

Copyright 2016, ABRACO

Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2016, em Búzios/RJ no mês de maio de 2016.

As informações e opiniões contidas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade do(s) autor(es).

Estimativa de probabilidade de falha por corrosão externa utilizando uma abordagem quantitativa de análise de risco para dutos
Marcos Bartelotti^a

Abstract

According to international statistics, risk assessment models should consider external corrosion as a major threat to pipeline integrity. The quantitative risk approaches that propose to perform the calculation of the probability of failure (PoF) for corrosion, rather than adopting statistical data, must identify the most important and representative variables of the aggression level at which the pipeline is exposed to, the effectiveness of existing barriers and the resistance of the structure to the effects of corrosion. Thus, environmental characteristics and corrosion control components such as: electrical resistivity of the soil, external coating and pipe material are classified as threat, mitigation or resistance variables. This assessment allows to systematically identifying which elements contribute more efficiently to improve the corrosion control and may support the decision-making process for the resources allocation. This paper presents a PoF calculation model for external corrosion based on quantitative Muhlbauer method, the technical considerations for assigning values to the variables, and the comparison between results obtained by this model and the records of pipelines failures database.

Keywords: external corrosion, probability of failure, risk variables, risk assessment.

Resumo

De acordo com as estatísticas internacionais, toda análise de risco de dutos deveria considerar a corrosão externa como uma das principais ameaças à sua integridade. Abordagens quantitativas de risco que se proponham a efetuar o cálculo da probabilidade de falha (PoF) por corrosão, ao invés de simplesmente adotar dados estatísticos, necessitam identificar as variáveis principais e representativas do nível de agressividade ao qual o duto se encontra exposto, da eficácia das barreiras existentes e da resistência da estrutura aos efeitos da corrosão. Assim, características ambientais e dos componentes do sistema anticorrosivo, tais como: resistividade elétrica do solo, revestimento externo e material da tubulação são classificados como variáveis de ameaça, de mitigação e de resistência, respectivamente. Esta avaliação permite identificar sistematicamente os elementos que contribuem de forma mais eficiente para aumentar o controle da corrosão e, conseqüentemente pode apoiar o processo de tomada de decisão para a ótima alocação de recursos. Este trabalho apresenta um modelo de

^a Consultor – TBG: Transportadora Brasileira Gasoduto Bolívia – Brasil S.A.

cálculo da PoF por corrosão baseada no método Muhlbauer quantitativo, as considerações técnicas para a atribuição de valores para as variáveis, e a comparação dos resultados obtidos por este modelo com os registros encontrados nos bancos de dados de falhas de gasodutos.

Palavras-chave: corrosão externa, probabilidade de falha, variáveis de risco, análise de risco.

Introdução

A análise de risco tem se consolidado nos últimos anos como uma das etapas do processo de gerenciamento de integridade de dutos. Métodos quantitativos específicos para dutos vêm sendo aprimorados para atender às expectativas sobre os resultados práticos das análises de risco, permitindo compreender quais as ações podem ser tomadas no sentido da redução do risco, que é definido como o produto da probabilidade de falha (PoF) do duto pela consequência dessa falha (CoF):

$$\text{Risco} = \text{PoF} \times \text{CoF}$$

A norma ASME B31.8S (1) apresenta uma lista dos modos de falha ou ameaças à integridade de gasodutos agrupadas em nove categorias: corrosão externa, corrosão interna, corrosão sob tensão, danos mecânicos pela ação de terceiros, danos mecânicos pela ação da natureza, defeitos de fabricação, defeitos de construção, defeitos em equipamentos e falha humana. Portanto, a falha pode ocorrer por qualquer uma dessas ameaças que atuam de forma independente em relação às demais. A PoF do duto seria o resultado da soma das probabilidades de ocorrência de cada uma destas ameaças.

Este trabalho trata da estimativa da PoF por corrosão externa sob a abordagem quantitativa do método Muhlbauer (2). Este método procura considerar todas as variáveis relevantes que incidem sobre a PoF classificando-as em variáveis de exposição (ameaça), de mitigação (defesa) ou de resistência. Analisaremos as variáveis de mitigação contra a corrosão externa buscando nos aprofundar sobre os fatores que levam à eficiência da proteção catódica e do revestimento anticorrosivo. São propostas 15 variáveis de ordem prática consideradas relevantes e são sugeridos valores para situações reais de dutos em operação. Aplicando estas variáveis e valores são rodados cálculos para PoF por corrosão externa e comparados com estatísticas internacionais para validação do modelo.

Metodologia

No gerenciamento de integridade de dutos, a corrosão é classificada como um modo de falha dependente do tempo e desta forma Muhlbauer propõe se chegar a probabilidade de falha por corrosão externa ($\text{PoF}_{\text{corr_ext}}$) através do cálculo do tempo para falha (TTF):

$$\text{PoF}_{\text{corr_ext}} = f(\text{TTF})$$

A PoF – definida como a chance de uma ou mais falhas ocorrerem no período de um ano – pode ser obtida pela conversão de TTF para PoF. Para esta conversão utiliza-se uma função exponencial, apresentada a seguir:

$$PoF_{\text{corrosão}} = 1 - e^{\left(-\frac{1}{TTF}\right)}$$

e

$$TTF = \frac{t}{r \times (1-m)}$$

TTF: tempo para falha, em anos

t: espessura de parede do duto, em mm

r: taxa de corrosão para aço-carbono sem considerar medidas mitigadoras, em mm/ano

m: eficiência global das mitigações contra a corrosão externa, em valores percentuais.

ESPESSURA DE PAREDE

Segundo o método Muhlbauer esta é a variável de resistência no cálculo da PoF de corrosão. O valor de espessura de parede representa a capacidade da tubulação de resistir até a falha por vazamento ou ruptura uma vez estabelecido o processo de corrosão. Quanto maior a espessura maior será o tempo para falha e, portanto menor a probabilidade de falha para um determinado período de tempo. O valor atual da espessura de parede pode ser obtido por diversas fontes: especificação da tubulação, registros de teste hidrostáticos, registros de inspeções com pigs instrumentados, medições diretas sobre a parede do duto, cupons ou sondas de corrosão, e o histórico de pressão de operação. Uma análise criteriosa deve ser aplicada para identificar qual a fonte oferece o dado mais confiável para cada local ao longo do duto, considerando precisão de medição e o tempo decorrido desde o registro do dado. Para os propósitos deste trabalho aplicaremos um valor fixo de espessura de parede.

TAXA DE CORROSÃO

Esta variável representa numericamente o grau de exposição do duto à ameaça de corrosão. O valor da taxa de corrosão deve considerar a situação onde nenhuma mitigação ou proteção anticorrosiva foi aplicada. Este valor pode ser obtido por medições sucessivas em cupons de corrosão ou sondas por resistência elétrica enterradas no mesmo local do duto. Estimativas podem ser feitas com base na resistividade elétrica, pH, umidade, granulometria e aeração do solo, concentração de cloretos e sulfatos, potencial redox, presença de correntes de interferência elétrica, entre outras variáveis. Na medida em que mais dados sejam coletados sobre as condições do solo, mais precisas serão as estimativas de taxa de corrosão, lembrando que estas variáveis mudam ao longo do traçado de um duto terrestre. Para os propósitos deste trabalho adotaremos também um valor fixo para a taxa de corrosão.

MITIGAÇÕES

A variável mitigação representa a eficiência de todas as defesas ou barreiras aplicadas para conter a ação da corrosão. Para esta finalidade é aplicado fundamentalmente o revestimento e a proteção catódica em dutos enterrados. Em teoria, cada uma destas medidas mitigadoras poderia proteger o duto independentemente uma da outra. Desta forma, se o revestimento tivesse uma eficiência de 100% não seria necessária a proteção catódica, e vice-versa. Como na prática é inviável técnica ou economicamente um revestimento sem falhas ou uma proteção catódica 100% eficiente sobre um duto sem revestimento, aplicam-se ambos de forma que se complementem um ao outro. Para somar adequadamente a contribuição do revestimento e da proteção catódica na mitigação global contra a corrosão aplica-se matemática probabilística usando o operador “ou”:

$$m = 1 - [(1 - m_{\text{revestimento}}) \times (1 - m_{\text{proteção catódica}})]$$

m: eficiência global das mitigações contra a corrosão externa

$m_{\text{revestimento}}$: eficiência do revestimento externo

$m_{\text{proteção catódica}}$: eficiência da proteção catódica

EFICIÊNCIA DO REVESTIMENTO EXTERNO

O revestimento externo de dutos enterrados tem por objetivo bloquear o contato entre a parede do duto e o solo. A sua eficiência pode ser medida pelo percentual da parede do duto isolada onde 0% seria um duto sem revestimento e 100% o revestimento perfeito. O valor da eficiência do revestimento pode ser estimado de diferentes maneiras dependendo dos dados disponíveis e do grau de precisão desejado.

a) Estimativa com base na corrente de proteção catódica

O valor da corrente injetada no duto – necessária para polarizá-la ao nível de proteção segundo os critérios de proteção catódica – permite estimar a eficiência do revestimento através da seguinte equação apresentada na literatura especializada (3):

$$m_{\text{revestimento}} = \left(1 - \frac{i}{A \times d}\right) \times 100$$

i: intensidade de corrente de proteção catódica aplicada ao duto, em A

A: área da superfície de duto protegido, em m^2

d: densidade de corrente, em A/m^2

b) Estimativa com base em inspeções de revestimento

As inspeções de revestimento pelos métodos DCVG (direct current voltage gradient) e ACVG (alternate current voltage gradient) – baseadas no gradiente de tensão medido na superfície do solo acima dos dutos – são atualmente as técnicas mais aplicadas nas rotinas das operadoras de dutos e permitem localizar falhas de revestimento com boa precisão. Na tabela 1 se encontra a proposta de quantificação da eficiência com base no número de falhas localizadas por uma inspeção de revestimento.

Tabela 1 – Eficiência com base no número de falhas identificadas pela inspeção de revestimento: m_{r1}

Número de falhas de revestimento / km	Avaliação qualitativa	m_{r1}
0,1	Excelente	0,9999
1	Muito Bom	0,999
10	Bom	0,99
20	Regular	0,98
50	Ruim	0,95
100	Péssimo	0,9

Existem variáveis envolvidas na inspeção de revestimento que devem ser consideradas, pois incidem na confiança sobre o número real de falhas de revestimento, por exemplo:

- Data da inspeção: Quanto mais recente é a inspeção, mais representativos são os dados sobre a condição atual do revestimento. A tabela 2 apresenta valores para variável data de inspeção.
- Qualificação e experiência do inspetor: A inspeção executada por profissional devidamente qualificado e experiente proporciona dados mais confiáveis. A tabela 3 apresenta valores propostos para esta variável.
- Instrumentos de inspeção: O uso de instrumentos com especificação técnicas inadequadas ou em más condições de funcionamento compromete a confiança nos registros obtidos. A tabela 4 apresenta valores propostos para esta variável.
- Interferências elétricas: A presença de interferências elétricas pode afetar a capacidade dos instrumentos de DCVG e ACVG de localizar de falhas de revestimento. A tabela 5 apresenta valores propostos para esta variável.

Tabela 2 – Variável: data da inspeção m_{r2}

Tempo decorrido desde a inspeção de revestimento	m_{r2}
Data \leq 2 anos	0,9999
2 anos < data \leq 5 anos	0,999
5 anos < data \leq 10 anos	0,99
Data > 10 anos	0,9

Tabela 3 – Variável: Qualificação e Experiência do Inspetor m_{r3}

Qualificação / Experiência do inspetor de revestimento	m_{r3}
Alta experiência ou qualificado	0,9999
Não qualificado com média experiência	0,99
Pouca experiência	0,9
Sem experiência	0,5

Tabela 4 – Variável: Instrumentos de inspeção m_{r4}

Instrumentos	m_{r4}
Boa especificação técnica e calibração	0,9999
Boa especificação técnica, mas calibração vencida	0,99
Instrumento de especificação inadequada	0,7

Tabela 5 – Variável: Interferências Elétricas m_{r5}

Nível de interferências elétricas	m_{r5}
Ausente	0,9999
Leve	0,999
Forte	0,9

Obviamente existem mais variáveis que poderiam afetar o resultado da inspeção de revestimento que podem ser acrescentadas ao modelo. Uma das vantagens deste método é a possibilidade de incluir novas variáveis ou excluir sem a necessidade de redistribuir pesos entre as outras. Os valores devem ser atribuídos dentro de uma escala que confira a correta significância da variável. O desenvolvedor se deparará com a realidade de que nem todo dado disponível é relevante, e nem todo dado relevante está disponível. Algumas variáveis podem não ser relevantes para um duto, mas podem ser para outro e por isso os modelos devem ser muitas vezes ajustados ao duto que se está analisando.

Para a mais alta eficiência do revestimento como mitigação da corrosão externa deveríamos ter todas as variáveis simultaneamente na situação mais favorável, ou seja, baixíssima taxa de falhas por quilômetro, e inspeção realizada a pouco tempo, e por profissional qualificado, e com instrumentos confiáveis, e em região sem interferências elétricas. Em matemática probabilística esta condição pode ser representada pela multiplicação de todas as variáveis, assim a eficiência do revestimento é dada por:

$$m_{\text{revestimento}} = m_{r1} \times m_{r2} \times m_{r3} \times m_{r4} \times m_{r5}$$

EFICIÊNCIA DA PROTEÇÃO CATÓDICA

A proteção catódica tem por objetivo polarizar o duto a um nível de tensão elétrica no qual o processo de corrosão é considerado nulo ou desprezível. A sua eficiência pode ser representada pelo percentual da parede do duto em contato com o solo que se encontra com potencial tubo/solo de proteção. A tabela 6 apresenta valores propostos para esta variável.

Tabela 6 – Eficiência da proteção catódica com base no valor do potencial tubo/solo m_{pc1}

Potencial tubo-solo	m_{pc1}
Dentro dos limites de proteção	0,9999
Proteção insuficiente. Potencial fora dos limites de proteção	0,5
Sem proteção catódica	0,1

Algumas variáveis que influem no processo de registro do potencial tubo/solo devem ser consideradas com o objetivo de aferir o nível de confiança sobre a real situação da eficiência da proteção catódica, por exemplo:

- Critério de Proteção Catódica: As normas de referências têm revisado os critérios de proteção catódica ao longo dos anos. Atualmente a ISO 15589-1 (4) tem seus critérios

baseados no potencial tubo/solo livre de queda ôhmica, conhecido como potencial “off” ou de polarização. A utilização de potencial “on” nos critérios de proteção pode trazer maior incerteza quanto à eficiência da proteção catódica. Na tabela 7 são apresentados valores propostos para esta variável.

- Alcance dos Registros de Potencial Tubo/Solo: O valor de potencial tubo/solo medido em um dado ponto do duto representa a condição de alguns metros de duto no entorno desse ponto. Para se verificar a condição do potencial em toda a extensão do duto se deve executar a medição em intervalos muito curtos de distância, usualmente de 1 a 2 metros, pela técnica denominada inspeção CIS (close interval survey). Outra prática é medir o potencial em pontos de teste distantes entre si e assumir – como elevado grau de incerteza – que este valor representa o trecho entre dois pontos de teste. A tabela 8 apresenta os valores propostos para esta variável de acordo com o tipo de levantamento de potencial tubo/solo.

- Correntes circulantes no duto: Para a adequado registro do potencial “off” são instaladas chaves interruptoras sincronizadas via satélite nos retificadores e nas demais fontes corrente contínua de forma a garantir a total eliminação de correntes elétrica de proteção circulantes no duto. Quando se tem dutos de terceiros interligados ou uma análise pobre sobre o alcance dos retificadores, alguma corrente pode não ter sido devidamente eliminada e estar ainda circulando, e portanto nesta condição o potencial off medido seria falso. A tabela 9 apresenta valores propostos para esta variável.

Tabela 7 – Variável: Critério de proteção catódica m_{pc2}

Critério adotado	m_{pc2}
Baseada em potencial “off”	0,9999
Baseada em potencial “on”	0,9

Tabela 8 – Variável: Alcance dos registros de potencial tubo-solo m_{pc3}

Tipo de levantamento de potencial	m_{pc3}
CIS	0,9999
Ponto de teste eletrolítico a cada 500 m	0,999
Ponto de teste eletrolítico a cada 2 km ou mais	0,99

Tabela 9 – Variável: Presença de corrente circulante no duto durante levantamento de potencial off m_{pc4}

Estimativa de presença	m_{pc4}
Não há possibilidade de correntes circulantes	0,9999
Alta confiança sobre a eliminação das correntes	0,9999
Média confiança sobre a eliminação das correntes	0,999
Baixa confiança sobre a eliminação das correntes	0,9

- Data do registro do potencial tubo/solo: Quanto mais recente é o registro do potencial tubo/solo, mais representativo ele é sobre a condição atual de proteção catódica. A tabela 10 apresenta valores para esta variável.

- Bloqueio da Proteção Catódica: Fenômeno conhecido como “cathodic shielding” é provocado por estruturas que possuem propriedade isolante elétrica e se encontram muito próximas ao duto impedindo de que a corrente de proteção catódica chegue ao duto. Esta condição pode ser criada também por revestimentos altamente isolantes que se descolaram da parede do duto. O valor de potencial tubo/solo medido em regiões com este tipo de problema pode estar mascarado e não representar a situação real de falta de proteção. Ver tabela 11.

- Qualificação e experiência do inspetor: A inspeção executada por profissional devidamente qualificado e experiente proporciona dados mais confiáveis. A tabela 12 apresenta valores propostos para esta variável.

- Instrumentos de inspeção: O uso de instrumentos com especificações técnicas inadequadas ou em más condições de funcionamento compromete a confiança nos registros obtidos. Especificamente para a medição de potencial tubo/solo são requeridos voltímetros de alta impedância interna. A tabela 13 apresenta valores propostos para esta variável.

- Confiabilidade Operacional dos Retificadores: Para que se possa assumir de que os níveis de potencial tubo/solo são mantidos ao longo do tempo após os registros, é necessário que as fontes de corrente impressa se mantenham operando com alta confiabilidade. A tabela 14 apresenta valores para esta variável.

- Interferências Elétricas: Além de poder provocar corrosão a taxas mais altas, as interferências elétricas também afetam a atividade da medição do potencial tubo/solo. Oscilações provocadas no potencial podem mascarar situações de desproteção do duto. A tabela 15 apresenta valores propostos para esta variável.

Tabela 10 – Variável: Data do registro do potencial tubo/solo m_{pc5}

Data	m_{pc5}
Data < 1 ano	0,9999
1 ano \leq data < 2 anos	0,999
2 anos \leq data < 4 anos	0,99
4 anos \leq data < 6 anos	0,9
6 anos \leq data < 8 anos	0,6
Data \geq 8 anos	0,3

Tabela 11 – Variável: Bloqueio da proteção catódica m_{pc6}

Estimativa de presença	m_{pc6}
Não há evidências de bloqueio de corrente	0,9999
Evidências da existência do bloqueio	0,9

Tabela 12 – Variável: Qualificação e experiência do técnico executante do registro de potencial tubo/solo m_{pc7}

Nível de qualificação e experiência	m_{pc7}
Qualificado em proteção catódica por entidade externa competente	0,9999
Sem qualificação em proteção catódica. Experiência > 5 anos	0,999
1 ano < experiência < 5 anos	0,99
Experiência < 1 ano	0,9
Sem experiência	0,5

Tabela 13 – Variável: Instrumentos para o registro de potencial tubo/solo m_{pc8}

Nível de adequação ao serviço	m_{pc8}
Instrumento devidamente especificado (por exemplo: alta impedância interna) e calibração vigente	0,9999
Instrumento devidamente especificado (alta impedância interna), mas com calibração vencida	0,99
Instrumentos inadequados	0,5

Tabela 14 – Variável: Confiabilidade operacional dos retificadores m_{pc9}

Nível de disponibilidade	m_{pc9}
Disponibilidade > 95%	0,9999
80% < disponibilidade < 95%	0,99
60% < disponibilidade < 80%	0,9
Disponibilidade < 60%	0,5

Tabela 15 – Variável: Interferências elétricas na medição de potencial tubo/solo m_{pc10}

Nível de interferências	m_{pc10}
Ausência de interferências	0,9999
Interferências leves	0,999
Interferências fortes	0,99

Para a maior eficiência possível da mitigação da proteção catódica deveríamos ter todas as variáveis simultaneamente na situação mais favorável, ou seja, potencial tubo-solo off de proteção, e levantado pelo método CIS, e por profissional qualificado, e aplicando todos os cuidados para a eliminação das correntes circulantes, e usando instrumentos confiáveis, e calibrados, e retificadores de alta disponibilidade operacional, e em região sem interferências elétricas, e sem possibilidade de bloqueio de corrente. Matematicamente esta condição é representada da seguinte forma:

$$m_{\text{proteção catódica}} = m_{pc1} \times m_{pc2} \times m_{pc3} \times m_{pc4} \times m_{pc5} \times m_{pc6} \times m_{pc7} \times m_{pc8} \times m_{pc9} \times m_{pc10}$$

VALIDAÇÃO DO MODELO DE CÁLCULO

Apesar de todo o rigor e complexidade que possam ser aplicados no desenvolvimento do modelo para o cálculo de probabilidade de corrosão, na definição de variáveis representativas e na determinação de faixa de valores para cada possível condição do duto, sempre serão necessárias simplificações e a adoção de premissas baseada no conhecimento e experiência, portanto ao final do processo é preciso validar o sistema mediante a aferição dos seus resultados. Os cálculos devem produzir resultados esperados dentro de cenários reais ou hipotéticos próximos da realidade, e compatíveis com estatísticas de frequência de falha de dutos similares. Ajustes por tentativa e erro podem ser necessários e fazem parte do processo. A participação de profissionais especializados em controle de corrosão é fundamental para garantir a aderência do modelo à realidade.

Resultados e discussão

Aplicando-se as variáveis de mitigação e os valores propostos anteriormente ao modelo de risco foram rodados cálculos simulando três situações hipotéticas, porém próximas da realidade operacional de dutos, considerando diferentes condições de revestimento e de proteção catódica. Em seguida fazemos duas simulações adicionais considerando casos extremos: um duto ideal e um duto em péssimas condições. Os resultados das três primeiras simulações foram comparados aos dados estatísticos mais recentes do EGIG – European Gas Pipeline Incident Data Group (5). Considerando que os valores de frequência e de probabilidade de falhas são muito pequenos, da ordem de 10^{-5} , assumimos que, para aplicações práticas e para os propósitos deste trabalho, estas duas grandezas são intercambiáveis entre si. Para a rodada dos cálculos adotamos valores fixos para a taxa de corrosão e para a espessura de parede do duto.

Simulação 1: Duto em boas condições. Revestimento de polietileno

-Revestimento: com uma média de 0,1 falhas/km identificadas por inspeção DCVG realizada há 4 anos por técnico de boa experiência com instrumentos excelentes, em região sem interferência elétrica.

-Proteção Catódica: duto protegido de acordo com critério de potencial off registrado a 1,5 anos em pontos de testes a cada 2 km, por técnico muito experiente usando instrumentos excelentes. Os retificadores têm boa disponibilidade operacional; não há bloqueio de proteção catódica na região. Não há interferência elétrica tampouco correntes circulantes no duto durante o registro de potencial.

Tabela 17 – Resultados de PoF por corrosão externa: duto hipotético com revestimento de polietileno

Variável	Valor	Unidade
PoF_corr_ext	$1,22 \times 10^{-5}$	probabilidade de falha / ano
TTF	82235	anos
espessura_parede	6,35	mm
taxa_corrosão	0,3048	mm/ano
Mitigações	0,999747	%

Simulação 2: Duto em condições intermediárias. Revestimento epóxi.

-Revestimento: com uma média de 10 falhas/km identificadas por inspeção DCVG realizada há 6 anos por técnico de boa experiência utilizando instrumentos excelentes, em região com leve interferência elétrica.

-Proteção Catódica: duto protegido de acordo com critério de potencial off, registrado a 1,5 anos em pontos de testes distantes a cada 2 km, por técnico bem experiente usando instrumentos excelentes. Os retificadores têm boa disponibilidade operacional. Não há bloqueio de proteção catódica na região. Há uma leve interferência elétrica e houve média eliminação das correntes circulantes no duto.

Tabela 18 – Resultados de PoF por corrosão externa: duto hipotético com revestimento epóxi

Variável	Valor	Unidade
PoF_corr_ext	$3,57 \times 10^{-5}$	probabilidade de falha / ano
TTF	27974	anos
espessura_parede	6,35	mm
taxa_corrosão	0,3048	mm/ano
Mitigações	0,999255	%

Simulação 3: Duto em piores condições. Revestimento coal-tar.

-Revestimento: com 20 falhas/km identificadas por inspeção DCVG realizada há 7 anos por técnico de boa experiência com instrumentos excelentes, em região sem interferência elétrica.

-Proteção Catódica: duto protegido de acordo com critério de potencial “on” registrado a 1,5 anos em pontos de testes a cada 2 km, por técnico com média experiência usando instrumentos excelentes. Os retificadores têm excelente disponibilidade operacional; não há bloqueio de proteção catódica na região nem interferência elétrica.

Tabela 19 – Resultados de PoF por corrosão externa: duto hipotético com revestimento coal-tar

Variável	Valor	Unidade
PoF_corr_ext	$5,95 \times 10^{-5}$	probabilidade de falha / ano
TTF	16794	anos
espessura_parede	6,35	mm
taxa_corrosão	0,3048	mm/ano
Mitigações	0,998759	%

Simulação 4: O duto perfeito. Todas as inspeções e parâmetros na situação ideal mas viável.

-Revestimento: com 0,1 falhas/km identificadas por inspeção DCVG realizada há 1 ano por técnico qualificado e de excelente experiência com instrumentos excelentes, em região sem interferência elétrica.

-Proteção Catódica: duto protegido pelo critério -0,85 V off registrado a 6 meses atrás pelo método CIS, por técnico qualificado e de excelente experiência usando instrumentos excelentes. Os retificadores têm excelente disponibilidade operacional; não há bloqueio de

proteção catódica na região nem interferência elétrica. Chaveamento perfeito das correntes circulantes no duto.

Tabela 20 – Resultados de PoF por corrosão externa: duto ideal

Variável	Valor	Unidade
PoF_corr_ext	$2,40 \times 10^{-8}$	probabilidade de falha / ano
TTF	41693758	anos
espessura_parede	6,35	mm
taxa_corrosão	0,3048	mm/ano
Mitigações	0,9999995	%

Simulação 5: O duto antigo e mal cuidado.

-Revestimento: com 20 falhas/km identificadas por inspeção realizada há 10 anos por técnico principiante com instrumentos bons mas sem calibração, em região sem interferência elétrica.

-Proteção Catódica: potencial indicando desproteção em alguns locais, medidos há 3 anos em pontos de teste a cada 2 km, por técnico de pouca experiência usando instrumentos bons mas com calibração vencida. Os retificadores têm disponibilidade operacional de 82%; não há bloqueio de proteção catódica na região nem interferência elétrica. Chaveamento das correntes circulantes no duto mal feito.

Tabela 21 – Resultados de PoF por corrosão externa: duto ideal

Variável	Valor	Unidade
PoF_corr_ext	$1,01 \times 10^{-2}$	probabilidade de falha / ano
TTF	98	anos
espessura_parede	6,35	mm
taxa_corrosão	0,3048	mm/ano
Mitigações	0,787480	%

O EGIG apresenta para o período de 1970 a 2013 uma frequência de falha por corrosão igual a $5,5 \times 10^{-5}$ falhas/km-ano. Este valor foi obtido com base em dados fornecidos por 17 grandes operadoras de gasodutos da Europa. Na figura 1 podemos ver a frequência de falha segundo o tipo de revestimento do duto e constatar como este parâmetro tem influência sobre os resultados estatísticos.

Comparando os registros do EGIG com os valores obtidos nas simulações para dutos com revestimento de polietileno, epóxi e coal tar encontramos a mesma ordem de grandeza e proximidade de resultados evidenciando a aplicabilidade do método.

Figura 1 – Frequência de falha de gasodutos segundo o tipo de revestimento
Fonte: EGIG - 9º Relatório (1970-2013)

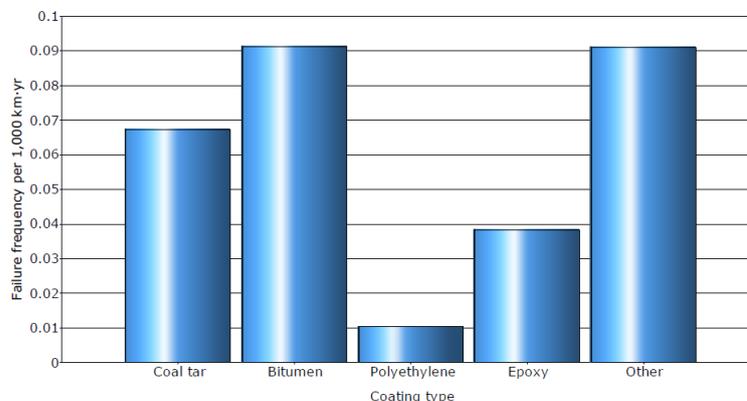


Tabela 22 – Frequências de falha para gasodutos segundo o tipo de revestimento convertidas para a unidade falha/km-ano. Fonte: EGIG – 9º Relatório (1970-2013)

Revestimento	Falhas / km - ano
Polietileno	$1,1 \times 10^{-5}$
Epóxi	$3,8 \times 10^{-5}$
Coal tar	$6,7 \times 10^{-5}$
Asfalto	$9,1 \times 10^{-5}$
Outros	$9,1 \times 10^{-5}$

Conclusões

A estimativa da probabilidade de falha de dutos por corrosão externa sob a abordagem quantitativa do método Muhlbauer é uma atividade viável de se conduzir por técnicos da área de controle de corrosão e permite obter resultados práticos e realistas partindo-se da adequada identificação das variáveis que influenciam no processo de corrosão e de proteção. O modelo deve se ajustar aos parâmetros técnicos de cada duto e ser validado mediante comparação com dados estatísticos ou por benchmarking. Uma das grandes vantagens dos modelos quantitativos é que eles permitem identificar com maior precisão quais as variáveis estão levando ao aumento da probabilidade e, portanto onde devem ser concentrados esforços para a redução do risco. Este trabalho apresentou um exercício com a definição de 15 variáveis e seus respectivos valores com influência direta sobre a estimativa da eficiência do revestimento e da proteção catódica para a mitigação da corrosão externa. Os resultados obtidos se mostraram compatíveis com os registros de banco de dados internacionais de falhas de dutos.

Referências bibliográficas

- (1) ASME B31.8S – **Managing System Integrity of Gas Pipelines**. The American Society of Mechanical Engineers. Three Park Avenue, New York, NY – USA.
- (2) MUHLBAUER, W. K. **Enhanced Pipeline Risk Assessment. Part 1 – Probability of Failure Assessment. Rev 4**. WKM Consultancy. www.pipelinerrisk.com.
- (3) Dutra, A. C.; Nunes, L. P. **Proteção Catódica – Técnica de Combate à Corrosão**, 4ª Edição. Editora Interciência, Rio de Janeiro. 2006. p.94.
- (4) ISO 15589-1 – Petroleum and natural gas industries – **Cathodic protection of pipeline transportation systems – Part 1: on-land pipelines**. The International Organization for Standardization. Geneva, Switzerland.
- (5) European Gas Pipeline Incident Data Group – EGIG. **9th Report (period 1970 – 2013)**. www.egig.eu

* * *