

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E VERIFICAÇÃO NORMATIVA DE PÓRTICO DE IÇAMENTO ATRAVÉS DE ENGENHARIA REVERSA

Guilherme Pedroso Rodrigues¹
Yuri de Souza Oliveira¹
Vitor Iotte Medeiros²

vitor_iotte@hotmail.com

ÁREA DO CONHECIMENTO: Engenharias

RESUMO

Este trabalho apresenta a aplicação da engenharia reversa na avaliação da integridade estrutural de um pórtico de içamento, considerando normas técnicas brasileiras (NR 11, NBR 8400 e NBR 8800). O estudo compreende o levantamento dimensional, modelagem 3D, cálculos estruturais e simulações computacionais via método de Elementos Finitos. Os resultados revelaram situações de não conformidade em condições críticas de carregamento, especialmente nas extremidades e no centro da viga principal, evidenciando tensões e deflexões superiores aos limites normativos. Foram propostas soluções de reforço estrutural, que indicaram melhorias significativas no desempenho do equipamento. A pesquisa reforça a importância de inspeções detalhadas e análises computacionais para garantir a segurança operacional, a confiabilidade de estruturas metálicas e a adequação normativa de equipamentos industriais.

PALAVRAS-CHAVE: engenharia reversa; integridade estrutural; pórtico de içamento; simulação computacional; normas técnicas

1 INTRODUÇÃO

A engenharia reversa é um processo fundamental na engenharia moderna, especialmente quando se trata de compreender e otimizar equipamentos existentes sem documentação original completa. Este processo envolve a análise de um sistema ou componente para identificar seus elementos, inter-relações e princípios de funcionamento, com o objetivo de recriar ou aprimorar o projeto original (Chikofsky; Cross, 1990).

No contexto de equipamentos industriais, como pórticos de içamento, a engenharia reversa é crucial para garantir a segurança operacional e a conformidade com as normas regulamentadoras, como a Norma Regulamentadora (NR) 11, que

¹ Estudante do décimo período da Faculdade Vértice Trirriense.

² Doutor em Química (UFJF) – Professor da Faculdade Vértix Trirriense – UNIVÉRTIX TR

estabelece os requisitos de segurança para transporte, movimentação, armazenagem e manuseio de materiais (Fagnoli *et al.*, 2012).

A necessidade de tal avaliação surge da importância de assegurar que equipamentos de içamento operem dentro de parâmetros seguros, prevenindo acidentes e garantindo a longevidade da estrutura. A metodologia empregada combina a elaboração de um modelo As-Built do equipamento, cálculos estruturais baseados em normas e simulações computacionais utilizando o software SolidWorks Simulation (Ersdal; Sharp; Stacey, 2019).

Esta abordagem integrada permite uma análise detalhada das tensões e deformações, identificando pontos críticos e propondo sugestões de melhoria estrutural. O presente estudo se justifica pela relevância da segurança em operações de içamento e pela carência de documentação técnica para muitos equipamentos em uso. Ao demonstrar a aplicação prática da engenharia reversa e da análise de integridade estrutural, este trabalho contribui para a disseminação de conhecimentos e para a promoção de práticas de engenharia mais seguras e eficientes no ambiente industrial.

O objetivo geral da pesquisa é realizar a engenharia reversa do Pórtico e, por meio de uma avaliação de integridade estrutural, apresentar as condições de serviço adequadas para a validação da conformidade com a Norma Regulamentadora 11.

Como auxiliar no processo de execução do projeto propomos alguns objetivos específicos, a saber: (i) Executar o levantamento As-Built do equipamento, detalhando suas dimensões e características construtivas; (ii) Realizar os cálculos de carga de trabalho e verificar a conformidade com as normas técnicas aplicáveis, como a NBR 8400 e a NBR 8800; (iii) Simular os esforços computacionalmente utilizando o método de Elementos Finitos (MEF) no SolidWorks Simulation, analisando tensões e deflexões; (iv) Identificar pontos críticos na estrutura do pórtico e propor sugestões de melhoria estrutural, visando aumentar a segurança e a vida útil do equipamento; (v) Analisar os aspectos gerais de adequação do pórtico à Norma Regulamentadora 11, considerando os resultados da avaliação de integridade estrutural.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A engenharia reversa consiste em analisar produtos ou sistemas existentes para compreender seus princípios de funcionamento, materiais e características

construtivas, possibilitando sua recriação ou otimização. Diferente da engenharia convencional, que parte de um projeto para a construção, ela começa pelo produto final e busca reconstruir suas informações técnicas. Na área da engenharia mecânica, esse processo é aplicado em situações que envolvem a reprodução de peças sem documentação, a investigação de falhas, a melhoria de desempenho e a compatibilidade entre sistemas. Normalmente, envolve medições, modelagem em CAD, simulações computacionais e a geração de documentação. Essa prática é essencial em contextos industriais onde não há informações técnicas disponíveis, garantindo maior segurança e eficiência nos projetos (Ferneda, 1999).

A avaliação de integridade estrutural, por sua vez, tem como objetivo verificar a capacidade de componentes e estruturas de desempenharem suas funções de forma segura ao longo do tempo, considerando mecanismos de degradação como fadiga, corrosão e carregamentos dinâmicos. Sua aplicação permite evitar falhas inesperadas, reduzir custos de manutenção e garantir conformidade com normas regulamentadoras. Os métodos utilizados incluem inspeções visuais, ensaios não destrutivos e simulações numéricas. No caso de pórticos de içamento, essa análise é fundamental para assegurar que o equipamento opere dentro de parâmetros confiáveis, evitando acidentes e aumentando sua vida útil (Martins, 2023).

2.1 NORMATIVAS TÉCNICAS

A conformidade normativa é indispensável para a segurança de estruturas metálicas. A Norma Regulamentadora NR 11 estabelece requisitos de segurança para transporte e movimentação de materiais, exigindo operadores capacitados, dispositivos de proteção, sinalização adequada e inspeções periódicas. Já a NBR 8400 define critérios de dimensionamento para equipamentos de içamento, considerando cargas de projeto, combinações desfavoráveis e coeficientes de segurança. Complementarmente, a NBR 8800 trata do projeto de estruturas de aço e mistas de aço e concreto, abordando propriedades dos materiais, dimensionamento de elementos, limites de deformação e verificação de estabilidade. Juntas, essas normas formam a base de referência para o cálculo estrutural e validação de equipamentos de içamento (ABNT, 2008).

2.2 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

A análise de elementos finitos (AEF) constitui-se em uma das principais ferramentas computacionais na engenharia moderna. Através dela, é possível subdividir a estrutura em elementos menores, resolvendo equações matemáticas que descrevem o comportamento do material sob carregamentos. Softwares como o SolidWorks Simulation permitem integrar modelagem tridimensional com análises estruturais, fornecendo resultados sobre tensões, deformações e deslocamentos. Entre suas vantagens estão a possibilidade de otimizar projetos, identificar pontos críticos suscetíveis a falhas e simular diferentes cenários de carregamento, reduzindo custos com protótipos físicos e aumentando a confiabilidade da avaliação estrutural. Assim, a simulação computacional representa um recurso essencial para garantir a segurança e a eficiência em projetos de engenharia (Gehm, 2022).

3 METODOLOGIA

A avaliação da integridade estrutural do pórtico será realizada por meio de um processo de engenharia reversa, estruturado em etapas sequenciais que integrarão levantamento dimensional, modelagem 3D, cálculos estruturais e simulação computacional. Essa abordagem permitirá compreender as características do equipamento e verificar sua adequação às normas técnicas brasileiras de segurança. Inicialmente, será feita uma inspeção visual detalhada, acompanhada de medições com instrumentos apropriados, como paquímetro digital, trena e medidor de espessura. Essas informações possibilitarão a elaboração de um modelo as-built, fundamental para reproduzir fielmente as dimensões e características construtivas do equipamento.

A partir dos dados coletados, será desenvolvido o modelo tridimensional do pórtico utilizando o software SolidWorks 2023, permitindo uma representação precisa da geometria e facilitando a identificação de parâmetros relevantes para as análises estruturais. O modelo servirá de base para a elaboração dos desenhos construtivos, que incluirão dimensões principais como vão livre da viga, altura de içamento e perfil estrutural. Essa etapa será essencial para estruturar as análises subsequentes e garantir a fidelidade da simulação em relação ao equipamento físico.

Com o modelo 3D definido, serão realizados os cálculos estruturais necessários para avaliar a resistência do pórtico. O dimensionamento levará em conta parâmetros estabelecidos pelas normas NBR 8400 e NBR 8800, incluindo cargas de trabalho,

combinações de esforços, coeficientes de segurança e limites de deformação admissíveis. Essa etapa será decisiva para verificar a conformidade do equipamento em condições reais de uso, assegurando que os resultados das análises estejam de acordo com a legislação técnica brasileira.

Na sequência, será aplicada a Análise de Elementos Finitos (AEF) por meio do SolidWorks Simulation 2023. Serão definidos cenários distintos de carregamento, contemplando cargas aplicadas no centro, nas extremidades e na parte interna da viga principal, considerando como material o aço ASTM A36. A análise permitirá observar a distribuição de tensões, as deformações máximas e o coeficiente de segurança em cada situação, comparando os resultados com os limites normativos. Essa etapa será decisiva para identificar pontos críticos da estrutura e condições de não conformidade, além de embasar recomendações de melhorias.

Por fim, serão propostas intervenções estruturais, especialmente no reforço da viga principal, com o objetivo de aumentar a capacidade de suporte e reduzir deformações excessivas. As modificações sugeridas serão novamente submetidas a simulações, de forma a verificar sua eficácia na adequação às normas. Esse processo metodológico, baseado na combinação entre levantamento de dados, modelagem computacional, cálculos normativos e simulações, permitirá uma avaliação robusta e confiável da integridade do pórtico.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados das simulações computacionais realizadas no SolidWorks Simulation evidenciaram que o comportamento estrutural do pórtico varia significativamente conforme a posição e magnitude da carga aplicada. Considerando o limite de escoamento do aço ASTM A36 de 250 MPa, observou-se que, para cargas de 2 toneladas aplicadas na extremidade e no centro da viga, as tensões máximas atingiram, respectivamente, 763 MPa e 394 MPa, valores que superam amplamente a resistência do material e resultam em coeficientes de segurança de apenas 0,33 e 0,63, ambos abaixo dos limites mínimos estabelecidos pelas normas técnicas (1,15 segundo Collins e 1,5 conforme a NBR 8400). Além disso, as deflexões obtidas nessas condições, de 57,3 mm e 20,7 mm, ultrapassaram em muito o limite de 8 mm previsto pela NBR 8800, caracterizando não conformidade estrutural.

Quando aplicada carga de 2 toneladas na parte interna da viga, os resultados mostraram tensão máxima de 109 MPa, correspondente a um coeficiente de segurança de 2,29, e deflexão de apenas 1,9 mm, valores que se enquadram dentro dos limites normativos, demonstrando que o pórtico apresenta comportamento satisfatório apenas nesta condição específica. Para cargas reduzidas, como 1 tonelada, os cenários de aplicação no centro e na extremidade da viga ainda indicaram não conformidade, com coeficientes de segurança de 0,65 e 1,38 e deflexões de 27,6 mm e 10,3 mm, superiores ao limite permitido. Apenas quando aplicada carga de 800 kg no centro ($\sigma_{\text{máx}} = 139$ MPa, $CS \approx 1,79$ e deflexão de 6,98 mm) e 250 kg na extremidade ($\sigma_{\text{máx}} = 91$ MPa, $CS \approx 2,74$ e deflexão de 6,91 mm) o pórtico apresentou resultados compatíveis com as exigências da NBR 8400 e da NBR 8800.

O diagnóstico geral indica que, em sua configuração original, o equipamento não atende às condições de operação seguras para a carga nominal de 2 toneladas, apresentando risco de falhas estruturais e comprometendo sua adequação às normas técnicas. A viga principal foi identificada como o elemento mais crítico, apresentando tensões e deflexões excessivas sob cargas elevadas, o que restringe a utilização prática do pórtico a valores bem inferiores ao declarado.

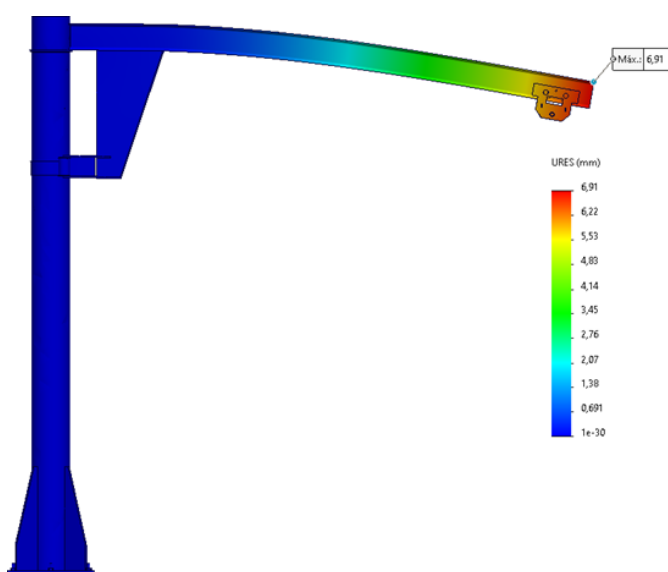
Diante desse cenário, foram propostas intervenções estruturais voltadas ao reforço da viga principal, com aumento de sua seção transversal ou utilização de perfis com maior momento de inércia, além da possibilidade de adição de chapas de reforço nas regiões de maior solicitação. Também foi considerada a adoção de materiais com maior limite de escoamento e a revisão do sistema de movimentação da talha, de forma a redistribuir as cargas e reduzir as solicitações nas extremidades. Uma análise complementar das ligações parafusadas e soldadas também se mostrou necessária, visto que a concentração de esforços pode comprometer a transmissão de cargas entre os elementos.

As simulações realizadas após a introdução de reforços estruturais mostraram ganhos significativos no desempenho do equipamento. Embora a estrutura ainda não tenha atendido plenamente aos critérios normativos para cargas de 2 toneladas, houve melhora expressiva em condições intermediárias. Para a carga de 1,5 toneladas, os resultados indicaram tensão máxima de 213 MPa, coeficiente de segurança de 1,17 (conforme Collins, mas inferior ao exigido pela NBR 8400) e deflexão de 4,9 mm, em conformidade com a NBR 8800. Já para a carga de 1,2

toneladas, a simulação apontou tensão máxima de 144 MPa, coeficiente de segurança de 1,73 e deflexão de 3,6 mm, enquadrando-se nos limites das normas. Isso representa um ganho de aproximadamente 950 kg em relação à capacidade da estrutura original.

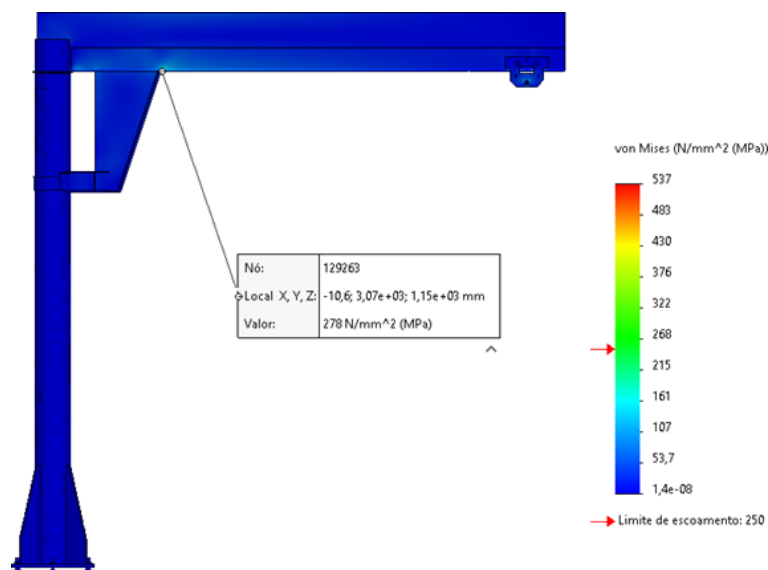
Em síntese, os resultados reforçam a necessidade de modificações estruturais para que o pórtico atenda às exigências de segurança da NR 11, NBR 8400 e NBR 8800. Mesmo após os reforços, observa-se que a operação em sua capacidade nominal de 2 toneladas não é viável sem alterações mais profundas no projeto (Figura 1). Contudo, a adequação parcial obtida para cargas de até 1,2 toneladas demonstra que intervenções relativamente simples podem ampliar a segurança e a confiabilidade do equipamento, garantindo maior conformidade normativa e reduzindo os riscos operacionais (Figura 2).

Figura 1 – Deflexão para 250 KG



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Figura 2 – Tensões para 2 toneladas (Pós Reforço)



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As análises realizadas permitiram concluir que o pórtico, em sua configuração original, apresenta sérias limitações estruturais para operar de forma segura na carga nominal de 2 toneladas. As simulações computacionais indicaram que, quando submetido a esforços críticos, como nas extremidades e no centro da viga, as tensões atuantes ultrapassam consideravelmente o limite de escoamento do aço ASTM A36 e resultam em coeficientes de segurança muito inferiores aos valores mínimos exigidos pela literatura técnica e pelas normas NBR 8400 e NBR 8800. Além disso, as deflexões observadas em tais condições superaram em múltiplos o limite de 8 mm estabelecido pela NBR 8800, comprometendo tanto a segurança estrutural quanto a funcionalidade do equipamento.

Foi possível identificar que apenas a aplicação de carga na parte interna da viga ou em situações de carregamento reduzido apresentou conformidade normativa, o que limita de forma significativa a utilização prática do pórtico. Essa constatação evidencia uma deficiência de projeto que compromete a distribuição de esforços ao longo da viga, reforçando a necessidade de modificações estruturais para que o equipamento esteja apto a operar dentro dos parâmetros de segurança estabelecidos.

Diante desse cenário, foram propostas intervenções como o reforço da viga principal, a utilização de perfis com maior momento de inércia e a eventual adoção de

materiais de maior resistência, que se mostraram eficazes em aumentar a capacidade de suporte da estrutura. As simulações posteriores aos reforços apontaram para um desempenho mais satisfatório, especialmente na condição de 1,2 toneladas, em que tensões, deflexões e coeficiente de segurança permaneceram dentro dos limites normativos. Apesar disso, a plena conformidade para a carga nominal de 2 toneladas não foi atingida, indicando que somente alterações mais profundas no projeto poderiam viabilizar a utilização segura nessa capacidade.

Assim, conclui-se que o pórtico, em sua configuração atual, não deve ser operado em cargas iguais ou superiores a 1 tonelada sem modificações, sob pena de comprometer a segurança operacional e descumprir os requisitos da NR 11, da NBR 8400 e da NBR 8800. O estudo reforça a relevância da engenharia reversa e da avaliação de integridade estrutural como ferramentas indispensáveis para a inspeção de equipamentos industriais, destacando a importância de análises rigorosas e periódicas para garantir a segurança dos trabalhadores, a integridade dos ativos e a conformidade normativa. Além disso, evidencia que a implementação de melhorias, aliada a novas rodadas de verificação computacional, é essencial para prolongar a vida útil do equipamento e assegurar um ambiente de trabalho mais seguro e eficiente.

REFERÊNCIAS

CHIKOFSKY, Elliot J.; CROSS II, James H. Reverse engineering and design recovery: a taxonomy. **IEEE Software**, v. 7, n. 1, p. 13-17, jan. 1990. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/43044>. Acesso em: 1 set. 2025.

ERSDAL, Gerhard; SHARP, John V.; STACEY, Alan. **Ageing and life extension of offshore structures: the challenge of managing structural integrity**. John Wiley & Sons, 2019. Disponível em: <https://www.wiley.com/Ageing+and+Life+Extension+of+Offshore+Structures%3A+The+Challenge+of+Managing+Structural+Integrity-p-9781119284406>. Acesso em: 1 set. 2025.

FARGNOLLI, Mario *et al.* A reverse engineering approach to enhance machinery design for safety. In: **INTERNATIONAL DESIGN CONFERENCE - DESIGN 2012**. Dubrovnik - Croatia, 21-24 maio 2012. Disponível em: <https://www.designsociety.org/download-publication/32030/a-reverse-engineering-approach-to-enhance-machinery-design-for-safety>. Acesso em: 1 set. 2025.

FERNEDA, Amauri B. **Integração metrologia, CAD e CAM: uma contribuição ao estudo de engenharia reversa**. 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia

Mecânica) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18135/tde-19122001-093341/en.php>. Acesso em: 13 set. 2025.

GEHM, Gabriel M. **Dimensionamento de um pórtico rolante para uma empresa de equipamentos ferroviários**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, Ibirubá, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ifrs.edu.br/bitstream/handle/123456789/1669/1234567891669.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 1 set. 2025.

MARTINS, Guilherme C. **Avaliação da Integridade de Estruturas de Concreto Armado Através de Análise Dinâmica Experimental**. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/63561/63561.PDF>. Acesso em: 1 set. 2025.