



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

MARILIA GABRIELA ALVES DE ARRUDA
THIAGO VICTOR DA SILVA FERREIRA

ANÁLISE DE RISCO EM DUTOS CORROÍDOS ENTERRADOS

Recife

2022

MARILIA GABRIELA ALVES DE ARRUDA
THIAGO VICTOR DA SILVA FERREIRA

ANÁLISE DE RISCO EM DUTOS CORROIDOS ENTERRADOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos para obtenção de grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof. Dra. Juliana von Schmalz Torres

Coorientadora: Prof. Dra. Silvana Maria B. A. da Silva

Recife

2022

Catálogo na fonte
Bibliotecário Gabriel Luz CRB-4 / 2222

A779a Arruda, Marília Gabriela Alves de.
Análise de risco em dutos corroídos enterrados / Marília Gabriela Alves de Arruda, Thiago Victor da Silva Ferreira. 2022.
48 f.; fig., quads., símbolos.

Orientadora: Profa. Dra. Juliana Von Schmalz Torres.
Coorientadora: Silvana Maria Bastos Afonso da Silva
TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Recife, 2022.
Inclui referências e apêndice.

1. Engenharia civil. 2. análise de risco. 3. dutos corroídos enterrados. 4. confiabilidade estrutural. I. Torres, Juliana Von Schmalz (Orientadora). II. Silva, Silvana Maria Bastos Afonso da (Coorientadora). III. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG / 2022-250

MARILIA GABRIELA ALVES DE ARRUDA

THIAGO VICTOR DA SILVA FERREIRA

ANÁLISE DE RISCO EM DUTOS CORROÍDOS ENTERRADOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos para obtenção de grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovada em: 26/05/2022.

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Dr.^a Juliana Von Schmalz Torres (Orientadora)

Universidade Federal de Pernambuco

Prof.^a Dr.^a Silvana Maria B. A. da Silva (Coorientadora)

Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Renato de Siqueira Motta (Examinador interno)

Universidade Federal de Pernambuco

Msc. Paulo Fernando Silva Sousa (Examinador externo)

Universidade Federal de Pernambuco

RESUMO

O transporte de fluidos como petróleo e gás através de dutos corroídos apresenta riscos econômicos, humanos e ambientais. Este trabalho tem como objetivo fazer uma análise qualitativa e quantitativa desses riscos, com base na DNV-RP-G101 (2010). Para medi-los, é necessário analisar a probabilidade de falha por meio de métodos de confiabilidade estrutural, pois a probabilidade de falha funciona como indicador de segurança. Diferentes abordagens serão consideradas aqui como: FORM (First Order Reliability Method) e Monte Carlo (Crude), os métodos são implementados e comparados. São utilizados dados estatísticos de variáveis aleatórias como espessura, taxa de corrosão radial, pressão interna e profundidade do defeito. A função de falha é definida aqui pela diferença entre a pressão de falha e a pressão de atuação na tubulação. Para isso, a pressão de ruptura é calculada aplicando o método proposto pelas recomendações práticas da DNV-RP-F101 (2015). Com as probabilidades de falha em mãos, que são obtidas nos métodos de confiabilidade, é feita a análise de risco das tubulações corroídas enterradas. A programação é feita usando o software MatLab. Como forma de demonstrar a aplicabilidade da metodologia descrita, foi realizado um exemplo o qual trata-se de um duto corroído enterrado. Dessa forma, foi calculada as probabilidades de falha de maneira quantitativa e qualitativa para ambos os métodos de análise de confiabilidade estrutural, as consequências de falha e por fim, o risco estimado para um duto em estudo. Além disso, os resultados encontrados foram correlacionados em uma matriz de risco a fim de verificar o comportamento da corrosão ao longo do tempo.

Palavras-chave: análise de risco; dutos corroídos enterrados; confiabilidade estrutural.

ABSTRACT

The transport of fluids such as oil and gas through corroded pipelines poses economic, human and environmental risks. This work aims to make a qualitative and quantitative analysis of these risks, based on DNV-RP-G101 (2010). To measure them, it is necessary to analyze the probability of failure by means of structural reliability methods, as the probability of failure works as a safety indicator. Different approaches will be considered here such as: FORM (First Order Reliability Method) and Monte Carlo (Crude), the methods are implemented and compared. Statistical data of random variables such as thickness, radial corrosion rate, internal pressure and defect depth are used. The fault function is defined here by the difference between the fault pressure and the operating pressure in the pipeline. For this, the break up pressure is calculated by applying the method proposed by the practical recommendations of DNV-RP-F101 (2015). With the failure probabilities, which are obtained in the reliability methods, the risk analysis of the buried corroded pipelines is carried out. Programming is done using MatLab software. As a way of demonstrating the applicability of the described methodology, an example was made in which it is a buried corroded pipeline. This way, the failure probabilities were calculated quantitatively and qualitatively for both methods of structural reliability analysis, the consequences of failure and, finally, the estimated risk for a pipeline under study. In addition, the results found were correlated in a risk matrix in order to verify the corrosion behavior over time.

Keywords: risk analysis; buried corroded pipelines; structural reliability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Curva da superfície de falha	17
Figura 2 - Aproximação do defeito irregular	19
Figura 3 - Características físicas da corrosão	20
Figura 4 - Aproximação pelo FORM para superfícies concavas e convexas	24
Figura 5 - Fluxograma de risco.....	30
Figura 6 - Profundidade de corrosão esperada do duto	32
Figura 7 - Comprimento de corrosão esperada do duto	33
Figura 8 - Índice de confiabilidade em relação ao tempo.....	34
Figura 9 - Comparação das probabilidades de falha para FORM e Monte Carlo.	35
Figura 10 - Taxa de vazamento esperada	38
Figura 11 - Consequências de falha totais estimada.....	41
Figura 12 - Risco estimado para FORM e Monte Carlo.....	42

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 -	Combinações de cargas.....	22
Quadro 2 -	Exemplo de matriz de risco.....	29
Quadro 3 -	Paramentos do duto corroído	31
Quadro 4 -	Fatores de importância	34
Quadro 5 -	Escala recomendada de probabilidade	36
Quadro 6 -	Descrição da análise qualitativa por FORM	36
Quadro 7 -	Descrição da análise qualitativa por Monte Carlo.	37
Quadro 8 -	Matriz de risco adotada.....	38
Quadro 9 -	Comportamento do risco em relação as consequências de falha à segurança humana para FORM e Monte Carlo.....	39
Quadro 10 -	Comportamento do risco em relação as consequências de falha ao meio ambiente para FORM e Monte Carlo.....	39
Quadro 11 -	Comportamento do risco em relação as consequências de falha econômicas para FORM e Monte Carlo.	40
Quadro 12 -	Resumo dos anos críticos para FORM e Monte Carlo	42

LISTA DE SÍMBOLOS

MC	Monte Carlo;
FORM	<i>First Order Reliability Method</i> ;
$g(u)$	função de falha;
β	índice de confiabilidade;
R	variável aleatória de resistência;
S	variável aleatória de solicitante;
σ_{rup}	tensão de ruptura;
σ_{flow}	tensão de fluência;
σ_y	tensão de escoamento do material;
σ_u	tensão última;
σ_{circ}	tensão circunferencial do duto;
f_r	fator de redução;
α	fator empírico que leva em conta a geometria do defeito;
A_0	área longitudinal do duto sem corrosão;
A	área longitudinal do defeito;
M	fator de dilatação de Folias;
a	comprimento de corrosão;
t	espessura da parede do duto;
d	profundidade do defeito;
D	diâmetro do duto;
P_{of}	probabilidade de falha;
P_f	pressão de falha;
P_a	pressão admissível;
F_d	fator de segurança;
F_m	fator de modelagem;
P_{int}	pressão interna;
P_{ext}	pressão externa;
EL	carga do solo;
LL	cargas vivas;
IL	cargas de impacto;

H	coluna de solo acima do duto;
w	peso específico do solo;
n	número de amostras no Monte Carlo;
ρ	densidade do fluido;
Q	taxa de vazamento;
C_d	coeficiente de descarga;
C_{ma}	custo de meio ambiente;
V_p	volume de vazamento;
C_{lp}	custo de limpeza;
C_{pp}	custo de petróleo perdido;
C_{pd}	custo de produção deferida;
C_{pet}	custo do barril de petróleo;
C_{rp}	custo de reparo;
C_{eco}	consequências econômicas;
C_{of}	consequência de falha;
d_0	profundidade inicial do defeito;
d_{rate}	taxa de corrosão radial;
α_x	coeficiente de sensibilidade;
σ	desvio padrão

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
1.1	JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO	12
1.2	OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS	13
2	REFERENCIAL TEÓRICO	14
3	MÉTODOS.....	17
3.1	PROBABILIDADE DE FALHA	17
3.1.1	Confiabilidade estrutural	17
3.1.2	Pressão de falha.....	18
3.1.3	Esforços solicitantes	21
3.1.4	Método analítico FORM	23
3.1.5	Simulação de Monte Carlo.....	24
3.2	CONSEQUÊNCIAS DE FALHA	25
3.2.1	Consequências humanas	25
3.2.2	Consequências ambientais	25
3.2.3	Consequências econômicas	26
3.2.4	Consequências total de falha.....	26
3.3	ANÁLISE DO RISCO.....	27
3.3.1	Matriz de risco	28
4	EXEMPLO, RESULTADOS E DISCUSSÕES	30
4.1	DADOS DO PROBLEMA	31
4.2	PROFUNDIDADE E COMPRIMENTO DE CORROSÃO	31
4.3	PROBABILIDADE DE FALHA	33
4.3.1	Análise quantitativa.....	33
4.3.2	Análise qualitativa	35
4.4	CONSEQUÊNCIAS DE FALHA	37
4.4.1	Taxa de vazamento esperada	37
4.4.2	Tipos de consequências e seus riscos	38
4.4.3	Consequências de falha totais estimadas	40
4.5	ANÁLISE DE RISCO TOTAL	41
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	43

5.1	CONCLUSÕES	43
5.2	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	44
	REFERÊNCIAS.....	45

1 INTRODUÇÃO

A utilização de dutos para transporte de óleo e gás aumentou consideravelmente nas últimas décadas, principalmente por se mostrar o meio de transporte mais seguro e econômico dessas substâncias. Porém, de acordo com o meio onde está alocado e principalmente com a idade avançada das tubulações, os dutos apresentam falhas devido a corrosão, que é a segunda maior causa de colapsos, ficando atrás apenas de falhas causadas por fatores externos, como má operação e queda de objetos (DILAY, 2001). Segundo Pinto (2007), a corrosão dos dutos e interferências externas constituem as maiores causas de danos e falhas no transporte de óleo e gás.

A análise estrutural dos dutos tem sua relevância devido ao fato de que uma falha presente nessas tubulações pode ocasionar uma série de danos. Somado a isso, o fenômeno mais crítico para o meio ambiente é a contaminação dos solos e das águas causados pela falha de dutos sujeitos à corrosão (PINTO, 2007).

A corrosão é um tipo de falha que varia de acordo com o tempo, a qual se inicia na parede externa do duto e gradativamente vai aumentando a ponto que a sua parede tenha uma perda significativa, chegando a ocorrer até um vazamento. Mas, este não é o único e nem o pior tipo de dano que pode ser provocado pela corrosão. À medida que ocorre o aumento das dimensões do defeito a integridade do duto vai sendo afetada, podendo provocar um rompimento brusco da tubulação.

Dessa maneira, buscou-se analisar os riscos de vazamento em tubulações enterradas sujeitas a corrosão. Para isto se faz necessário a determinação dos valores de probabilidade de falha e consequências de falha, pois o risco é obtido através do produto entre elas.

A obtenção dos dados de probabilidade de falha foi feita por meio do estudo da confiabilidade estrutural, através da aplicação dos métodos FORM e Monte Carlo. Porém, para dar início a tal estudo, se faz necessário o conhecimento da pressão de falha, a qual será definida de acordo com as equações propostas pelo manual de recomendações prático, o DNV-RP-F101 (2015), que foi produzido em uma colaboração entre a fundação BG Technology e a DNV (Det Norske Veritas).

O segundo parâmetro de total importância para a obtenção do risco é a consequência de falha, na qual foram levados em consideração os custos provocados pelo vazamento de dutos, referentes ao meio ambiente, a economia e aos seres humanos. Para sua determinação usou-se

o manual prático DNV-RP-G101 (2010), que também foi usado para fazer a análise qualitativa e quantitativa do custo de falha, ou seja, do risco.

A análise do risco em dutos enterrados corroídos foi feita de maneira qualitativa, em termos de grau de gravidade e de forma quantitativa, a fim de determinar o risco em termos monetários. Desta forma, baseado em um limite já pré-definido pelas empresas operacionais (ALJAROUDI, 2015), encontrar qual o ano crítico para a falha de tubulações quando se utiliza o método FORM e o método de simulação de Monte Carlo, visando compará-los e saber o grau de conservadorismo de cada um.

1.1 JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO

Estruturas e equipamentos metálicos são atacados naturalmente por um fenômeno conhecido como corrosão, um dos principais fatores que levam a falhas em redes dutoviárias (VALENTINI, 2006). Com o crescimento das malhas dutoviárias, se faz necessário estudar os riscos de colapso por corrosão nas tubulações, visto que, a maioria dos fluidos transportados podem trazer diversos problemas quando há deterioração nos condutos, gerando danos econômicos, ambientais ou até mesmo perda de vidas humanas ou lesões nas pessoas.

Pensando na integridade estrutural dos dutos e nos problemas gerados por falhas devido à perda de resistência mecânica à corrosão, a análise será feita visando prever quais os custos que serão provocados pela falha da tubulação corroída e encontrar quais os anos críticos em termo de falha quando se aplica os métodos de confiabilidade estrutural, FORM ou Monte Carlo.

Segundo Valentini (2006), uma das consequências provocadas nos dutos sujeitos a corrosão é uma operação custosa e muito complexa, pois importante ter conhecimento do grau de risco quantitativo para que as empresas operacionais possam, de maneira antecipada, prever quando o colapso pode acontecer e quanto será o custo associado.

Em condições práticas, os dutos estão localizados em regiões de difícil acesso, estando sujeitos muitas vezes, à influência de movimentações do terreno, especialmente quando se encontram enterrados (VALENTINI, 2006, p. 21). Dessa forma, se faz necessário fazer uma análise minuciosa levando em consideração fenômenos que possam comprometer a funcionalidade e/ou integridade dos dutos, pois as consequências de suas falhas podem ser graves ou até mesmo irreversíveis.

Esse trabalho fornece o risco em valor monetário, para ser feita a previsão dos custos de um possível futuro dano financeiro, caso o duto entre em colapso, e como também do seu grau de gravidade. Tais informações são de grande importância para as empresas de operação pois permitem que a partir da consideração em projeto de um risco alvo para as suas tubulações seja determinado o ano crítico de falha e associar a isto um custo monetário, tornando-se possível fazer a alocação de recursos financeiros previamente.

1.2 OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS

Esse trabalho tem por finalidade analisar os riscos humanos, ambientais e econômicos provocados pela corrosão em tubulações enterradas responsáveis pelo transporte de fluidos, de forma quantitativa e qualitativa, visando encontrar os anos críticos referentes a falha da tubulação, a partir do uso de análises de confiabilidade estrutural.

Como objetivos específicos pode-se listar:

- Utilizar os métodos empíricos para cálculo da pressão de falha apresentados no manual prático de recomendações, a DNV-RP-F101 (2015) para aplicação em estudo de caso;
- Realizar a análise de confiabilidade através dos métodos de FORM e Monte Carlo para encontrar a probabilidade de falha;
- Levantar os custos das consequências de falha provocados pelo vazamento em tubulações enterradas corroídas aplicando o manual prático DNV-RP-G101(2010);
- Quantificar e qualificar o risco de falha associado a um estudo de caso em duto enterrado submetido à corrosão de acordo com a DNV-RP-G101(2010);
- Comparar os níveis de risco obtidos pelas diferentes consequências de falha e determinar o risco esperado, de acordo com seus respectivos valores alvos especificados em projeto para um estudo de caso;
- Localizar e comparar os anos críticos de falha associados a probabilidade de falha, consequências de falha e risco esperado, utilizando os métodos de confiabilidade estrutural de FORM e Monte Carlo;

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Há décadas, o meio mais econômico para o transporte de óleo e gás se dá através de dutos. Entretanto, com o avanço da idade dos tubos, uma grande preocupação para a segurança é o efeito da corrosão nos mesmos. Segundo Ramanathan (2004), a corrosão é um fenômeno onde ocorre uma reação do metal com elementos em seu meio transformando-o em não metálico. Nestes pontos corroídos, o material sofre uma série de problemas como a perda de resistência e da elasticidade.

Como os óleos e gases transportados dentro dos dutos são extremamente inflamáveis, a operação dos mesmos deve ser feita com bastante cuidado, pois este transporte apresenta riscos associados à economia e à vida. Adicionalmente, a contaminação dos solos e das águas devido à falha de dutos é o fenômeno mais crítico contra a preservação do meio ambiente (PINTO, 2007). Segundo Valentini (2006), quando ocorre a perda de resistência numa tubulação devido a corrosão deve-se usar métodos analíticos semiempíricos, como o DNV-RP-F101, para analisar o que deve ser feito em relação a este problema, pois são práticos e podem ser utilizados diretamente em campo.

Para determinar a segurança dos oleodutos estuda-se a probabilidade de falha através da confiabilidade estrutural, que é uma ferramenta que permite considerar as incertezas inerentes a variáveis de projeto (SAGRILO, 1994). A confiabilidade estrutural é baseada em conceitos de probabilidade que buscam avaliar o índice de confiabilidade. O conceito de confiabilidade estrutural foi aprimorado por Ang e Tang (1984) e Melchers (1987).

Ahammed e Melchers (1996) trouxeram uma metodologia para analisar oleodutos pressurizados para determinar o índice de confiabilidade através do FORM. Em sequência, Ahammed (1998) estudou a vida residual de dutos com defeitos de corrosão utilizando o FORM. Torres (2007) apresentou uma metodologia para análise probabilística aplicada a dutos com corrosão, mostrando comparações entre os métodos FORM e Monte Carlo. Pinto (2007) trouxe uma avaliação numérica para cálculo de pressão de ruptura para diversos métodos de determinação da pressão de falha do duto, incluindo o DNV-RP-F101 (2015). Na mesma linha de pesquisa, Vanhazebrouck (2008) apresentou uma análise de confiabilidade estrutural aplicados a duto corroídos.

Em posse das probabilidades de falhas advindas dos métodos de confiabilidade estrutural, pode-se definir os riscos. Beck (2012) define risco como o produto entre a probabilidade de

ocorrência de um evento e as consequências deste evento. Aljaroudi (2015) apresentou uma análise que mostra que o risco envolvido para um determinado duto é o somatório dos riscos associados a ele, anualmente. De acordo com Seo *et al.* (2015), cada empresa operacional precisa estabelecer um critério de risco alvo para assim determinar os anos críticos de falha. Estes critérios ajudam a analisar o que deve ser feito para dutos que apresentem problemas. O manual técnico DNV RP G-101 (2010) apresenta os métodos e fórmulas para calcular os riscos, ou seja, o custo esperado de falhas de dutos.

Nos últimos dez anos, a corrosão encontra-se como uma das principais causas de incidentes em dutos na Europa, apresentando uma mesma taxa, de 27% de frequência que a interferência externa (EGIG,2020). Segundo Andresen e Misund (1993), na liderança das falhas no duto estão as falhas por deterioração do duto, com 29%, seguido de falhas relacionadas a erro de operação, a qual apresenta uma taxa igual a falha por interferência de terceiros ambas com 27%.

A corrosão é responsável por dois tipos de vazamento no duto, o vazamento que ocorre quando a profundidade da corrosão se iguala a espessura da parede e o de ruptura que ocorre quando a pressão interna extrapola a pressão máxima permitida no ponto corroído, sendo essa a forma de vazamento mais crítica.

Risco é a probabilidade de insucesso em função de um determinado evento, cuja ocorrência não seja intencional. De acordo com Beck (2012), na análise de risco em engenharia, os eventos do tipo falhas são: falha em atender a função para a qual o sistema foi projetado, falha em atender a esta função com a eficiência desejada ou falha que leva a um acidente. De maneira geral, a falha tem por definição ser um evento no qual um sistema não funciona de acordo com seus requisitos operacionais (ISO/TS 12747, 2011).

Nesse trabalho o risco é fornecido em valor monetário a fim de prever, quantificar e qualificar um futuro dano financeiro caso o duto venha a falhar. Nele é feita a combinação da probabilidade de falha e suas consequências. Tais conhecimentos são de grande importância para as empresas de operação, pois de maneira prévia poderá ser feita a alocação de recursos financeiros.

Para ser possível estimar o risco é necessário o conhecimento da probabilidade de falha e das consequências de falha referentes a cada ocorrência. Os riscos para o sistema serão analisados tanto de forma quantitativa quanto qualitativa. Dessa maneira, estima-se o dano que poderá ser causado socialmente, economicamente e para o meio ambiente.

Nessa análise, inicialmente é feita, de maneira estatística, a determinação das probabilidades de falha para o duto enterrado corroído, posteriormente determina-se as consequências de falha, nas quais estão inclusas as consequências socioeconômicas e ambientais. Com isso, torna-se possível determinar os respectivos níveis de risco e avaliá-los. A fim demonstrar sua aplicação, foi apresentada a análise em um caso de duto corroído enterrado, que será apresentado na seção 4.

3 MÉTODOS

Nesse tópico será apresentado a metodologia para a elaboração do trabalho.

3.1 PROBABILIDADE DE FALHA

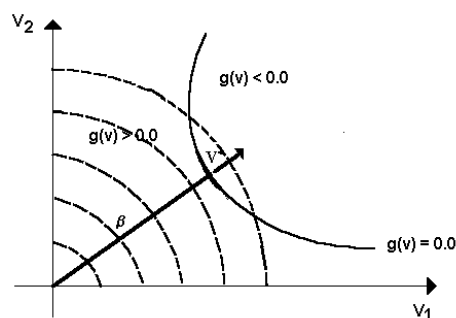
A corrosão varia de acordo com o tempo, no qual se inicia na parede externa do duto e de maneira gradativa avança até que, em certo momento, consuma toda a espessura da parede provocando um vazamento. Porém, antes mesmo de ocorrer a completa corrosão, já existe uma ameaça pois, ocasionalmente, devido a fraqueza do material no ponto corroído pode ocorrer uma ruptura repentina. Dessa forma, é de total importância a análise dos anos críticos e das probabilidades de falha.

3.1.1 Confiabilidade estrutural

A confiabilidade estrutural (SAGRILLO, 1994) é uma avaliação da segurança de um sistema, ou seja, ela estima a probabilidade de colapso em sua vida útil. A confiabilidade é definida como um complemento da probabilidade de falha que são as chances desse sistema ruir. Como essa probabilidade de falha é muito pequena para estruturas, é comum o uso da confiabilidade para medir o nível de segurança.

A análise de confiabilidade estrutural é baseada na existência de uma função de falha $g(\mathbf{V})$ a qual, representa o estado limite, sendo \mathbf{V} as variáveis aleatórias (VANHAZEBROUCK, 2008). A função de estado limite deverá ser definida no limite onde $g(\mathbf{V})$ seja igual a zero, ou seja, quando estiver na eminência de romper. De maneira geral, esse limite separará as zonas de risco (domínio de falha) onde $g(\mathbf{V}) < 0$ e locais seguros onde $g(\mathbf{V}) > 0$, como mostrado na figura 1 abaixo. Quando a função $g(\mathbf{V}) = 0$ significa que o duto está na eminência de falhar.

Figura 1 - Curva da superfície de falha



Fonte: Sagrillo (1994)

Dessa forma, é necessário definir qual a probabilidade de falha, ou seja, qual a probabilidade de a função de falha apresentar valores dentro do domínio de falha ($g(\mathbf{V}) < 0$). Assim, a função falha é definida da seguinte maneira:

$$g(v) = Z = R - S \quad (1)$$

onde R é a variável aleatória de resistência e S representa a variável aleatória de solicitação. Para determinar a resistência do oleoduto é preciso definir a pressão de falha.

3.1.2 Pressão de falha

A pressão atuante no duto que causa a sua ruptura é chamada de pressão de falha. Para fazer a análise de risco em dutos com defeitos de corrosão, inicialmente é necessário definir a pressão de falha, para compor a função de falha que será aplicada na análise de confiabilidade. Para isso é aqui utilizado o método semiempírico da DNV RP-F101 (2015), uma recomendação prática para a avaliação de dutos com corrosão baseada em experimentos laboratoriais usando o método dos elementos finitos desenvolvida pela organização norueguesa Det Norske Veritas.

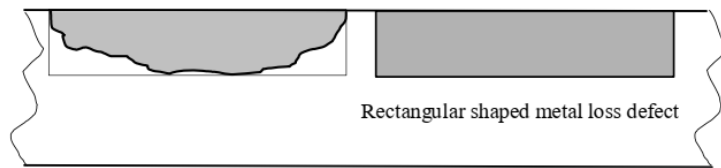
Esta norma pode ser aplicada para dutos corroídos com carregamento de pressão interna para defeito único ou múltiplos defeitos e para carregamento por pressão interna combinado com tensões compressivas longitudinais para defeitos únicos, que é o caso de dutos enterrados. No caso de múltiplos defeitos, o DNV-RP-F101 (2015) apresenta um método na seção 5 para este tipo de análise. Entretanto, a norma não se aplica para as seguintes situações:

- Profundidade do defeito maior que 85% da espessura do duto.
- Tubulações que não sejam de aço carbono.
- Corrosão combinada com danos mecânicos.
- Perda de metal por danos mecânicos.
- Fabricação com defeito de soldagem.
- Carregamentos cíclicos e defeitos como trinca.

A escolha do método da DNV RP-F101 foi definida pois apresenta resultados mais realistas dentre os métodos estudados pela referência adotada. (VANHAZEBROUCK, 2008).

Para aplicação do método da DNV RP-F101, a programação foi realizada através do *software* MatLab (2016). Destaca-se que são consideradas simplificações na geometria do defeito. Os defeitos de corrosão são de formas irregulares, muito parecidos com uma parábola. A norma realiza a aproximação dessas irregularidades por um defeito retangular que é o caso mais crítico. Desta forma, a pressão de falha é subestimada fazendo a situação de análise ser a favor da segurança (SILVA, 2016).

Figura 2 - Aproximação do defeito irregular



Fonte - DNV (2015).

O método semiempírico que será apresentado a seguir toma como base a equação básica NG-18 *Surface Flaw Equation*, (VANHAZEBROUCK, 2008) que é dada por:

$$\sigma_{rup} = \sigma_{flow} \cdot f_r \quad (2)$$

onde σ_{rup} é a tensão de ruptura do material do duto, σ_{flow} é a tensão de fluência no material do duto e f_r é o fator de redução.

A tensão de fluência no material (σ_{flow}) é relacionada com a tensão de escoamento do material (σ_y). Para o método da DNV-RP-F101 (2015) a relação é dada por:

$$\sigma_{flow} = \sigma_u \quad (3)$$

onde σ_u é a tensão última do material do duto.

O fator de redução (f_r) é expresso da seguinte maneira:

$$f_r = \left[\frac{1 - \alpha \left(\frac{A}{A_0} \right)}{1 - \alpha \left(\frac{A}{A_0} \right) M^{-1}} \right] \quad (4)$$

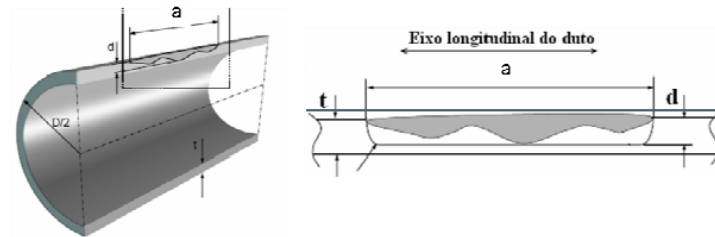
Sendo:

$$A_0 = a \cdot t \quad (5)$$

$$A = a \cdot d \quad (6)$$

onde α é um fator empírico, M é o fator de dilatação de Folias (que leva em conta o comprimento da corrosão e é adimensional), a é o comprimento de corrosão. t é a espessura da parede do duto e d é a profundidade da corrosão.

Figura 3 - Características físicas da corrosão



Fonte – VANHAZEBROUCK (2008).

Temos que a tensão circunferencial do duto é expressa por:

$$\sigma_{circ} = P_f \cdot \left(\frac{D}{2t} \right) \quad (7)$$

sendo D o diâmetro do duto. Quando se avalia no estado limite a $\sigma_{circ} = \sigma_{rup}$ e P é a pressão de falha (P_f). Substituindo as equações anteriores, temos:

$$P_f = \frac{2t}{D} \cdot \sigma_{rup} = \left(2 \frac{t}{D} \right) \cdot \left[\frac{1 - \alpha \left(\frac{d}{t} \right)}{1 - \alpha \left(\frac{d}{t} \right) \cdot M^{-1}} \right] \cdot \sigma_{flow} \quad (8)$$

No método da DNV-RP-F101, o fator $\alpha = 1$ e $\sigma_{flow} = \sigma_U$ como já visto antes. Já o fator de Folias pode ser definido como:

$$M = \sqrt{\left[1 + 0,31 \frac{a^2}{Dt} \right]} \quad (9)$$

Com isso, para este método, pode-se definir a pressão de falha como:

$$P_f = \frac{\sigma_u 2t}{D-t} * \left[\frac{1 - \frac{d}{t}}{1 - \frac{d}{t} M^{-1}} \right] \quad (10)$$

Tratando-se de estado limite, deve-se sempre trabalhar com coeficientes de segurança. Com isso, a pressão de operação admissível (P_a) pode ser definida como:

$$P_a = F_d * P_f \quad (11)$$

com $P_a < \frac{2t\sigma_{flow}}{D}$.

Em especial, o método da norma DNV-RP-F101 (2015), conta sempre com o fator de modelagem $F_m = 0,9$ agindo como fator de segurança. Neste caso, a pressão de operação admissível é dada por:

$$P_a = F_m P_f \quad (12)$$

3.1.3 Esforços solicitantes

Para estudar a função de falha, além de conhecer a resistência do duto, é necessário analisar os esforços solicitantes na tubulação. A carga solicitante é composta pela pressão interna do fluido e pelas solicitações de cargas que agem de forma externa (ASTM A796/A796M-21). Então, define-se a solicitante (S) como:

$$S = P_{int} + P_{ext} \quad (13)$$

A pressão interna é um dado de projeto definido para o estado limite de serviço ou para atender a necessidade de distribuição do fluido de acordo com o desejado em projeto. Este valor varia de projeto a projeto.

A pressão externa para dutos enterrados é composta pela carga do solo acima do duto (**EL**), pelas cargas vivas (**LL**) e pelas cargas de impacto (**IL**). As cargas são aplicadas como uma pressão do fluido agindo no entorno do duto (ASTM A796/A796M-21). Estas cargas agem como tensões compressivas longitudinais.

A carga do solo é determinada através da coluna de solo acima do duto e o peso do solo. Por estar enterrado, a condição de contorno do duto é considerada uma situação restrita (AFONSO *et al.*, 2020), não havendo momento fletor envolvido, apenas a pressão vertical, que é o peso da coluna de solo acima do duto agindo como carga externa. A pressão vertical do solo pode ser definida como:

$$(EL) = H * w \quad (14)$$

Onde H é a coluna de solo [m] acima do duto e w o peso específico do solo [kN/m³].

As cargas vivas são os pesos de veículos, trens e aeronaves passando acima dos dutos e é distribuído através do solo para os dutos. As cargas de impacto, que são os impactos causados pelo tráfego em movimento, são utilizadas para tubulações com baixa altura de cobrimento de solo. Este cobrimento é a profundidade da camada de terra que está acima da tubulação. De acordo com a ASTM A796/A796M (2021) as combinações de (LL) + (IL) para dutos abaixo de rodovias são definidas de acordo com a altura de cobrimento, como mostrado no *Quadro 1*.

Quadro 1 - Combinações de cargas

ALTURA DE COBRIMENTO [m]	CARGA VIVA [kPa]
0,30	86,2
0,61	38,3
0,91	28,7
1,22	19,2
1,52	12,0
1,83	9,6
2,13	8,4
2,44	4,8

Fonte – ASTM A796/A796M – 21 (modificado).

3.1.4 Método analítico FORM

A probabilidade de falha é fundamental para analisar a segurança de estruturas. Para calculá-la existem alguns métodos conhecidos, dentre eles o método analítico FORM (*First Order Reliability Method*) e os métodos baseados na simulação de Monte Carlo. De acordo com o DNV-RP-F101 (2015), uma probabilidade de falha para ser considerada normal é na faixa de 10^{-4} para o estado limite último do material.

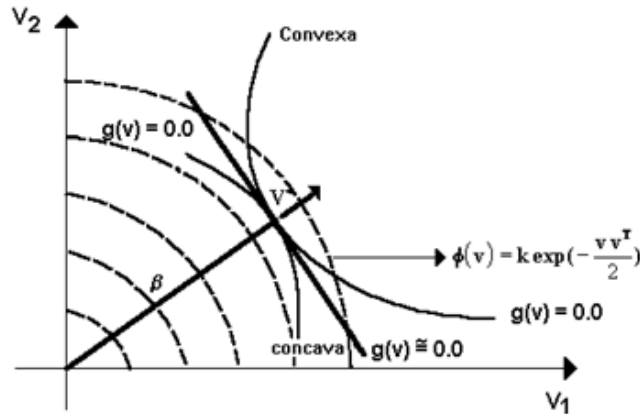
Segundo Sagrilo (1994), no FORM (método de confiabilidade de primeira ordem) as variáveis que possuem informações estatísticas são transformadas em variáveis normais padrão independentes e a função de falha é escrita no espaço das variáveis reduzidas com média zero e desvio padrão unitário. A escolha das variáveis para o problema pode ser definida a partir de um estudo de sensibilidade do problema (AHAMMED, 1998). O estudo de sensibilidade é uma análise para saber quais variáveis aleatórias mais influenciam no problema, principalmente em relação ao tempo. Um dos objetivos do método é encontrar o ponto de projeto, ou seja, o ponto onde a probabilidade de falha seja maior. Esse ponto caracteriza-se por ter o menor índice de confiabilidade (distância do ponto da superfície de falha à origem) como se encontra na *Figura 4*.

Para obter o ponto de projeto, resolve-se um problema de programação não-linear. O objetivo desse método é transformar as variáveis em variáveis normais padrão, ou seja, média zero e desvio padrão unitário usando as distribuições normais equivalentes.

Sabendo-se que a probabilidade de falha pelo método FORM é calculada de forma aproximada, pode-se obter uma aproximação tanto a favor da segurança quanto contra segurança, dependendo da forma que a função $g(\mathbf{v})$ esteja no espaço. Como por exemplo na *Figura 4* tem-se uma aproximação linear equivalente da função de falha, tanto para uma curva côncava quanto para a convexa e dessa forma observa-se que, se for convexa em torno no ponto de projeto, a aproximação será a favor da segurança, diferentemente de o que acontece na curva côncava.

Vale ressaltar que, a função $g(\mathbf{V})$ representa a superfície de falha, ou seja, onde a diferença entre as variáveis aleatórias resistentes e os solicitantes é igual a zero. A distância entre a origem e o ponto de projeto é chamada de índice de confiabilidade (β). Esse índice é definido para o estado de limite último da estrutura, que está associado a uma probabilidade de falha. (JCSS, 2001).

Figura 4 - Aproximação pelo FORM para superfícies concavas e convexas



Fonte – SAGRILO (1994).

3.1.5 Simulação de Monte Carlo

Segundo Vanhazebrouck (2008), a simulação de Monte Carlo é uma técnica na qual é feita uma quantidade pré-definida de simulações com o objetivo de obter pontos que simulem as variáveis aleatórias no espaço normal padrão. No contexto da análise de confiabilidade, a finalidade é saber a quantidade de vezes que os pontos gerados aleatoriamente estão dentro da região de falha, dentre todas as simulações realizadas. De maneira mais simples, esse método possibilita testes com uma grande quantidade de diferentes variáveis aleatórias para oferecer, com mais precisão, os resultados da probabilidade de falha. Assim como no FORM, para definir as variáveis aleatórias do problema, pode ser aplicado um teste de sensibilidade, através do cálculo do fator de importância.

Uma vantagem desse método é a robustez e a simplicidade (OLIVEIRA, 2022). Entretanto, este método possui alto custo computacional, devido a necessidade de uma amostragem muito grande, geralmente maior que 10^5 . Com isto, a análise por esse método é mais lenta do que pelo FORM.

De maneira geral, a simulação de Monte Carlo substitui a integração numérica por uma estimativa da probabilidade de falha. Assim, esse método é considerado um método probabilístico o qual produz uma elevada quantidade de amostras para que um conjunto de simulações que mostrem resultados precisos.

A probabilidade de falha utilizada no método de Monte Carlo é:

$$Pf = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I\{G(U) \leq 0\} \quad (15)$$

onde n é o número de amostras, I é a função indicadora onde $I\{G(U) \leq 0\} = 1$ e $I\{G(U) > 0\} = 0$. A ideia deste método é substituir uma grande integração numérica por um estimador de probabilidade de falha (VANHAZEBROUCK, 2008).

3.2 CONSEQUÊNCIAS DE FALHA

As consequências de falha nos dutos abrangem as consequências tanto ambientais quando socioeconômicas dadas em valor monetário. Na situação de mais de um evento de falha, segundo Faber (2007), o risco será a soma dos riscos individuais associados as probabilidades e consequências de falha para cada evento. Para mensura-lo é usada a recomendação prática DNV-RP-G101(2010).

Esses tipos de consequências que devem ser levadas em consideração para ser feita a análise qualitativa e quantitativa do risco. Recomenda-se que essas análises sejam feitas de maneira individual de acordo com o tipo de consequência.

3.2.1 Consequências humanas

As consequências relacionadas à segurança das pessoas são determinadas de acordo com o grau de inflamabilidade, no caso dos não-inflamáveis tais consequências são analisadas a partir da concentração de sulfeto de hidrogênio, tempo de exposição e concentração restante de oxigênio no ar. Outro ponto importante é a necessidade de conhecer da taxa de vazamento (DNV-RP-G101,2010):

$$Q = A * C_d * \sqrt{2\rho(P_{int} - P_{ext})} \quad (16)$$

Onde Q está expresso em kg/s; A é a área da seção transversal da abertura (m^2); C_d é o coeficiente de descarga e ρ é a densidade do líquido (kg/m^3), os quais de acordo com a DNV-RP-G101 são 0,61 e $850kg/m^3$, respectivamente; e P_{int} e P_{ext} são as pressões internas e externas em N/m^2 .

3.2.2 Consequências ambientais

Para calcular as consequências ambientais deve-se ter o conhecimento do volume de óleo perdido, o custo de limpeza e o custo do petróleo que foi vazado. De maneira conservadora, pode ser considerado que todo o óleo que vazou foi perdido, ou seja, sem reaproveitamento ou

contenção. Em unidades monetárias por unidade de volume, a consequência de custo para o meio ambiente é dada por (DNV-RP-G101, 2010):

$$C_{ma} = V_p * (C_{LP} + C_{PP}) \quad (17)$$

Onde C_{ma} é o custo de meio ambiente (\$), V_p é o volume de vazamento (m^3); C_{LP} é o custo de limpeza (\$/ m^3) e C_{PP} é o custo de petróleo perdido (\$/ m^3).

3.2.3 Consequências econômicas

As consequências econômicas englobam o custo de produção diferida e o custo de reparo. Para o custo da produção diferida é levado em consideração o valor da produção por hora multiplicada pelo número de horas a uma taxa de produção reduzida, usando a seguinte equação:

$$C_{pd} = Q_{pd} * C_{pet} * T_{pd} \quad (18)$$

Onde C_{pd} é o custo de produção diferida (\$); Q_{pd} é a produção deferida (barril/h); C_{pet} é o custo do barril de petróleo; e T_{pd} é p tempo de produção deferida.

Em relação aos custos de reparo (C_{rp}), diversas vezes estão limitados a tubulação com falha ou equipamentos localizados em sua redondeza, assim, esses custos serão bem menores que os custos de produção deferida. Os custos de reparo/substituição em termos de produção diferida englobarão os custos de material, mão de obra, mobilização, equipamentos, serviços e limpeza os quais podem ser estimados em termo de valor monetário.

Dessa maneira, torna-se possível quantificar as consequências econômicas C_{eco} em termos financeiros, da seguinte maneira:

$$C_{eco} = C_{pd} + C_{rp} \quad (19)$$

3.2.4 Consequências total de falha

As consequências totais de falha (C_{0f}) abrangem todos os tipos de consequências citadas anteriormente. Dessa maneira, soma-se todas as consequências.

$$C_{of} = C_{eco} + C_{ma} \quad (20)$$

Porém, para estimar seu valor dos próximos anos, se faz necessário aplicar uma taxa de juros i e uma taxa de inflação I (Ayyub, 2014). Dessa forma, para fazer a estimativa da consequência de falha no tempo T usa-se:

$$C_{of}(T) = [C_{eco}(T) + C_{ma}(T)] * \left(\frac{1+i}{1+I}\right)^T \quad (21)$$

Onde $C_{of}(T)$ é a consequência total de falha no tempo T .

3.3 ANÁLISE DO RISCO

O risco é o produto entre a probabilidade de falha e a consequência de falha.

$$Risco(T) = P_{of}(T) * C_{of}(T) \quad (22)$$

Para a determinação dos anos críticos de risco de falha se faz necessário o conhecimento das probabilidades e consequências de falha. A variação da probabilidade de falha e das consequências de falhas se dá pelo crescimento da corrosão no decorrer dos anos. Aplica-se uma taxa anual de corrosão radial e longitudinal na profundidade de corrosão e ao comprimento da corrosão, respectivamente.

A profundidade de corrosão é limitada, pois ela não pode ser maior que a espessura da parede do duto, ou seja, sua máxima corrosão se dá por essa espessura. Porém, de acordo com a DNV-RP-F101 (2015), a profundidade de corrosão não pode ultrapassar um limite de 85% do valor da espessura do duto, pois, a integridade do local do duto onde está localizada a corrosão ficará comprometida e, mesmo que não ocorra o vazamento, a pressão interna pode se sobressair a ponto de levar o duto à ruptura.

O ano crítico em termos de risco de falha da profundidade de corrosão é justamente o ano em que, aplicando a taxa anual de corrosão radial, a profundidade do defeito ultrapassa o limite dado pelo DNV-RP-F101 (2015). Dessa forma, indicando a necessidade de um reparo.

Um outro parâmetro que apresenta ano crítico em termos de probabilidade de falha do duto, na qual apresenta como valor máximo permitido 10^{-4} para dutos que não apresentam

elevada frequência de atividades humanas, para a definição na classe de segurança normal (DNV-RP-F101,2015).

É considerado o ano de falha crítica aquele no qual a probabilidade ultrapassar o limite proposto por norma (DNV-RP-F101, 2015).

As empresas são as responsáveis por fornecer o nível de risco tolerável, no qual o risco alvo varia de acordo com suas diretrizes. O ano de risco crítico é aquele em que o duto extrapola o risco alvo (Aljaroudi,2015).

Nesse trabalho obteve-se dois anos de falha crítica em termos de falha do duto, um deles quando se faz a análise de probabilidade de falha pelo FORM e o outro se aplica a simulação de Monte Carlo, para efeito comparativo. Vale destacar que toda programação foi realizada no MatLab.

3.3.1 Matriz de risco

A estimativa do risco pode ser apresentada como uma matriz de risco, em função da probabilidade de falha e dos tipos de consequência de falha (DNV-RP-G101, 2010). Essa matriz é uma forma de relacionar valores quantitativos com os graus qualitativos. O *Quadro 2* é um exemplo de matriz dado pela DNV-RP-G101 (2010), na qual horizontalmente são mostrados os parâmetros de consequência de falha e verticalmente os parâmetros de probabilidade de falha.

Quadro 2 – Exemplo de matriz de risco

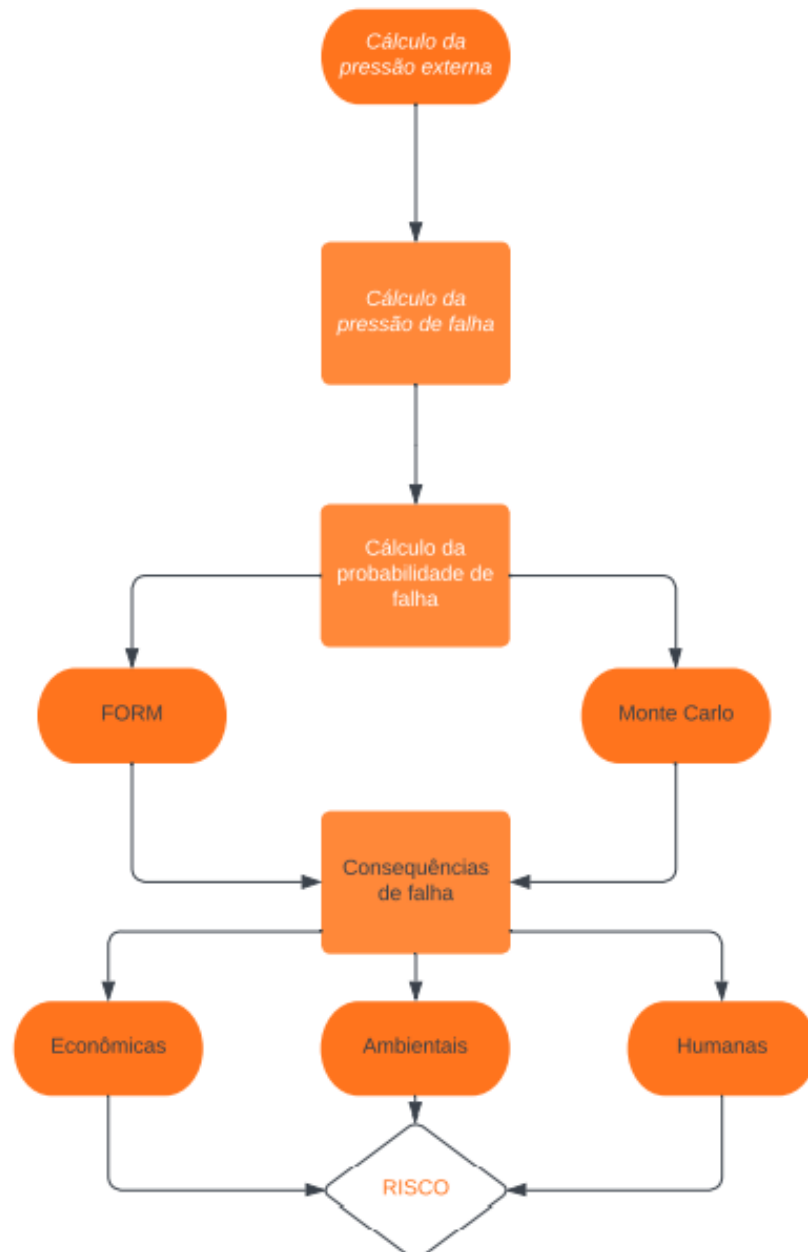
PoF Ranking	PoF Description	A	B	C	D	E
5	(1) In a small population, one or more failures can be expected annually. (2) Failure has occurred several times a year in the location.	YELLOW	RED	RED	RED	RED
4	(1) In a large population, one or more failures can be expected annually. (2) Failure has occurred several times a year in operating company.	YELLOW	YELLOW	RED	RED	RED
3	(1) Several failures may occur during the life of the installation for a system comprising a small number of components. (2) Failure has occurred in the operating company.	GREEN	YELLOW	YELLOW	RED	RED
2	(1) Several failures may occur during the life of the installation for a system comprising a large number of components. (2) Failure has occurred in industry.	GREEN	GREEN	YELLOW	YELLOW	RED
1	(1) Several failures may occur during the life of the installation for a system comprising a large number of components. (2) Failure has occurred in industry.	GREEN	GREEN	GREEN	YELLOW	YELLOW
CoF Types	Safety	No Injury	Minor Injury Absence < 2 days	Major Injury Absence > 2 days	Single Fatality	Multiple Fatalities
	Environment	No pollution	Minor local effect. Can be cleaned up easily.	Significant local effect. Will take more than 1 man week to remove.	Pollution has significant effect upon the surrounding ecosystem (e.g. population of birds or fish).	Pollution that can cause massive and irreparable damage to ecosystem.
	Business	No downtime or asset damage	< € 10.000 damage or downtime < one shift	< € 100.000 damage or downtime < 4 shifts	< € 1.000.000 damage or downtime < one month	< € 10.000.000 damage or downtime one year
CoF Ranking		A	B	C	D	E

Fonte: ISO (2000)

4 EXEMPLO, RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para resolver o exemplo, os passos a serem seguidos são representados em um fluxograma de acordo com a *Figura 5*.

Figura 5 – Fluxograma de risco



Fonte: os autores (2022)

4.1 DADOS DO PROBLEMA

O exemplo abaixo trata de duto corroído enterrado, no qual tem por finalidade aplicar a metodologia descrita nas seções anteriores. Dessa forma, foi calculada a probabilidade de falha, as consequências de falha e o risco estimado. Tal exemplo se baseou em um duto corroído enterrado a uma profundidade de 1,52m, com um solo superior apresentando peso específico de 20 kN/m³, sendo caracterizado como um solo arenoso compacto (Godoy, 1972). Sua extensão é de 100km. O duto transporta um óleo não inflamável com densidade de 850kg/m³ (DNV-RP-G101, 2010).

Os parâmetros do duto e da geometria de seus defeitos estão descritos no *Quadro 3* (ALJAROUDI, 2015):

Quadro 3: Parâmetros do duto corroído

Variável		Média	Cov	Und
Pressão Interna	P0	7,7	0,07	Mpa
Diametro do Duto	D	400	0,003	mm
Espessura da parede do duto	t	10	0,005	mm
Resistencia de escoamento do duto	σ_y	420	0,07	MPa
Resistencia à tração do duto	σ_u	520	0,065	MPa
Profundidade inicial do defeito	d0	3	0,24	mm
Comprimento inicial do defeito	Lo	800	0,2	mm
Taxa de profundidade de corrosão	d rate	0,2	0,02	mm/ano
Taxa de comprimento de corrosão	L rate	20	0,2	mm/ano

Fonte: Aljaroudi (2015)

4.2 PROFUNDIDADE E COMPRIMENTO DE CORROSÃO

Como já citado anteriormente, pela DNV-RP-F101 (2015) existe um limite para a profundidade de corrosão, definido como sendo 85% da espessura da parede, não podendo ultrapassá-lo, pois pode provocar uma ruptura bruta da tubulação. Pode-se calcular como a profundidade do defeito varia no tempo de acordo com a equação 23:

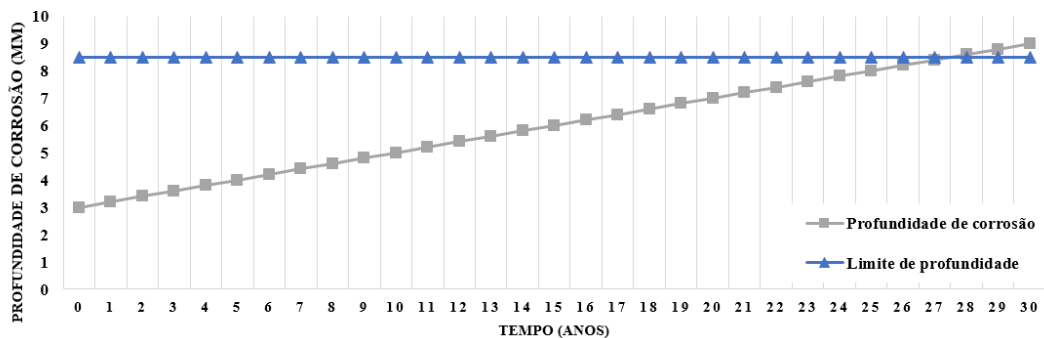
$$d(t) = d_0 + d_{rate} * t \quad (23)$$

Onde d_0 é a profundidade de defeito inicial [mm], d_{rate} é a taxa de corrosão radial [mm/ano] e t o tempo [anos].

No gráfico abaixo, a linha com triângulos representa esse limite de profundidade de corrosão e a linha com os quadrados representa o comportamento dessa profundidade com o decorrer do tempo.

Dessa forma para o exemplo em questão, sabendo-se que a espessura da parede é de 10 mm e que a taxa corrosão radial é de 0,2 mm/ano, obtém-se o gráfico como mostrado na *Figura 6*:

Figura 6 - Profundidade de corrosão esperada do duto

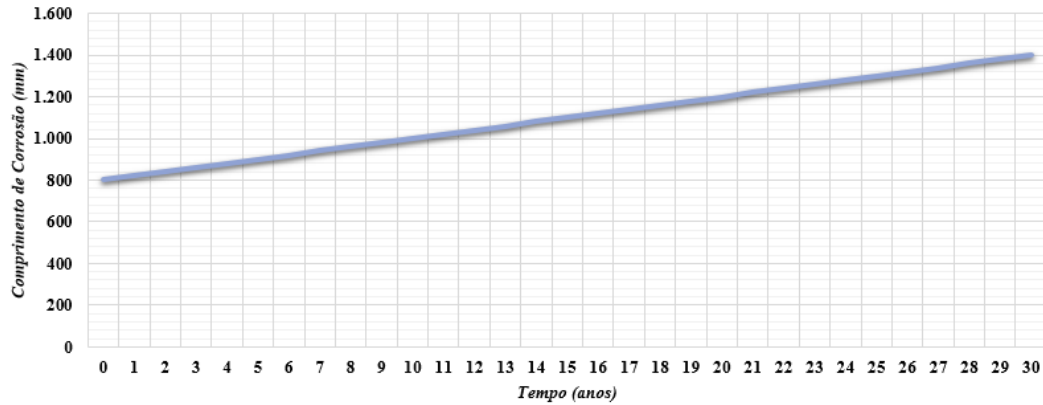


Fonte – Os autores (2022).

Dessa forma pode-se notar que o ano crítico esperado para o duto em relação a profundidade de corrosão é o 27º ano. Neste tempo, o valor da profundidade de defeito já atingiu 84% da espessura da parede do duto. No próximo ano, a porcentagem equivalente de corrosão terá ultrapassado o limite normativo DNV-RP-F101 (2015).

A *Figura 7* mostra o comportamento esperado para o aumento do comprimento de defeito. Esse aumento se dá pela taxa de corrosão longitudinal de 20 mm/ano.

Figura 7 - Comprimento de corrosão esperada do duto



Fonte – Os autores (2022).

4.3 PROBABILIDADE DE FALHA

Abaixo será descrito os resultados obtidos para a probabilidade de falha da análise do estudo de caso tanto de maneira quantitativa quanto qualitativa.

4.3.1 Análise quantitativa

Para ser possível determinar o valor do risco, a primeira parcela a ser analisada é a probabilidade de falha. Dessa forma, a análise de confiabilidade estrutural foi realizada para dois métodos, o FORM e de Monte Carlo.

Para realizar a análise de sensibilidade das variáveis foi calculado os respectivos fatores de importância para 10, 20 e 30 anos. Os resultados obtidos estão representados no *Quadro 4*. Para a realização do cálculo usou-se:

$$\alpha_X^2 = \frac{\left[\frac{dz}{dx} \cdot \sigma(X)\right]^2}{\sigma^2(z)} \quad (24)$$

Onde X é a variável aleatória, α_X é o coeficiente de sensibilidade e σ é o desvio padrão.

Após realizada a análise de sensibilidade com seus respectivos fatores de importância, adotou-se como variáveis aleatórias a profundidade do defeito, a taxa de corrosão radial, a espessura da parede e a carga. Considerando como variáveis determinísticas o diâmetro do duto, comprimento inicial do defeito e taxa de corrosão longitudinal. Como é mostrado na *Quadro 4*.

Quadro 4 – Fatores de importância

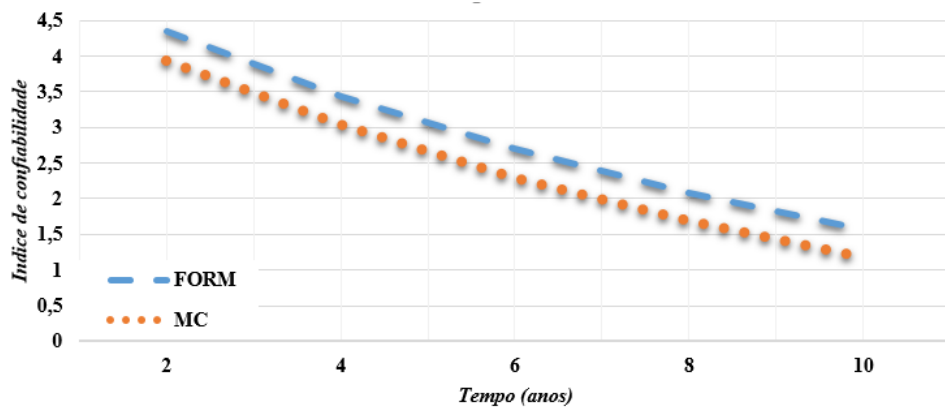
VARIAVEIS ALEATÓRIAS	T = 10 ANOS	T = 20 ANOS	T = 30 ANOS
PROFUNDIDADE DO DEFEITO	13,20	12,60	10,90
DIAMETRO DO DUTO	1,70	1,10	0,88
COMPRIMENTO DO DEFEITO	0,32	0,22	0,35
PRESSÃO INTERNA	13,60	11,12	10,10
TAXA DE CORROSÃO RADIAL	4,17	20,10	36,30
TAXA DE CORROSÃO LONGITUDINAL	0,00	0,00	0,00
TENSÃO DE ESCOAMENTO	5,65	4,60	2,30
ESPESSURA DO DUTO	48,14	45,25	33,80

Fonte: os autores (2022)

Para esse exemplo foi considerada a situação de baixa frequência de atividades humanas. De acordo com a DNV-RP-F101 (2015), o máximo valor permitido de probabilidade de falha é de 10^{-4} para tubulações pertencentes a classe de segurança normal.

Para cada um dos métodos foi obtido o índice de confiabilidade (β) em função do tempo, como é mostrado na *Figura 8*, na qual a linha tracejada representa os resultados obtidos por FORM e a linha pontilhada os resultados por Monte Carlo.

Figura 8 – Índice de confiabilidade em relação ao tempo



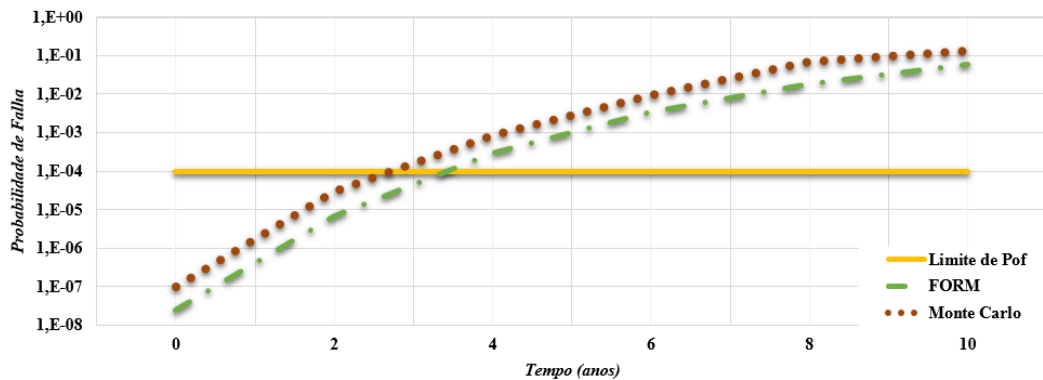
Fonte: os autores (2022)

Em seguida, é feita uma análise comparativa do comportamento da probabilidade de falha no decorrer do tempo para ambos os métodos da confiabilidade estrutural, FORM e Monte Carlo. Estabelecido o limite de probabilidade de falha de 10^{-4} (DNV-RP-F101, 2015)

relacionando com os valores obtidos pelos métodos é possível determinar qual o ano crítico de falha referente a cada um dos métodos.

A *Figura 9* ilustra o resultado dessa análise para ambos os métodos. A linha tracejada representa os resultados obtidos por FORM, a linha pontilhada representa os resultados pela simulação de Monte Carlo e a linha contínua representa o limite normativo (DNV-RP-F101, 2015).

Figura 9 - Comparação das probabilidades de falha para FORM e Monte Carlo



Fonte – Os autores (2022)

De acordo com os resultados de FORM e Monte Carlo, é observado que as probabilidades de falha do Monte Carlo são um pouco maiores ($\cong 25\%$) que as obtidas por FORM. Isso significa que para essa análise, Monte Carlo se mostrou mais conservador, tendendo para a segurança. Em relação aos anos críticos de falha do duto, quando se aplica o método de FORM apresentou 3 anos para atingir o ano crítico de falha. E, quando se aplica a simulação de Monte Carlo o ano crítico de falha é atingido com 2 anos.

4.3.2 Análise qualitativa

Essa análise é feita de acordo com a ordem de grandeza dos valores da probabilidade de falha encontradas na análise quantitativa. No *Quadro 5* apresentada no manual da DNV-RP-G101 (2010) consta uma escala que correlaciona valores da probabilidade de falha com o grau de risco. Dessa forma, observa-se que quanto maior a probabilidade de falha, mais elevado é o risco.

Quadro 5 - Escala recomendada de probabilidade

Cat.	Annual failure probability		Description
	Quantitative	Qualitative	
5	$> 10^{-2}$	Failure expected	(1) In a small population*, one or more failures can be expected annually. (2) Failure has occurred several times a year in location.
4	10^{-3} to 10^{-2}	High	(1) In a large population**, one or more failures can be expected annually. (2) Failure has occurred several times a year in operating company.
3	10^{-4} to 10^{-3}	Medium	(1) Several failures may occur during the life of the installation for a system comprising a small number of components. (2) Failure has occurred in operating company.
2	10^{-5} to 10^{-4}	Low	(1) Several failures may occur during the life of the installation for a system comprising a large number of components. (2) Failure has occurred in industry.
1	$< 10^{-5}$	Negligible	(1) Failure is not expected. (2) Failure has not occurred in industry.
Notes: * Small population = 20 to 50 components. ** Large population = More than 50 components			

Fonte: DNV-RP-G101 (2010)

No *Quadro 6* é mostrado os resultados obtidos para FORM no intervalo de tempo de 0 a 10 anos a partir do momento inicial de inspeção de corrosão. Essa Quadro mostra a correlação de acordo com os dados obtidos da análise quantitativa e os dados de referência da Quadro 5.

Quadro 6 - Descrição da análise qualitativa por FORM

FORM	
Anos	Qualitativo
9-10	Falha esperada
7-9	Alto
5-7	Médio
3-5	Baixo
0-3	Insignificante

Fonte – Os autores (2022).

Na *Quadro 7* são mostrados os resultados obtidos para Monte Carlo no intervalo de tempo de 0 a 10 anos a partir do momento inicial de inspeção de corrosão. Essa Quadro mostra a correlação de acordo com os dados obtidos da análise quantitativa e os dados de referência da Quadro 5.

Quadro 7 - Descrição da análise qualitativa por Monte Carlo

MONTE CARLO	
Anos	Qualitativo
8-10	Falha esperada
6-8	Alto
4-6	Médio
2-4	Baixo
0-2	Insignificante

Fonte – Os autores (2022).

Dessa maneira, é notório uma pequena diferença ($\cong 1$ ano) dos resultados obtidos em termos qualitativos de probabilidade de falha entre os métodos. O FORM apresentou um comportamento menos seguro que Monte Carlo em relação aos graus de risco.

Como por exemplo, pode ser observado para um grau de risco alto, em Monte Carlo o intervalo de anos é o do 6º ao 8º ano, enquanto para FORM para esse mesmo grau de risco o intervalo de tempo é do 7º ao 9º ano.

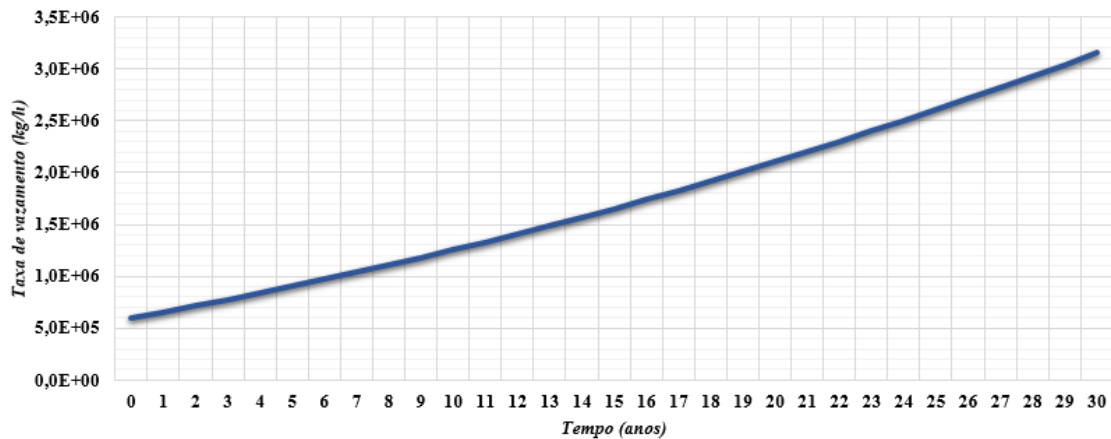
4.4 CONSEQUÊNCIAS DE FALHA

As consequências de falha abrangem três tipos para a análise de risco, o humano, econômico e ao meio ambiente. Em relação a consequência aos seres humanos foi relacionada a segurança humana e seu valor foi expresso em termos de perda potencial de vida. Para as econômicas foi analisada em termos financeiros de acordo com a unidade monetária. E as consequências relacionadas ao meio ambiente que foram analisadas em relação a taxa de vazamento.

4.4.1 Taxa de vazamento esperada

Um dado importante para estimar as consequências de falha é a taxa de vazamento, que representa a quantidade de óleo perdida devido a corrosão. Como citado no item 4.2, a seção de corrosão aumenta com o passar do tempo, consequentemente a taxa de vazamento aumenta, pois está diretamente ligada a área corroída. Na *Figura 10* está ilustrado seu comportamento no tempo.

Figura 10 - Taxa de vazamento esperada



Fonte – Os autores (2022).

4.4.2 Tipos de consequências e seus riscos

A *Quadro 8* ilustra um exemplo de matriz de risco a qual será aplicada nesse estudo.

Quadro 8 – Matriz de risco adotada

Consequencia de falha				Probabilidade de falha				
Categoria	Ambiental	Economica	Humana	1	2	3	4	5
	oleo derramado (toneladas)	Custo (\$)	Segurança	$< 10^{-5}$	10^{-5} $> 10^{-4}$	10^{-4} $> 10^{-3}$	10^{-3} $> 10^{-2}$	$> 10^{-2}$
A	~0	~ 0	0					
B	<1000	<10.000	0,1					
C	<10.000	<100.000	1					
D	<100.000	<1.000.000	10					
E	>100.000	>1000.000	100					

Fonte: J. K. Seo *et al.*, 2015 (modificado)

Tal matriz mostra os graus de risco para cada situação. De acordo com a DNV-RP-G101 (2010) esses graus são ranqueados da seguinte forma: Verde representa baixo risco, ou seja, o risco é aceitável; amarelo representa risco médio, no qual o risco ainda está dentro dos padrões aceitáveis, porém faz necessário aumentar a atenção e tomar atitudes para que o risco não passe para o vermelho, o qual apresenta um grau de risco inaceitável.

Para o estudo em questão é considerado que o local onde o duto está enterrado não há movimentação de pessoas, logo, o risco ao longo dos anos se comporta conforme os resultados apresentados no *Quadro 9*:

Quadro 9 - Comportamento do risco em relação as consequenciais de falha à segurança humana para FORM e Monte Carlo

Consequencias HUMANAS			
Ano	Mortes	Grau	
		FORM	MC
1	~ 0	BAIXO	BAIXO
2	~ 0	BAIXO	BAIXO
3	~ 0	BAIXO	BAIXO
4	~ 0	BAIXO	BAIXO
5	~ 0	BAIXO	BAIXO
6	~ 0	BAIXO	BAIXO
7	~ 0	BAIXO	BAIXO
8	~ 0	BAIXO	MÉDIO
9	~ 0	MÉDIO	MÉDIO
10	~ 0	MÉDIO	MÉDIO

Fonte – Os autores (2022).

De acordo com a Quadro acima, nota-se uma pequena variação em relação aos graus de riscos encontrados para ambos os métodos, FORM e Monte Carlo. Porém, em relação à segurança humana em nenhum deles apresentou risco elevado para as condições adotadas, pois como citado anteriormente, apenas o grau alto é considerado como inaceitável.

Em relação a consequência ao meio ambiente analisa-se de acordo com a quantidade de óleo derramado, em toneladas. Esse valor foi obtido através da *equação 17*.

A *Quadro 10*, mostra o comportamento do risco em relação as consequências de falha ao meio ambiente para ambos os métodos de análise de confiabilidade estrutural.

Quadro 10 - Comportamento do risco em relação as consequências de falha ao meio ambiente para FORM e Monte Carlo

Consequencias AMBIENTAIS			
Ano	Oleo derramado	Grau	
		FORM	MC
1	<10.000	BAIXO	BAIXO
2	<10.000	BAIXO	BAIXO
3	<10.000	BAIXO	BAIXO
4	<10.000	BAIXO	BAIXO
5	<10.000	BAIXO	MÉDIO
6	<10.000	MÉDIO	MÉDIO
7	<100.000	ALTO	ALTO
8	<100.000	ALTO	ALTO
9	<100.000	ALTO	ALTO
10	<100.000	ALTO	ALTO

Fonte – Os autores (2022).

Na *Quadro 10* pode ser observado que mesmo aparecendo uma diferença de grau de gravidade para o 5º ano em relação aos métodos estudados, o ano crítico, ou seja, o ano que apresentou risco alto, é dado para um mesmo tempo. Dessa forma, o 7º ano pode ser considerado como o ano crítico para as consequências ambientais tanto para FORM quanto para Monte Carlo.

Para a análise das consequências de falha relacionadas a economia, leva-se em conta os custos para a produção deferida, em dólar.

Quadro 11 - Comportamento do risco em relação as consequências de falha econômicas para FORM e Monte Carlo

Consequencias ECONOMICAS			
Ano	Custo	Grau	
		FORM	MC
1	>1.000.000	MÉDIO	MÉDIO
2	>1.000.000	MÉDIO	MÉDIO
3	>1.000.000	MÉDIO	ALTO
4	>1.000.000	ALTO	ALTO
5	>1.000.000	ALTO	ALTO
6	>1.000.000	ALTO	ALTO
7	>1.000.000	ALTO	ALTO
8	>1.000.000	ALTO	ALTO
9	>1.000.000	ALTO	ALTO
10	>1.000.000	ALTO	ALTO

Fonte – Os autores (2022).

A *Quadro 11* tem um comportamento diferente do ocorrido anteriormente, os anos críticos encontrados para as diferentes análises de confiabilidade estrutural, são distintos. Quando se usa Monte Carlo obtém-se um ano crítico de falha, ou seja, ano que corresponde a um grau alto de gravidade, imediatamente inferior ao de FORM apresentando grau alto no 3º ano, enquanto no FORM, 4º ano.

Para os diferentes tipos de consequências obteve-se anos críticos distintos, isso explica a necessidade de ser feita uma análise individual.

4.4.3 Consequências de falha totais estimadas

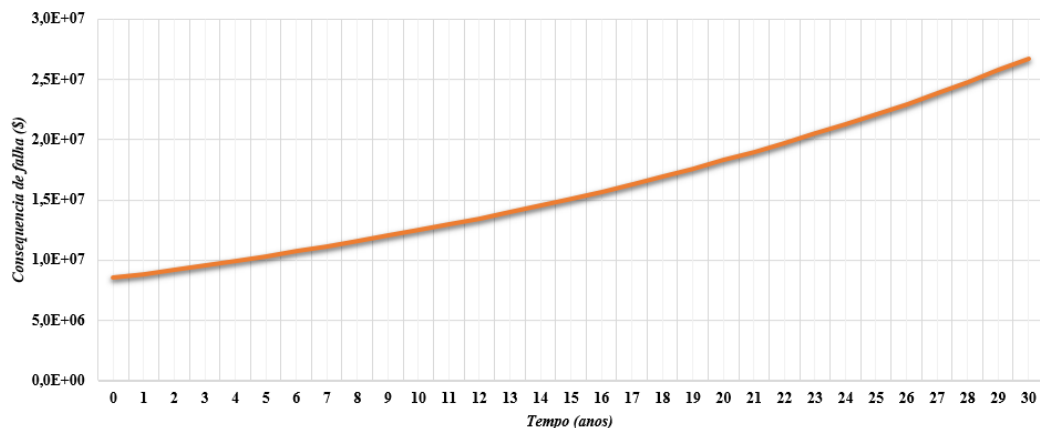
Na consequência de falha total estimada, inclui-se todas consequências citadas anteriormente, ou seja, as ligadas ao meio ambiente, aos seres humanos e a economia. Em

relação as consequências econômicas nela estão inclusos os custos de produção deferida e o custo de reparo. Para o caso em questão foi feita a suposição que o duto foi deixado sem qualquer tipo de reparo.

As consequências ligadas ao meio ambiente foram baseadas na suposição que a limpeza não foi realizada, levando-se em consideração apenas o custo do petróleo perdido. Para ser feita a estimativa das consequências de falha ao longo do tempo é necessário aplicar uma taxa de juros nominal e de inflação, adotados 7% e 3% respectivamente (Aljaroudi,2015).

A *Figura 11* descreve as consequências de falha totais estimadas, em dólar, ao longo do tempo. Essas consequências de falha foram obtidas através da *equação 21*, a qual leva em consideração os valores obtidos para as consequências de falha econômicas e para o meio ambiente. As consequências de falha humanas não estão inclusas devido ao fato que, de acordo com a DNV RP-G101 (2010), tais consequências são dadas de acordo com a perda potencial de vida de pessoas, não se aplicando um valor monetário. Porém, caso seja necessário aplicar um valor para essa consequência de falha pode-se levar em consideração o risco de vida humano baseado no PIB de acordo com Beck (2012).

Figura 11 - Consequências de falha totais estimada



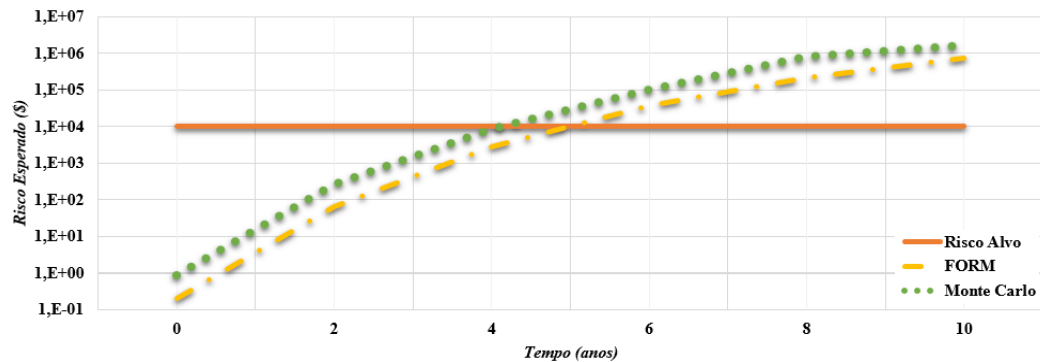
Fonte – Os autores (2022).

4.5 ANÁLISE DE RISCO TOTAL

O risco estimado pode ser definido como a perda financeira estimada, ou seja, o custo esperado. Dessa maneira, diversas empresas operacionais julgam necessário ter esse conhecimento prévio com a finalidade de minimizar os custos a longo prazo. Tais empresas

definem um valor alvo de risco, nesse caso foi de \$10.000. Assim, encontrou-se o ano crítico para ambos os métodos de confiabilidade estrutural como é mostrado na *Figura 12*.

Figura 12 - Risco estimado para FORM e Monte Carlo



Fonte – Os autores (2022).

A partir da *Figura 12* é possível identificar quais os anos críticos equivalentes para cada um dos métodos de análise de confiabilidade, sendo FORM representado pela linha tracejada, Monte Carlo pela linha pontilhada e a linha contínua representando o risco alvo. Dessa forma, de maneira idêntica ao ocorrido na probabilidade de falha, ao aplicar o método de Monte Carlo observa-se um comportamento mais conservador em relação ao FORM tendo como anos críticos referente ao risco estimado o 4º e 5º ano, respectivamente.

Está representada na Quadro 12 o resumo dos anos críticos para o estudo em questão:

Quadro 12 - Resumo dos anos críticos para FORM e Monte Carlo

		Anos críticos	
		FORM	MC
Probabilidade de falha		3	2
Consequencias de falha	Humanas	-	-
	Ambientais	7	7
	Economicas	4	3
Risco Estimado		5	4

Fonte – Os autores (2022).

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

São apresentadas nesse tópico as principais conclusões desse trabalho além de sugestões para pesquisas futuras.

5.1 CONCLUSÕES

Esse trabalho possibilita, ao longo do seu desenvolvimento fazer o levantamento dos riscos e obter os anos críticos de falha para um duto enterrado sujeito a corrosão através de diferentes métodos de análise de confiabilidade estrutural, e para esse trabalho foi usado FORM e Monte Carlo.

Pôde-se observar que o método de Monte Carlo apresentou resultados mais conservadores em relação a FORM, podendo se considerar, para esse caso, mais favorável a segurança. Apresentou-se uma pequena diferença em relação aos anos críticos, no qual para FORM e Monte Carlo encontrou-se o 3º e 2º ano, respectivamente.

Outro ponto realizado foi a descrição da análise qualitativa para ambos os métodos, como pode ser observado nas Quadros 4 e 5, no qual se obteve uma diferença de aproximadamente 1 ano em relação aos níveis de gravidade para cada um dos métodos em questão.

As consequências de falha também são de total importância para se determinar o risco. Suas análises foram feitas de maneira individualizada para seus variados tipos, tais como as econômicas, as ambientais e as relacionadas à segurança dos seres humanos.

Nas consequências humanas, observou-se que, tanto na aplicação do método de FORM quanto para o método de Monte Carlo não foi encontrado intervalo elevado para o risco, diferentemente do que acontece para as consequências relacionadas ao meio ambiente, na qual há uma semelhança entre os anos críticos. Ambos os métodos julgaram o 7º ano como sendo o crítico. E, por fim, as consequências econômicas que, diferente das anteriores, houve diferença entre os anos críticos, notando-se que Monte Carlo teve comportamento mais conservador apresentando como ano crítico o 3º ano, enquanto para FORM foi o 4º ano.

Para o risco estimado, ou seja, para a perda financeira estimada, leva-se em consideração todos os parâmetros tanto os de probabilidade de falha quanto os diferentes tipos de consequência de falha. Tal risco foi estimado para um valor alvo de \$ 10.000, apresentando como anos críticos o 4º e o 5º para Monte Carlo e FORM, respectivamente.

Dessa forma, conclui-se que, para as condições de exemplo apresentadas, o método de Monte Carlo mostrou-se mais conservador. Porém, dependendo do parâmetro que está sendo avaliado, essa diferença pode ser inexistente.

Outro ponto importante que foi observado diz respeito aos diferentes anos críticos para cada um dos tipos de consequências de falha, o que destaca a importância de avaliá-los individualmente.

5.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Algumas sugestões para pesquisas futuras relacionadas a este trabalho são:

- Avaliar a pressão de falha aplicando diferentes métodos empíricos;
- Analisar probabilidade de falha por outros métodos de simulação, por exemplo: Importance Sampling, Separable Monte Carlo e Selective Monte Carlo.
- Estudar o risco em dutos com múltiplos defeitos;
- Analisar o risco em dutos submersos.

REFERÊNCIAS

AFONSO, S. M. B. *et al.* **Desenvolvimento de metodologia para a avaliação de integridade estrutural de dutos terrestres e submarinos.** Recife, 2020.

AHAMMED, M.; MELCHERS, R. E., "Reliability Estimation of Pressurised Pipelines subject to Localised Corrosion Defects", *Int J. Pres. Ves Piping*, v.69, p267-272, 1996.

AHAMMED, M. (1998). Probabilistic estimation of remaining life of pipeline in the presence of active corrosion defects. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 75, 321-329.

ALJAROUDI, A., THODI, P., AKINTURK, A., KHAN, F., & PAULIN, M. (2014a). **Application of probabilistic methods for predicting the remaining life of offshore pipelines.**

Proceedings of the 10th International Pipeline Conference, IPC2014, Setembro 29 – Outubro 3, 2014, Calgary, Alberta, Canada.

ALVES, Anderson; TORRES, Juliana; AFONSO, Silvana. **Estudo comparativo das alterações da norma britânica BS7910 no projeto baseado em confiabilidade de dutos sujeitos a múltiplos defeitos.** In: CILAMCE, XXXVIII, 2017, Florianópolis. Anais. 2017 p. 01-18.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL. ASTM A796/A796M-21: Standard test method of water vapor transmission of materials. Philadelphia, 2021

ANDERSEN, T., & MISUND, A. (1983). **Pipeline reliability: An investigation of pipeline failure characteristics and analysis of pipeline failure rates for submarine and cross-country pipelines.** *Journal of Petroleum Technology*, 35(4). <http://dx.doi.org/10.2118/10467-PA>

ANG, A.H.S., TANG, W.H., "Probability Concepts in Engineering Planning and Design - Vol. 2 - Decision, Risk and Reliability", New York: John Wiley & Sons, 1984.

AYYUB, B. M. (2014). *Risk analysis in engineering and economics (2nd ed.)*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press.

BECK, A. T., **Curso de Confiabilidade Estrutural.** São Paulo. 2012.

CALEYO, F., GONZALEZ, J., and HALLEN, J. (2002). **A study on the reliability assessment methodology for pipelines with active corrosion defects**. *International Journal of Pressure and Piping*, 79, 77–86.

DILAY, J. **Pipeline Safety: Technology and Communication**. Opening Plenary Lecture, Banff, Pipeline Workshop, Calgary; 2001.

DNV, “**DNV Recommended Practice – DNV-RP-F101 – Corroded Pipelines**”, Det Norske Veritas, Norway, 2015.

DNV “**DNV-RP-G101. (2010). Risk based inspection of offshore topsides static mechanical equipment**”. Oslo, Norway: Det Norske Veritas.

EGIG. (2011). **11th report of the European Gas Pipeline Incident Data Group**. Doc. Number EGIG 11.R.0402.

Joint Committee on Structural Safety (JCSS), *Probabilistic Model Code – Part I*, Internet Publication (<https://www.jcss-lc.org/publications/jcsspmc/desbasis2a.pdf>).

MATLAB, User’s Guide. *The Math Works Inc.*, 2016.

OLIVEIRA, R. S., **Análise de confiabilidade estrutural usando o método Monte Carlo seletivo**. 2022. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2022, 78 p.

PINTO, Olivier Stephane Xavier. **Avaliação numérico-experimental de métodos analíticos para cálculo da pressão de ruptura de dutos corroídos**. 2007. 103 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007. Cap. 1.

RAMANATHAN, L. V., “**Corrosão e seu controle**”, Embracop, São Paulo, 2004.

SAGRILO, L. V. S., **Análise de Confiabilidade Estrutural Utilizando os Métodos Analíticos FORM e SORM**, Tese de Doutorado, Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, 1994.

SEO, J. K. *et al.*, *A risk-based inspection planning method for corroded subsea pipelines*. Ocean Engineering 109 (2015) 539-552.

SILVA, E. S., **Análise da Integridade Estrutural de Dutos com Defeitos de Corrosão Interagentes Através de Modelagem Multifísica**. 2016. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016, 102 p.

TORRES, J. V.S., “**Metodologia Probabilística para estudar dutos na presença de defeitos de corrosão**”, Rop Pipeline Conference & Exposition 2007, Rio de Janeiro, 2007.

TORRES, J. V.S., **Uma metodologia para verificação da segurança e dimensionamento ótimo de dutos com defeitos causados por corrosão**. 2009. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009, 179 p.

VALENTINI, M. D. **Avaliação dos Métodos Semi-Empíricos para Análise de Dutos Corroídos pelo Método dos Elementos Finitos**. 2006. 128 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Ciências Exatas e de Tecnologia, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2006.

VANHAZEBROUCK, V. M., **Análise de dutos corroídos por meio de método de confiabilidade estrutural**. 2008. Dissertação (Mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2008, 139 p.