



METODOLOGIA PARA PRORROGAÇÃO DA VIDA ÚTIL EM PONTES ROLANTES: INTEGRAÇÃO ENTRE MODELAGEM COMPUTACIONAL E VALIDAÇÃO METROLÓGICA COM ANÁLISE DE INCERTEZA

METHODOLOGY FOR EXTENDING THE SERVICE LIFE OF OVERHEAD CRANES: INTEGRATION BETWEEN COMPUTATIONAL MODELING AND METROLOGICAL VALIDATION WITH UNCERTAINTY ANALYSIS

CAIO CAMARGO CALTABIANO | ccamargocaltabiano@gmail.com
FERNANDO SILVA DE ARAÚJO PORTO | fernando.porto@unitau.br

RESUMO

A gestão de ativos críticos em indústrias de base exige estratégias que conciliem segurança operacional e otimização de custos de capital (CAPEX). Este artigo apresenta uma metodologia estruturada para a avaliação e prorrogação da vida útil de pontes rolantes que atingiram o limite estatístico de ciclos de projeto, conforme preconizado pelas normas NBR 8400 e ISO 12482. A abordagem fundamenta-se na integração entre a engenharia reversa para reconstrução do memorial de cálculo, a simulação numérica via Método de Elementos Finitos (MEF) para identificação de regiões críticas sob tensões alternantes, e a validação experimental por medições tridimensionais de flecha elástica. O diferencial desta pesquisa reside na quantificação da incerteza de medição, garantindo que a validação do modelo computacional seja quantitativamente segura. Os resultados demonstram, através de um estudo de caso em um equipamento com 50 anos de operação, que o monitoramento do *Design Working Period* (DWP) permite a extensão da performance segura, evitando o descarte prematuro de ativos estruturalmente íntegros.

Palavras-chave: Vida Útil Remanescente. Pontes Rolantes. ISO 12482. Incerteza de Medição. Elementos Finitos.

ABSTRACT

Critical asset management in heavy industries requires strategies that balance operational safety and capital cost optimization (CAPEX). This paper presents a structured methodology for evaluating and extending the service life of overhead cranes that have reached the statistical limit of design cycles, as recommended by NBR 8400 and ISO 12482 standards. The approach is based on the integration of reverse engineering for recalculating the design report, numerical simulation via Finite Element Method (FEM) to identify critical regions under alternating stresses, and experimental validation through three-dimensional elastic deflection measurements. The core contribution of this research lies in the quantification of measurement uncertainty, ensuring that the validation of the computational model is quantitatively sound. Results demonstrate, through a case study on a 50-year-old operating equipment, that monitoring the Design Working Period (DWP) allows for the extension of safe performance, preventing the premature disposal of structurally sound assets.

Keywords: Remaining Service Life. Overhead Cranes. ISO 12482. Measurement Uncertainty. Finite Element Method.

1. INTRODUÇÃO

No cenário de competitividade global, a gestão térmica e estrutural de ativos evoluiu de um requisito de confiabilidade para um pilar de eficiência energética e econômica. A Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC) estabelece que a decisão de substituição de um equipamento deve ser pautada no risco e na condição física real, e não meramente na idade cronológica. No caso de pontes rolantes, ativos com ciclo de vida superior a 20 anos são comuns, mas a incerteza sobre a fadiga acumulada frequentemente leva a decisões de descarte conservadoras e onerosas.

O problema central reside na lacuna entre as normas clássicas de projeto (ABNT, 1984; CMAA, 2020) e as diretrizes de monitoramento contínuo de vida. Enquanto as primeiras dimensionam o equipamento para uma vida teórica estatística, a norma ISO 12482 (ISO, 2014) introduz o conceito de *Safe Working Period* (SWP), permitindo que, através de inspeções e recálculos, a operação seja estendida. Este artigo propõe um protocolo técnico para preencher essa lacuna, utilizando modelagem computacional e metrologia industrial de alta precisão para validar a integridade estrutural de ativos *over-life*.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 CRITÉRIOS DE FADIGA E CICLOS DE TRABALHO

A vida útil de uma ponte rolante é limitada primariamente pela fadiga do material. A relação entre a tensão alternante (σ_{alt}) e o número de ciclos até a falha (N) é expressa pela curva S-N. Segundo os critérios estabelecidos para extensão de vida (ISO, 2014; GAO; WANG, 2023), o cálculo do DWP (*Design Working Period*) remanescente deve ser revisado periodicamente através do somatório do dano acumulado (S_i):

$$DWP_{remanescente} = DWP_{projeto} - \sum_{i=1}^n S_i$$

2.2 MODELAGEM NUMÉRICA E FLECHA ELÁSTICA

A validação do modelo de Elementos Finitos (MEF) utiliza a flecha elástica (δ) como parâmetro fundamental de controle. De acordo com os preceitos clássicos de resistência dos materiais (SHIGLEY; MISCHKE; BUDYNAS, 2016), para uma viga biapoiada sob carga concentrada, a flecha teórica máxima no centro do vão é expressa por:

$$\delta = \frac{P \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I}$$

Onde P é a carga aplicada, L o vão, E o módulo de elasticidade e I o momento de inércia da seção transversal.

3. METODOLOGIA PROPOSTA

A metodologia estruturada para a certificação de extensão de vida útil segue quatro fases:

Fase I - Diagnóstico e SWP: Coleta de dados históricos de manutenção e espectro de cargas real para atualização do período de trabalho seguro (CHEN; LIU; ZHANG, 2024).

Fase II - Engenharia Reversa e MEF: Reconstrução geométrica do ativo e simulação numérica tridimensional para determinação de flechas teóricas e identificação de tensões de Von Mises e pontos críticos de fadiga (KOSER; SAVKOVIC; BULATOVIC, 2022).

Fase III - Validação Metrológica e END: Ensaios Não Destrutivos (END) focados nos críticos apontados pelo MEF, seguidos de ensaio de carga controlada com monitoramento metrológico tridimensional de flecha em larga escala (MÜLLER; MEIER, 2022).

Fase IV - Certificação: Análise de incerteza e comparação entre δ_{MEF} e $\delta_{Exp} \pm U$, culminando na emissão de laudo técnico de prorrogação.

4. ESTUDO DE CASO: APLICAÇÃO EM ATIVO *OVER-LIFE* (PONTE ROLANTE H925)

Para validar a metodologia (Fases I e II), realizou-se a modelagem de uma ponte rolante operante em indústria de base (Fábrica-04), fabricada em 1974 (50 anos de operação). O ativo, designado H925 (Figura 1), opera na movimentação de chapas por eletroímãs sob severo regime de trabalho (Classe CMAA - D) (CMAA, 2020).

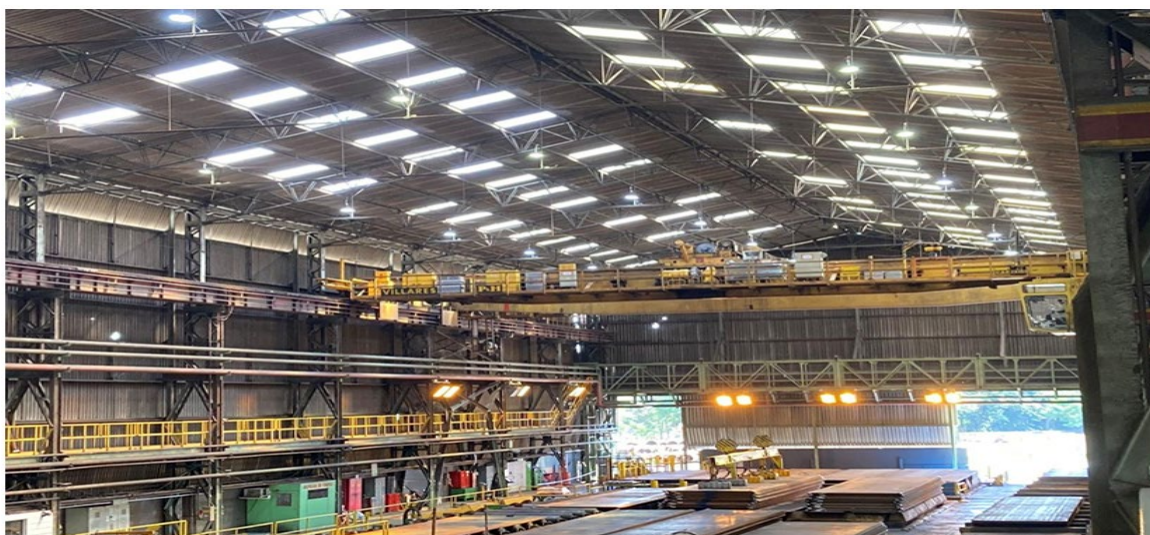
Capacidade: 30 Toneladas (2x 15t);

Vão da Ponte: 24.200 mm;

Material: Aço Estrutural ASTM A36 ($S_y = 250 \text{ MPa}$; $\sigma_{adm} = 167 \text{ MPa}$);

Critério de Flecha Admissível: Vão / 800 (30,25 mm);

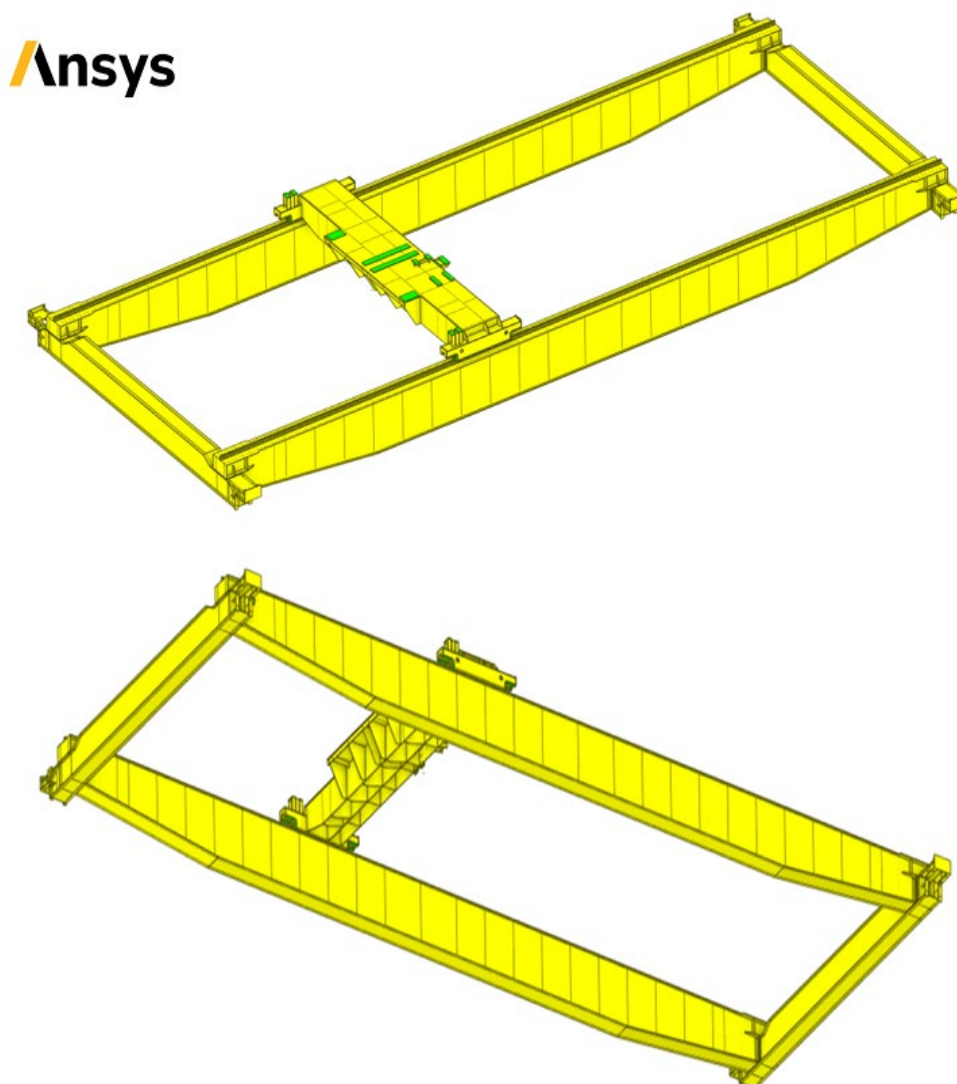
Figura 1



Ponte rolante H925 em indústria de base. Fonte: Autor

Utilizou-se o software Ansys (SpaceClaim) para modelagem sólida e simulação sob diferentes condições de contorno: Carro em Vazio, Carga 10t e Carga Nominal 30t (Figura 2).

Figura 2

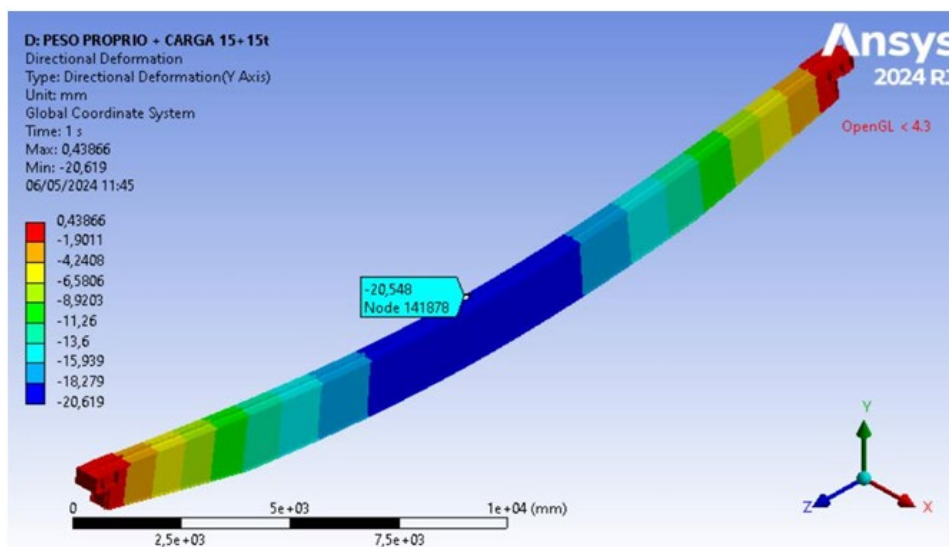


Modelagem sólida Ponte rolante H925. Fonte: Autor

4.1 SIMULAÇÃO NUMÉRICA E IDENTIFICAÇÃO DE SINGULARIDADES

A simulação por elementos finitos da Viga Principal sob carga nominal de 30t posicionada no centro do vão indicou uma deformação máxima (δ_{MEF}) de 20,6 mm, valor consideravelmente inferior à deformação admissível de 30,25 mm. As tensões atuantes mantiveram-se predominantemente abaixo do limite admissível de 167 MPa (Figura 3).

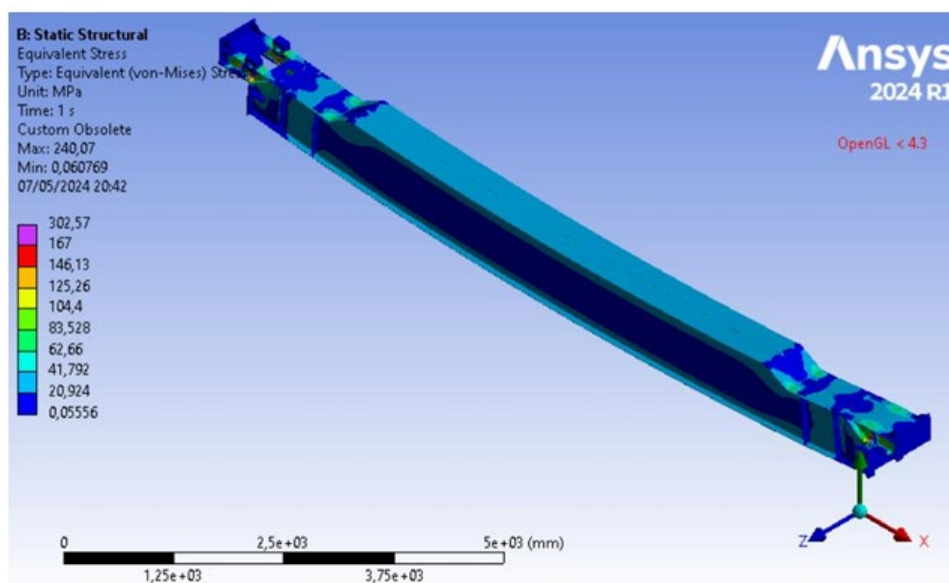
Figura 3



Simulação MEF, carga de 30t aplicada à viga principal ponte rolante H925. Fonte: Autor

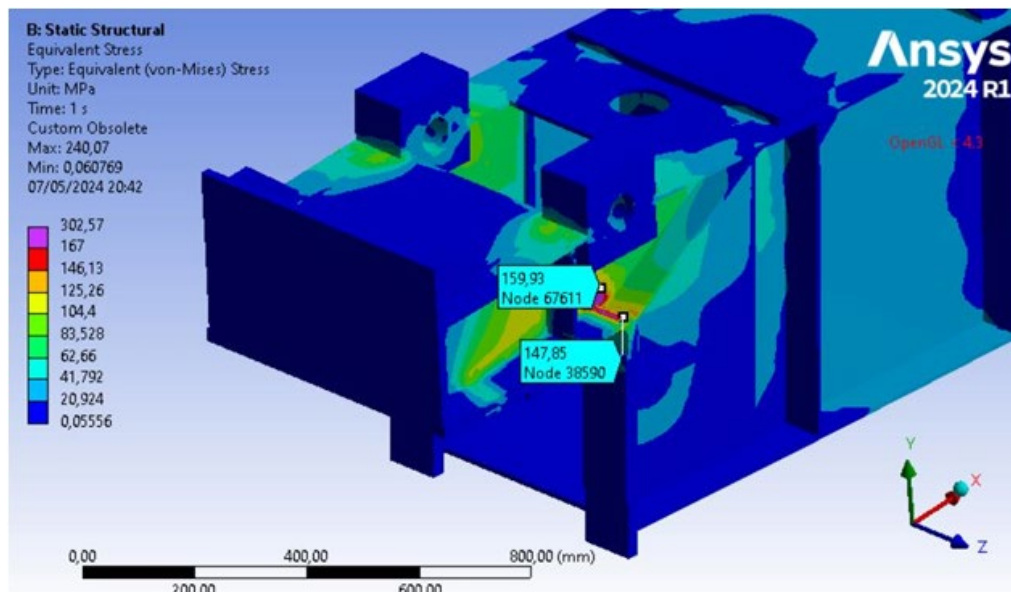
Durante a simulação das vigas cabeceiras sob aproximação máxima do carro, o modelo acusou picos de tensão de 302,57 MPa (Figura 4). A análise técnica apurada evidenciou tratar-se de uma singularidade matemática na malha de transição geométrica, não refletindo o comportamento global da estrutura, que manteve tensões reais dentro do envelope elástico normativo (Figura 5).

Figura 4



Simulação MEF, carga de 30t aplicada à cabeceira da ponte rolante H925.

Figura 5

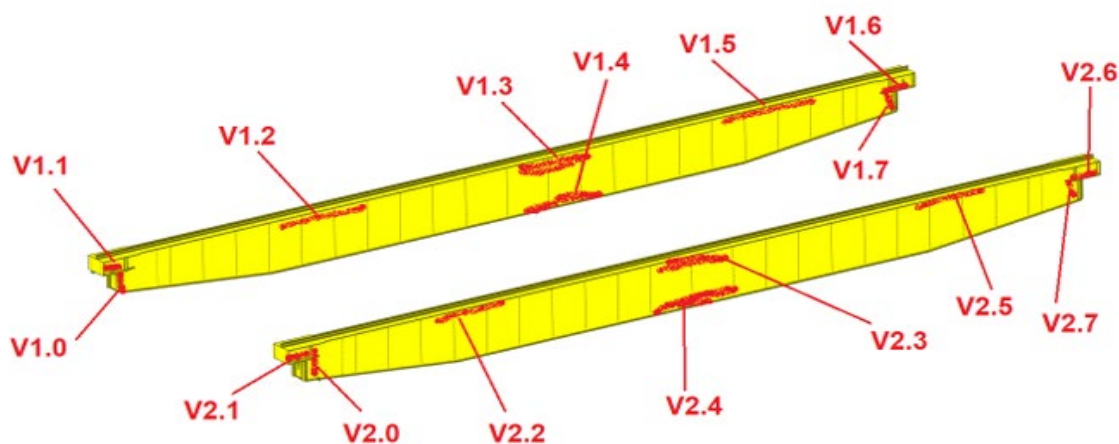


Simulação MEF, ampliação da região de maior tensão demonstrada na imagem 4. Fonte: Autor.

4.2 DEFINIÇÃO DE *BASELINE* METROLÓGICA E PLANO DE INSPEÇÃO

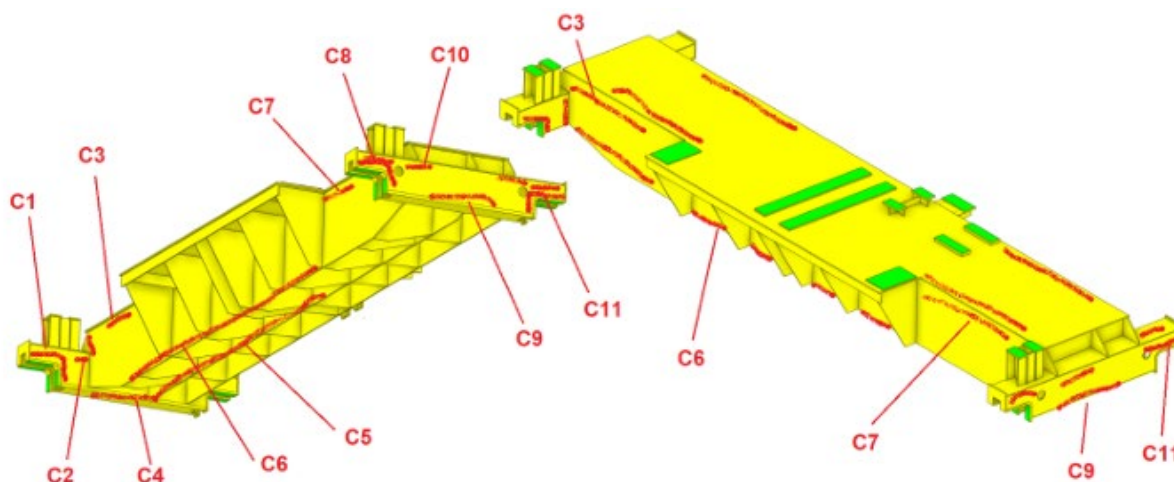
A grande contribuição da Fase II para a extensão da vida útil reside na geração de *baselines* teóricas para o teste de campo. A partir da simulação, extraiu-se o mapeamento exato das zonas de concentração de tensão. Com base nestes pontos críticos, definiu-se um plano de inspeção com 33 locais específicos (Figuras 6 a 8) para ensaios de Líquido Penetrante (LP) e Partículas Magnéticas (PM).

Figura 6



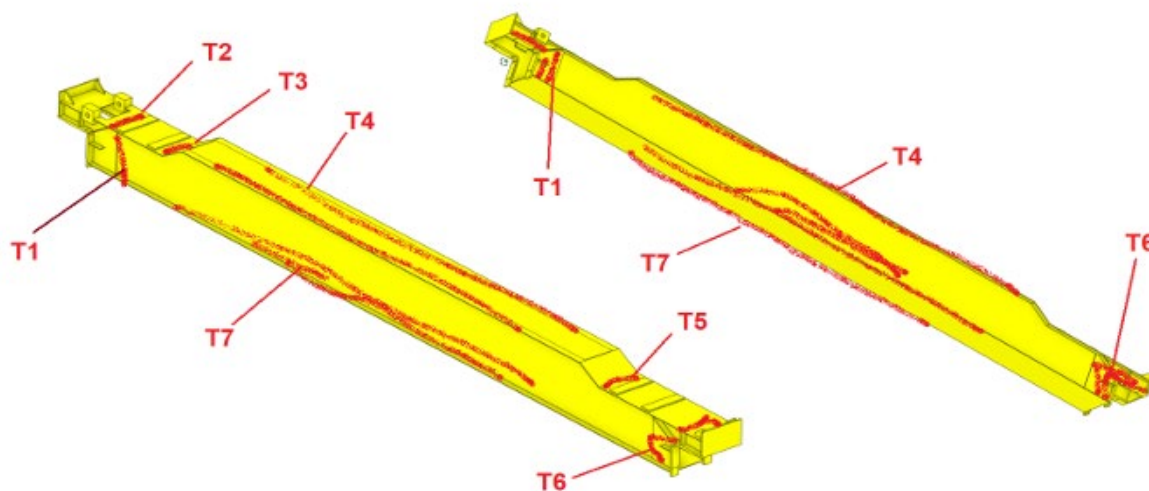
Mapeamento dos pontos para ensaios não destrutivos nas vigas principais. Fonte: Autor

Figura 7



Mapeamento dos pontos para ensaios não destrutivos no carro de içamento. Fonte: Autor

Figura 8



Mapeamento dos pontos para ensaios não destrutivos nas vigas de cabeceira. Fonte: Autor

A Tabela 1 sintetiza a *baseline* de deformações gerada pelo modelo, que alimentará a Fase III, utilizando as duas últimas linhas para realizar a correlação entre os valores e a normativa base (NBR 8800) demonstrando a conformidade e integridade das estruturas analisadas.

Tabela 1 | *Baseline* teórica de deformação (δ_{MEF}) para validação metrológica.

Condição de Carregamento	Flecha Viga Principal (δ_{MEF})	Flecha Viga Cabeceira (δ_{MEF})	Flecha Estrutura Carro (δ_{MEF})
Peso Próprio (Vazio)	11,9 mm	0,0 mm	0,0 mm
Carga de Trabalho (10t)	13,8 mm	1,0 mm	0,20 mm
Carga Nominal (30t)	20,6 mm	2,6 mm	1,43 mm
Limite NBR 8800	30,25 mm	12,72 mm	10,45 mm
Validação metrológica e normativa	Valido em todas as cargas	Valido em todas as cargas	Valido em todas as cargas

Fonte: Autor

5. ANÁLISE DE INCERTEZA DE MEDIÇÃO PARA VALIDAÇÃO DA FASE III

Para garantir a fidedignidade da validação do modelo frente aos dados reais de campo, a medição da flecha experimental deve ser submetida a um rigoroso protocolo de incerteza, fundamentado nas diretrizes do GUM (BIPM *et al.*, 2008; ALBERTAZZI GONÇALVES JR; SOUSA, 2018). A incerteza combinada (u_c) considera as fontes de erro essenciais:

$$u_c(\delta) = \sqrt{u_{inst}^2 + u_{res}^2 + u_{temp}^2 + u_{rep}^2}$$

Onde u_{inst} é a incerteza de calibração do instrumento ótico; u_{res} a resolução do sistema; u_{rep} a repetibilidade; e u_{temp} a incerteza associada à dilatação térmica diferencial da estrutura ($L \cdot \alpha \cdot \Delta T$). A incerteza expandida (U), para um nível de confiança de 95% ($k=2$), define o intervalo de aceitação. O modelo numérico será considerado validado se seu resultado situar-se no intervalo $\delta_{Exp} \pm U$.

6. RESULTADOS GLOBAIS E DISCUSSÃO

O estudo de caso demonstrou que o ativo, embora tenha ultrapassado cronologicamente os 2.000.000 de ciclos estatísticos projetados na década de 1970 para pontes rolantes classe “D”, possui reservas de resistência perfeitamente mensuráveis conforme demonstrado na tabela 1, mesmo que os valores sejam acrescidos a incerteza de calibração do instrumento laser scanner faro premium 150 (Figura 9, Tabela 2). A metodologia corrobora achados recentes da literatura (CHEN; LIU; ZHANG, 2024), indicando que o espectro de consequência estrutural das condições operativas segundo histórico, foi inferior ao regime limite de projeto.

Contudo, a viabilidade da prorrogação impõe a necessidade de rigorosos planos de inspeção física baseados em risco, voltados especificamente para as regiões de maior tensão identificadas no modelo computacional (KOSER; SAVKOVIC; BULATOVIC, 2022).

Figura 9



Laser Scanner FARO Premium 150 utilizado. Fonte: FARO ([s.d.]).

Tabela 2 | Especificações das medições do Laser Scanner FARO Premium 150.

Performance Specifications			
Range Option		Focus Premium 150	
Unambiguity Interval		614 m for up to 0.5 MPts/sec	
		307 m at 1 MPts/sec	
		153 m at 2 MPts/sec	
		Range	
White, 90% Reflectivity		0.5 - 150 m	
Dark-grey, 10% Reflectivity		0.5 - 150 m	
Black, 2% Reflectivity		0.5 - 50 m	
		Range Noise ^{1,2}	
White, 90% Reflectivity	0.1 mm @ 10 m, 0.2 mm @ 25 m		
Dark-grey, 10% Reflectivity	0.3 mm @ 10 m, 0.4 mm @ 25 m		
Black, 2% Reflectivity	0.7 mm @ 10 m, 1.2 mm @ 25 m		
Max Speed	Up to 2 MPts/sec		
3D Accuracy ³	2 mm @ 10 m, 3.5 mm @ 25 m		
Ranging Error ⁴	± 1 mm		
Angular Accuracy ⁵	19 arcsec		
LaserHDR	Yes		
Temperature Range ⁶	Operating: +5 ° to +40 °C, Extended Operating: -10 ° to +55 °C, Storage: -10 ° to +60 °C		

Fonte: FARO ([s.d.]).

7. CONCLUSÃO

A metodologia estruturada proposta neste trabalho promove a extensão segura da vida útil de pontes rolantes, superando metodologias puramente estatísticas. Através do equipamento H925, provou-se que a simulação via Método de Elementos Finitos atua como núcleo direcionador para inspeções físicas, aplicando práticas metroológicas para determinação do espectro de consequência estrutural e delimitação das condições de prorrogação de vida útil mantendo a performance segura do equipamento.

A adoção da análise de incertezas confere a robustez exigida para a emissão de laudos técnicos conclusivos. Ao integrar preceitos clássicos de engenharia estrutural com técnicas modernas de validação que pavimentam o caminho para a aplicação de Gêmeos Digitais na indústria (ZHAO *et al.*, 2023), esta abordagem e planos de manutenção posteriores alinhados entre si, asseguram a continuidade operacional e a otimização de capital em indústrias de base.

REFERÊNCIAS

ALBERTAZZI GONÇALVES JR, A.; SOUSA, A. R. de. **Fundamentos de metrologia científica e industrial**. 2. ed. Barueri: Manole, 2018.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8400**: Equipamentos de elevação e movimentação de carga - Regras para cálculo das estruturas. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.

BIPM *et al.* **JCGM 100:2008**: Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM). 1. ed. Sèvres: JCGM, 2008.

CHEN, Y.; LIU, H.; ZHANG, P. Real-time condition monitoring and remaining useful life estimation of overhead cranes under varying load spectra. **Reliability Engineering & System Safety**, Amsterdã, v. 241, p. 109670, 2024.

CMAA - CRANE MANUFACTURERS ASSOCIATION OF AMERICA. **CMAA Specification No. 70**: Specifications for Top Running Bridge & Gantry Type Multiple Girder Electric Overhead Traveling Cranes. Charlotte: CMAA, 2020.

FARO. **Compreendendo os Scanners Laser**. [S. l.], [s.d.]. Disponível em: <https://www.faro.com/pt-BR/Resource-Library/Article/understanding-laser-scanners>. Acesso em: 4 maio 2026.

GAO, X.; WANG, Z. Fatigue life assessment of crane structures based on real-world load spectra and ISO 12482. **International Journal of Fatigue**, Oxford, v. 170, p. 107511, 2023.

ISO - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 12482**: Cranes - Monitoring for crane design working period. Genebra: ISO, 2014.

KOSER, K.; SAVKOVIC, M.; BULATOVIC, R. Determination of remaining working life of overhead cranes with box girders using finite element modeling. **Engineering Structures**, Oxford, v. 250, p. 113456, 2022.

MÜLLER, H.; MEIER, T. Large-scale dimensional metrology for structural health monitoring using laser trackers: an uncertainty approach. **Measurement**, Londres, v. 190, p. 110753, 2022.

SHIGLEY, J. E.; MISCHKE, C. R.; BUDYNAS, R. G. **Projeto de engenharia mecânica**. 10. ed. Porto Alegre: AMGH, 2016.

ZHAO, Y. *et al.* Digital twin-driven structural integrity assessment of aging heavy-duty overhead cranes. **Engineering Failure Analysis**, Oxford, v. 145, p. 107023, 2023.

