

USO DE ROBÔ DE INSPEÇÃO ELETROMAGNÉTICA PARA AVALIAÇÃO DE ALTA RESOLUÇÃO DA CONDIÇÃO DE EMISSÁRIO SUBMARINO

Mike Wrigglesworth⁽¹⁾

Engenheiro Ambiental pela University of Guelph, no Canadá. Atualmente, como VP Xylem Inc., lidera o desenvolvimento de negócios da divisão de Serviços de Avaliação da Xylem fora da América do Norte; e apoia concessionárias, municípios e indústrias na tomada de decisões inteligentes com sua infraestrutura enterrada. Tem mais de 20 anos de experiência no gerenciamento e operação de várias tecnologias Pure para realização de inspeções. Ativamente envolvido no grupo de especialistas em perda de água da IWA.

Mike Garaci⁽²⁾

Gerente Regional Pure. Bacharel em Geografia pela University of Waterloo com Mestrado em Geografia pela University of Toronto, ambas no Canadá. Tem mais de 30 anos de experiência em soluções para avaliação de infraestrutura de dutos; GIS para tubulações de água ou esgoto.

Sonia Mucciolo⁽³⁾

Engenheira Materiais-Química pela Universidade Mackenzie com Mestrado em Engenharia Ambiental pelo Politécnico di Torino – Itália, diploma revalidado pela USP. Gerente de Desenvolvimento de Negócios da Xylem Brasil e quase 20 anos na área de sistemas de Tratamento de Água e Efluentes.

Roberto Brasil⁽⁴⁾

Gerente de Engenharia, Qualidade, Suprimentos e ESH da Xylem Brasil. Engenheiro Mecânico formado em 1985 pela Universidade de Mogi das Cruzes, pós graduado em Administração pela Fundação Armando Alvares Penteado – Faap em 1993. Trinta e dois anos de experiência em projetos, instalação e manutenção de sistema de captação e bombeamento de águas de superfície, águas subterrâneas, efluentes industriais e municipais e sistemas de drenagem e controle de enchentes.

Endereço⁽⁴⁾: Rua Telmo Coelho Filho, 40 - Vila Albano – São Paulo – São Paulo - CEP: 05543-020 - Brasil - Tel: +55 (11) 3732-0150 - e-mail: roberto.brasil@xylem.com

RESUMO

O Emissário de Águas Residuais de *Bazan Bay* do Capital Regional District (CRD) foi construído em 1.999, para descartar efluentes secundários da ETE da Península de Saanich para o Mar Salish em British Columbia, Canadá.

Com 1,5 km e construído com tubos de aço de 762 mm de diâmetro; foi operado originalmente sem proteção catódica até 2.015, quando um sistema de corrente impressa foi instalado. Em 2.018, o CRD selecionou esse emissário para uma avaliação de alta resolução, já que ocorreram várias falhas nas paredes dos tubos, que causaram vazamentos.

Um **Robô de Inspeção Eletromagnética** de longo alcance foi utilizado para identificar áreas de corrosão e perda de parede do tubo de aço. Um curto espaço de tempo para inspeção, devido ao período limitado em que o emissário poderia permanecer fechado para avaliação, se mostrou um ponto bastante desafiador.

Esse veículo de inspeção multissensor é projetado para uso em tubulações - de qualquer material - de água potável, água bruta e esgoto.

Este trabalho cobrirá a metodologia de avaliação usada para determinar a condição do emissário, e sua expectativa de vida restante, bem como os resultados usados para informar se as seções ou todo do emissário exigiram substituição ou reabilitação.

PALAVRAS-CHAVE: robô de inspeção, emissário submarino, caça-vazamentos

INTRODUÇÃO

A parte inspecionada do Emissário de Efluentes da Baía de Bazan é composta por tubos de aço carbono com 762 mm de diâmetro. Os tubos foram fabricados com uma espessura de parede de aço de 9,5 milímetros.

O Emissário de Esgoto Tratado de *Bazan Bay* foi construído em 1.999. Desde sua construção original, o emissário foi operado sem proteção catódica por 15 anos até 2.015, quando um sistema de corrente impressa foi instalado. Ele pertence e é operado pelo Distrito Regional da Capital.

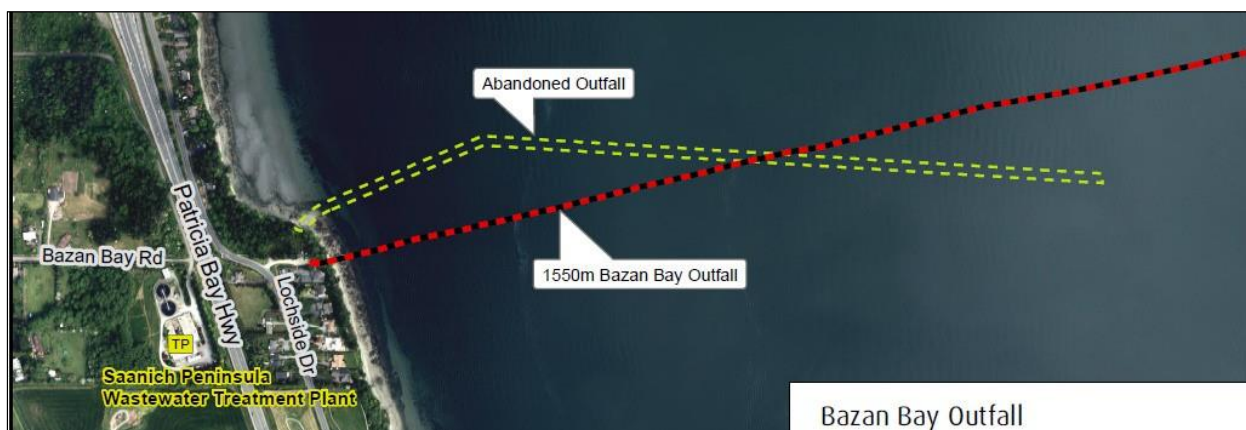


Figura 1: Seção inspecionada do emissário de descarte de águas residuais de Bazan Bay de aço de 762 milímetros.

O aço, bem como seu precursor e componente, o ferro, são materiais de tubulação amplamente usados. O aço macio tem sido usado como material estrutural por causa de suas propriedades físicas altamente desejáveis, que incluem alta resistência, a capacidade de ceder ou desviar enquanto ainda suporta a carga total e resistência a choques [1]. A ductilidade do aço, ou sua capacidade de ceder sem quebrar, o torna uma escolha atraente como material de tubulação.

Algumas propriedades do aço, como módulo de Young e coeficiente de Poisson, permanecem quase as mesmas para a maioria dos tipos de aço, a 30.000 psi e 0,27, respectivamente. No entanto, propriedades como a resistência ao escoamento variam amplamente com base na composição química do aço e no método de sua produção. Geralmente, o aumento do teor de carbono do aço aumenta sua resistência ao escoamento, enquanto a conformação a frio do aço diminui sua ductilidade geral [1].

A maioria dos tubos de aço é considerada flexível, o que significa que eles têm a capacidade de se deformar sob uma carga elevada sem que ocorra uma falha. A principal causa de falha em tubos de aço é a corrosão. Como o único componente estrutural de um tubo de aço é o próprio aço, qualquer perda de área da seção transversal devido à corrosão tem um impacto imediato na resistência geral do tubo. Danos ao exterior de uma tubulação podem ser causados por um ambiente de solo corrosivo ou por corrente perdida, enquanto danos internos podem ser causados pelos fluidos que a tubulação está transportando. [3]

À medida que mais da área da seção transversal é perdida para a corrosão, o carregamento externo e a pressão interna ao longo da tubulação causam deformação nos tubos danificados, e tensão adicional é desenvolvida nas fibras internas e externas extremas da seção transversal. Isso leva a buracos, rachaduras e vazamentos, que são as falhas mais comuns vistas em uma tubulação de aço. A menos que o emissário seja submetido a pressões positivas ou negativas extremamente altas, os tubos tendem a ceder e vazam ao invés de romper, o que permitiria mitigar os danos em um emissário antes de uma falha catastrófica.

Embora a corrosão seja o mecanismo de falha mais comum para tubos de aço, existem outras condições que podem causar danos e desgaste. Deformações ou sulcos causados durante a produção ou instalação dos tubos podem criar áreas de danos localizados em um duto, antes mesmo desse ser colocado em uso. Os tubos de aço também são suscetíveis a danos causados por carga externa excessiva. Sobrecarga e flambagem podem ocorrer se as cargas aplicadas forem altas o suficiente ou a pressão interna for particularmente baixa ou negativa. Mesmo que o tubo de aço seja flexível, essas condições têm a capacidade de causar deflexões extremamente altas e ovalização em um duto, o que pode levar a falhas no tubo.

OBJETIVO(S)

O objetivo desse trabalho foi verificar a viabilidade do uso de **Robô de Inspeção Eletromagnética** como tecnologia não destrutiva para identificação de falhas e defeitos em tubulação de emissário submarino, em curto espaço de tempo.

METODOLOGIA UTILIZADA

A abordagem para avaliação das condições do emissário submarino foi dividida nas seguintes etapas:

- Entender: Formular um método de avaliação com base nas características do emissário, modo de falha, histórico e contexto.
- Avaliar: Coletar dados de condição relevantes e reais ao longo do comprimento do emissário.
- Agir Prontamente: Tomar medidas imediatas para reparar ou substituir tubos, com base na avaliação.
- Gerenciar: Considerar a gestão dos ativos a longo prazo, re-inspeções e métodos preventivos para reduzir ainda mais os riscos futuros.

O sistema de inspeção utilizado no estudo de avaliação foi um veículo de inspeção multissensor projetado para uso em tubulações - de qualquer material - de água potável, esgoto e água bruta. Usando um cabo de comunicação de fibra ótica leve e de última geração, em conjunto com o projeto da trilha e da banda de rodagem, o equipamento pode inspecionar longas distâncias (até 1.800 metros).

O equipamento é portátil e facilmente adaptado a um trailer ou caminhão. Um guincho de alta potência permite um recuo controlado rápido do sistema, o qual atua como um sistema de recuperação de *backup* no caso de falha do sistema ou de energia. A inserção robótica pode ser feita por muitos tipos de entrada, incluindo formas irregulares, acessos laterais, câmaras e escavações.



Figura 2: Veículo de inspeção Multissensor ou Robô de Inspeção Eletromagnética

A inspeção eletromagnética é uma tecnologia não destrutiva que detecta áreas de defeitos de uma superfície cilíndrica. O sistema de inspeção induz um campo magnético no cilindro metálico. Os sensores de recepção colocados perto da parede do tubo registram a assinatura magnética resultante que é influenciada por áreas de perda de parede. Os dados da inspeção são submetidos a um processo de análise de dados detalhado que identifica e quantifica os danos na tubulação.

A sensibilidade à perda de parede depende da espessura do cilindro e do diâmetro do tubo. Para o emissário de *Bazan Bay*, se definiu identificar todos os defeitos que são de pelo menos 75 milímetros por 75 milímetros e 30% de perda de parede.

O Método de Avaliação de Nível 1, é a avaliação mais conservadora de aptidão para o serviço (FFS). FFS é uma prática recomendada para avaliação de equipamentos em serviço para determinar sua adequação para serviço contínuo. O FFS serve como uma base racional para definir limites de aceitação de falhas e permite aos engenheiros distinguir entre falhas aceitáveis e inaceitáveis; e danos com base nas boas práticas de engenharia reconhecidas pela indústria e geralmente aceitas.

A Avaliação de Corrosão de Nível 1 avalia o impacto de áreas específicas de perda de parede por corrosão. Um relatório do Pipeline Research Council International (PRCI) compilado em 2011, denominado “Avaliação de defeitos

de dutos - uma revisão e comparação de métodos comumente usados” [2] apresenta cinco (5) modelos que podem ser usados para avaliar a corrosão encontrada em um duto metálico. Esses modelos podem fornecer uma avaliação preliminar, ou de Nível 1, de defeitos de corrosão específicos. Os cinco (5) modelos de Nível 1 são os seguintes:

- ASME B31.G (Sociedade Americana de Engenheiros Mecânicos B31.G)
- ASME B31.G Modificado (American Society of Mechanical Engineers Modified B31.G)
- PCORRC
- API RP 579 (Prática Recomendada do American Petroleum Institute 579)
- DNV RP F101 (Prática Recomendada Det Norske Veritas F101)

Para uma Comparação de Métodos de Avaliação de Nível 1, podemos nos basear em um estudo conduzido pela Advantica e apresentado no relatório PRCI de 2011 [2], que comparou a pressão de falha real (P_a) de vários tubos de referência com sua pressão de falha prevista (P_p), com base nos cinco modelos de avaliação de corrosão de Nível 1 descritos acima. A Tabela abaixo fornece os resultados desta comparação.

Tabela 1: Comparação de métodos de avaliação de corrosão [2]

MÉTODO DE AVALIAÇÃO	Pa/Pp	Pa/Pp
	MÉDIA	PADRÃO DESVIO
ASME B31.G	1.330	0.468
Modified ASME B31.G	1.184	0.285
PCORRC	1.191	0.310
API RP 579, Level 1	1.436	0.407
DNV RP F101	1.178	0.318

O valor médio para cada método é maior que 1, indicando que todos os cinco modelos resultam em pressões de falha conservadoras. A avaliação menos conservadora foi DNV RP F101, enquanto a mais conservadora foi API RP 579, Nível 1.

As diferenças entre as cinco (5) avaliações podem se dar pelos seguintes fatores:

1. Equações empíricas versus semi-empíricas

As equações originais criadas para modelar a resistência restante de tubos corroídos foram baseadas em testes de ruptura de tubos mais antigos. Esses tubos mais antigos tinham uma tenacidade relativamente baixa quando comparados aos tubos de aço modernos e essa diferença é incorporada nas equações empíricas.

- ASME B31.G, ASME B31.G Modificado e API RP 579

Novas equações foram desenvolvidas com base na modelagem de elementos finitos. Os modelos foram criados a partir de critérios de falha validados experimentalmente para tubos mais novos e de maior tenacidade.

- DNV RP F101 e PCORRC

2. Área de defeito

A área de perda de parede considerada na análise tem um grande efeito nos resultados da avaliação de Nível 1.

- ASME B31.G considera a área do defeito parabólica ($2/3$ de $L * d$).
- A ASME B31.G modificada considera a área do defeito como 85% do retângulo formado por $L * d$.
- PCORRC não tem um cálculo de área facilmente identificável e, em vez disso, usa uma fórmula empírica exponencial.
- API RP 579 e DNV RP F101 consideram a área do defeito como o retângulo inteiro formado por $L * d$.

3. Tensão de fluxo do material

A tensão de fluxo é o nível de tensão aplicada que causa escoamento em larga escala do aço [2].

- ASME B31.G e API RP 579 consideram a tensão de fluxo 1,1 vezes o SMYS do material.
- O B31.G modificado considera o SMYS mais 10.000 psi como a tensão de fluxo.
- Tanto o PCORRC quanto o DNV FP F101 usam a resistência máxima à tração do aço como tensão de fluxo.

4. Fator Folias

Define a relação empírica entre a tensão do arco na ruptura e a tensão nas bordas de uma falha na parede em um tubo pressurizado [2].

- Um fator de Folias de dois termos é considerado mais conservador. ASME B31.G, API RP 579, PCORRC e DNV RP F101 usam fatores de Folias de dois termos.
- ASME B31.G modificado considera fatores de Folias de dois e três termos.

A Vida Útil Restante, também conhecida como *Remaining Useful Life* (RUL), que é definida como o tempo para o tubo atingir um limite de escoamento estrutural, é calculada usando um modelo estatístico que produz uma distribuição de valores de probabilidade de falha (PoF) para cada área de perda de parede detectada na inspeção com **Robô de Inspeção Eletromagnética**. Este modelo é baseado na espessura da parede medida a partir da inspeção do emissário e uma espessura mínima da parede do tubo necessária calculada a partir da análise estrutural.

Usando as medições de perda de parede do tubo da inspeção com **Robô de Inspeção Eletromagnética** e a idade do tubo, um RUL pode ser estimado. Os resultados da análise estrutural mostraram que o emissário não atingirá um limite de rendimento nas atuais condições de operação. Como resultado, foram estimados os seguintes cenários de RUL:

- RUL para vazamento, que é o tempo em que toda a parede do tubo é perdida, ou seja, a espessura torna-se 0 milímetros.
- RUL para perda de parede do tubo de 80%, que é o ponto em que a espessura da parede do tubo atinge 1,9 milímetros (dada a espessura inicial da parede do tubo de 9,5 milímetros). Como a Avaliação de Corrosão de Nível 1 determinou que o tubo não atingirá um limite estrutural nas condições operacionais atuais, 80% de perda de parede é considerado o limite no qual a reabilitação da perda de parede é recomendada.

Duas (2) estimativas de RUL foram derivadas para cada área de perda de parede: RUL para vazamento e RUL para perda de parede de 80%.

O RUL é estimado usando os dados de inspeção, realizando uma simulação de Monte Carlo de forma que 10.000 simulações sejam conduzidas para cada área detectada de perda de parede. Essas simulações permitem que a análise capture a variabilidade em RUL que é gerada pelo cálculo de diferentes combinações possíveis de taxas de degradação com base nas espessuras de parede medidas. Uma faixa de valores de PoF é desenvolvida usando a distribuição de frequência dos resultados das simulações e é então usada para estimar a probabilidade de ocorrer um RUL calculado.

A vida útil remanescente é calculada com base nas Equações abaixo.

$$RUL \text{ to } 80\% \text{ Wall Loss} = \frac{\textit{Simulated Thickness} - \textit{Minimum Required Thickness}}{\textit{Degradation Rate}} \quad \text{equação (1)}$$

$$RUL \text{ to Leakage} = \frac{\textit{Minimum Measured Thickness} - 0}{\textit{Degradation Rate}} \quad \text{equação (2)}$$

$$\textit{Degradation Rate} = \frac{\textit{Maximum Measured Thickness} - \textit{Simulated Measured Thickness}}{(\textit{Inspection Year} - \textit{Installation Year})} \quad \text{equação (3)}$$

onde a espessura simulada é o resultado dado a partir das simulações de Monte Carlo e a espessura mínima exigida é de 80% de perda de parede de acordo com as premissas apresentadas acima.

RESULTADOS OBTIDOS

O **Robô de Inspeção Eletromagnética** inspecionou 1.528 metros do Emissário Submarino de Bazan Bay. Uma análise abrangente dos dados de inspeção identificou as dimensões e locais para todos os defeitos de perda de metal descobertos. A análise dos dados identificou 11 áreas de anomalias de perda de parede.

Um total de 14 seções de tubos flangeadas foram identificadas durante a inspeção, desde o Porto Piggings na estação 0+09,5 até o difusor multiporta. Quatro (4) seções de tubo foram identificadas com sinais eletromagnéticos consistentes de defeitos de perda de parede. Os defeitos são detalhados na Tabela abaixo.

Tabela 2: Seções com anomalias consistentes com perda de parede no emissário de Bazan Bay.

NÚMERO DA FLANGE	NÚMERO DA ESTAÇÃO	DISTÂNCIA DO RASTREADOR ROBÓTICO (METROS)	DISTÂNCIA DA FLANGE À ANOMALIA (METROS)	POSIÇÃO CIRCUNFERENCIAL DA ANOMALIA (GRAUS VOLTADOS PARA O MAR)	ÁREA DE ANOMALIA (CENTÍMETROS QUADRADOS)	PROFUNDIDADE ESTIMADA DE PERDA DA PAREDE (%)
1	0+195	177.8	78.3	300	149	35
2	0+350	345.4	61.6	45	149	50
2	0+350	345.4	62.5	30	149	40
2	0+350	345.4	63.9	60	141	50
3	0+500	494.4	19.6	75	149	30
3	0+500	494.4	62.2	270	84	25
3	0+500	494.4	69.0	240	232	50
3	0+500	494.4	159.7	30	107	35
4	0+670	661.9	7.1	285	111	35
4	0+670	661.9	122.0	330	205	50
4	0+670	661.9	135.5	105	86	45

Na Metodologia de Avaliação de Corrosão de Nível 1, se observou que como o único componente estrutural de um tubo de aço é o próprio aço, qualquer perda de área da seção transversal devido à corrosão tem um impacto imediato na resistência geral do tubo. O objetivo da Avaliação de Corrosão de Nível 1 é determinar a pressão de falha, de cada defeito de perda de parede, com base no tamanho e profundidade da perda de parede. As pressões de falha são previstas usando métodos de avaliação de corrosão de nível 1.

Tabela 3: Dimensões da Tubulação e Propriedades do Material.

Diâmetro do Tubo	762 milímetros	Pressão de operação	Gravidade
Espessura da Parede do Tubo	9,5 milímetros	Módulo de Young do tubo	30000000 psi
Material do Tubo	Aço	Força de rendimento específica	36000 psi
Grau do Aço	ASTM A36	Resistência mínima à tração específica	58000 psi

A pressão interna máxima experimentada na tubulação está em seu ponto mais profundo debaixo d'água, no difusor multiporta.

O inverso do tubo no difusor multiporta está a 30,0 metros abaixo do nível do mar. Incorporando 3,7 metros adicionais de pressão na maré alta e 0,7 metros de pressão no emissário, a pressão interna máxima no Emissário da Baía de Bazan é de 34,4 metros de coluna de água, ou 48,9 psi.

Os números da profundidade e da maré alta foram obtidos no desenho do Plano e Perfil fornecido 9- S156-2, enquanto a pressão de carga devido ao fluxo do emissário foi calculada a partir dos dados de vazão de efluentes em 2.017 e 2.018 (até 16 de outubro de 2018), fornecidos pelo CRD.

Os resultados da Avaliação de Corrosão de Nível 1 são conservadores, pois a pressão externa é excluída da análise e a pressão interna máxima calculada para o ponto mais profundo da tubulação é considerada para toda a tubulação.

A Tabela abaixo lista as anomalias de perda de parede detectadas na tubulação. A referência de anomalia de perda de parede é usada para identificar cada anomalia nos gráficos de corrosão de nível 1.

Tabela 4: Rotulagem de referência para anomalias de perda de parede no emissário de Bazan Bay.

NÚMERO DA FLANGE	NÚMERO DA ESTAÇÃO	REFERÊNCIA DE ANOMALIA DE PERDA DE PAREDE	DISTÂNCIA DA FLANGE À ANOMALIA (METROS)	POSIÇÃO CIRCUNFERENCIAL DA ANOMALIA (GRAUS VOLTADOS PARA O MAR)	ÁREA DE ANOMALIA (CENTÍMETROS QUADRADOS)	PROFUNDIDADE ESTIMADA DE PERDA DA PAREDE (%)
1	0+195	1-D1	78.3	300	149	35
2	0+350	2-D2	61.6	45	149	50
2	0+350	2-D3	62.5	30	149	40
2	0+350	2-D4	63.9	60	141	50
3	0+500	3-D1	19.6	75	149	30
3	0+500	3-D2	62.2	270	84	25
3	0+500	3-D3	69.0	240	232	50
3	0+500	3-D4	159.7	30	107	35
4	0+670	4-D1	7.1	285	111	35
4	0+670	4-D2	122.0	330	205	50
4	0+670	4-D3	135.5	105	86	45

Cada área de perda de parede detectada durante a inspeção foi analisada usando os métodos de Avaliação de Corrosão de Nível 1 descritos na Tabela 1. Os resultados de cada um dos cinco (5) modelos de avaliação de nível 1 estão representados graficamente na Figuras 3 a 7. A Tabela 5 abaixo descreve cada uma das linhas e pontos plotados nos gráficos de Avaliação de Nível 1.

Tabela 5: Descrição das curvas de avaliação de nível 1

COR DA LINHA	DESCRIÇÃO
Linhas Sólidas	Curvas que representam a pressão de falha de um tubo com o percentual de perda de parede dada por níveis variáveis de corrosão (d / t)
Verde Tracejada	A pressão necessária para um tubo sem corrosão chegar a 100 por cento da resistência ao escoamento do aço
Azul Tracejada	A pressão necessária para que um tubo sem corrosão alcance 72 por cento da resistência ao escoamento do aço
Marrom Tracejada	Pressão operacional máxima atual
Cinza Tracejada	Pressão de estouro em um tubo sem corrosão para um determinado Método de avaliação
Pontos	Pressão de falha de para cada uma das áreas de defeito detectadas durante a inspeção

Para cada um dos gráficos a seguir, o eixo x exibe o comprimento de corrosão no tubo enquanto o eixo y indica a pressão de falha. As curvas de azul claro, laranja, cinza, amarelo e azul escuro mostram a pressão de falha prevista associada para cada comprimento de corrosão quando a perda de espessura (a / t) é de 10%, 20%, 40%, 60% e 80%, respectivamente. As linhas tracejadas em verde e azul mostram as pressões internas que fazem com que a tensão do arco atinja 100% e 72% da tensão de escoamento. A linha tracejada marrom indica o nível de estresse devido à pressão operacional. Cada ponto se refere a uma área de corrosão específica (em comprimento e profundidade) detectada durante a inspeção com **Robô de Inspeção Eletromagnética**.

Failure Pressure based on "ASME B31G"

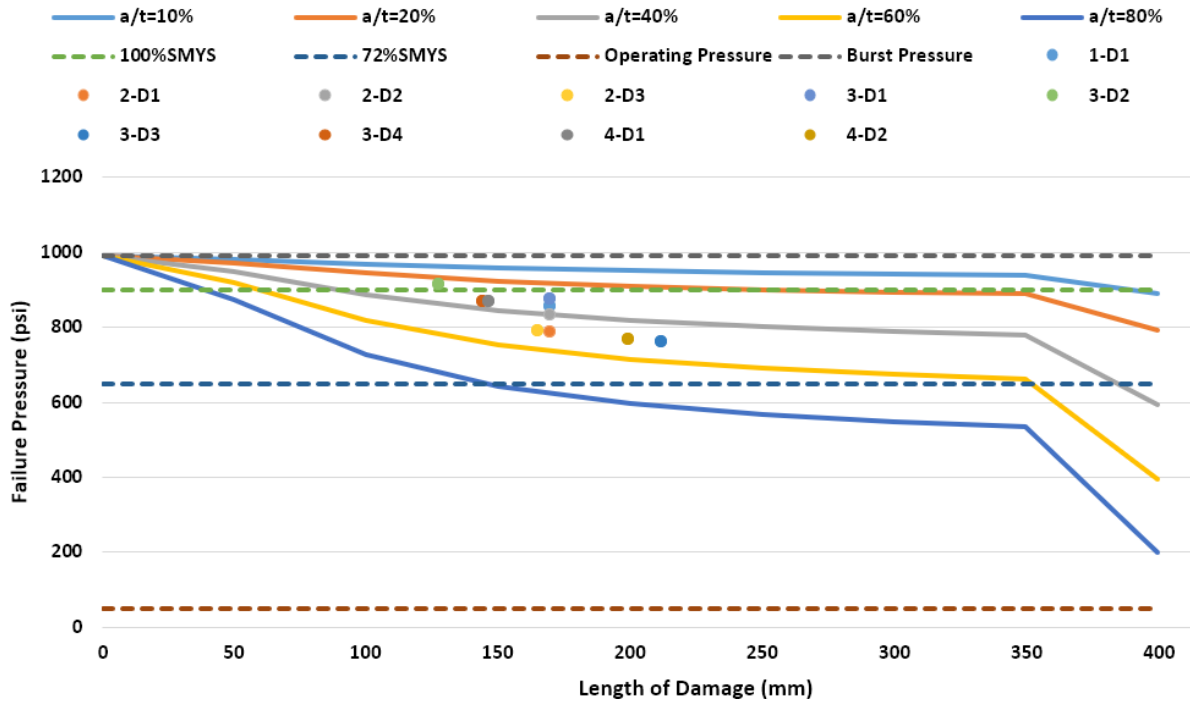


Figura 3: Avaliação de corrosão ASME B31.G

Failure Pressure based on "Modified ASME B31G"

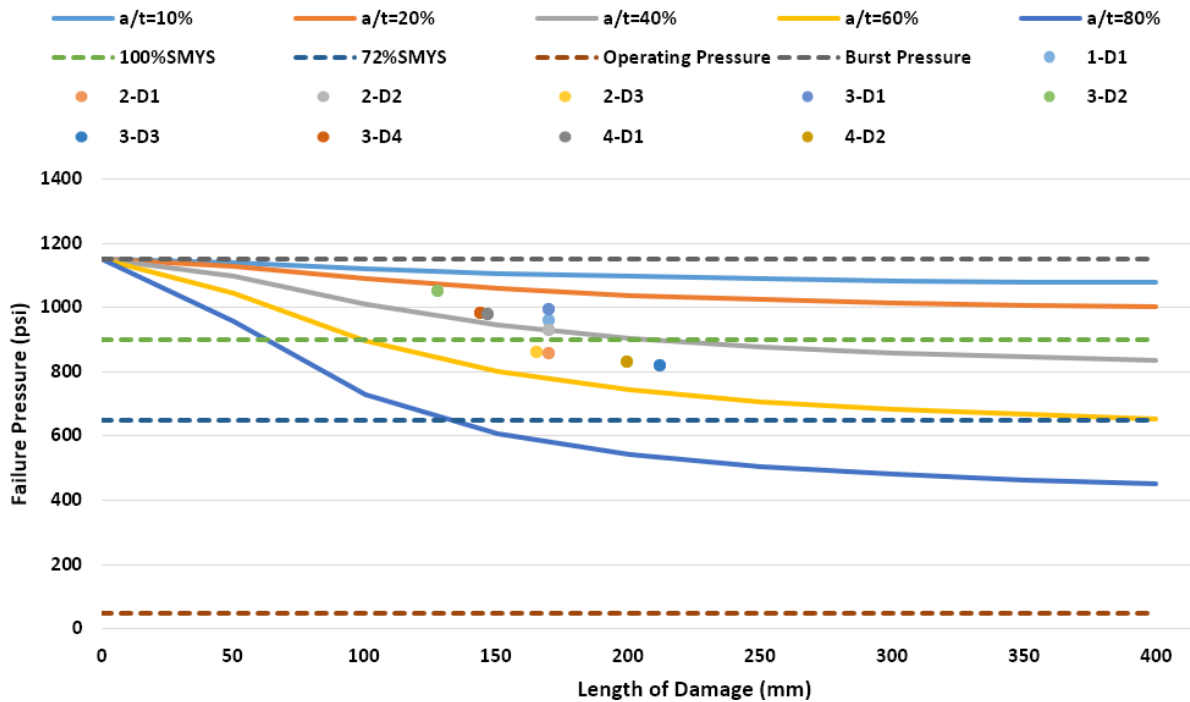


Figura 4: Avaliação de corrosão ASME B31.G modificada

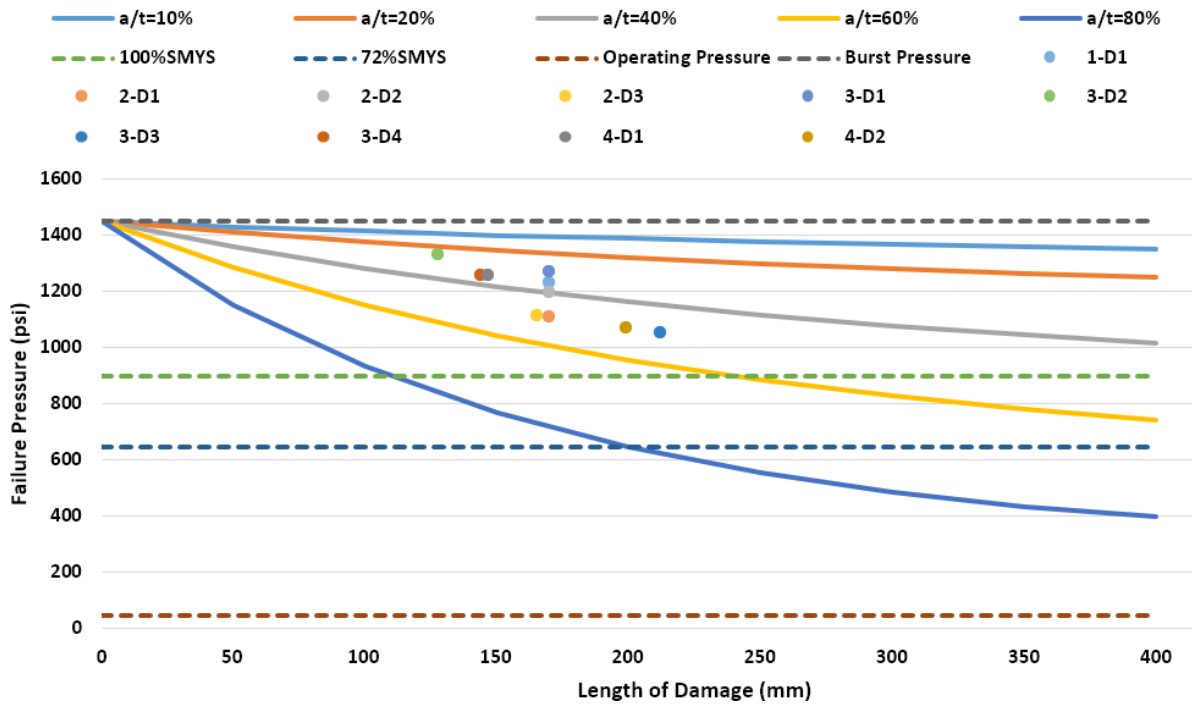


Figura 5: Avaliação de corrosão ASME B31.G modificada

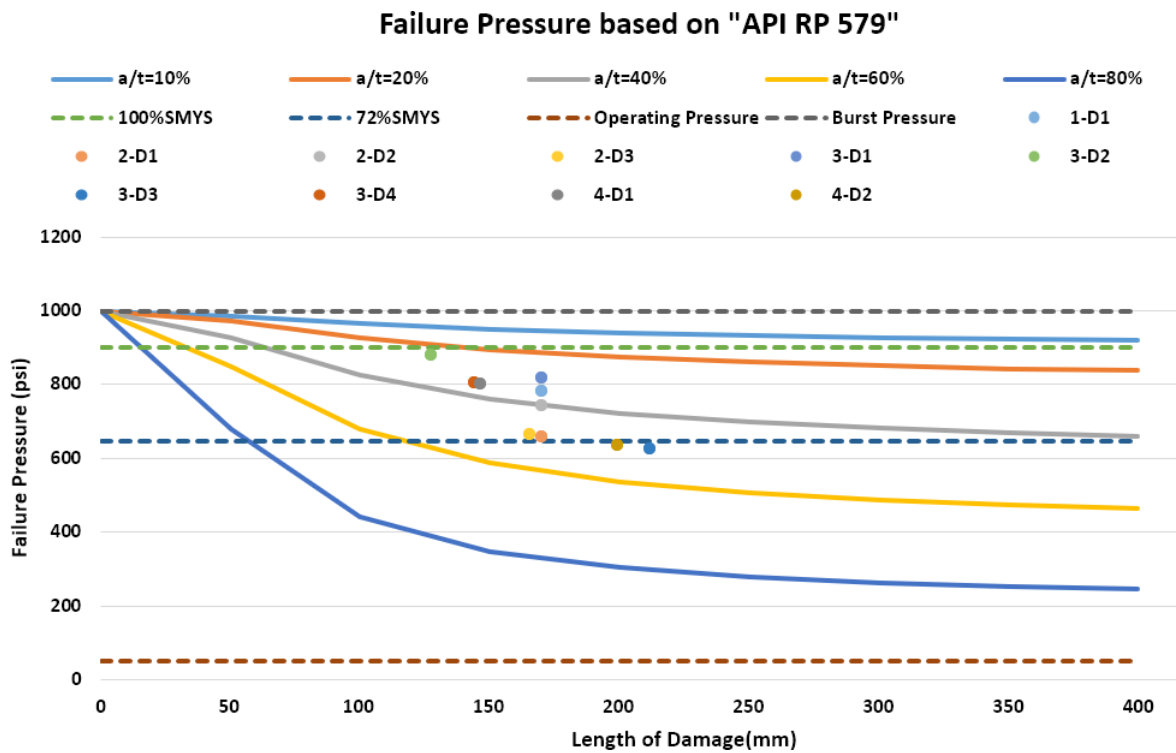


Figura 6: Avaliação de corrosão API RP 579



Failure Pressure based on "DNV RP F101"

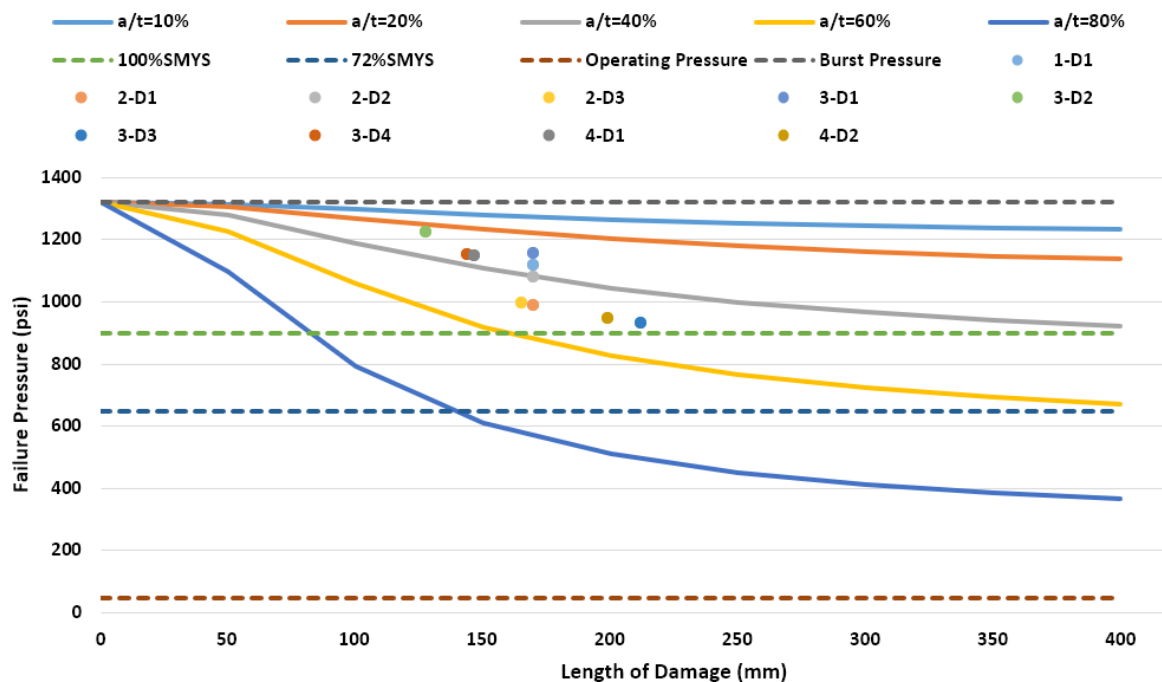


Figura 7: Avaliação de corrosão DNV RP F101

Os resultados dos cálculos de vida útil restantes (RUL) foram realizados para o Emissário de Águas Residuais de *Bazan Bay* usando as medições da parede do tubo da inspeção com **Robô de Inspeção Eletromagnética**, a espessura nominal do tubo fornecida nos desenhos e a espessura mínima necessária para 80% de perda de parede ou 100% de perda de parede (vazamento). Um resumo do RUL médio para perda de parede de 80% e para vazamento, para cada anomalia de perda de parede, está tabulado na Tabela abaixo.

Tabela 6: Resumo da Análise RUL

ANOMALIA DE PERDA DE PAREDE	PROFUNDIDADE ESTIMADA DE PERDA DA PAREDE (%)	RUL MÉDIO A 80% DA PERDA DA PAREDE DO TUBO (ANOS)	RUL MÉDIO PARA VAZAMENTO (ANOS)
1-D1	35	22	32
2-D2	50	15	25
2-D3	40	20	30
2-D4	50	15	25
3-D1	30	25	35
3-D2	25	27	37
3-D3	50	15	25
3-D4	35	22	32
4-D1	35	22	32
4-D2	50	15	25
4-D3	45	17	27

ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A partir da Avaliação de Corrosão de Nível 1, é determinado que nas condições operacionais atuais, com base nos defeitos de perda de parede existentes, a tubulação está segura para continuar operando. Considerando uma pressão

de pico de 100 psi no topo da pressão máxima de operação de 48,9 psi (total de 149 psi) e considerando um fator de segurança de dois (2); ainda assim, o emissário deve ser seguro para continuar operando.

Ao combinar a análise estrutural com os dados de inspeção, a vida útil restante do Emissário de Águas Residuais da Baía de Bazan pode ser estimada usando análise estatística. Se recomenda que as estimativas de *Remaining Useful Life* (RUL) sejam usadas como orientação para o planejamento do intervalo de reinspeção. Uma vez realizadas inspeções adicionais, os dados coletados em inspeções sucessivas podem ser analisados em conjunto com os dados apresentados neste relatório para fornecer uma avaliação RUL mais precisa e robusta. É importante notar que o modelo RUL é de natureza preditiva e, como tal, não é uma estimativa explícita do tempo exato até a falha.

As seguintes suposições foram usadas na análise RUL:

- As taxas de degradação são consideradas lineares ao longo da vida do tubo. A tendência de perda de parede pode ser reavaliada conforme os dados de inspeção futura são coletados.
- As taxas de degradação são consideradas uniformes em toda a tubulação, e a espessura mínima da parede até a espessura média da parede medida no campo é usada como base a partir da qual a taxa de degradação é calculada. As taxas de degradação foram estimadas a partir de informações sobre a espessura da parede do tubo em toda a faixa de inspeção.
- A espessura nominal da parede do tubo é considerada como sendo 9,5 milímetros, conforme indicado nos desenhos fornecidos. A espessura nominal é assumida para seguir uma distribuição normal com o desvio padrão como a tolerância de fabricação, uma vez que a espessura nominal pode variar devido às limitações dentro do processo de fabricação.
- RUL para perda de parede de 80% é definido como o tempo em que a parede do tubo atingiu 1,9 milímetros. 80% de perda de parede não indica falha estrutural iminente, mas que o tubo não atende mais aos padrões mínimos de projeto exigidos para suportar sua carga.
- RUL para vazamento é definido como o tempo em que a parede do tubo atingiu 0 milímetros.

Os resultados da análise RUL determinam que o Emissário de Águas Residuais da Baía de Bazan tem uma vida útil remanescente de 15 a 25 anos. Este cálculo assume que a proteção catódica de corrente impressa continuará a operar. O reparo proativo ou a reabilitação das anomalias de perda de parede com as maiores porcentagens de perda de parede podem estender a vida útil restante da tubulação.

O modelo RUL, junto com a análise estrutural, fornece uma visão sobre a probabilidade de falha do duto. Os resultados desta avaliação são baseados nos testes de espessura da parede do tubo e inferências estatísticas desses locais e não levam em consideração fatores imprevistos, como fabricação, instalação ou defeitos operacionais que podem levar à falha prematura do tubo.

A probabilidade de uma anomalia de perda de parede exceder 80% da perda de parede do tubo nos próximos 10, 20 e 30 anos está resumida na Tabela abaixo.

Tabela 7: Probabilidade de exceder 80% da perda da parede do tubo nos próximos 30 anos

ANOMALIA DE PERDA DE PAREDE	PROBABILIDADE DE EXCEDER 80% DA PERDA DA PAREDE DO TUBO EM 2028	PROBABILIDADE DE EXCEDER 80% DA PERDA DA PAREDE DO TUBO EM 2038	PROBABILIDADE DE EXCEDER 80% DA PERDA DA PAREDE DO TUBO EM 2048
1-D1	0%	45%	91%
2-D2	0%	91%	100%
2-D3	0%	54%	91%
2-D4	0%	91%	100%
3-D1	0%	37%	82%
3-D2	0%	0%	82%
3-D3	0%	91%	100%
3-D4	0%	45%	91%
4-D1	0%	45%	91%
4-D2	0%	91%	100%
4-D3	0%	82%	100%

A Tabela abaixo resume a probabilidade de falha devido a vazamento nos próximos 10, 20 e 30 anos, para cada anomalia de perda de parede.

Tabela 8: Probabilidade de falha devido a vazamento nos próximos 30 anos

ANOMALIA DE PERDA DE PAREDE	PROBABILIDADE DE FALHA DEVIDO A VAZAMENTOS EM 2028	PROBABILIDADE DE FALHA DEVIDO A VAZAMENTOS EM 2038	PROBABILIDADE DE FALHA DEVIDO A VAZAMENTOS EM 2048
1-D1	0%	0%	45%
2-D2	0%	37%	82%
2-D3	0%	0%	54%
2-D4	0%	37%	82%
3-D1	0%	0%	45%
3-D2	0%	0%	37%
3-D3	0%	37%	82%
3-D4	0%	0%	45%
4-D1	0%	0%	45%
4-D2	0%	37%	82%
4-D3	0%	0%	82%

Se observa que há vários fatores que influenciam a deterioração do duto e eventual falha. A intenção desta análise estatística não é avaliar cada um desses fatores, mas sim servir como uma ferramenta para a gestão futura do emissário. Nenhum dos métodos analíticos apresentados neste relatório pode garantir contra falha potencial do duto, mas visa reduzir o risco de tal ocorrência.

CONCLUSÕES/RECOMENDAÇÕES

Se concluiu uma inspeção interna abrangente, análise estrutural e análise estatística do emissário de águas residuais de *Bazan Bay*, de aço de 762 milímetros. A inspeção com **Robô de Inspeção Eletromagnética** localizou 11 áreas de perda de parede ao longo da tubulação. A avaliação de corrosão de Nível 1 determinou que é seguro continuar a operar o Emissário de Águas Residuais de *Bazan Bay* devido às anomalias de perda de parede detectadas durante a inspeção com o **Robô de Inspeção Eletromagnética**. Por último, uma análise estatística concluiu que o Emissário de Efluentes de *Bazan Bay*, tem uma vida útil remanescente de 15 a 25 anos.

Com base na inspeção e nas análises acima, se considera que o emissário de águas residuais avaliado está em boas condições. A fim de manter a condição e estender a vida útil do duto, nesse caso, se recomenda o seguinte:

- Sistema de proteção catódica: inspeção e teste do sistema de proteção catódica de corrente impressa.
- Gerenciamento do duto: Uma reinspeção da rede de transmissão e atualização da análise estrutural e estatística deve ocorrer dentro de 5 anos ou antes, se exigido pelos regulamentos.

A manutenção e as inspeções adequadas devem manter a condição e estender a vida útil do emissário.

Este trabalho cumpriu seu objetivo ao cobrir a metodologia de avaliação usada para determinar a condição do emissário, e sua expectativa de vida restante; bem como os resultados usados para informar se as seções ou todo do emissário exigiriam substituição ou reabilitação.

O **Robô de Inspeção Eletromagnética** de longo alcance se comprovou como uma excelente tecnologia para identificar áreas de corrosão e perda de parede do tubo de aço, especialmente quando a inspeção deve ser realizada em curto espaço de tempo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. American Water Works Association. "Tubo de aço - um guia para projeto e instalação". AWWA M11. 2017
2. KIEFNER AND ASSOCIATES, I. Avaliação de defeitos do duto - uma revisão e comparação dos métodos comumente usados. 1-238. 2011

3. CHAUHAN, V. E SWANKIE, T. “Orientação do Projeto # 153M para Avaliar a Resistência Restante de Dutos Corroídos”. Abril de 2012, 8 a 11 de julho.
4. CATES, WALTER H. “História da tubulação de água de aço, sua fabricação e desenvolvimento do projeto”. Abril de 1971.