



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

Avaliação à Fadiga para Ponte Mista em Arcos Metálicos Conforme Requisitos da Norma ABNT NBR 16694:2020.

Carlos Alberto Medeiros¹, Hudson Chagas dos Santos²

¹ UMC / ENGFEA / carlosmedeiros@umc.br / carlosmedeiros@engfea.com.br

² IFPI / UFPI / PCA ENGENHARIA / hudson@ifpi.edu.br / pcaengenharia@ymail.com

Resumo

Estruturas de pontes quando sujeitas a ação repetidas de carga móvel apresentam variações de tensões nos elementos estruturais e que sob esta condição de tensão pode ocasionar o fenômeno de fadiga, caracterizado pelo aparecimento de trincas e posterior propagação, e que pode levar ao colapso da estrutura. A verificação de resistência à fadiga em projetos estruturais de pontes rodoviárias em vigas retas mistas deve ser realizada conforme as prescrições do Anexo A da norma ABNT NBR 16694:2020 e que especifica o limite admissível da faixa de variação de tensões para categorias de detalhes construtivos e para um número de ciclos de solitação. O presente trabalho tem como objetivo avaliar à fadiga os elementos estruturais da superestrutura de uma ponte mista em arcos metálicos de modo a atender aos requisitos apresentados no Anexo A da norma ABNT NBR 16694:2020. A ponte mista em arcos metálicos aqui estudada possui tabuleiro em vigas retas mistas e foi projetada para atender ao sistema de adutoras do Rio São Francisco e é usada também como passarela de pedestres. Inicialmente, um modelo de elementos finitos foi elaborado para a estrutura da ponte mista em arcos metálicos. Em seguida, carregamentos foram estabelecidos para a combinação frequente de fadiga e para a combinação de ações permanentes. A faixa de variação de tensões de cálculo foi determinada a partir de resultados de tensões de tração provenientes da análise de elementos finitos. A avaliação à fadiga para os elementos estruturais da ponte mista em arcos metálicos foi apenas realizada para as regiões do filete de solda entre a alma do perfil da viga longarina e o enrijecedor vertical onde a iniciação e propagação de fissuras nessa região ocasiona a ruptura da mesa tracionada e pode levar ao colapso da viga. Dessa forma, a faixa admissível de variação de tensões foi estabelecida para o detalhe construtivo da ligação soldada em questão e conforme representação indicada na Tabela A.1 do Anexo A da norma ABNT NBR 16694:2020. No final foi verificado se a faixa de variação de tensões de cálculo é inferior a faixa admissível de variação de tensões de modo a garantir que a estrutura da ponte mista em arcos metálicos é segura à fadiga.

Palavras-chave

Ponte mista; Verificação à fadiga; Análise de elementos finitos.

Introdução

Pontes rodoviárias e passarelas estão sujeitas a carregamento de fadiga devido a carga móvel como estabelecido pela norma ABNT NBR 7188:2013. A ação da carga móvel atravessando o vão produz variações de tensões nos elementos estruturais da ponte e que sob esta condição de tensão pode levar o material a sofrer o fenômeno de fadiga que é caracterizado pela iniciação e propagação de fissuras e que pode levar o colapso da estrutura da ponte por ruptura frágil.

FISHER (1981, *apud* KLINSKY, 1999, p. 58) afirma que os principais fatores que ocasionam o aparecimento de fissuras por fadiga em pontes são devido ao volume de tráfego, a idade da ponte, magnitude das variações de tensões devido a carga móvel e impacto, tipos de detalhes geométricos dos elementos estruturais e a qualidade da execução dos detalhes e a tenacidade à fratura do material.



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

Segundo SMITH (1989), citado por KLINSKY (1999, p. 58), em geral, as estruturas soldadas são mais suscetíveis a desenvolver o fenômeno de fadiga do que as estruturas em ligações parafusadas ou rebitadas; isto se deve ao fato que no processo da solda acontece a introdução de tensões residuais no material e o aparecimento de microfissuras junto ao cordão de solda.

Procedimentos para verificação à fadiga em elementos estruturais de pontes mistas conforme as prescrições da norma Eurocode são encontrados em VAYAS (2017). VAYAS (2017) faz uma explanação teórica da verificação à fadiga pelo método SN para carregamentos de amplitude constante e de amplitude variável. Também discute sobre detalhes construtivos definidos para juntas soldadas, aborda alguns tipos de modelos de trem tipo de carregamento empregados na análise de fadiga e apresenta procedimentos simplificados para avaliação à fadiga dos principais elementos estruturais presentes nas pontes mistas em vigas retas.

BILÉ (2009) avaliou o comportamento à fadiga para pontes mistas de aço e concreto rodoviárias e ferroviárias, de médio vão e de seção transversal em duas vigas longarinas e conforme os tipos de categorias de detalhes e critérios da norma Eurocode. Ele destacou os principais tipos de categorias de detalhes que são mais condicionantes para o dimensionamento estrutural de pontes mistas em duas vigas longarinas.

ZACARIAS *et al* (2012) desenvolveu um estudo comparativo de verificação à fadiga para uma viga de rolamento de ponte rolante industrial entre a norma ABNT NBR 8800:2008 e os guias ANSI/AISC 360-10 e CSA S16-01. Eles concluíram que o coeficiente de impacto vertical exerce influência sobre as tensões atuantes na viga de rolamento, pois amplifica os momentos gerados pela passagem das cargas móveis. E também aconselham que devem ser seguidas as indicações do guia AISC 360-10 em relação a importância da execução de soldas de penetração total na ligação entre a alma e a mesa superior, e entre o enrijecedor e a mesa superior de vigas de rolamento, em razão que esses efeitos por muitas vezes não são contabilizados no cálculo de avaliação à fadiga de pontes rolantes.

LEITÃO (2013) desenvolveu uma avaliação à fadiga por análise dinâmica de elementos finitos para uma ponte rodoviária mista. Na representação do trem-tipo foi utilizado um modelo constituído por sistemas massa-mola-amortecedor. Uma análise dinâmica de vibração forçada foi processada para obter históricos de tensões e fazer contagem de ciclos pelo Método Rainflow. A verificação à fadiga foi feita por comparar o número de ciclos de vida de serviço da ponte com valores de curvas SN das normas AASTHO e Eurocode.

A norma ABNT NBR 16694:2020 em seu Anexo A apresenta as prescrições necessárias a serem adotadas na determinação do limite admissível da faixa de variação de tensões, levando em conta diversas categorias de detalhes construtivos e para um número de ciclos de solicitação, e que deve ser considerado na avaliação à fadiga para elementos estruturais de pontes rodoviárias em vigas retas mistas.

O presente trabalho tem como objetivo avaliar à fadiga os elementos estruturais da superestrutura de uma ponte mista em arcos metálicos de modo a atender aos requisitos apresentados no Anexo A da norma ABNT NBR 16694:2020. A avaliação à fadiga para os elementos estruturais da ponte mista em arcos metálicos será apenas realizada para as regiões do filete de solda entre a alma do perfil da viga longarina e o enrijecedor vertical. Isso porque as vigas longarinas são estruturas primárias e a iniciação e propagação de fissuras nessa região ocasiona a ruptura da mesa tracionada e pode levar ao colapso da viga. Para desenvolvimento do trabalho será elaborado um modelo de elementos finitos para a estrutura da ponte mista em arcos metálicos. Dois carregamentos serão definidos, um para representar a combinação frequente de fadiga e o outro para representar a combinação de ações permanentes. Esses carregamentos serão processados na análise de elementos finitos de modo a obter valores de tensões de tração e que serão usados na definição da faixa de variação de tensões de cálculo. A faixa admissível de variação de tensões será estabelecida para o detalhe construtivo representativo da ligação soldada em estudo e conforme indicação na Tabela A.1 do Anexo A da norma ABNT NBR 16694:2020. No final será feita a avaliação à fadiga da ligação soldada de modo a verificar se o valor da faixa de variação de tensões de cálculo está abaixo do valor da faixa admissível de variação de tensões.



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

A Ponte Mista em Arcos Metálicos

Uma ponte mista em arcos metálicos com 200 metros de comprimento, sendo 4 arcos de 50 metros, e com 7,9 metros de largura, ilustrada na Figura 1, foi projetada para atender ao sistema de adutoras do Rio São Francisco em Aracaju / Sergipe e também para ser usada como passarela de pedestres.



Figura 1 – Ponte mista em arcos metálica para a um sistema de adutoras e de uso como passarela.

Descrição do Sistema Estrutural da Ponte Mista em Arcos Metálicos

O sistema estrutural da ponte é composto por arcos metálicos em perfis tubulares retangulares de seção $1000 \times 300 \times 22 \times 22$ mm e com elementos de diagonais, montantes e travamentos transversais em tubos circulares metálicos de seção $219,1 \times 10$ mm. O tabuleiro da ponte é formado por uma laje de concreto com espessura de 18 cm, com vigas longarinas em perfil I de seção $500 \times 350 \times 9,5$ mm e com vigas transversinas em perfil I de seção $300 \times 200 \times 7,9$ mm.

Figura 2 ilustra uma vista lateral e outra transversal de um trecho de 50 m da ponte.

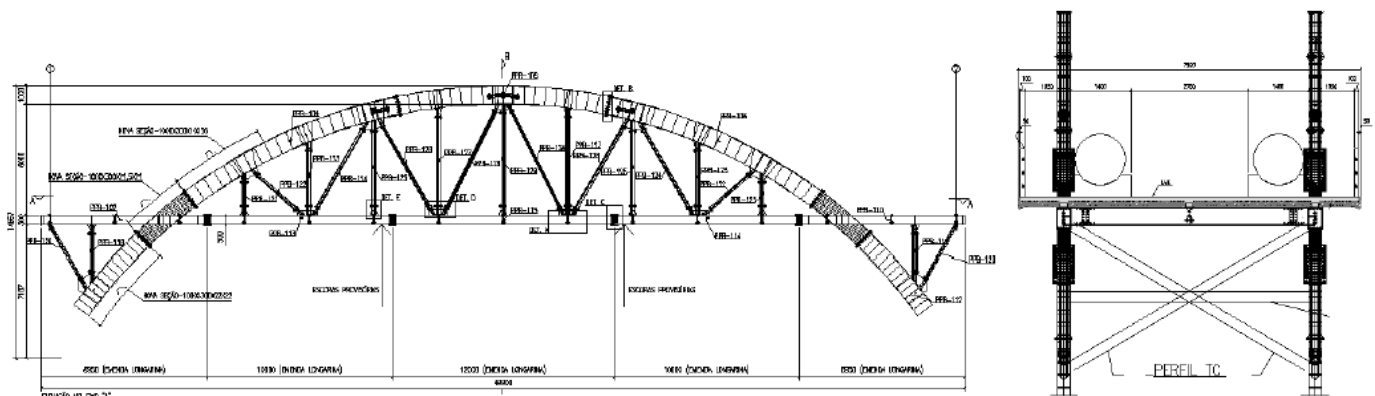


Figura 2 – Sistema estrutural da ponte mista em arcos metálicos.

Modelo Computacional de Elementos Finitos da Ponte Mista em Arcos Metálicos

Para avaliação à fadiga dos elementos estruturais da ponte mista em arcos metálicos foi elaborado um modelo computacional de elementos finitos como ilustrado na Figura 3. Na modelagem da ponte foram empregados elementos de casca para modelar a estrutura da laje do tabuleiro e elementos de vigas para modelar as estruturas de barras como: arcos, diagonais, montantes, travamentos transversais, vigas longarinas, vigas transversinas e estacas da fundação. A interação solo-estrutura foi simulada considerando elementos de molas e com valores de coeficientes de mola estabelecidos por resultados de sondagem do solo. Os tubos das adutoras, elementos de dormentes e guarda corpo não foram modelados e seus valores de pesos foram aplicados ao modelo como cargas atuantes.

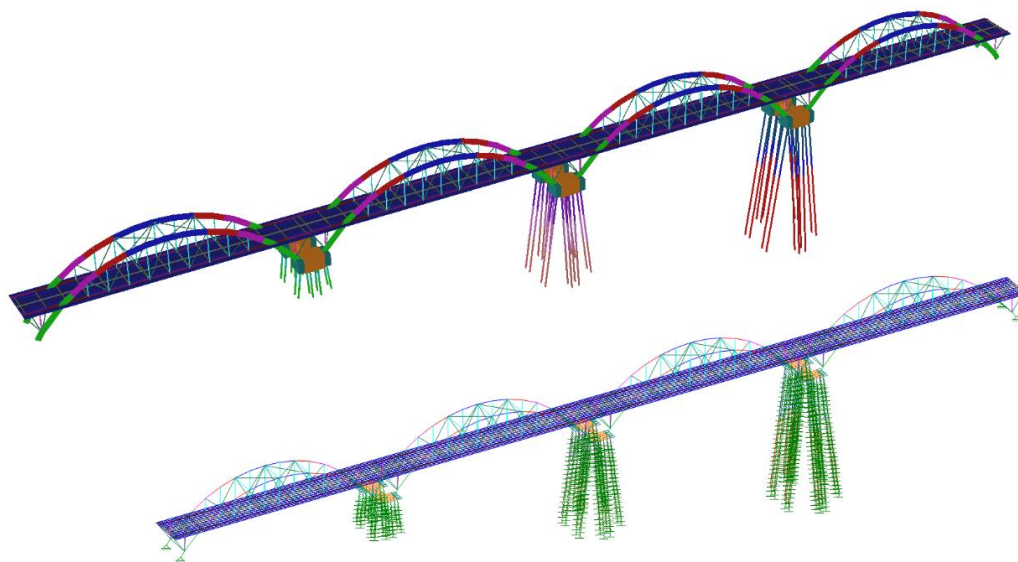


Figura 3 – Modelo de elementos finitos para a ponte mista em arcos metálicos.

Carregamentos para Análise de Fadiga da Ponte Mista em Arcos Metálicos

Os carregamentos aplicados ao modelo da ponte mista em arcos metálicos foram definido por ações permanentes de peso próprio da estrutura e de elementos permanentes fixos (tubos de aço das adutoras, dormentes e estrutura de guarda-corpos) e pela ação variável de carga móvel. A ação variável de carga móvel foi definida apenas como sendo a carga vertical de 5 kN/m^2 conforme norma ABNT NBR 7188:2013, Estruturas de Passarelas, e foi aplicada ao modelo de elementos finitos na posição mais desfavorável e sem consideração de coeficiente de impacto vertical, como ilustra a Figura 4.

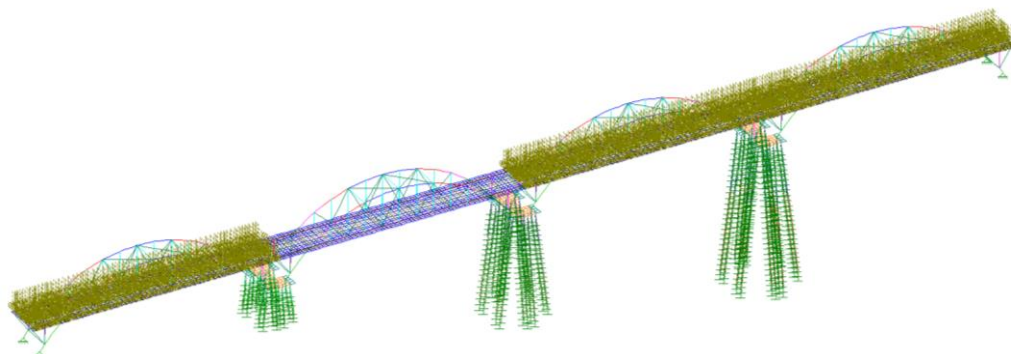


Figura 4 – Ação variável de carga vertical na posição mais desfavorável.

Falha por Fadiga em Elementos Estruturais Soldados de Vigas de Pontes Metálicas

VAYAS (2017) define fadiga como um processo em que o dano é acumulado no material sob ação de variação de tensões devido ao carregamento atuante. O dano toma a forma de fissuras no material que se desenvolve lentamente nos estágios iniciais do carregamento e acelera muito rapidamente no final do processo, levando a fratura do material. Microfissuras se iniciam em pontos de concentração de tensões para valores de tensões que podem estar bem abaixo ao limite elástico do material. Evidentemente tensões de tração são mais nocivas a fadiga do que tensões compressivas. Logo, fadiga é um fenômeno local e que acontece em regiões de concentrações de tensões tais como mudança de seção geométrica, em ligações parafusadas ou em ligações soldadas, onde o material sofre alterações metalúrgicas.

MAEDA *et al* (1991, *apud* KLINSKY, 1999, p. 58) salienta que o principal problema que a fadiga ocasiona em pontes soldadas é o aparecimento de fissuras próximas aos locais de solda. Dessa forma, ele faz uma classificação para o tipo fissura conforme indicado na Figura 5.

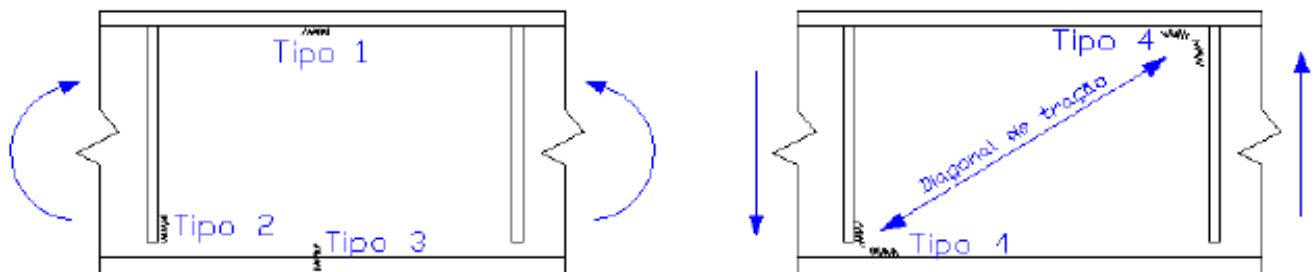


Figura 5 – Fissuras por fadiga observadas em pontes metálicas.

A classificação de Fissura Tipo 2 (FISHER (1981, *apud* KLINSKY, 1999, p. 60) indicada na Figura 5 caracteriza uma fissura que se inicia na base do filete de solda entre a alma da viga e o enrijecedor vertical e a propagação desse tipo de fissura ocasiona a ruptura da mesa tracionada e pode levar ao colapso da viga. Dessa forma, constata-se que o elemento estrutural crítico da ponte mista em arcos metálicos a ser avaliado à fadiga são as vigas longarinas e para a região do filete de solda entre a alma do perfil da viga e o enrijecedor vertical como destacadas em linhas tracejadas em vermelho na foto da Figura 6.



Figura 6 – Seções críticas da viga longarina quanto a ocorrência de falhas por fadiga.

Esclarece-se que no presente trabalho foi dispensada a verificação à fadiga para os demais elementos estruturais da ponte mista em arcos metálicos tais como: elementos de diagonais, montantes e travamentos transversais, vigas transversinas e arcos metálicos. A justificativa de tal dispensa consiste no fato que esses elementos são em ligações parafusadas e também possuem redundância, e no caso dos arcos metálicos estes trabalham predominantemente à compressão. Julga-se assim que o problema do fenômeno de fadiga nesses elementos estruturais não ocasionará colapso estrutural para a ponte mista em arcos metálicos.

Procedimento de Verificação à Fadiga pela Norma ABNT NBR 16694:2020

O Anexo A da norma ABNT NBR 16694:2020 traz as prescrições necessárias para a avaliação à fadiga dos elementos estruturais de aço e das ligações para pontes de aço e mistas de aço e concreto. Tal anexo considera ações repetitivas ou cíclicas, com variação de tensões no regime elástico, cuja frequência e magnitude são suficientes para iniciar fissuras e colapso progressivo por fadiga.

O Anexo A considera a seguinte combinação frequente de fadiga:

$$F_{d,fad} = \sum_{i=1}^m F_{Gi,k} + \psi_1 \sum_{j=1}^n F_{Qj,k} \quad (1)$$

onde

$F_{Gi,k}$ é o valor característico das ações permanentes;

$F_{Qi,k}$ é o valor característico das ações variáveis, sendo, neste caso, apenas as cargas móveis;

ψ_1 é o fator de redução para as ações variáveis de acordo com a Tabela 5 da norma ABNT NBR 16694:2020.

No estabelecimento da combinação frequente de fadiga foi adotado o fator de redução ψ_1 de 0,5.

A verificação à fadiga foi realizada segundo as seguintes etapas:

- Obtenção das tensões de tração solicitantes provenientes da combinação frequente de fadiga e da combinação de ações permanentes;
- Definição da faixa de variação de tensões de cálculo na seção analisada;
- Obtenção dos parâmetros de fadiga para detalhes construtivos apresentados na Tabela A.1 do Anexo A da norma ABNT NBR 16694:2020 para definição da faixa admissível de variação de tensões;
- Avaliação à fadiga para o elemento estrutural da ponte mista.

Avaliação à Fadiga para os Elementos Estruturais da Ponte Mista em Arcos Metálicos

Figura 7 mostra o resultado das máximas tensões de tração devido a combinação frequente de fadiga atuantes nos elementos estruturais das vigas longarinas.

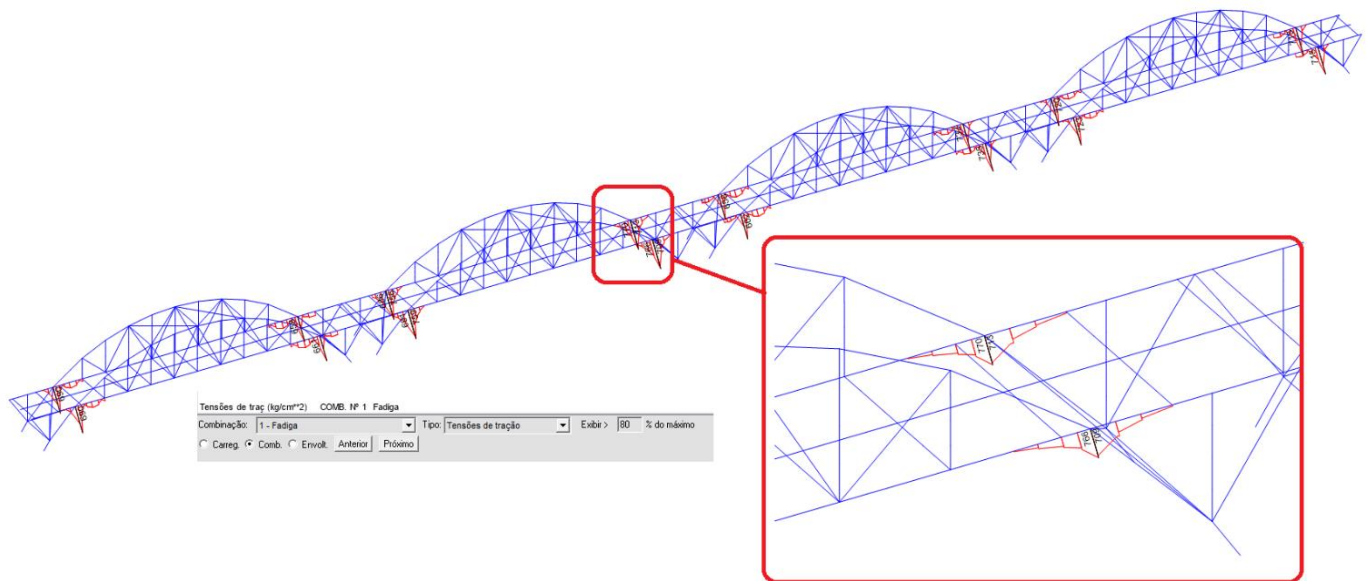


Figura 7 – Tensões de tração (kgf/cm²) nas vigas longarinas - Combinação frequente de fadiga.

Figura 8 mostra o resultado das máximas tensões de tração devido a combinação de ações permanentes atuantes nos elementos estruturais das vigas longarinas.

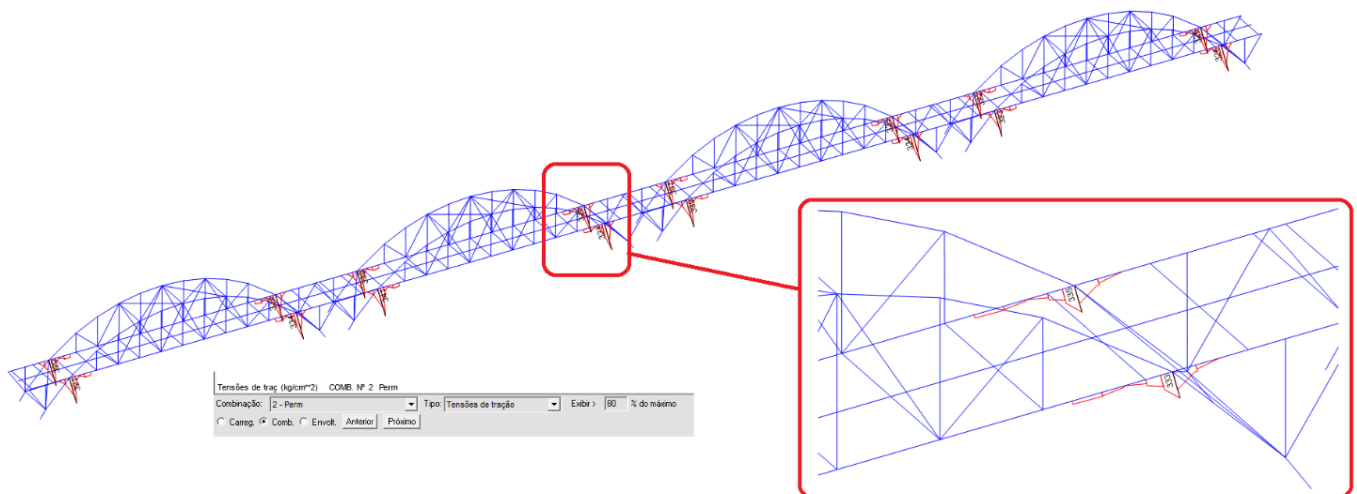


Figura 8 – Tensões de tração (kgf/cm²) nas vigas longarinas - Combinação de ações permanentes.

A tensão de tração de cálculo devido a combinação frequente de fadiga vale 77 MPa enquanto a tensão de tração de cálculo devido a combinação de ações permanentes vale 33,5 MPa. Logo, a faixa de variação de tensões de cálculo vale 43,5 MPa, ou seja, $\Delta\sigma = 77 - 33,5 = 43,5$ MPa.

Para avaliação à fadiga da seção crítica da viga longarina foi considerado o detalhe construtivo da descrição 4.1 da Tabela A.1 do Anexo A da norma ABNT NBR 16694:2020 e mostrado na Figura 9.



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

Seção 4 – Conexões de enrijecedores soldados					
Descrição	Categoria	Constante A MPa ³	Limiar σ_{TH} MPa	Localização potencial do início da fratura	Detalhes construtivos
4.1 Metal-base no pé da solda de filete entre o enrijecedor e a mesa, e na solda transversal de filete entre o enrijecedor e a alma NOTA Inclui soldas similares em enrijecedores de contato e chapas de conexão	C'	44×10^8	83	Iniciando na descontinuidade geométrica no pé da solda de filete e estendendo-se para o metal-base	

Figura 9 – Faixa admissível de variação de tensões para o detalhe construtivo da Descrição 4.1.

Observa-se que a faixa admissível de variação de tensões (σ_{TH}) é de 83 MPa.

Conclusão

Uma avaliação à fadiga foi realizada para uma ponte mista em arcos metálicos de modo a atender as prescrições do Anexo A da norma ABNT NBR 16694:2020. A avaliação à fadiga foi apenas realizada para a região do filete de solda entre a alma do perfil das vigas longarinas e o enrijecedor vertical. Foi constatado que a faixa de variação de tensões de cálculo foi de 43,5 MPa e ficou abaixo da faixa admissível de variação de tensões do detalhe construtivo que foi de 83 MPa. Portanto, a região analisada não apresentará problemas de fadiga durante a sua vida útil de projeto.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR7188 – Carga móvel rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas. Rio de Janeiro, ABNT, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, ABNT, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR16694: Projeto de pontes rodoviárias de aço e mistas de aço e concreto. Rio de Janeiro, ABNT, 2020.
- BILÉ, C. E. M., Verificação da Resistência à Fadiga em Pontes Mistas Aço-Betão. Estudo de Casos. Dissertação (Mestrado), Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2009.
- FISHER, J. W., Inspecting steel bridges for fatigue damage. Fritz Engineering Laboratory Report, n. 386-15. Lehigh University, 1981.
- KLINSKY, G. E. R. G., Uma Contribuição ao Estudo das Pontes em Vigas Mistas. Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, EESC/USP, São Carlos, SP, Brasil, 1999.
- LEITÃO, F. N. e SILVA, I. A. R., Análise de fadiga de pontes rodoviárias mistas submetidas ao tráfego de veículos. ABMEC, CILAMCE, Pirenópolis, GO, Brasil, 2013.
- MAEDA, Y., KAWAY, Y. e OKURA, I., Fatigue cracking in plate and box girders. In: Structures Subjected to Repeated Loading: Stability and Strength. London, Elsevier, Cap 4, p. 73-102, 1991.
- PRAVIA, Z. M. C., FABIANE, R. e FICANHA, R. A., Verificação à fadiga de vigas de rolamento de pontes rolantes industriais. ABCEM, CONSTRUMETAL, São Paulo, SP, Brasil, 2012.
- SMITH, I. F. C., Fatigue assessment and fracture mechanics in structural engineering. In: Structures Subjected to Repeated Loading: Stability and Strength. London, Elsevier, Cap 1, p. 1-24, 1989.
- VAYAS, I. e ILIOPOULOS, A., Design of steel-concrete composite bridges to Eurocodes. Taylor & Francis Group, CRC Press, New York, 2017.