cbecimat26
26° Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais
22 a 26 de novembro de 2026
Costão do Santinho
Florianópolis-SC

Avaliação preditiva do crescimento da corrosão em dutos por meio de modelagem probabilística e simulação de Monte Carlo

L. C. Santos[1]; G. C. S. Santos[1]; C. E. V. Masalla[1]; R. C. Souza[1];
J. A. C. Ponciano Gomes[2]; A. H. S. Bueno[1]; G. P. C. Moreira[1]
1. CESTEq – Centro de Engenharia de Superfícies, Tribologia, Eletroquímica e Corrosão, DEMEP/UFSJ – São João del-Rei, Brasil;
2. LabCorr – Laboratório de Corrosão, PEMM/COPPE/UFRJ – Rio de Janeiro, Brasil.

Introdução

A corrosão é a principal ameaça à integridade de dutos de óleo e gás. A avaliação usual, pela ASME B31G, é estática: usa uma única inspeção em linha (ILI) e não prevê a evolução dos defeitos. Este trabalho propõe um framework probabilístico em quatro fases, dos dados de ILI à previsão do risco de falha.

Objetivos

Propor um framework que integra dados de ILI, teoria de valores extremos (EVT) e Monte Carlo com a ASME B31G, e demonstrá-lo em duas inspeções de um mesmo duto.

Metodologia

Duas ILI consecutivas (Ano 1 e Ano 3) foram analisadas nas quatro fases da Tabela 1 e projetadas até o Ano 15 (pressão de operação: 1500 psi; espessura de parede: 0,280 in).

Tabela 1. Fases do framework proposto

Fase	Etapa	Métodos
I	Tratamento e estatística descritiva	Classificação POF-100; janela deslizante de 50 m; teste U de Mann–Whitney
II	Modelagem e extrapolação	Corpo paramétrico + cauda GPD (POT); bootstrap; regressão temporal dos parâmetros
III	Simulação e confiabilidade	Monte Carlo (10^6 defeitos por ano) e pressão de ruptura pela ASME B31G
IV	Síntese e apoio à decisão	Trechos críticos e intervalos de inspeção

Resultados e Discussão

As anomalias aumentaram 13% entre as inspeções (de 735.755 para 832.681), e a profundidade mediana passou de 0,42 para 0,49 mm. Os outliers extremos de profundidade aumentaram 59%: a cauda ficou mais pesada. As anomalias se agrupam em faixas axiais e setores angulares que persistem entre as inspeções (Fig. 1). No trecho crítico de 50 m, os defeitos são 58–62% mais profundos e 48–52% mais longos que a média do duto ($p < 10^{-8}$). A profundidade segue um corpo exponencial e o comprimento, um corpo lognormal, ambos com cauda GPD (u ≈ 1,07–1,14 mm e 132–141 mm). Sem a cauda, os quantis extremos seriam subestimados.

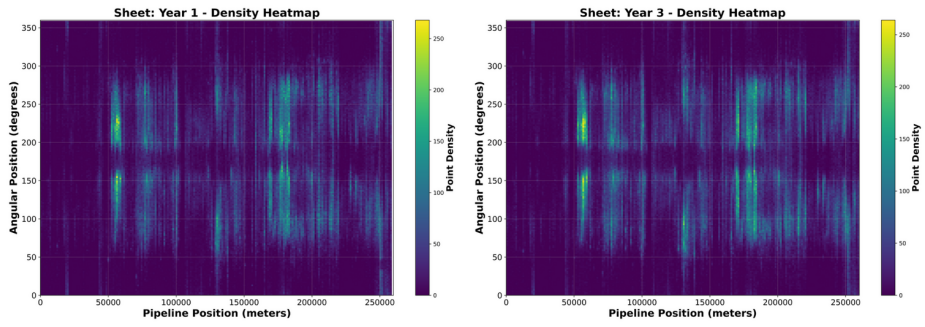


Figura 1. Mapas de densidade das anomalias (posição axial × posição angular) no Ano 1 (esq.) e no Ano 3 (dir.).

A regressão temporal dos parâmetros projeta, para a profundidade, caudas mais pesadas até o Ano 15 (Fig. 2). No Monte Carlo com a B31G, surgem defeitos que atravessam a parede (d ≥ t; Fig. 3). As falhas chegam a cerca de 1.390 por 10^6 defeitos no Ano 15, com forte alta a partir do Ano 8 (Fig. 4).

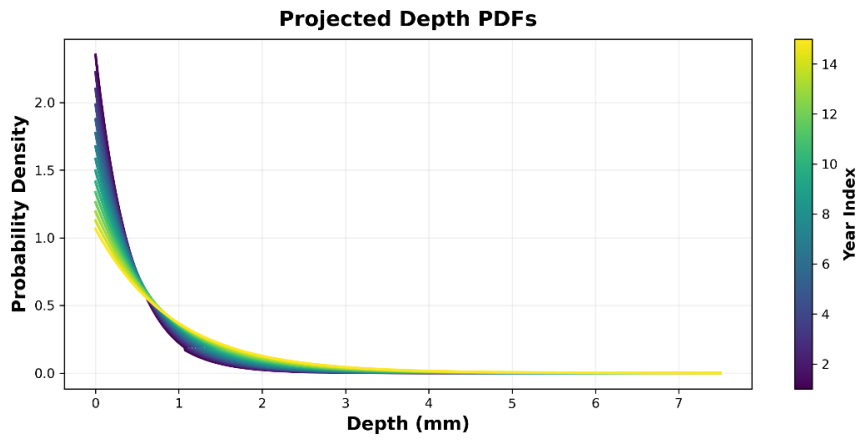


Figura 2. Densidades de probabilidade projetadas para a profundidade das anomalias (Anos 1 a 15).

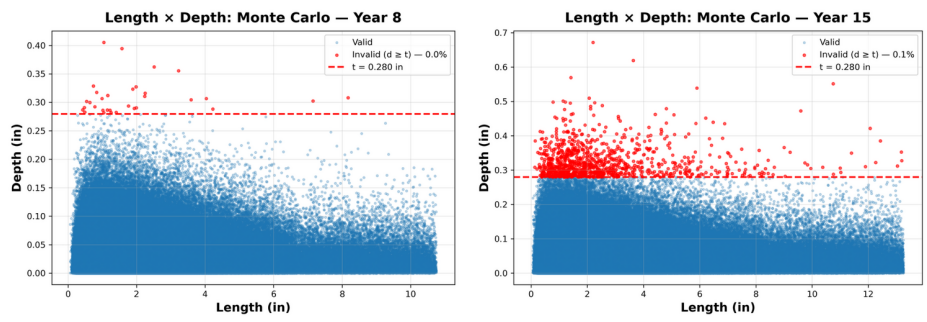


Figura 3. Monte Carlo (comprimento × profundidade) nos Anos 8 e 15; em vermelho, defeitos com d ≥ t (t = 0,280 in).

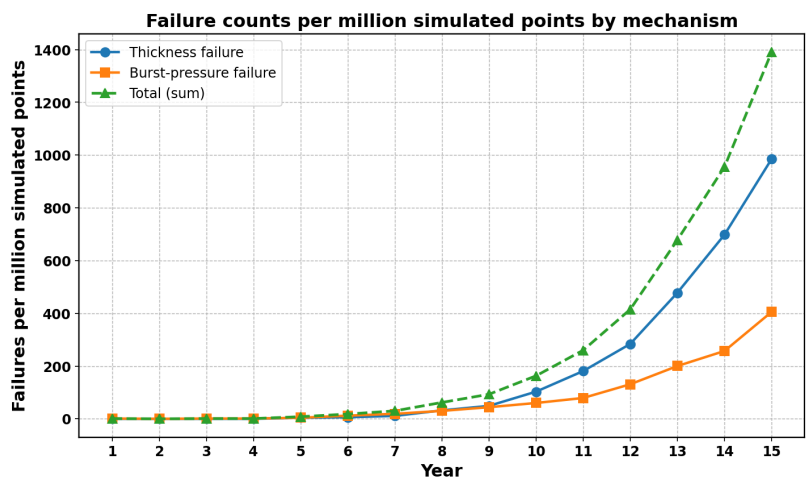


Figura 4. Falhas por 10^6 defeitos simulados, por mecanismo: por espessura (d ≥ t), por pressão de ruptura e total.

Conclusões

- O framework em quatro fases converteu dados de ILI em uma previsão probabilística da integridade do duto.
- A corrosão não foi uniforme: no trecho crítico de 50 m, os defeitos foram mais profundos e mais longos que a média do duto.
- A cauda GPD foi essencial; sem ela, os defeitos extremos seriam subestimados.
- A regressão temporal dos parâmetros das distribuições projetou o crescimento da corrosão até o Ano 15.
- O risco de falha cresceu de forma não linear, o que justifica intervalos de inspeção menores no fim do horizonte.

Referências e Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, além do apoio da FAPEMIG, do CNPq, do FQMAT, do PPMEC, do CESTEq e da UFSJ.

ASME. ASME B31G-2023: Manual for Determining the Remaining Strength of Corroded Pipelines. American Society of Mechanical Engineers, 2023.
COLES, S. An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values. Springer, 2001.
CUI, B.; WANG, H. Analysis and prediction of pipeline corrosion defects based on data analytics of in-line inspection. Journal of Infrastructure Preservation and Resilience, v. 4, 2023.
PIPELINE OPERATORS FORUM. Specifications and requirements for in-line inspection of pipelines (POF-100). 2021.