

# Desenvolvimento de aplicativo para um sistema de manutenção de pontes de aço

Verissa P. M. Queiroz<sup>1</sup>, Gabriel V. Santos<sup>1</sup>, Elisa D. Sotelino<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Engenharia Civil, *Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro*  
*Marquês de São Vicente St., N° 225, Gávea, 22451-900, Rio de Janeiro/RJ, Brasil*  
verissa@aluno.puc-rio.br, gabriel\_vs@aluno.puc-rio.br, sotelino@puc-rio.br

**Abstract.** Highway bridges are structures subject to fatigue and corrosion effects. In this sense, this work aims to develop a steel bridge maintenance system tool based on the use of a neural network model and a reliability analysis, using languages such as Python, HTML, CSS and Javascript. The system prototype considers the corrosion-fatigue effects and some maintenance activities to estimate the structure's lifetime. According to the simulations carried out on a steel bridge designed according to the AASHTO American code, it was found that the increase in the traffic volume and in its growth rate can cause a reduction of up to 66% in the structure's lifetime, while the presence of maintenance activities can increase its lifetime by up to 71% depending on the traffic parameters.

**Keywords:** steel bridge, maintenance, corrosion, fatigue

## 1 Introdução

Pontes são estruturas que estão sujeitas, principalmente, aos fenômenos de fadiga e corrosão [1]. O carregamento cíclico repetitivo provocado pelo tráfego de veículos pode provocar danos estruturais progressivos pela propagação de trincas em regiões com concentração de tensões [2]. A corrosão provocada pela exposição ao ar e umidade, por outro lado, pode causar aumento da tensão e mudança nas propriedades geométricas do elemento estrutural [1], além de reduzir suas propriedades de fadiga [3]. Apesar de pouco compreendida, algumas metodologias foram propostas para considerar o efeito da corrosão-fadiga [4]–[6].

Para avaliação da segurança estrutural, diversas pesquisas utilizam o índice de confiabilidade variante no tempo como indicador de performance de forma a considerar as incertezas dos modelos de deterioração. Assim, o fim da vida útil da estrutura se dá quando o nível de confiabilidade atinge seu limite mínimo, representado pelo índice de confiabilidade alvo ( $\beta_{alvo}$ ) que pode variar entre 2 e 4 para o caso de fadiga [7]–[10]. Dentre tais pesquisas, destacam-se as que integraram o uso de sistemas de pesagem em movimento WIM com o uso de modelos em elementos finitos e modelos preditivos a fim de avaliar a confiabilidade a fadiga de pontes de aço [9]–[12]. Nesses estudos, modelos de aprendizado de máquina são utilizados para substituir a análise em elementos finitos de modo a obter a variação de tensão conforme o carregamento simulado, o que reduz o esforço computacional.

Os danos estruturais provocados pela corrosão-fadiga, no caso de pontes de aço, podem levar à redução da capacidade carga ou ao colapso da estrutura. Dessa forma, a gestão eficiente de sistemas de infraestrutura, com o planejamento de atividades de manutenção e restauração, busca garantir a segurança e funcionalidade das mesmas. Nesse contexto, este trabalho tem o objetivo de desenvolver um aplicativo de um protótipo de sistema de manutenção de pontes de vigas de aço simplesmente apoiadas que integra o uso de um modelo de redes neurais e de uma análise de confiabilidade, considerando os danos por fadiga e corrosão, para a estimativa do tempo de vida útil dessas estruturas. O aplicativo foi desenvolvido com a utilização de linguagens de programação que otimizam os processos de Aprendizado de Máquina (Machine Learning) como Python e linguagens/tecnologias de desenvolvimento para criação de interfaces gráficas modernas como HTML, CSS e Javascript.

## 2 Protótipo do sistema de manutenção

O protótipo de sistema de manutenção de pontes utilizado na elaboração do aplicativo foi baseado no estudo desenvolvido por Queiroz [13]. No método proposto, foram realizadas simulações em elementos finitos para obter os resultados de tensão máxima nas vigas de pontes de aço simplesmente apoiadas com a passagem de um veículo de fadiga da AASHTO de peso unitário, de modo a criar um banco de dados elaborado com diferentes configurações de pontes. Esse banco de dados foi utilizado para o treinamento e validação de um modelo de redes neurais que prediz resultados de tensão a partir de dados geométricos e de material da ponte (dados de entrada do modelo). Os coeficientes e a configuração de rede neural obtidos foram então utilizados no sistema.

### 2.1 Fluxograma

A Figura 1 apresenta o fluxograma do sistema, que inicializa com a leitura de dados a respeito da estrutura – geometria, material, tráfego de veículos e classificação do meio ambiente – que serão definidos pelo usuário.

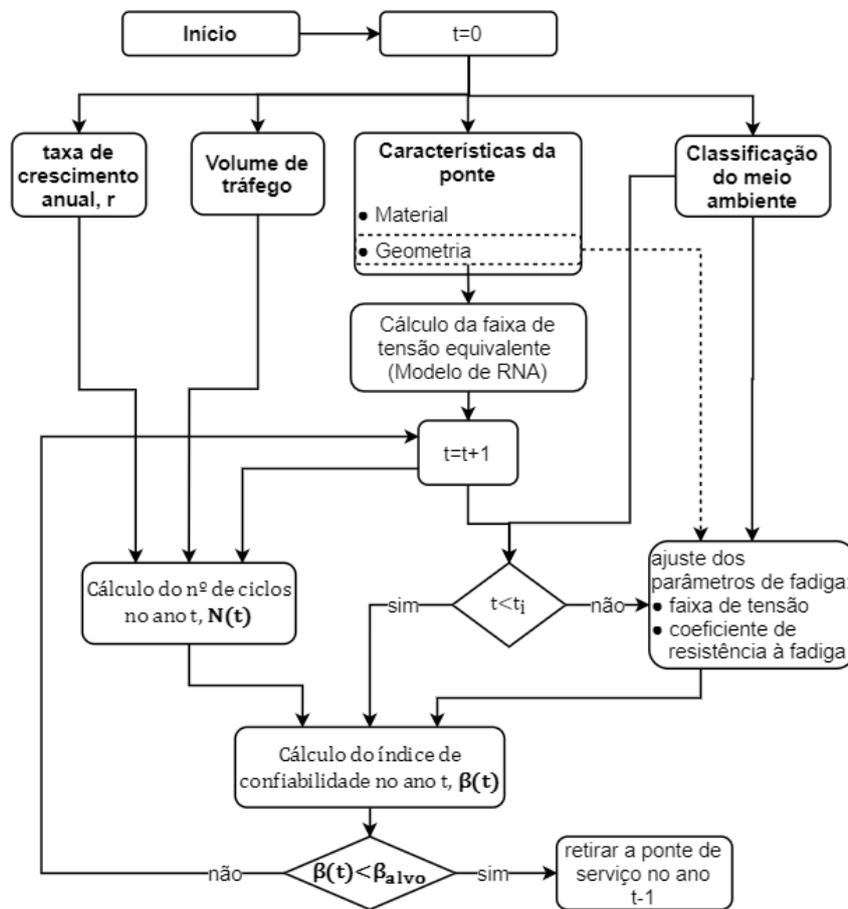


Figura 1 – Fluxograma

Primeiramente, o modelo de rede neural é utilizado para estimar a faixa de tensão equivalente do detalhe estrutural considerado (solda entre a alma e a mesa inferior da viga – Categoria B da AASHTO). O volume de tráfego e a sua taxa de crescimento anual são utilizados para o cálculo do número de ciclos acumulado,  $N(t)$ , também necessário para análise. A classificação do meio ambiente, por outro lado, determina o tempo de início da corrosão ( $t_i$ ), assim como a taxa de corrosão utilizada para os ajustes nos parâmetros de fadiga afetados pela corrosão – faixa de tensão equivalente e coeficiente de resistência à fadiga.

A avaliação da segurança de detalhes estruturais de pontes de aço submetidos aos efeitos de corrosão-fadiga é feita a partir de uma análise de confiabilidade estrutural. Dessa forma, calcula-se o índice de confiabilidade de

acordo com método proposto por Frangopol et al. [7] para análise de fadiga pela curva S-N para o caso em que o período analisado é menor do que o tempo de início da corrosão. Caso o período analisado seja superior ao tempo de início de corrosão, ajusta-se os parâmetros de fadiga conforme método proposto por Hosseini et al. [4] e pelo padrão de corrosão presente no estudo de Kayser e Nowak [1].

O cálculo do índice de confiabilidade é interrompido no ano em que  $\beta < \beta_{alvo}$ , com  $\beta_{alvo} = 2$ , quando a estrutura apresenta um nível de segurança insatisfatório. O cálculo de  $\beta$  é realizado 3 vezes, pois o sistema apresenta resultados para um cenário sem manutenção e para dois cenários com estratégias de manutenção distintas. A primeira estratégia de manutenção consiste na lavagem periódica das vigas de aço após a degradação do revestimento de proteção, enquanto a segunda, na lavagem das vigas durante toda vida útil da estrutura. Detalhes a respeito da metodologia podem ser encontrados no estudo de Queiroz [13].

## 2.2 Aplicativo

Para implementar a metodologia descrita acima, desenvolveu-se um aplicativo com o propósito de fornecer uma interface mais agradável para que usuários do sistema possam avaliar a durabilidade de pontes de aço simplesmente apoiadas sob diferentes cenários de manutenção. O aplicativo foi implementado em linguagem Python com uma interface gráfica com tecnologias/ linguagens web em HTML, CSS e Javascript, baseada no framework Eel [14].

O aplicativo apresenta quatro abas. Na primeira aba, o usuário deve inserir os dados geométricos e de material da ponte (Figura 2). Na segunda aba, o usuário deve selecionar o tipo de ambiente no qual a estrutura está inserida (Figura 3). Já na terceira aba, o usuário deve selecionar o tipo de dado em relação ao volume de tráfego que ele tem acesso e, em seguida, preencher os outros dados relacionados ao número de veículos (e selecionar o tipo de rodovia) ou de caminhões, assim como a taxa de crescimento anual do tráfego (Figura 4). Por fim, a quarta aba apresenta os resultados calculados pela metodologia (Figura 5). Nas figuras abaixo, os dados preenchidos no aplicativo ilustram uma das simulações realizadas na próxima seção.

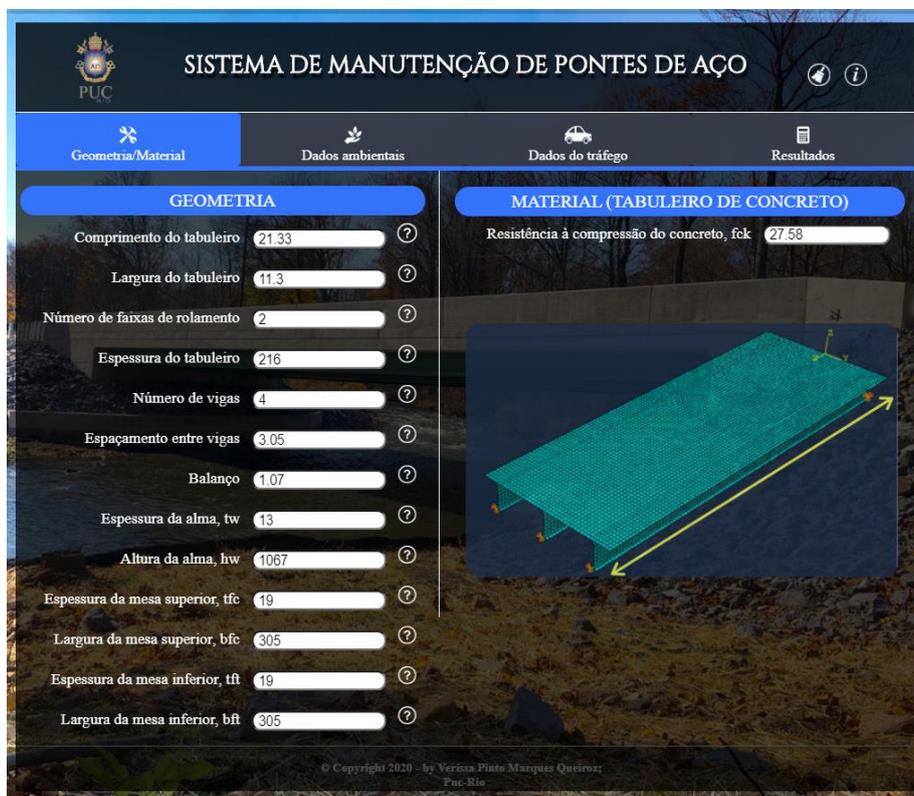


Figura 2 – Interface gráfica do sistema - aba "Geometria/ Material"

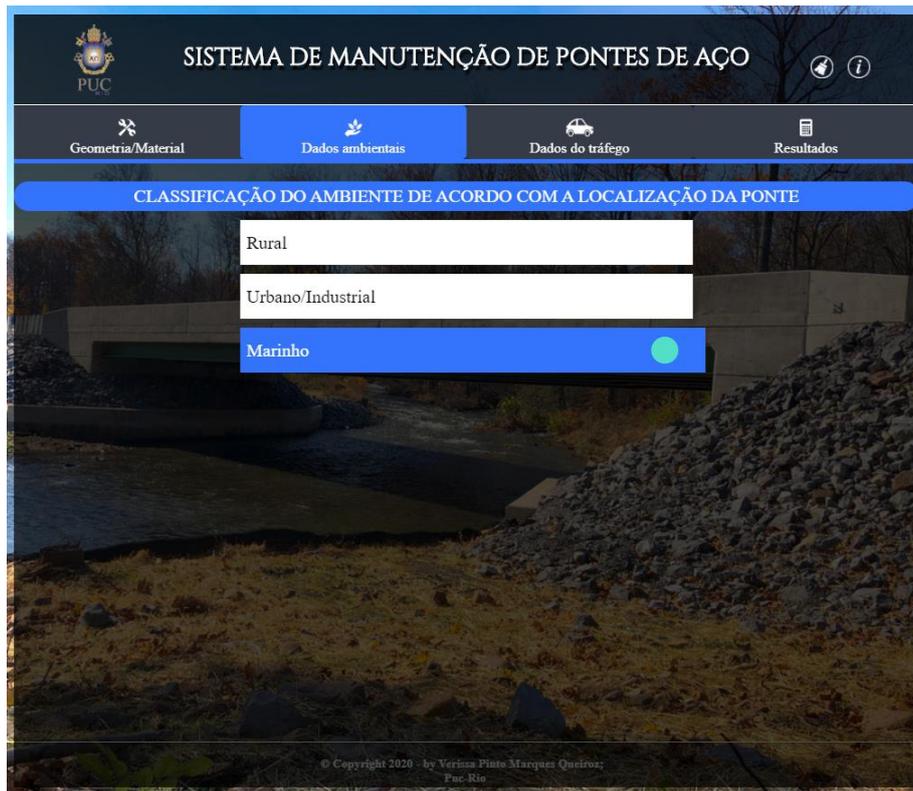


Figura 3 – Interface gráfica do sistema - aba "Dados ambientais"

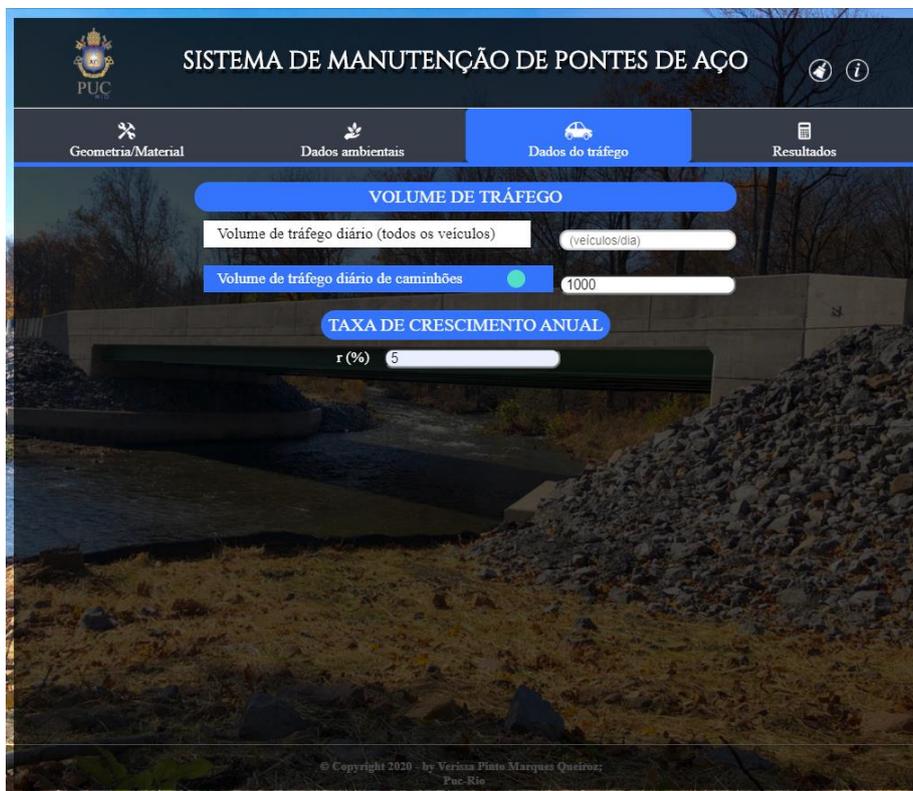


Figura 4 – Interface gráfica do sistema - aba "Dados do tráfego"



Figura 5 – Interface gráfica do sistema - aba "Resultados"

### 3 Simulação numérica

Para demonstrar o uso do aplicativo, realizaram-se algumas simulações com uma ponte projetada de acordo com critérios da AASHTO, presente no trabalho de Yanez [15]. Os dados da ponte encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1 – Dados da ponte considerada

Dimensões/ Propriedades	Valores
Comprimento (m)	21,33
Largura do tabuleiro (m)	11,3
Número de faixas de rolamento	2
Espessura do tabuleiro (mm)	216
Resistência à compressão do concreto (MPa)	27,58
Espaçamento entre vigas (m)	3,05
Número de vigas	4
Balanço (m)	1.07
Espessura da alma (mm)	13
Altura da alma (mm)	1067
Espessura da mesa superior (mm)	19
Largura da mesa superior (mm)	305
Espessura da mesa inferior (mm)	19
Largura da mesa inferior (mm)	305

Nas simulações realizadas, buscou-se avaliar o efeito dos parâmetros de tráfego e das atividades de manutenção. Para isso, adotou-se valores de ADTT equivalentes a 1000 e 5000, taxa de crescimento anual de 0% e 5%, e considerou-se que ponte está localizada em ambiente marinho. A Tabela 3 e a Figura 7 mostram os resultados do índice de confiabilidade e do tempo de vida útil, respectivamente, estimados para cada simulação.

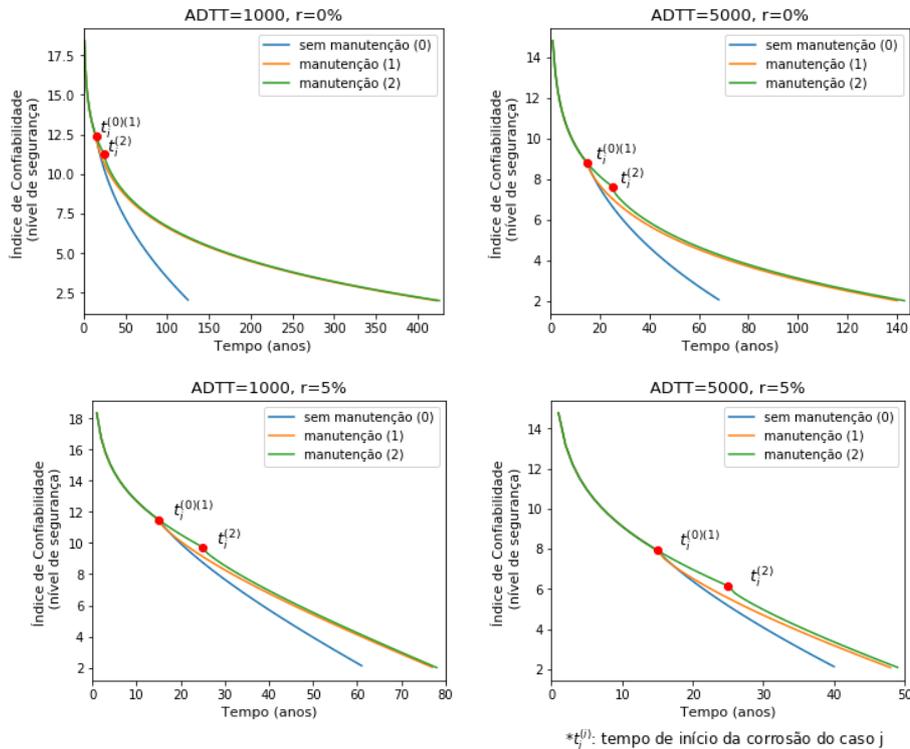


Figura 7 - Índice de confiabilidade ao longo do tempo (ambiente marinho)

Tabela 3 – Tempo de vida útil (ambiente marinho)

Alternativa de manutenção	Tempo de vida útil (anos)			
	ADTT (r=0%)		ADTT (r=5%)	
	1000	5000	1000	5000
sem manutenção (0)	125	68	61	40
manutenção (1)	423	140	77	48
manutenção (2)	426	143	78	49

Observa-se que o aumento no volume diário de tráfego (ADTT) pode causar uma redução na vida útil da estrutura de 46% a 66% com taxa de crescimento anual nula. O aumento dessa taxa de crescimento anual de tráfego também reduz essa estimativa, podendo chegar a uma redução de até 51% para o mesmo ADTT no cenário sem manutenção. Em relação ao efeito das atividades de manutenção, observa-se uma variação entre 17% a 71% no aumento da vida útil da estrutura, dependendo do tráfego da rodovia. Apesar disso, o tempo de vida útil proporcionado por tais atividades para um volume diário de tráfego de 5000 caminhões com  $r=5\%$  se manteve abaixo dos 75 anos recomendados. Assim, observa-se que a manutenção considerada no sistema não causa impacto significativo quando o dano por fadiga é dominante.

## 4 Conclusão

De acordo com os resultados das simulações realizadas pelo aplicativo desenvolvido, observou-se que o aumento nos valores dos parâmetros de tráfego (ADTT e  $r$ ) reduzem o tempo de vida útil da estrutura, podendo chegar a uma redução de até 66%. Em relação ao efeito das alternativas de manutenção consideradas, observou-

se um aumento na vida útil de até 71%, porém tais atividades não são tão efetivas quando a rodovia apresenta volume de tráfego ou crescimento anual do tráfego elevados.

O aplicativo desenvolvido proporciona ao usuário informações a respeito do tempo de vida útil de pontes de aço simplesmente apoiadas para alguns cenários de manutenção sob condições mínimas de segurança e, assim, pode auxiliar na tomada de decisões quanto a gestão dessas estruturas. Cabe ressaltar, porém, que a ferramenta apresenta alternativas de manutenção limitadas à lavagem da superestrutura, além de não considerar os custos envolvidos em tais atividades. Dessa forma, novas pesquisas a respeito do efeito de outras atividades de manutenção na deterioração de pontes de aço, além de estudos de custos, podem fornecer dados que colaborem com o aperfeiçoamento do sistema do aplicativo.

**Agradecimentos.** O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

**Declaração de autoria.** Os autores confirmam que são as únicas pessoas responsáveis pela autoria deste trabalho, e que todo o material aqui incluído como parte deste artigo é de propriedade (e autoria) dos autores ou tem a permissão dos proprietários a serem incluídos aqui.

## Referências

- [1] J. R. Kayser and A. S. Nowak, “Reliability of corroded steel girder bridges,” *Struct. Saf.*, vol. 6, no. 1, pp. 53–63, 1989, doi: 10.1016/0167-4730(89)90007-6.
- [2] X. W. Ye, Y. H. Su, and J. P. Han, “A state-of-the-art review on fatigue life assessment of steel bridges,” *Math. Probl. Eng.*, vol. 2014, 2014, doi: 10.1155/2014/956473.
- [3] R. W. Revie and H. H. Uhlig, *Corrosion and corrosion control. An introduction to corrosion science and engineering.*, Third Edit. New Jersey: John Wiley & Sons, 2008.
- [4] A. Hosseini, A. Sahraeyma, and M. S. Marefat, “A reliability-based methodology for considering corrosion effects on fatigue deterioration in steel bridges - Part I: Methodology - Part I,” *Int. J. Steel Struct.*, vol. 13, no. 4, pp. 645–656, 2013, doi: 10.1007/s13296-013-4006-x.
- [5] I. M. El Aghoury and K. Galal, “Corrosion-fatigue strain-life model for steel bridge girders under various weathering conditions,” *J. Struct. Eng.*, vol. 140, no. 6, 2014, doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000992.
- [6] C. Hahin, “Effects of Corrosion and Fatigue on the Load Carrying Capacity of Structural and Reinforcing Steel,” 1994.
- [7] D. M. Frangopol, B. Zhu, and M. Soliman, “Redundancy of Structures and Fatigue of Bridges and Ships Under Uncertainty,” in *Handbook of Uncertainty Quantification*, R. Ghanem, D. Higdon, and H. Owhadi, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2016, pp. 1–25.
- [8] A. E. Mansour, P. H. Wirsching, G. J. White, and B. M. Ayyub, “Probability Based Ship Design: Implementation of Design Guidelines,” Washington, DC, 1996. [Online]. Available: internal-pdf://0187262376/392.pdf.
- [9] J. Zhu and W. Zhang, “Probabilistic fatigue damage assessment of coastal slender bridges under coupled dynamic loads,” *Eng. Struct.*, vol. 166, pp. 274–285, 2018, doi: 10.1016/j.engstruct.2018.03.073.
- [10] N. Lu, M. Noori, and Y. Liu, “Fatigue reliability assessment of welded steel bridge decks under stochastic truck loads via machine learning,” *J. Bridg. Eng.*, vol. 22, no. 1, pp. 1–12, 2016, doi: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000982.
- [11] N. Lu, Y. Liu, and Y. Deng, “Fatigue Reliability Evaluation of Orthotropic Steel Bridge Decks Based on Site-Specific Weigh-in-Motion Measurements,” *Int. J. Steel Struct.*, vol. 19, no. 1, pp. 181–192, 2019, doi: 10.1007/s13296-018-0109-8.
- [12] W. Yan, L. Deng, F. Zhang, T. Li, and S. Li, “Probabilistic machine learning approach to bridge fatigue failure analysis due to vehicular overloading,” *Eng. Struct.*, vol. 193, no. 1, pp. 91–99, 2019, doi: 10.1016/j.engstruct.2019.05.028.
- [13] V. P. M. Queiroz, “Avaliação do ciclo de vida de pontes de aço considerando os danos por fadiga e corrosão,” Master Thesis, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2020. (unpublished)
- [14] “Eel 0.13.2.” <https://pypi.org/project/Eel/> (accessed Jul. 27, 2020).
- [15] L. M. M. Yanez, “Bridge maintenance to enhance corrosion resistance and performance of steel girder bridges,” PhD Thesis, Purdue University, 2016.