT has produced several publications in relation to static design and fatigue. Their efforts for producing

recommendations for tubular profile designs have now become accepted by Eurocode 3. It is in this context that the present study presents an estimate of the useful life for the tubular connections of a trussed bridge in relation to fatigue, which was achieved by both geometrical and nominal tension methods as established by CIDECT 8 (2000) and Eurocode 3 (2005). A discussion of the two proposed methods is also presented.

2 Design Methods

Each standard contemplates one or more methods for evaluating useful life before fatigue sets in. CIDECT 8 (2000) considers geometric and nominal stress methods (also known as classification method) and Eurocode 3 (2005) considers only nominal tension. In both methods, the approach is based on tension cycles (S-N curves). The *safe life* philosophy, which proportions an acceptable reliability level for the structure during which periodic inspections are not yet necessary, is considered.

2.1 Nominal stress method

This is a simple method that can be used and includes the following stages:

Stage 1 – determine the category of the detail $\Delta\sigma_c$. This is represented by a number (36, 40,..., 160), that corresponds to the fatigue-resistance tension limit for two million cycles. The choice for $\Delta\sigma_c$ is basically done in function of the connection's geometry (limited to type K and N planar connections), profile section (circular or rectangular) and the chord-thickness/diagonal (t_0/t_i) ratio.

Stage 2 – calculation of the nominal stress, σ_n . This is obtained by using axial force and bending moment for an elastic effect, applying the strength of materials theory. As such, this does not take into consideration the localized effects regarding concentrated tensions in the geometry of the structure. According to Eurocode 3(2005), in the absence of a rigorous analysis, an magnification factor should be applied in the axial forces (MF), which takes into account the moments due to secondary effects, such as those occasioned by the rigid connections of the trussed beams.

State 3 – calculation of $\Delta\sigma_D$ e $\Delta\sigma_L$. $\Delta\sigma_D$ is the fatigue-resistant tension limit for constant amplitude in a given number of cycles, N_D . $\Delta\sigma_L$ is the endurance limit for a given number of cycles, N_L , below which there is no contribution to the accumulation of fatigue damage.

Stage 4 – calculation of the number of cycles for failure, N_f . This can be performed using S-N curves.

2.2 Geometric stress method

In summary, this method involves the following stages:

Stage 1 – calculation of the nominal stress, σ_n .

Stage 2 – calculation of the geometric stress, σ_{rbs} . When dealing with welded connections, the geometric stress is the critical stress that occurs on the exterior surface at

the chord weld toe. It can be obtained by analysis using finite elements or parametric formulations. In this case, it is determined by increasing the nominal stress by a factor (not dimensional) of stress concentration (SCF).

Stage 3 – calculation of the number of cycles for the failure, N_f . This is determined according to CIDECT 8 (2000), directly from the S-N curves.

3 Conclusions

In the railroad bridge fatigue analyses, using geometric and nominal stress methods, the chord connection failure occurred in both methods. However, the results obtained for the number of cycles for the failure were more conservative when using the geometrical method.

The fatigue resistance of the welded structures is influenced by various parameters (welding quality, welding process, material, etc.). During the manufacturing process, imperfections can appear because of the welding process. These matters are partially considered in the CIDECT 8 (2000) and Eurocode 3 (2005) recommendations. As such, high SCF ($SCF_{min} = 2.0$) values, recommended by these standards, were utilized. This resulted in a significant reduction of the number of cycles for the failure by the geometric stress method. Besides this, in determining the stress concentration factors (SCF) for the Type K connections, and using Eurocode 3(2005), the parametric formulations cannot be extrapolated for low gamma values (≤ 12), which are generally the case with bridge structures that have robust profile dimensions (diameter and thickness). As such, other studies should be used, as previously mentioned, so that the calculations are not penalized.

In the nominal stress method, the studies published by CIDECT 8 (2000) and Eurocode 3 (2005) limit the geometric parameters, principally as refers to dimensions (width and diameter), profile thickness and connection types. In the case of Eurocode, the studies are limited to uniplanar connections of the K and N types. Whereas, in the case of CIDECT 8 (2000), they involve K, T, X, and Y type uniplanar connections and also, the multiplanar connection types KK and XX. When analyzing the railroad bridge mentioned herein, half of the geometric parameters did not meet the recommended standards. In addition, for a given connection, a high number of geometric parameter variations are grouped together in the same tension range (detail class). Thus, it can be expected that the results from this method of analysis will be less conservative.

This study indicates that for a more ample application, the presented standards – CIDECT 8 (2000) e Eurocode 3 (20005) -, need to be adjusted to the specific structural situation of bridges, i.e. amplifying the parameters variation of the stress concentration factor or furnishing values for structural fatigue resistance for thicker profiles.

4 References

European Committee for Standardization (2005). BS EN 1993-1-9: Eurocode 3: *Design of steel structures. Part 1.9: Fatigue*. CEN, European Committee for Standardization, Brussels.

Zhao, X. L.; Herion, S.; Packer, J. A.; Puthli, R. S.; Sedlacek, G.; Wardenier, J.; Weynand, K.; van Wingerde, A. M.; Yeomans, N. F. (2000). *Design guide for circular and rectangular hollow section welded joints under fatigue loading*. CIDECT, N° 8, Köln: TUV Verlag Rheinland, Germany.