

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**  
**CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

LARISSA ROLDÃO ANTONIAZZI

ESTUDO DE CASO SOBRE CORROSÃO COMO CAUSA DE INCIDENTES EM DUTOS  
DE PETRÓLEO E GÁS

BELO HORIZONTE

2022

LARISSA ROLDÃO ANTONIAZZI

ESTUDO DE CASO SOBRE CORROSÃO COMO CAUSA DE INCIDENTES EM DUTOS  
DE PETRÓLEO E GÁS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Dr. Marcello Dummont

BELO HORIZONTE

2022

LARISSA ROLDÃO ANTONIAZZI

ESTUDO DE CASO SOBRE CORROSÃO COMO CAUSA DE INCIDENTES EM DUTOS  
DE PETRÓLEO E GÁS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no  
Curso de Graduação em Engenharia de Materiais  
do Centro Federal de Educação Tecnológica de  
Minas Gerais como requisito parcial para  
obtenção do título de Bacharel em Engenharia  
de Materiais.

Aprovado em:

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Marcello Dummont - Orientador

---

Profa. Dra. Aline Silva Magalhães

---

Profa. Dra. Elaine Carballo Siqueira Corrêa

## **AGRADECIMENTOS**

À minha família e amigos, que me apoiaram desde o início, e que mesmo diante de tantas incertezas respeitaram o meu tempo me mostrando que independente das minhas escolhas acadêmicas ou profissionais, eu seria para eles, motivo de orgulho. Vocês permitiram que, a escolha de ser Engenheira de Materiais, fosse genuinamente minha, do início ao fim.

Ao Dr. Marcello R. Dummont, meu orientador, que se mostrou muito paciente, mesmo com todas as peripécias ao longo do desenvolvimento deste trabalho, me dando suporte para concluir este trabalho, sempre com muito cuidado e respeito. Você possui a capacidade de fazer muitos alunos se apaixonarem pela Corrosão, com sua abordagem dinâmica e domínio sobre o assunto.

Às Dras. Elaine Corrêa e Aline Magalhães, agradeço por todo o apoio, por me incentivarem nos momentos mais difíceis da elaboração deste trabalho, quando encontrei dificuldades e fui agraciada com o incentivo que me deram. Em vocês, vejo o exemplo de mulheres que se dedicaram e se destacaram em suas profissões, é inspiradora a paixão que demonstram ao dar aula, o que levarei como exemplo para a minha vida profissional.

Aos professores do CEFET-MG que fizeram parte da minha trajetória, e que em sua maioria, me motivaram, impulsionaram e ensinaram a encontrar prazer nos estudos, foi na faculdade que, da pior e da melhor forma, minha mente se abriu para novas perspectivas do mundo e de mim mesma. Foi por meio de muito esforço que eu descobri algo, que carregaria e usaria no momento e situação adequados, para conquistar minha independência: o CONHECIMENTO!

## RESUMO

Em 2018 o Brasil vivenciou a Greve dos Caminhoneiros, que nos mostrou na prática como a sociedade depende dos combustíveis. Em 2019, um vazamento de óleo no litoral afetou pelo menos 675 áreas de 116 cidades e resultou em 15 mil pescadores prejudicados, sendo considerado o maior desastre ambiental do litoral brasileiro. Em menos de um ano obtiveram-se provas concretas da real necessidade dos combustíveis na sociedade atual, e dos dutos de transporte, que são uma das mais importantes estruturas utilizadas para transporte energético ao redor do mundo, assim como os impactos negativos causados quando ocorrem incidentes, que resultam em vazamento ou explosão. A relevância deste assunto para a sociedade, meio-ambiente, política e economia motivaram a execução do presente trabalho, que através do estudo de caso de uma base de dados de incidentes em dutos ocorridos entre 1986 e 2022 nos EUA, e dos respectivos relatórios de investigação, mostrou uma análise das variáveis que influenciam a segunda causa mais relevante desses incidentes: a corrosão. O estudo de caso mostrou que os fatores mais críticos neste contexto são a substância transportada pelo duto, as instalações subterrâneas e o material utilizado em sua confecção.

Palavras chaves: dutos de transporte, oleodutos, gasodutos, onshore, offshore, corrosão.

## **ABSTRACT**

In 2018, Brazil experienced the Truckers' Strike, which showed us in practice how society depends on fuel. In 2019, an oil spill on the coast affected at least 675 areas in 116 cities and resulted in 15,000 fishermen harmed, being considered the biggest environmental disaster on the Brazilian coast. In less than a year, there was evidence for the real need of fuels in today's society. This leads to the need for pipelines, which is one of the most important structures used for energy transport around the world. When those pipelines are taken to incidents, that can result on leakage or explosion, and many negative impacts can be expected. The relevance of this subject to society, environment, politics and economy motivated the execution of this case study. An analysis of a pipeline incidents database that occurred between 1986 and 2022 , in the USA will be made, as well as the study of their reports of investigation, to find the variables that influence the second most relevant cause of those incidents: corrosion. The case study shows that the most critical factors in this context are the substance transported by the pipeline, the underground installations and the material used in its manufacture.

Keywords: pipelines, oil pipelines, gas pipelines, onshore, offshore, corrosion.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Imagem de uma infraestrutura antiga de dutos .....	15
Figura 2 - Top 14 consumidores de Gás Natural no ano de 2018.....	16
Figura 3 - Bases de Dados oficiais de incidentes existentes no mundo .....	18
Figura 4 - Distribuição das causas de incidentes em dutos da PHMSA (2009-2018).....	20
Figura 5 - Distribuição das causas de incidentes em dutos da EGIG (2007-2016).....	21
Figura 6 - Distribuição das fatalidades de incidentes mais letais .....	22
Figura 7 - Representação do mecanismo eletroquímico de corrosão .....	25
Figura 8 - Histórico de incidentes de corrosão mais significativos nos EUA.....	29
Figura 9 - Fluxo da construção de um estudo de caso aplicado à Engenharia .....	31
Figura 10 - Estruturação de um estudo de caso .....	33
Figura 11 - Etapas de um Estudo de Caso .....	33
Figura 12 - Fluxo para condução do presente estudo de caso .....	36
Figura 13 - Visão geral da quantidade de incidentes por causa (padrão) .....	46
Figura 14 - Visão geral da quantidade de incidentes por causa (original) .....	46
Figura 15 - Distribuição de incidentes no período de 1986 a 2021 .....	47
Figura 16 - Distribuição de incidentes de corrosão entre 1986 e 2021 .....	47
Figura 17 - Corrosão interna e externa em dutos onshore e offshore entre 1986 e 2022.....	49
Figura 18 - Percentual de incidentes de corrosão por local de instalação de 2002 a 2022 .....	53
Figura 19 - Foto da corrosão externa identificada no duto .....	59
Figura 20 - Foto mais detalhada da corrosão externa identificada no duto.....	60
Figura 21 - Foto do buraco que deu início ao vazamento do duto .....	61
Figura 22 - Local do vazamento no duto de Diesel .....	62

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Acidentes mais letais ao longo da história no mundo .....	23
Tabela 2 - Relatórios disponíveis para análise que têm corrosão como causa principal .....	44
Tabela 3 - Probabilidade de ocorrer corrosão em dutos onshore e offshore .....	49
Tabela 4- Quantidade de incidentes para cada tipo de corrosão de 1986 a 2022 .....	50
Tabela 5 - Principais substâncias em incidentes de corrosão entre 1986 e 2022 .....	51
Tabela 6 - Quantidade de incidentes para cada tipo de corrosão de 2002 a 2022 .....	52
Tabela 7 - Análise de revestimentos em incidentes de corrosão, por período .....	54
Tabela 8 - Quantidade de incidentes para cada tipo e natureza de corrosão de 2002 a 2022 ..	56
Tabela 9 - Evidências que construíram a narrativa geral do caso .....	57
Tabela 10 - Relatórios selecionados para análise .....	58



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PHMSA - Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration

PID - Base de Dados de Incidentes com Dutos

UKOPA - Associação de Operadores de Dutos Onshore do Reino Unido

EGIG - Grupo Europeu de Dados de Incidentes com Dutos de Gás

APIA - Associação da Indústria Australiana de Dutos

FAES - Sistema Inteligente de Análise de Falhas

LPG - Gás Liquefeito de Petróleo

EDS - Espectroscopia de Energia-Dispersiva

SEM - Microscópio Eletrônico de Varredura

H<sub>2</sub>S - Sulfeto de hidrogênio

CO<sub>2</sub> - Dióxido de carbono

Cl<sup>-</sup> - Ânion Cloreto

2N HCl - Ácido Clorídrico (Concentração 2N)

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>11</b>
<b>2 OBJETIVOS</b>	<b>13</b>
<b>2.1 Objetivo geral</b>	<b>13</b>
<b>2.2 Objetivos específicos</b>	<b>13</b>
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>14</b>
<b>3.1 Oleodutos</b>	<b>14</b>
<b>3.2 Gasodutos</b>	<b>15</b>
<i>3.3 Evolução das infraestruturas de petróleo e gás no mundo</i>	<i>16</i>
<b>3.4 Incidentes envolvendo Oleodutos e Gasodutos</b>	<b>17</b>
<i>3.4.1 Bases de Dados</i>	<i>17</i>
<i>3.4.2 Principais causas de falhas nos dutos</i>	<i>19</i>
<b>3.5 Corrosão como causa de incidentes em Dutos</b>	<b>24</b>
<i>3.5.1 Definição de corrosão</i>	<i>24</i>
<i>3.5.2 Mecanismo Eletroquímico de corrosão</i>	<i>25</i>
<i>3.5.3 Morfologia da corrosão</i>	<i>26</i>
<i>3.5.4 Corrosão por pite</i>	<i>26</i>
<i>3.5.5 Materiais utilizados na produção de dutos e sua influência na corrosão</i>	<i>27</i>
<i>3.5.6 Fatores que influenciam a corrosão em oleodutos e gasodutos</i>	<i>28</i>
<i>3.5.7 Corrosão como causa de incidentes em dutos nos Estados Unidos</i>	<i>29</i>
<b>3.6 Metodologia do Estudo de Caso</b>	<b>30</b>
<i>3.6.1 Definição do estudo de caso</i>	<i>30</i>
<i>3.6.2 Estruturação do estudo de caso</i>	<i>31</i>
<b>4 METODOLOGIA</b>	<b>36</b>
<b>4.1 Planejamento</b>	<b>36</b>
<i>4.1.1 Revisão da Teoria</i>	<i>36</i>
<i>4.1.2 Elaboração das principais questões</i>	<i>37</i>
<i>4.1.3 Confirmação da escolha do estudo de caso como metodologia</i>	<i>37</i>
<b>4.2 Design de Estudo</b>	<b>37</b>
<i>4.2.1 Definição do tipo do estudo de caso</i>	<i>37</i>
<i>4.2.2 Definição dos métodos a serem utilizados no estudo</i>	<i>38</i>
<i>4.2.3 Definição da quantidade de casos e questões subjacentes do estudo</i>	<i>39</i>
<i>4.2.4 Teste Piloto do estudo</i>	<i>40</i>
<b>4.3 Coleta de dados</b>	<b>41</b>
<i>4.3.1 Realização da coleta de dados para o estudo</i>	<i>41</i>
<i>4.3.2 Identificação de dados relevantes e resumo das informações selecionadas</i>	<i>41</i>
<i>4.3.3 Análise dos dados e construção da narrativa geral do caso</i>	<i>42</i>
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>43</b>
<b>5.1 Teste Piloto do Estudo</b>	<b>43</b>

<b>5.2 Coleta de Dados</b>	<b>43</b>
<b>5.3 Resumo das informações selecionadas para análise final do estudo</b>	<b>45</b>
<b>5.4 Análise dos Dados e construção da narrativa geral do caso</b>	<b>45</b>
<b>5.5 Construção do painel e resumo de evidências do estudo</b>	<b>57</b>
<b>5.6 Análise de múltiplas fontes</b>	<b>57</b>
5.7.1 <i>Análise de corrosão Galvânica como subcausa</i>	58
5.7.2 <i>Análise de corrosão Microbiológica como subcausa em dutos de Petróleo Cru</i>	60
5.7.3 <i>Análise de corrosão em dutos de produtos do refino do Petróleo</i>	61
<b>6 CONCLUSÃO</b>	<b>63</b>
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>64</b>
<b>ANEXO A</b>	<b>66</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Em 2018, O Brasil vivenciou a Greve dos Caminhoneiros (ou Crise do Diesel), que foi impulsionada pelo aumento do preço do combustível e marcada pela suspensão das atividades dos caminhoneiros, que bloquearam as rodovias impedindo a passagem de veículos comerciais e impedindo o fornecimento de combustível, alimentos e insumos médicos (UOL,2018). A greve durou 10 dias e os efeitos foram catastróficos. Ainda no 4º dia, aulas e vôos começaram a ser cancelados por falta de combustível e de alimentos nos supermercados. No 8º dia, o desabastecimento atingia mais 90% dos postos em alguns estados e, até mesmo, no 10º dia de greve, abastecer o carro ainda era difícil, as filas eram quilométricas e as pessoas pagavam preços abusivos temendo ficar sem combustível. A Crise do Diesel nos mostrou como seria o mundo sem combustível: um caos, sem precedentes, todas as atividades do dia-a-dia dependem dos combustíveis (UOL, 2018).

Esse acontecimento ajuda a entender na prática a importância dos dutos de transporte, que são uma das mais importantes estruturas utilizadas para transporte energético ao redor do mundo, sendo um dos maiores investimentos feitos por áreas ou países que não possuem tais recursos disponíveis (POPESCU;GABOR, 2021).

Com o avanço da tecnologia, diferentes normas começaram a surgir ao longo dos anos, trazendo melhorias em termos de microestrutura, aditivos e normas de processamento que resultaram em tubos de alta qualidade, com maior resistência ao escoamento e, conseqüentemente, maior resistência mecânica. Com a melhora das propriedades dos tubos, houve um aumento de sua utilização para fins de transporte de líquidos e gases (BIEZMA *et al*, 2019).

A crescente demanda por petróleo e gás se deu principalmente pela criação do motor à combustão (POPESCU;GABOR, 2021). Existem pelo menos 4,4 milhões de quilômetros de dutos deste tipo cruzando regiões, florestas, desertos, cidades e continentes (CIANCIARULLO, 2019).

Com o aumento da utilização de dutos houve uma conseqüente preocupação com segurança. Foram desenvolvidos, em 1965, sistemas de monitoramento e, desde então, esses são continuamente melhorados: sensores, controles remotos de válvulas e softwares específicos, que controlam parâmetros como pressão, por exemplo (BIEZMA *et al*, 2019).

Os dutos são responsáveis, em grande parte, pelo transporte de produtos perigosos e, embora sejam considerados o método mais seguro e econômico de transportar combustíveis, sua utilização está associada a riscos e falhas, em que o principal afetado é o meio ambiente

(POPESCU; GABOR, 2021). No caso de vazamento, pode ocorrer a contaminação de rios e mares, solos e também das comunidades que se encontram nos arredores, podendo prejudicar muito mais que apenas uma localidade, dependendo de sua proporção. Como exemplo pode ser citado o vazamento no litoral do Brasil, em 2018, que afetou pelo menos 675 áreas de 116 cidades e resultou em 15 mil pescadores prejudicados (O POVO, 2020).

Cada país fiscaliza e acompanha de forma diferente a segurança e falhas dos dutos de transporte. Considerando que a sociedade atual é movida a dados, é coerente que existam diferentes bases de dados ao redor do mundo que registram as falhas ocorridas em oleodutos e gasodutos (BIEZMA *et al*, 2019). Porém, enquanto alguns países possuem uma base de dados bem estruturada, a maior parte não possui nem mesmo um sistema de base de dados para reportar os incidentes, como é o caso do Brasil (POPESCU; GABOR, 2021).

Nos Estados Unidos, por exemplo, existe a “Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration (PHMSA)”, que é uma das subdivisões do Departamento de Transporte e é responsável pelo gerenciamento da base de dados dos incidentes de Dutos de Petróleo e Gás no país (BIEZMA *et al*, 2019).

As falhas podem ocorrer por diferentes razões e não existe uma maneira unificada de classificá-las. Existe, entretanto, uma abordagem simplificada que divide as principais causas de falhas em oleodutos e gasodutos em quatro grupos: danos causados por terceiros, corrosão, erros de construção e design e condições de operação incorretas. Os danos causados por terceiros e a corrosão são os que mais contribuem para a falha dos dutos (BIEZMA *et al*, 2019).

A escolha da corrosão como tema ocorreu pelo fato de ser um assunto muito importante nas Engenharias, por se tratar de um fenômeno que pode ser influenciado por diversos fatores e está sempre no radar das indústrias e do governo por causar danos severos, gerando gastos exorbitantes tanto para mitigar sua ocorrência quanto para ações corretivas. A Engenharia de Materiais possui papel importante no estudo da corrosão e também na análise de incidentes desta natureza, uma vez que para mitigá-los é primordial conhecer as características do material e outras inerentes ao projeto de construção e instalação de dutos.

Neste trabalho foi feito um estudo utilizando a metodologia de estudo de caso analisando os principais incidentes causados por corrosão em dutos de petróleo e gás e, para isso, utilizou-se uma base de dados da PHMSA entre 1986 e 2022. Parâmetros analíticos e estatísticos foram utilizados buscando correlacionar as principais variáveis que podem influenciar neste processo.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo geral

Encontrar e analisar por meio de um Estudo de Caso, as principais causas e fatores que influenciam a corrosão em oleodutos *onshore* e *offshore* a partir da base de dados da PHMSA.

### 2.2 Objetivos específicos

- Analisar a base de dados disponibilizada pela PHMSA com o auxílio da linguagem de programação Python.
- Buscar correlação entre as variáveis apresentadas na base de incidentes ocorridos nos EUA que foi disponibilizada pela PHMSA.
- Entender como é feita a investigação e determinação da causa dos incidentes através da análise de relatórios disponibilizados no site da PHMSA que indicam a corrosão como principal causa do incidente.
- Comparar a partir dos incidentes dos relatórios as informações registradas na base geral de registro de incidentes.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os dutos de transporte possuem um papel importante na sociedade no que diz respeito ao uso industrial, comercial e doméstico de combustíveis e são considerados o método mais econômico e seguro de transportar esse ativo tão importante nos dias de hoje (BELVEDERSI, 2018).

O gás natural é utilizado para aquecer casas e gerar energia elétrica, enquanto a gasolina é utilizada em carros e o diesel é combustível para caminhões e ônibus, o petróleo cru é utilizado para fabricar gasolina e diesel e é matéria-prima para fabricar plásticos e outras substâncias químicas. O transporte dessas substâncias é feito principalmente através de dutos (KIEFNER; ROSENFELD, 2012).

#### 3.1 Oleodutos

A extração do petróleo teve início há mais de cinco mil anos. No início o óleo proveniente do solo era utilizado para pinturas, iluminação e como impermeabilizantes para cestas e barcos. A produção do petróleo comercial, como conhecemos hoje, começou nos Estados Unidos em meados de 1800 com a construção de um poço de petróleo em Titusville, na Pensilvânia (PHMSA, entre 2005 e 2009).

Transportar o petróleo bruto até as refinarias era um desafio que precisava ser resolvido rapidamente. Inicialmente utilizavam-se barcos, em seguida, por volta de 1861 começaram a transportá-lo por ferrovias, entretanto, uma viagem inicial de carroça puxada a cavalo era necessária entre os poços e as ferrovias. Ambas alternativas estavam expostas a condições climáticas imprevisíveis e também a operadores que realizavam o transporte, o que dificultava o planejamento e o controle desta atividade. Os dutos surgiram, em 1863, como uma alternativa mais segura e econômica de transporte (PHMSA, entre 2005 e 2009), como demonstrado na Figura 1.

**Figura 1 - Imagem de uma infraestrutura antiga de dutos**



Fonte: PHMSA, entre 2005 e 2019.

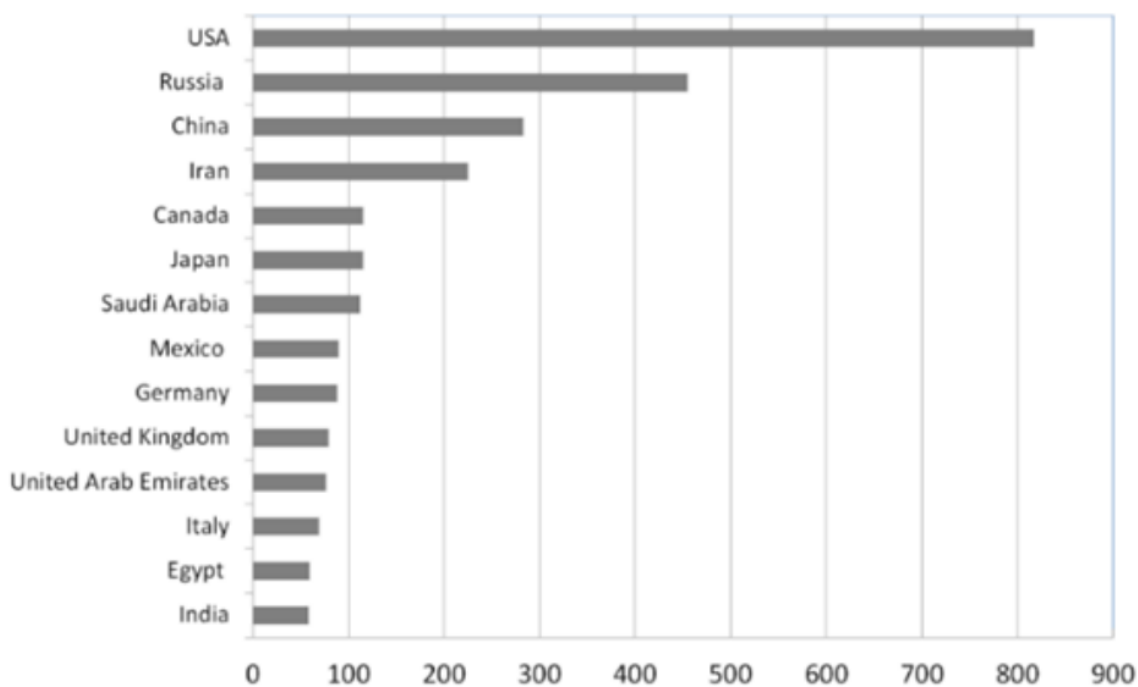
### **3.2 Gasodutos**

O gás natural é utilizado há mais de 3000 anos, e tinha como uma de suas principais aplicações o aquecimento de água salgada para obtenção de sal. Já o uso comercial do gás natural teve início por volta de 1812, impulsionado pelo surgimento da primeira companhia de gás: Companhia de Coca-Cola e Iluminação a Gás de Westminster e Londres. O primeiro trabalho feito pela companhia foi a instalação de tubos de madeira, que iluminaram a ponte de Westminster com lâmpadas a gás, na véspera do Ano Novo de 1813 (PEEBLES, 1980).

A Alemanha contribuiu consideravelmente para o avanço do transporte de gás natural através do processo Mannesmann de manufatura de tubos de aço sem costura, que eram adequados à aplicações com pressões internas de gás e substituíram os antigos tubos de madeira, cobre, chumbo, ferro fundido e forjado (PEEBLES, 1980). Os principais consumidores de gás natural do mundo são mostrados no Figura 2.



**Figura 2 - Top 14 consumidores de Gás Natural no ano de 2018 (em bilhões de metros cúbicos)**



Fonte: RUSIN, A. *et al*, 2021.

O gás natural ainda funciona como uma fonte básica de energia no setor energético, indústrias e residências. Os Estados Unidos são os principais consumidores e produtores de gás natural do mundo, produziram em 2018, 761,1 bilhões de metros cúbicos de gás, e consumiram 817 bilhões de metros cúbicos.

### 3.3 Evolução das infraestruturas de petróleo e gás no mundo

Muitos dutos foram construídos por empresas específicas para transportarem commodities para seus clientes e, ao longo dos anos, foram formando um sistema interligado a nível nacional e global (KISHAWY;GABBAR, 2010). As infraestruturas de dutos para transporte tiveram início com o uso de dutos de madeira, seguido de dutos de cobre e, em 1920, dutos de aço (BIEZMA *et al*, 2019).

Os dutos de aço seguem uma classificação onde o “X” representa a composição química do duto e fabricação, seguido do número, que representa a resistência mínima ao escoamento (API, 2018). Os avanços na tecnologia introduziram, a partir de 1960, novos testes de pressão e em 1970 houve adaptação das técnicas de fabricação dos dutos, utilizando processos termomecânicos e, levando ao desenvolvimento dos dutos de categoria X70. Outra

técnica introduzida foi a têmpera, que aumentou ainda mais a resistência ao escoamento, levando à obtenção do tubo X80 (BIEZMA *et al*, 2019).

A crescente demanda por petróleo e gás se deu principalmente pela criação do motor à combustão (POPESCU;GABOR, 2021), e com a melhora das propriedades dos dutos houve um aumento de sua utilização para fins de transporte de líquidos e gases (BIEZMA *et al*, 2019). O aumento da demanda implica no aumento da capacidade de transmissão desses ativos (RUSIN *et al*, 2021).

As infraestruturas de dutos evoluíram, assim como seu tamanho, complexidade e os impactos decorrentes de suas falhas. A indústria viu então a necessidade de evoluir os processos de prevenção de falhas através de novas formas de inspeção e da utilização de inibidores de corrosão (BIEZMA *et al*, 2019). Além dos avanços na tecnologia, foi identificada a importância da utilização de análises de riscos que permitem uma abordagem mais analítica, auxiliando na identificação e solução de possíveis falhas nos dutos (POPESCU; GABOR, 2021).

As melhorias trouxeram impactos significativos para a solução de falhas na indústria Norte Americana. Entre 1990 e 2012 houve uma queda de 70% na quantidade de falhas por km de dutos. Apesar dos números apresentarem uma queda nas falhas, considerando o grau de periculosidade em dutos que transportam líquidos tóxicos, é preciso garantir que haja um bom controle e gerenciamento dos dutos, garantindo a segurança dos transportes de petróleo e gás (GOODFELLOW; JONSSON, 2015).

A fim de classificar os incidentes em dutos de forma simplificada, alguns especialistas definiram quatro principais causas: danos causados por terceiros, corrosão, erro de design e construção e condições incorretas de operação. Os autores reportam em seus estudos que a corrosão e os danos causados por terceiros são os que mais contribuem com a recorrência de incidentes (POPESCU; GABOR, 2021).

### **3.4 Incidentes envolvendo Oleodutos e Gasodutos**

#### **3.4.1 Bases de Dados**

Existem diversas bases de dados ao redor do mundo que coletam dados dos incidentes envolvendo a indústria de Petróleo e Gás. Nos Estados Unidos há a PHMSA, no Canadá a Base de Dados de Incidentes com Dutos (PID), no Reino Unido a Associação de Operadores de Dutos Onshore do Reino Unido (UKOPA), na Europa o Grupo Europeu de Dados de

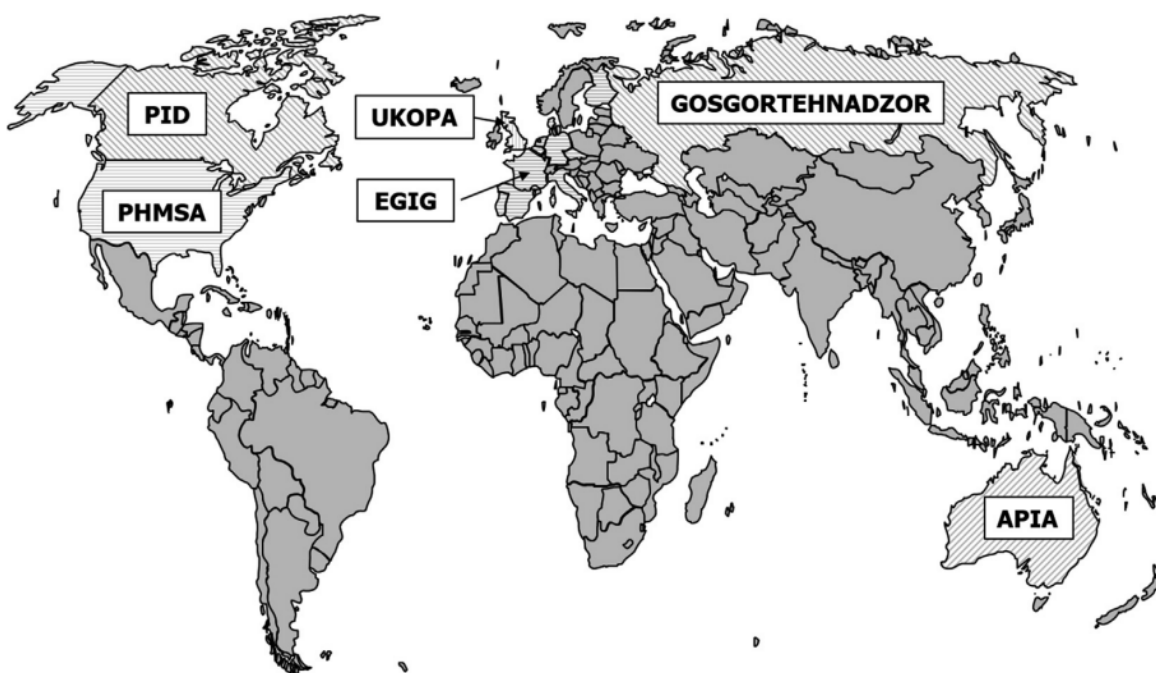
Incidentes com Dutos de Gás (EGIG), na Rússia Serviço Federal para Meio Ambiente e Supervisão Nuclear e Tecnológica, e na Austrália a Associação da Indústria Australiana de Dutos (APIA) (POPESCU; GABOR, 2021).

A maioria dos países não possuem um sistema de coleta de dados oficial para reportar os incidentes, o que pode ser observado na Figura 3, onde os países tracejados são os únicos que possuem. Pode ser observado também, que o Brasil não está entre os países que possuem um sistema de coleta de dados oficial (POPESCU; GABOR, 2021).

Popescu (2021) defende que é importante que haja uma base de dados globalmente unificada, pois cada região segue padrões distintos para reportar os acidentes, o que dificulta o processo da análise de dados de forma a determinar os impactos dos incidentes a nível global, ou ainda gerar correlações que permitam a diminuição da recorrência dos mesmos.

A falta de um banco de dados padronizado dificulta ainda mais a união da indústria de dutos de Petróleo e Gás em prol da unificação dos critérios que permitam a identificação das variáveis que induzem a falha, para assim preveni-la. É importante ressaltar que a comunidade científica entende a importância das bases de dados oficiais. Um passo importante foi dado com o desenvolvimento de um banco de dados do Sistema Inteligente de Análise de Falhas (FAES), que utiliza um algoritmo com redes neurais artificiais (BIEZMA *et al*, 2019).

**Figura 3 - Bases de Dados oficiais de incidentes existentes no mundo**



Fonte: BIEZMA *et al*, 2019.

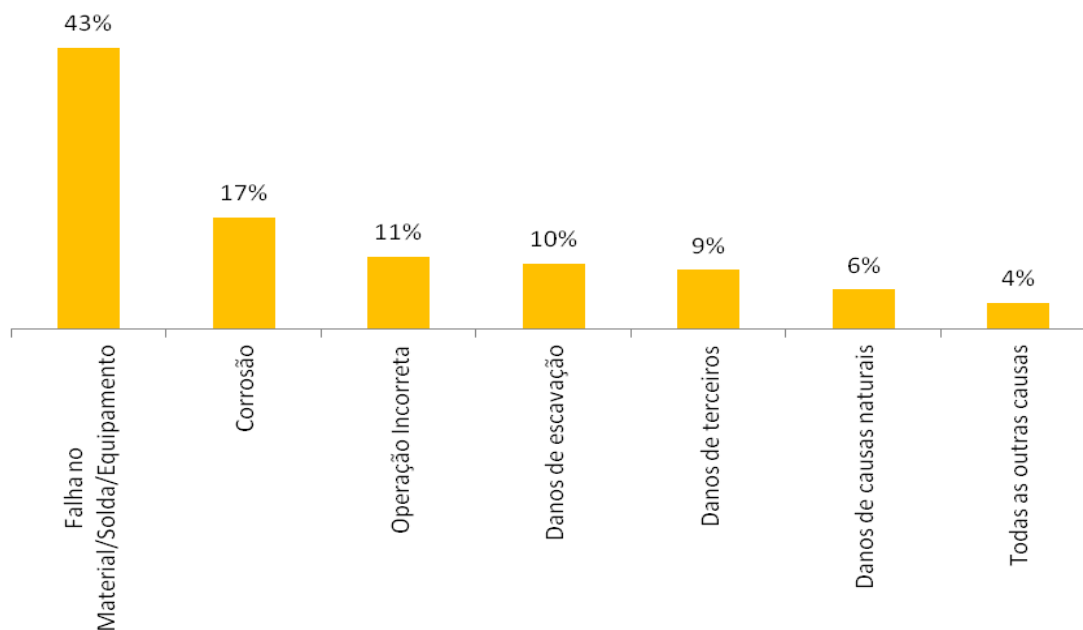
### ***3.4.2 Principais causas de falhas nos dutos***

Apesar das medidas de segurança que são aplicadas no design, construção e operação dos dutos é impossível garantir a ausência de falhas, tomando a Europa como exemplo, a média geral de falhas entre 1970 e 2016 foi de 0,31 falhas a cada 1000 Km de dutos por ano. Segundo Biezma *et al* (2019), a PHMSA estabelece 8 diferentes categorias de incidentes nos dutos:

- I. Corrosão: Consiste na deterioração de um duto metálico que resulta de uma reação eletroquímica entre a superfície do metal e o ambiente em que se encontra, tendo como consequência a perda de material metálico. A PHMSA divide a corrosão dos dutos metálicos em diferentes tipos: corrosão externa, corrosão interna, corrosão stress-cracking e corrosão seletiva.
- II. Danos de escavação: quando causados por escavações imprudentes em um duto subterrâneo que em algum momento resultará na falha repentina deste duto.
- III. Danos de fenômenos naturais: quando ocorrem devido a fenômenos naturais, como enchentes, terremotos ou raios.
- IV. Danos de outras causas externas: quando causados por acidentes automobilísticos, vandalismo, boicote ou como consequência de outro acidente nas proximidades.
- V. Material/Defeito de soldagem: quando ocorre devido a defeitos, impurezas, composição química ou técnicas inapropriadas de soldagem.
- VI. Falha de equipamentos: quando há falha de um componente ou dispositivo que não é o duto.
- VII. Operação incorreta: quando é induzido por fatores humanos, como por exemplo, um erro cometido por um operador.
- VIII. Todas as outras causas: subcategorias que não possuem classificação

Na Figura 4 é mostrado o comportamento da distribuição dessas causas entre os anos 2009 e 2018, onde os itens 1 e 5 da classificação se destacam com maior recorrência.

**Figura 4 - Distribuição das causas de incidentes em dutos da PHMSA (2009-2018)**



Fonte: Adaptado de BIEZMA *et al*, 2019.

A base de dados EGIG possui uma classificação menor, com 5 categorias (BIEZMA *et al*, 2019), são elas:

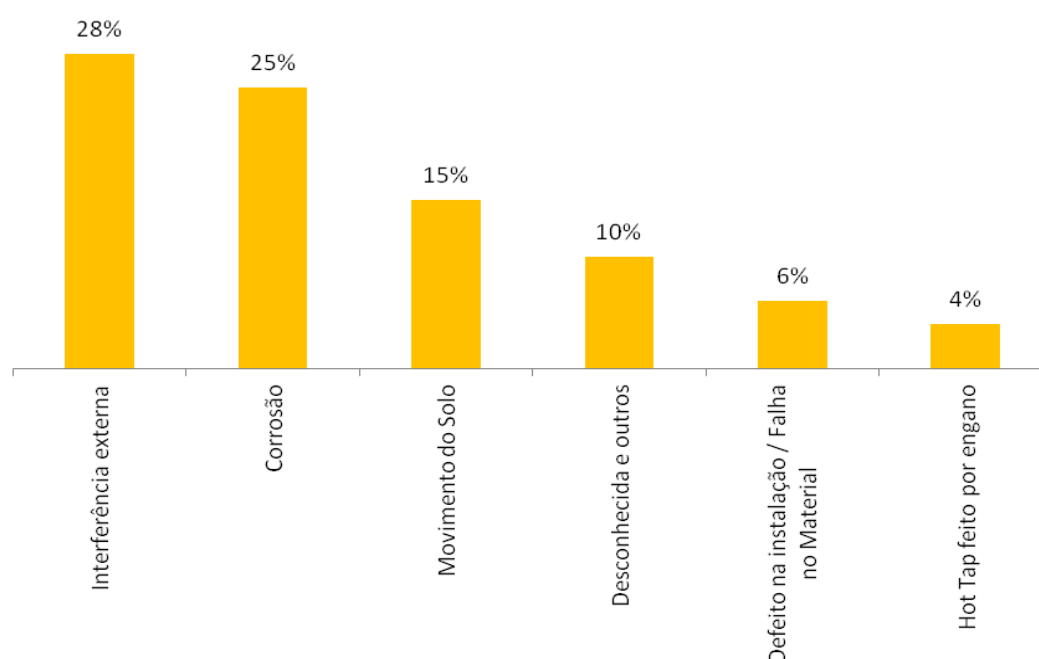
- I. Corrosão: engloba todas as falhas causadas por todos os tipos de corrosão, ainda que EGIG afirme nos relatórios que é preciso fornecer informações adicionais sobre o mecanismo de corrosão específico de cada incidente.
- II. Inferência externa: falhas provocadas por escavações, perfurações e obras. É muito similar ao item 1 das categorias do PHMSA.
- III. Defeito de construção/falha no material: Equivalente ao item 5 da classificação da PHMSA.
- IV. Movimentos no solo: falhas causadas por ruptura de dique, erosão, inundação, deslizamento de terra, mineração, rios ou desconhecidos.
- V. Outros e desconhecidos: sub-causas fora das categorias, como erro de design, erros de manutenção, entre outros.

Na Figura 5 é mostrado como estão distribuídas essas categorias de incidentes registrados na Europa entre 2007 e 2016. Pode-se observar que os itens 2 e 1 correspondem respectivamente às maiores causas de falhas nos dutos de petróleo e gás. Outro fator interessante, é que a diferença entre a corrosão e a primeira causa mais recorrente é bem

menor para a base de dados EGIG do que para a base de dados PHMSA e que comparativamente as duas distribuições são muito diferentes entre si, tendo como fator comum somente o fato de que a corrosão se apresenta como segunda causa mais frequente (BIEZMA *et al*, 2019). Tal fato pode ser explicado pela fiscalização mais rigorosa dos Estados Unidos, quando comparada aos outros países, uma vez que o país obriga as organizações, por lei, a reportar os incidentes em dutos (POPESCU;GABOR, 2021).

Assim, os dados da PHMSA são considerados mais confiáveis por apresentarem informações que refletem melhor a realidade, enquanto os dados EGIG são menos assertivos, podendo apresentar até mesmo inconsistências.

**Figura 5 - Distribuição das causas de incidentes em dutos da EGIG (2007-2016).**

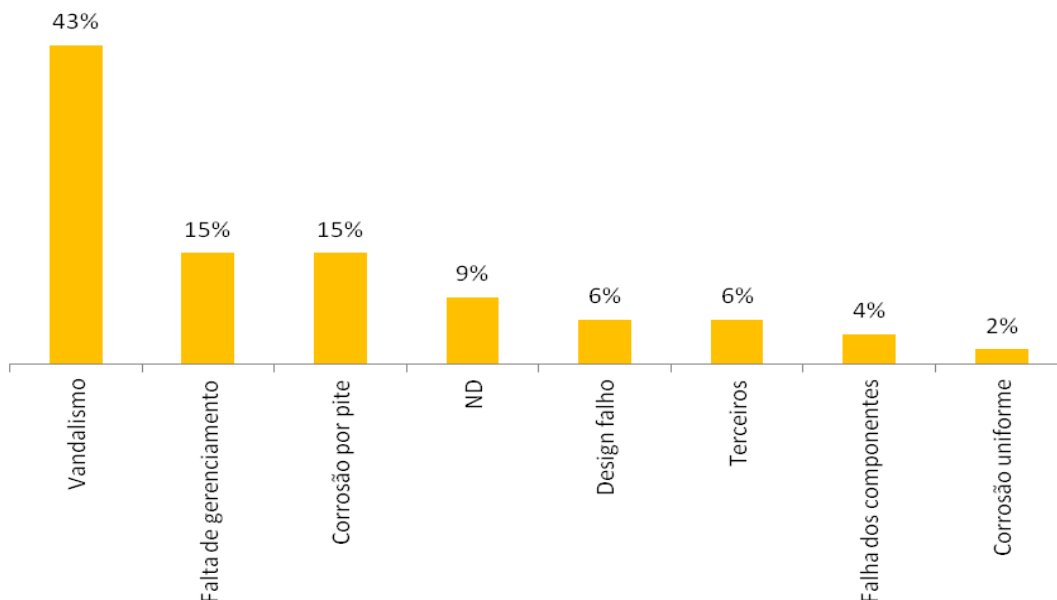


Fonte: Adaptado de BIEZMA *et al*, 2019.

Biezma *et al* (2019) considera em seu estudo, onde são comparadas as bases de dados PHMSA e EGIG, que a melhor abordagem para determinar os acidentes mais letais é a utilização de um sistema de nomenclatura que se adapte às falhas analisadas. Desta forma, foram selecionados pontos intermediários entre as duas bases, tendo em vista que a base do PHMSA é mais completa e detalhada e que a EGIG não seria suficiente para cobrir todas as particularidades.

Na Figura 6 é mostrada a distribuição dos incidentes de acordo com a nova classificação, onde mais uma vez a corrosão aparece como segunda causa mais recorrente, dessa vez empatada com mau gerenciamento e ficando atrás apenas de vandalismo.

**Figura 6 - Distribuição das fatalidades de incidentes mais letais PHMSA e EGIG**



Fonte: Adaptado de BIEZMA *et al*, 2019.

A classificação utilizada pelos autores segue os seguintes critérios:

- I. Vandalismo: acidentes causados por ladrões a fim de roubar combustíveis;
- II. Corrosão uniforme: falha causada pelo afinamento uniforme do interior ou exterior do duto devido à corrosão uniforme;
- III. Corrosão por pite: falha provocada pela corrosão por pite do duto;
- IV. Danos causados por terceiros: falhas provocadas por escavações, perfurações e obras;
- V. Falha no Design: falha provocada por um erro no design do duto;
- VI. Falta de gerenciamento: falhas induzidas por fatores humanos;
- VII. Falha do componente: falha de um dos componentes do duto;
- VIII. Não definido: não há informações que levem à causa do acidente;

Após classificar as causas, utilizou-se o critério do número de fatalidades para elencar os 23 acidentes mais letais, que somados, causaram um total de 4329 fatalidades (Tabela 1). Dentre os países listados, a Nigéria corresponde a 43% dos acidentes mais fatais. Os autores ressaltam que grandes esforços têm sido despendidos para mitigar esta recorrência, o que

mostra uma forte influência da análise de dados na redução de incidentes (BIEZMA *et al*, 2019).

**Tabela 1 - Acidentes mais letais ao longo da história no mundo**

Data	Localização	Fatalidades	Causa raiz	Substância
Outubro de 1998	Lagos, Nigéria	1078	Vandalismo	Gasolina
Novembro de 1984	San Juanico, México	650	Corrosão localizada	Gás Natural
Junho de 1989	Ufa, Rússia	643	Má gestão	Gás Natural
Dezembro 2006	Lagos, Nigéria	466	Vandalismo	Petróleo
Março de 1937	Texas, EUA	309	ND	Gás Natural
Abril de 1992	Guadalajara, México	252	Design defeituoso	Gasolina
Maior de 2006	Lagos, Nigéria	143	Vandalismo	Diesel
Junho de 2003	Abia, Nigéria	105	Vandalismo	Gasolina
Maior de 2008	Lagos, Nigéria	100	Danos causados por terceiros	Petróleo
Setembro de 2011	Nairobi, Quênia	100	Falha de componente	Petróleo
Agosto de 1970	Osaka, Japão	79	Danos causados por terceiros	Gás natural
Novembro de 2013	Qingdao, China	62	Corrosão uniforme	Petróleo
Março de 2004	Arkhangelsk, Rússia	58	Vandalismo	Gás Natural
Novembro de 1978	México DF, México	52	Falha de componente	Gás Natural
Novembro de 1996	San Juan, Porto Rico	33	Danos causados por terceiros	Propano
Julho de 2014	Kaohsiung, Taiwan	32	Corrosão uniforme	Propano
Dezembro 2010	Puebla, México	29	Danos causados por terceiros	Petróleo
Março de 1965	Quebec, Canadá	28	ND	Gás Natural
Julho de 2004	Ghislenghien, Bélgica	24	Danos causados por terceiros	Gás Natural
Junho de 2014	Andhra Pradesh, Índia	23	Má gestão	Gás natural
Agosto de 2013	Rosário, Argentina	22	ND	Gás Natural
Outubro de 1971	Renfrewshire, Escócia	22	ND	Gás Natural
Janeiro de 1976	Nebraska, EUA I	20	Design defeituoso	Gás Natural

Fonte: Adaptado de BIEZMA *et al*, 2019.



### 3.5 Corrosão como causa de incidentes em Dutos

O Petróleo Cru e o Gás Natural geralmente carregam impurezas que são corrosivas em diversas circunstâncias: água, sulfeto de hidrogênio ( $H_2S$ ) e dióxido de carbono ( $CO_2$ ). Além disso, mudanças na temperatura e pressão também podem desencadear no processo de corrosão. A degradação dos metais leva, usualmente, à perda de propriedades mecânicas como ductilidade e resistência mecânica, o que leva à eventual perda da espessura e consequente falha do material (ALAMRI, 2020).

Na distribuição das causas dos incidentes da PHMSA entre 2009 e 2018 (Figura 4) foi mostrado que a Corrosão, sozinha, corresponde a 17% dos incidentes em dutos de petróleo e gás, o que demonstra a relevância da corrosão como causa desses incidentes, uma vez que fica atrás apenas de “Materiais/Falha de Solda/Falha no Equipamento”, sendo que as 3 categorias juntas correspondem a 43% dos incidente, e não são avaliadas de forma individual como a corrosão (BIEZMA et al, 2019).

As falhas por corrosão podem se dar em forma de vazamentos ou rupturas. Vazamentos são mais comuns, porém os vazamentos em gasodutos não causam danos em propriedades, uma vez que o gás se dispersa na atmosfera. Em contrapartida, o vazamento de líquidos pode contaminar solos, lençóis freáticos ou meios aquosos da superfície. No entanto, é necessário ressaltar que a ruptura em gasodutos apresenta maior possibilidade de explosão e incêndios, causando, em média, mais fatalidades e ferimentos (BAKER, 2008).

#### 3.5.1 Definição de corrosão

Corrosão pode ser definida pela deterioração ou destruição de um material pela ação do meio, associada, ou não, a esforços mecânicos. Pode ocorrer de forma acelerada ou lenta, e podemos considerá-la como um processo inverso de metalurgia extrativa, em que o metal retorna ao seu estado original. Sabe-se que a corrosão pode ser classificada como ‘corrosão molhada’, quando envolve uma solução ou um eletrólito (de maior recorrência) ou ‘corrosão seca’, quando não há uma fase líquida mas sim vapores e gases, estando geralmente associada à altas temperaturas (FONTANA, 1987).

O processo de corrosão ocorre em função de três componentes: o anodo, o eletrólito e o catodo. O anodo representa o metal que está sofrendo corrosão, o eletrólito corresponde ao meio corrosivo que transfere elétrons do anodo para o catodo e o catodo, por sua vez, corresponde ao condutor elétrico que não é consumido durante o processo (ALAMRI, 2020).

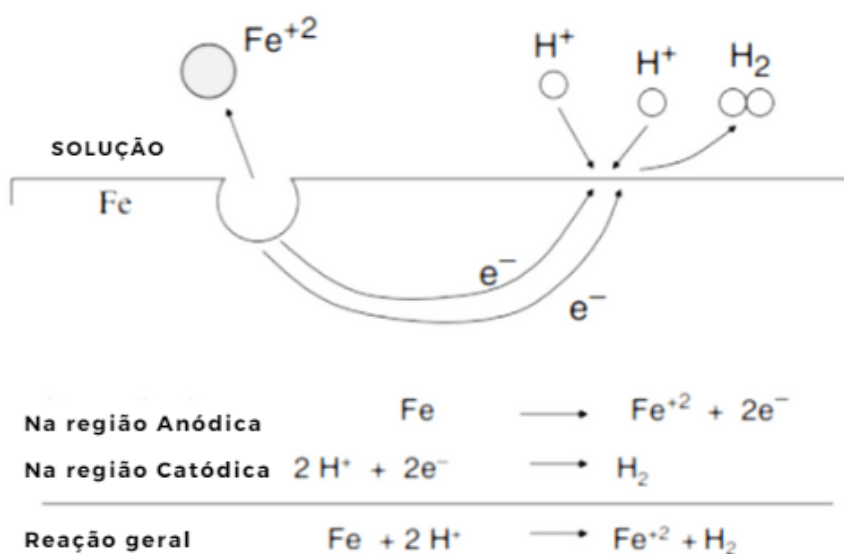
### 3.5.2 Mecanismo Eletroquímico de corrosão

Compreende-se que a corrosão é definida pela deterioração de um material pela ação do meio, uma outra definição também muito conhecida diz que a corrosão é a transferência simultânea de massa e carga, através de uma interface formada entre o metal e a solução (FONTANA, 1987; MCCAFFERTY, 2009). Através das reações de oxirredução, pode-se explicitar como ambas definições se relacionam, bem como aprimorar o entendimento da segunda definição.

Existem dois tipos de reação de oxirredução, na reação anódica o metal sofre oxidação, perdendo elétrons. É onde ocorre a perda de massa desse metal e consequentemente a deterioração deste, caracterizando a corrosão. Já na reação catódica, o outro componente envolvido na reação sofre redução através do recebimento dos elétrons liberados na reação anódica, como representado na Figura 7 (MCCAFFERTY, 2009).

Durante a corrosão, ambas reações ocorrem ao mesmo tempo, porém em regiões distintas da superfície (MCCAFFERTY, 2009). Faz sentido afirmar isso, uma vez que seria impossível que o metal se tornasse eletricamente carregado de forma espontânea, que é o que ocorreria caso as reações ocorressem isoladamente. Um dos princípios básicos da corrosão está diretamente ligado a essa dedução, afirmando que a taxa de corrosão e oxidação são equivalentes durante o processo, em termos de produção e consumo de elétrons (FONTANA, 1987).

**Figura 7 - Representação do mecanismo eletroquímico de corrosão**



Fonte: Adaptado de MCCAFFERTY, 2009.

É importante destacar que essa reação simultânea é possível devido à natureza heterogênea da superfície metálica, que é consequência das diferentes estruturas cristalinas e contornos de grão, entre outros defeitos presentes. Além disso, podem haver contaminantes na superfície que provocam uma mudança na energia dos átomos que estão em volta. Os átomos nos sítios de maior energia são mais propensos a passar para a solução e os sítios de maior energia atraem átomos nas bordas dos planos cristalinos, estabelecendo uma nova energia de distribuição de sítios. Assim, as posições de reações anódicas e catódicas mudam de maneira aleatória e o resultado é a corrosão uniforme do metal (MCCAFFERTY, 2009).

Sabendo que as reações anódicas e catódicas são mutuamente dependentes pode-se reduzir a corrosão ao diminuir a taxa de uma das reações, por exemplo, pode-se eliminar a redução do oxigênio impedindo o contato do ar com a solução aquosa, ou removendo o ar que foi dissolvido. Uma forma de inibir ambas as reações é através da utilização de tintas ou filmes, os quais chamamos de inibidores da corrosão (FONTANA, 1987).

### ***3.5.3 Morfologia da corrosão***

As duas principais formas de ocorrência da corrosão são a localizada e a uniforme. A corrosão uniforme ocorre em toda a superfície do metal causando uma diminuição da espessura da peça, enquanto na corrosão localizada a posição dos anodos e catodos se mantém fixa, intensificando o processo de corrosão em pontos específicos do material, podemos citar três tipos, são eles corrosão por pite, por placas e alveolar (MCCAFFERTY, 2009).

A corrosão por placas se caracteriza pela formação de placas com escavações, que se desprendem progressivamente devido aos deslocamentos que realizam enquanto a alveolar possui as características de alvéolos com diâmetro maior que a profundidade. Já o pite se diferencia da alveolar porque possui profundidade maior do que o diâmetro (FONTANA, 1987).

### ***3.5.4 Corrosão por pite***

O segundo acidente mais letal da história ocorreu em San Juanico, no México, e a indicação de causa do acidente foi corrosão por pite. O duto transportava gás liquefeito de petróleo (LPG) quando houve uma explosão inicial que gerou uma série de explosões de reação em cadeia, combinado ao fato da tubulação atravessar um complexo residencial na área da falha, causando um número expressivo de mortes. Uma das lições aprendidas com

esse acidente foi a importância da correta seleção de materiais no projeto dos dutos, levando em consideração a ocorrência de corrosão por pite, priorizando materiais que não estão sujeitos a esse tipo de corrosão (BIEZMA et al, 2019).

A corrosão por pite é um tipo de corrosão localizada conhecido por formar buracos na superfície do metal, esses buracos na maioria das vezes são muito pequenos com baixo percentual de perda de massa. Apesar disso, é considerado o tipo de corrosão mais destrutivo, principalmente pela dificuldade em detectá-los, uma vez que é necessário um período prolongado de instauração antes de se tornarem visíveis (FONTANA, 1987).

Uma característica importante do pite é que pode ser classificado como corrosão lenta, sendo rápida somente em casos extremos, e é considerada auto-propagante pois as condições observadas durante a corrosão estimulam o processo. Além disso, geralmente ocorrem na direção da gravidade e em superfícies com planos horizontais, sendo menos recorrentes em planos verticais (FONTANA, 1987).

O anodo é representado pelo pite e o catodo pelo restante da camada passiva. Ocorre sempre devido à presença de um ânion agressivo, como cloro (Cl<sup>-</sup>), em que sua concentração está diretamente relacionada à severidade da corrosão (ALAMRI, 2020).

### ***3.5.5 Materiais utilizados na produção de dutos e sua influência na corrosão***

Visando redução de custos, o aço de baixo carbono é muito utilizado na construção de dutos para a indústria de gás natural, porém quando comparado a outros tipos de aço este apresenta baixa resistência à corrosão (ALAMRI, 2020). É composto principalmente de ferro com 1% a 2% de elemento de liga para melhorar a resistência mecânica e a tenacidade, onde as ligas são consideradas irrelevantes na prevenção à corrosão (BAKER, 2008). Um estudo mais antigo, entretanto, afirmava que para aplicações que exijam resistência à corrosão e à oxidação, utilizam-se aços-liga, aumentando principalmente o teor de cromo, para melhorar o limite de resistência à corrosão e à oxidação, além de aumentar ligeiramente o limite de escoamento, e resistência à tração (CHIAVERINI, 1996).

Pode ser considerada a existência de dois tipos de tubos fundamentais: os com costura e os sem costura. Os tubos com costura são obtidos a partir de tarugos maciços passando por processos diversos, em grande parte perfuração, extrusão ou mandrilamento, e podem atingir até 660 mm de diâmetro. Já os tubos sem costura são fabricados a partir de tiras de aço laminadas a quente, a largura da tira corresponde à circunferência do tubo e a espessura corresponde à espessura do tubo, estas são aquecidas a elevada temperatura e em seguida

passadas através de uma matriz que as dobra no formato de um cilindro, enquanto as extremidades são soldadas para formar o tubo, estes podem atingir até 762 mm de diâmetro (CHIAVERINI, 1996).

A produção dos tubos é finalizada com o estiramento a frio, que busca obtenção de paredes mais finas, diâmetros muito pequenos, melhor acabamento superficial, tolerâncias dimensionais mais rigorosas, melhores propriedades mecânicas (como resistência à tração), produção de formas diferentes da circular (CHIAVERINI, 1996).

### ***3.5.6 Fatores que influenciam a corrosão em oleodutos e gasodutos***

A corrosão em dutos é muito difícil de se prever, alguns dos fatores que dificultam a investigação e mitigação desse defeito são listados a seguir:

- As propriedades químicas do meio em torno de um duto subterrâneo não podem ser determinadas de forma assertiva;
- Existem variações da concentração de oxigênio, teor de umidade e composição química do solo ao longo e de cima a baixo do duto e podem atuar como concentradores que provocam corrosão;
- Teor de umidade e teor de oxigênio do solo também variam com o tempo;
- A qualidade do revestimento não é a mesma ao longo de todo o duto;
- O revestimento, muitas vezes, descola da superfície do duto;
- O revestimento que descolou impede a detecção de condições de corrosão subjacentes;
- Variações físicas no solo e localização do duto afetam a distribuição de corrente de proteção-catódica;
- A inspeção visual da superfície externa e do revestimento do duto requer escavação;
- Corrente de Foucault dos arredores de estruturas subterrâneas podem interferir na proteção-catódica dos dutos;

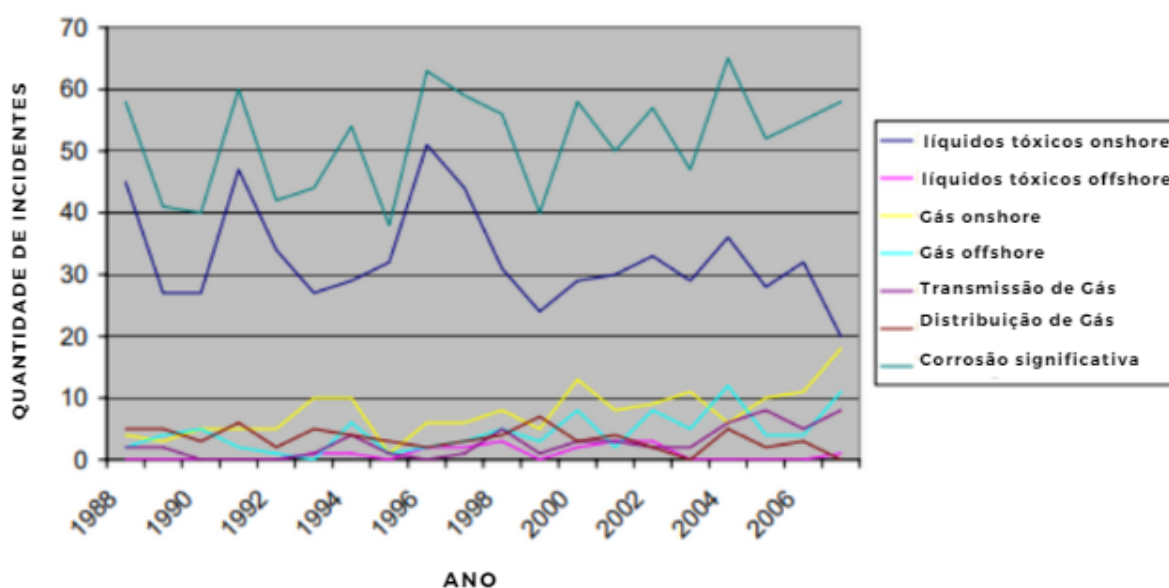
Portanto, a corrosão é um defeito muito difícil de ser controlado, uma vez que é necessário ter controle sobre o comprimento e diâmetro (muitas vezes grande) de uma estrutura de metal que se encontra em um ambiente que possui propriedades físicas e químicas indeterminadas, e que ainda possui o dificultador de não permitir observação direta da maior parte de sua estrutura (BAKER, 2008).

### 3.5.7 Corrosão como causa de incidentes em dutos nos Estados Unidos

Em 2008 o “U.S. Department of Transportation - Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration” fez uma análise dos dados num período de 20 anos, de 1988 a 2008. Neste intervalo de tempo a Corrosão correspondia a 18% do total de incidentes significativos, ficando atrás apenas de danos de escavação (BAKER, 2008).

De acordo com o Departamento de Transporte dos Estados Unidos, mais de 50% do sistema de dutos atual foi construído entre a década de 50 e 70, 5% foi construído antes da década de 40 e o restante após a década de 70 até os dias atuais (BIEZMA *et al*, 2019). Porém, as análises (Figura 8) indicam que os incidentes de corrosão não foram influenciados pela idade dos dutos, ao longo do tempo (BAKER, 2008).

**Figura 8 - Histórico de incidentes de corrosão mais significativos nos EUA**



Fonte: Adaptado de BAKER, 2008.

Dos incidentes mais significativos que ocorreram no período de 20 anos, houveram 30 fatalidades, 100 ferimentos e U\$551.000.000,00 em danos em propriedades. Um fato interessante é que mesmo que a corrosão fique atrás de danos de escavação quando se refere à quantidade de incidentes, os custos de danos em propriedades é menor para danos de escavação, o que confirma a importância de estudar a corrosão em dutos de petróleo e gás (BAKER,2008).

Quando se trata de oleodutos, quase todos os incidentes de corrosão envolveram dutos *onshore*, poucos envolveram dutos *offshore*. e devido ao isolamento dessas estruturas, não ocorreram fatalidades ou lesões. Foram reportados um número muito maior de falhas por

corrosão, por milhas, em gasodutos *offshore*, onde 97% ocorreram devido à corrosão interna, em contrapartida, dos incidentes *onshore* reportados, 77% ocorreram devido à corrosão externa (BAKER, 2008).

Em 1970 foi instaurada uma lei (49 CFR Part 192) que determinava os requisitos para as instalações de dutos. Antes dessa lei, não era um requisito que tivessem uma camada protetora ou proteção catódica, sendo assim, muitas instalações mais antigas passaram muitos anos sem nenhum tipo de proteção e podem ter sofrido danos por corrosão (BAKER, 2008).

### **3.6 Metodologia do Estudo de Caso**

A escolha do método ideal para um estudo depende de alguns fatores, é preciso analisar principalmente a natureza da questão a ser estudada e os métodos disponíveis que mais se encaixam no contexto do estudo (NOOR, 2008). Os métodos para um estudo podem ser definidos como pesquisa documental, de campo, levantamento, survey, experimental, bibliográfica ou estudo de caso (YIN, 2003).

#### **3.6.1 Definição do estudo de caso**

O Estudo de caso é o método ideal para situações em que se busque entender o “Porquê?” e “Como?” de uma situação específica, tendo como base os cenários em que se pode controlar eventos pré-determinados. É um método baseado em uma estruturação lógica que utiliza análise de dados como principal ferramenta (YIN, 2002). Após identificar o método ideal é necessário entender o que vai ser estudado e compor a sequência lógica para guiar o estudo (CAUCHICK, 2007).

O entendimento das questões para as quais se deseja obter resposta é de extrema relevância para o estudo de caso, é pela definição do objetivo do trabalho que se cumpre o papel de estabelecer essas perguntas (CAUCHICK, 2007). O estudo de caso permite o entendimento de situações complexas da vida real, é muito útil para entender profundamente um problema específico ou uma situação e deve ser rico em informações acerca destes (NOOR, 2008).

É preciso que haja uma boa revisão bibliográfica na qual o estudo se baseie, desta forma as lições aprendidas serão mais propensas a um conhecimento avançado e entendimento sobre o tema. Também é muito importante que se identifique o “caso” (unidade

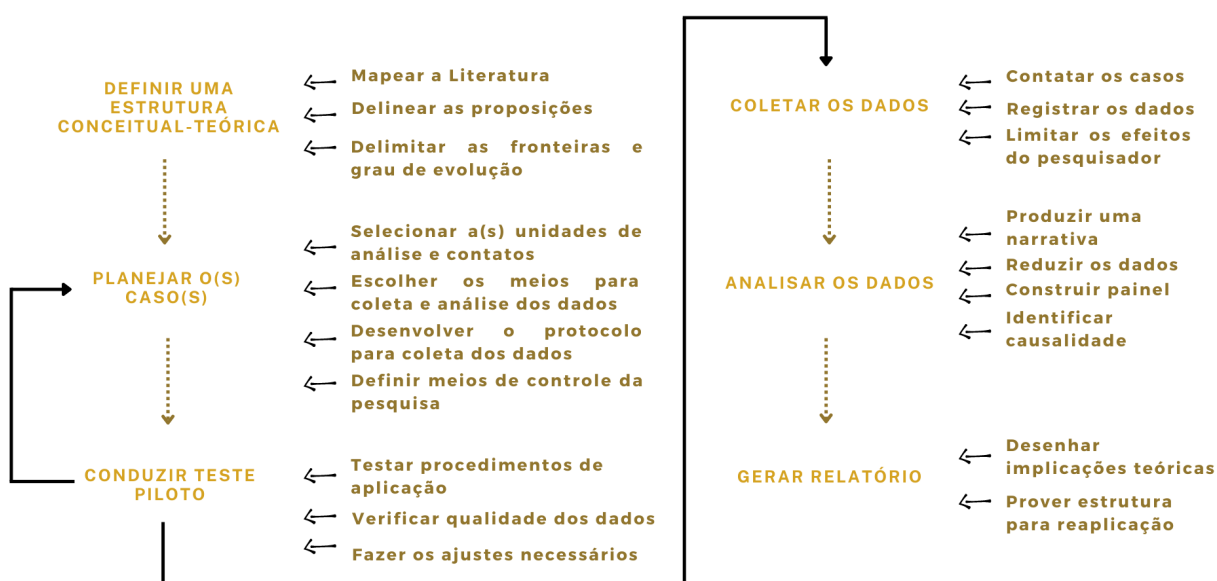
de análise), assim os critérios, as variáveis de interesse e os dados a serem coletados serão bem definidos (YIN, 2003).

### 3.6.2 Estruturação do estudo de caso

Sua estruturação pode ser feita de diferentes formas, porém a maioria dos trabalhos segue um padrão no escopo geral e se diferencia apenas nos detalhes. A metodologia mais universalmente aceita é a de Yin (BASKARADA, 2014).

Baseado no trabalho de Yin (2003), em 2007 um trabalho foi desenvolvido para o contexto da Engenharia, descrevendo uma metodologia para condução do estudo de caso que seria mais adequada a este contexto, como ilustrado na Figura 9 (CAUCHICK, 2007).

Figura 9 - Fluxo da construção de um estudo de caso aplicado à Engenharia



Fonte: Adaptado de CAUCHICK, 2007.

A construção do estudo tem início na revisão da literatura, com o intuito de estruturar o tema que será discutido. É através dessa base que identificam-se as fronteiras do que será investigado, apresentam-se os últimos estudos acerca do tema e também as lacunas sobre o tema estudado (CAUCHICK, 2007).

Em seguida, inicia-se o planejamento do estudo de caso, incluindo os métodos a serem aplicados e os casos a serem analisados. Após o planejamento, ao contrário do que se espera, não é o momento de dar início ao estudo de caso (YIN, 2002), primeiramente há uma etapa



de “Teste Piloto” na qual é feito um teste dos métodos escolhidos para realização de eventuais ajustes (CAUCHICK, 2007).

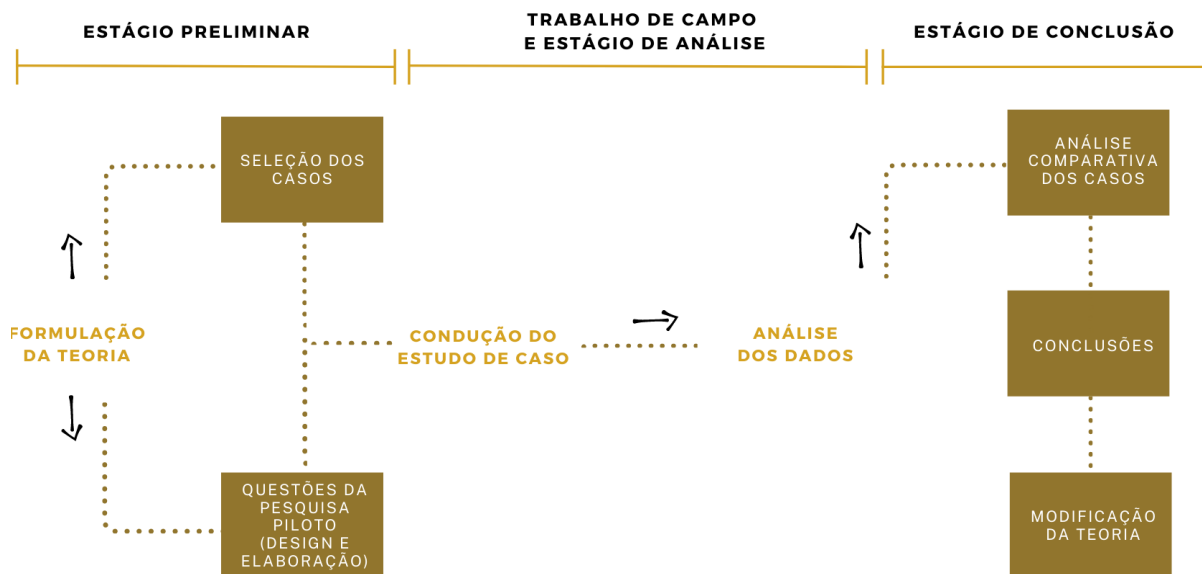
Existem premissas e restrições para cada método e essas devem ser levadas em consideração ao longo do estudo. A quantidade de casos, por exemplo, é uma determinação importante, assim como o recorte de tempo, e pode ser retrospectivo ou longitudinal, levando em conta se os dados analisados já foram ou serão coletados. Para definir esses aspectos será necessário estabelecer as estratégias de acordo com o objetivo geral, porém é de se esperar que os dados utilizados sejam longitudinais combinados com retrospectivos. Ao mesmo tempo que a análise de dados retroativos é capaz de trazer “insights” sobre o tema, é necessário acompanhar os novos casos a fim de confirmar ou refutar hipóteses (CAUCHICK, 2007).

Por fim, a condução do estudo de caso, propriamente dito, consiste em três fases: coleta e análise dos dados, seguidos da elaboração de um relatório com as conclusões obtidas a partir do estudo. Usualmente, são empregadas múltiplas fontes de evidência que sejam importantes para o fenômeno estudado, o que é importante para alcançar uma maior extensão pela qual a observação medirá o conceito proposto (CAUCHICK, 2007). O investigador deve buscar convergência e divergência dos dados e a coleta deve ser considerada concluída quando a quantidade de dados e informações for considerada suficiente para endereçar a questão da pesquisa (CAUCHICK, 2007).

A partir do conjunto de dados coletados constrói-se uma narrativa geral do caso, o que não implica na inserção de todos os dados coletados no relatório da pesquisa. O que ocorre geralmente é uma redução dos dados de forma que apenas o essencial e que possui estreita ligação com o objetivo seja incluído. Durante a análise de dados é interessante que se construa um painel com os dados, apresentando um resumo das evidências, para posterior análise cruzada. O objetivo principal de um estudo de caso é a contribuição para a teoria vigente, de forma a substituí-la, refiná-la ou estendê-la. As conclusões serão comparadas com ela, buscando responder a questão: a teoria corresponde aos fenômenos estudados em diferentes contextos? (CAUCHICK, 2007).

Em um trabalho desenvolvido em 2008 foi mostrada outra estrutura para o Estudo de Caso que segue uma lógica parecida. A divisão do Estudo de caso é feita em três estágios, e cada um deles dividido em etapas, como mostrado no Figura 10 (NOOR, 2008).

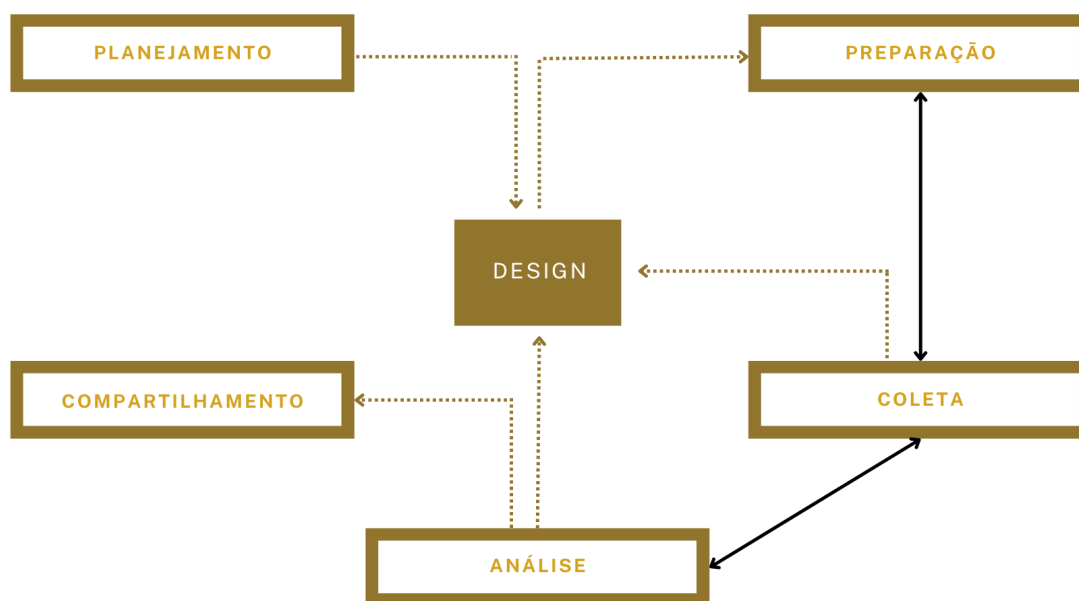
Figura 10 - Estruturação de um estudo de caso



Fonte: Adaptado de NOOR, 2008.

Em 2014 a metodologia de Yin (2002) foi adaptada, com a integração de literaturas adicionais para facilitar o trabalho dos estudantes. Conhecida como: investigação de seis etapas, é dividida nas etapas de planejamento, design, preparação, coleta, análise e compartilhamento, como demonstrado na Figura 11 (BASKARADA, 2014).

Figura 11 - Etapas de um Estudo de Caso



Fonte: Adaptado de BASKARADA, 2014.

A etapa de planejamento pode ser considerada a etapa mais importante da metodologia de um estudo de caso. O planejamento foca na identificação das perguntas que serão feitas, na escolha (ou não) do estudo de caso como metodologia, quando comparado a outras metodologias e o entendimento de seus pontos fortes e limitações (YIN, 2002). A metodologia deste estudo também tem início com a revisão de literatura, onde o objetivo é identificar as principais questões e fundamentos sobre o tema, e a partir dela identificar, de acordo com os fenômenos observados, quais são os pontos principais a serem investigados nos passos que virão a seguir (BASKARADA, 2014).

A etapa de design consiste na definição da unidade de análise e os casos que serão estudados, na criação de teorias e identificação de questões subjacentes ao estudo antecipado, na escolha do tipo de estudo de caso (único, múltiplo, holístico ou incorporado) e a utilização de procedimentos que garantem a qualidade do estudo de caso (BASKARADA, 2014).

Na preparação são mapeadas as possíveis limitações e empecilhos do estudo, objetivando a condução do caminho mais adequado para que se obtenha resultados coerentes e condizentes com a realidade. A etapa de preparação consiste no desenvolvimento de habilidades requeridas para um investigador de estudo de caso, condução de um caso piloto e obtenção de aprovações relevantes. É preciso que o investigador tenha familiaridade com o assunto, a ponto de entender os conceitos principais e as questões teóricas e metodológicas relevantes para o estudo (BASKARADA, 2014).

Seguindo para a coleta são utilizadas ferramentas e fontes de evidência para obtenção de dados, e conseqüentemente respostas para as questões elaboradas na etapa de planejamento. Recomenda-se a utilização de múltiplas fontes para que o alcance de dados do estudo seja maximizado (BASKARADA, 2014). Existem 6 tipos de fontes de dados que podem ser consideradas ao elaborar um estudo de caso: documentações, arquivos, entrevistas, observação direta, observação indireta e artefatos físicos. Os tipos de fontes de dados devem, idealmente, ser definidos nas etapas anteriores (YIN, 2002).

A base de dados de um estudo de caso permite a criação de uma trilha de auditoria desde a coleta de dados, passando pela análise e chegando às conclusões finais. É preciso que o leitor seja capaz de vincular as conclusões ao relatório do estudo de caso e suas questões originais. O uso de uma base de dados no estudo de caso aumenta a confiabilidade do estudo (BASKARADA, 2014).

Na etapa de análise os dados são compilados e analisados com o intuito de formular hipóteses que resultam em conclusões sobre o tema. A análise de dados, no contexto do estudo de caso, consiste em examinar, categorizar, tabular, testar ou recombinar as evidências

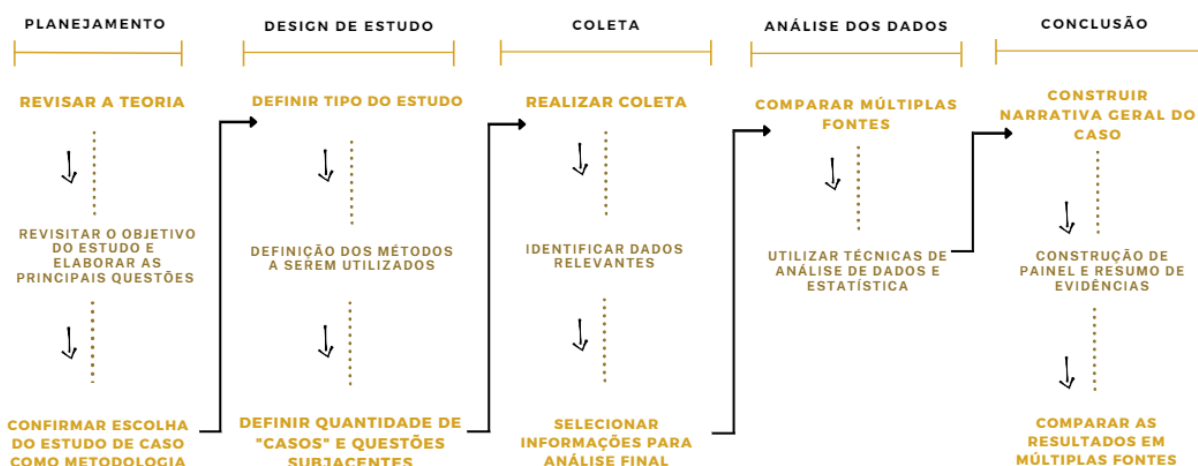
em questão a fim de tirar conclusões de maneira empírica, processo que deve ser guiado por uma teoria prévia. Os investigadores devem, a todo momento, estar abertos a revisar os preconceitos teóricos com base nas evidências que coletaram. Técnicas de correspondência de padrões, construção de explicações, análises de séries temporais, modelos lógicos e análises de casos cruzados podem ser utilizadas para analisar as evidências (BASKARADA, 2014).

O estágio de compartilhamento consiste na definição do público alvo e elaboração de materiais que facilitem a visualização, dispondo de evidências o suficiente para que o leitor tire suas próprias conclusões (YIN, 2002). Ao chegar nesta etapa, as conclusões obtidas são compiladas em um relatório e posteriormente apresentadas, aqui, os métodos utilizados e os resultados obtidos deverão ser expostos (BASKARADA, 2014).

## 4 METODOLOGIA

Foram analisadas as metodologias descritas por: Baskarada (2014) (descreve com mais detalhes a metodologia de estudo de caso), Cauchick (2007) (adapta a metodologia para o contexto da Engenharia) e Noor (2008) (apresenta uma divisão em etapas que torna mais lógico o desenvolvimento do estudo). Foi optado pela aplicação da combinação destas, alinhada aos objetivos do presente trabalho, definindo-se o fluxo de acordo com o ilustrado na Figura 12.

Figura 12 - Fluxo para condução do presente estudo de caso



Fonte: própria autora.

### 4.1 Planejamento

#### 4.1.1 Revisão da Teoria

A Revisão Bibliográfica deste estudo foi elaborada a partir das informações encontradas nos estudos de Alamri (2020), Baker (2008), Belvedersi, Thompson e Komers (2018), Biezma (2020), Cianciarullo (2019), Fontana (1987), Goodfellow, Jonsson e Katherine (2015), Kiefner e Rosenfeld (2012), Kishawy e Gabbar (2010), Peebles (1980), Popescu e Gabor (2021), Rusin (2021). Dos trabalhos destes autores, foram identificados os pontos mais relevantes para o tema e durante o estudo e aprofundamento sobre o assunto, algumas questões importantes foram levantadas.

#### ***4.1.2 Elaboração das principais questões***

Em concordância com os objetivos deste estudo e tendo em vista os pontos críticos identificados durante a revisão da teoria, as seguintes questões foram propostas:

- Como ocorre a corrosão em dutos offshore e onshore?
- Como os fatores externos influenciam na corrosão dos dutos?
- Como a natureza do produto transportado pode influenciar na corrosão?
- Como é feita a análise que determina a corrosão como causa dos incidentes?
- Porque a corrosão continua sendo uma causa recorrente de incidentes?

#### ***4.1.3 Confirmação da escolha do estudo de caso como metodologia***

A metodologia escolhida foi o estudo de caso, pois se trata da busca pelo entendimento de uma situação complexa da vida real, em conformidade com um dos objetivos de realizar um estudo de caso. Além disso, trata-se de um tema complexo, uma vez que os incidentes em dutos de petróleo e gás são comuns e recorrentes e ainda podem causar fatalidades e ferimentos e provocarem gastos e perdas exorbitantes. Outro ponto importante é que, como mencionado por Baker (2008), a corrosão em dutos é um assunto extremamente complexo, difícil de ser previsto ou evitado, principalmente devido às diversas variáveis que podem influenciar a ocorrência de incidentes desta natureza.

Desta forma, estudos aprofundados sobre o problema se apresentam como formas úteis de compreendê-lo, uma vez que foram analisados no contexto de múltiplas fontes. Além disso, o estudo de caso é o método ideal para situações em que se busque entender o “Porquê?” e “Como?” de situações específicas, é neste formato que se apresentam as perguntas propostas para o estudo, as quais foram identificadas através de pontos críticos encontrados em estudos da literatura (YIN, 2002; BASKARADA, 2014).

## **4.2 Design de Estudo**

### ***4.2.1 Definição do tipo do estudo de caso***

A escolha do tipo de estudo de caso baseou-se na metodologia de Yin (2002), que afirma que o estudo de caso explanatório é importante para indicar possíveis relações

causa-efeito entre o problema e as variáveis analisadas. Tem como objetivo analisar os dados do estudo, de forma que o investigador procure explicar um fenômeno estipulando um conjunto de elos causais em relação a ele.

Por esta razão o tipo de estudo de caso escolhido foi o explanatório, pois o tema de estudo envolve a ocorrência de incidentes, fatalidades e perdas, objetivando principalmente a identificação das principais causas e fatores que influenciam, possibilitando a investigação de forma a evitar ou minimizar as ocorrências. Outro fator importante são as consequências que os incidentes de dutos têm na sociedade.

Também foi necessário caracterizar o estudo pela quantidade de unidades de análise e de casos a serem estudados, devido às premissas definidas por Cauchik (2007): quantidade de casos e recorte de tempo, e considerando a etapa de Design definida por Baskarada (2014). Desta forma, foram definidas as subdivisões do tema principal (Corrosão como causa de incidentes em dutos de petróleo e gás), uma vez que este possui múltiplas unidades de análise: diferentes incidentes ocorridos, em diversas localidades, com diferentes responsáveis pelas instalações. São estas:

- I. Corrosão interna ou externa
- II. Substâncias transportadas
- III. Dutos onshore ou offshore

Desta forma, o presente estudo de caso pode ser classificado como estudo múltiplo incorporado (YIN, 2003).

#### ***4.2.2 Definição dos métodos a serem utilizados no estudo***

Foi identificado que Biezma et al. (2019) e Popescu e Gabor (2021) utilizaram, como principal material para a análise dos incidentes ao redor do mundo, diferentes bases de países que já aderiram à criação de uma base de dados unificada e padronizada. Dentre elas, optou-se por selecionar a base de um desses países, que seguisse um padrão detalhado o suficiente para atingir os objetivos e responder às perguntas elaboradas para o presente estudo de caso. A partir dessa escolha, foram avaliadas todas as variáveis descritas, acessando todas as informações disponibilizadas pela organização selecionada.

Foi utilizada a linguagem Python para realizar a análise de dados, pois seu uso é recomendado por ser a linguagem mais utilizada na comunidade de ciência de dados, e isso ocorre por se tratar de uma linguagem fácil, que possui diversas bibliotecas voltadas para a análise de dados. Utilizou-se a biblioteca Pandas para a fase de preparação e análise

preliminar dos dados, por possuir uma gama extensa de ferramentas para entrada e saída de dados em diferentes formatos, cálculos estatísticos e visualizações básicas. Com o Pandas foi criado um Data Frame, que é uma estrutura de dados bidimensional dividida em colunas que facilita o processo de análise (STANCIN; JOVIC, 2019).

Os dados foram selecionados com recorte do tempo entre 1986 e 2022, de forma a compreender o comportamento do problema ao longo do tempo e gerar *insights* para o estudo. Em seu trabalho, Cauchick (2007) defende a importância da utilização de dados longitudinais (a serem analisados) e retrospectivos (já foram analisados), a fim de confirmar ou refutar hipóteses.

Além disso, foram utilizadas múltiplas fontes de dados para incrementar a análise final do problema pois de acordo com Cauchick (2007) e Baskarada (2017), para garantir a qualidade do estudo de caso, é preciso que a análise seja feita utilizando-se múltiplas fontes. Também foram utilizados conceitos básicos da estatística para as análises dos resultados, como a probabilidade.

Sendo assim, a divisão da análise foi feita da seguinte forma:

- I. Análise geral da base de dados, da organização escolhida, que contém informações reais de incidentes utilizando a linguagem Python.
- II. Análise longitudinal e retrospectiva utilizando dados equivalentes entre si.
- III. Identificação de outra fonte de informações, seguindo a premissa de múltiplas fontes, para incrementar a análise e garantir a qualidade do estudo.

#### ***4.2.3 Definição da quantidade de casos e questões subjacentes do estudo***

Os estudos de Biezma et al. (2019) e Popescu e Gabor (2021), fazem análises de diferentes bases de incidentes no mundo, dentre elas, a base da PHMSA se mostrou mais completa, padronizada e abrangente, e por este motivo foi selecionada para a análise do estudo de caso. Tal fato pode ser explicado pela fiscalização mais rigorosa dos Estados Unidos, quando comparada aos outros países, uma vez que o país obriga as organizações, por lei, a reportar os incidentes em dutos (POPESCU; GABOR, 2021).

Um fator importante da definição dos métodos a serem utilizados é a garantia da disponibilidade dos recursos necessários para o estudo. Deste modo, foi encontrada online a base de dados de incidentes em dutos de petróleo e gás da PHMSA, disponibilizada no site da própria PHMSA. Estes dados correspondem aos dados brutos, que foram retirados dos relatórios de investigação dos incidentes e cadastrados no sistema da PHMSA. Três bases



foram encontradas no site, uma compreendendo o período de 1986 a 2001, outra de 2002 a 2009 e, por fim, uma base de 2010 até 2022.

Tendo em vista a necessidade de selecionar múltiplas fontes de análise, para garantir a qualidade do estudo de caso, e levando em conta as subdivisões do tema de estudo, no site da PHMSA outra fonte de dados foi encontrada: uma biblioteca com os relatórios de investigação.

Tais relatórios permitem analisar de forma detalhada, a investigação da causa dos incidentes, enriquecendo muito o estudo de caso, uma vez que permitem uma comparação entre as informações dispostas no relatório e divulgadas na base de dados oficial. Além disso, permitem uma aproximação maior do investigador com as ocorrências através de fotos, pareceres técnicos e outras informações que não constam na base de dados e possuem extrema relevância para o tema estudado, como por exemplo do material do duto.

A base de relatórios '*Pipeline Failure Investigation Reports*' encontrada no site PHMSA possui relatórios de diferentes causas de incidentes, como o caso do estudo em questão está direcionado apenas para corrosão, optou-se por analisar apenas os relatórios com esta designação específica. Dentre os relatórios selecionados, 3 foram selecionados, para realizar uma análise mais aprofundada, contribuir para a análise causa-efeito do estudo explanatório e responder à questão: Como é feita a análise que determina a corrosão como causa dos incidentes?

Sendo assim, para a próxima etapa, definiram-se as seguintes coletas de dados:

- I. Bases de Dados da PHMSA.
- II. Relatórios de investigação da causa de acidentes PHMSA.

#### **4.2.4 Teste Piloto do estudo**

O Teste Piloto foi executado para garantir a viabilidade do estudo e refinar o “plano de coleta de dados”, demonstrando que, além da quantidade de dados significativa, as informações da coleta seriam relevantes o suficiente para o estudo do tema. O primeiro passo foi acessar as bases de dados no site da PHMSA. Em seguida, as 3 bases foram analisadas, uma a uma, para entender as variáveis presentes nas colunas e como poderiam contribuir para o estudo. O processo de conhecer a base e os dados nela dispostos é muito importante para que se possa fazer uma análise efetiva, nesse caso, cada uma das bases possuía um dicionário de dados detalhado que explicava a informação contida em cada coluna, o que facilitou muito o processo.

Alguns filtros foram aplicados para conferir a disponibilidade dos dados necessários para a análise em conformidade com o tema proposto. A base de dados possui o total de 10843 linhas (registros), dentre as variáveis encontradas, muitas possuem relação direta com o problema de corrosão, estas foram selecionadas e analisadas durante o estudo.

A segunda fonte de informações foi a base de dados ‘Pipeline Failure Investigation Reports’ no site da PHMSA, na qual os dados são apresentados no formato de uma tabela com informações sobre a empresa responsável, o tipo de instalação (por material transportado), a causa, o estado, a data do incidente e a data da postagem do relatório. O diferencial dessa base é que nela consta um link para o relatório de investigação dos incidentes. Os dados foram analisados também com a linguagem Python, que foi estudada anteriormente e é amplamente utilizada para facilitar a identificação de informações de interesse.

A base apresenta 110 relatórios de incidentes com diferentes causas, foi utilizado um filtro das causas que tinham a palavra “corrosão” e foram encontrados 24 relatórios, essa quantidade representa um número satisfatório para realizar o estudo.

### **4.3 Coleta de dados**

#### ***4.3.1 Realização da coleta de dados para o estudo***

O procedimento de coleta foi feito no teste piloto. Após identificar a viabilidade do estudo e os possíveis ajustes, as informações obtidas foram utilizadas para realizar as análises. Sendo assim, foram usadas três bases PHMSA totalizando 10.843 registros, e a base de relatórios com 110 investigações de incidentes.

#### ***4.3.2 Identificação de dados relevantes e resumo das informações selecionadas***

Uma adaptação da base PHMSA foi realizada para identificação dos dados mais relevantes, pois uma das fases mais importantes da análise de dados é a limpeza e estruturação dos dados (STANCIN; JOVIC, 2019). Tal fase foi dividida em duas etapas, na primeira etapa foram selecionadas algumas variáveis específicas, que poderiam contribuir para uma análise dos fatores que influenciam no processo de corrosão em dutos.

Dentre as categorias identificadas no dicionário de dados foram selecionadas as mais importantes para a análise. À medida que o estudo foi se desenvolvendo, dados de outras

categorias foram consultados de acordo com a necessidade, e também foi feito um segundo filtro mais detalhado para eliminar colunas dentro das categorias que continham informações pouco relevantes.

#### ***4.3.3 Análise dos dados e construção da narrativa geral do caso***

Para uma análise inicial, buscou-se uma visão geral dos incidentes, que pudesse ser comparada aos estudos anteriores, e também entender este cenário em um período mais longo de tempo, de forma a analisar o comportamento da corrosão e a efetividade das técnicas de prevenção que foram desenvolvidas ao longo dos anos. Entende-se que quanto maior o período analisado, maior será a acuracidade da análise das variáveis que influenciam o processo.

Sendo assim, foram definidas as etapas de análise dos dados da seguinte forma:

- I. Análise das informações contidas no dicionário de dados
- II. Seleção dos dados mais relevantes para a análise em questão
- III. Extração dos dados da base original
- IV. Concatenação dos dados em um Data Frame unificado
- V. Manipulação dos dados para análises das informações desejadas

Para a redução dos dados, visando garantir que somente o essencial para o estudo fosse incluído na análise, foi aplicada a codificação, que parte do pressuposto de categorizar as informações, facilitando o resgate dos dados e a associação ao que se pretende investigar (CAUCHICK, 2007).

Foi calculada a probabilidade de ocorrer corrosão em um duto sabendo que ele é onshore ou offshore. Desta forma, foi dado início ao estudo e à medida que os resultados foram obtidos, foi dado o desdobramento das próximas variáveis a serem analisadas, criando uma espécie de rede causal, que relaciona as variáveis analisadas (CAUCHIK, 2007).

Foram utilizadas as evidências em conjunto com os dados convergentes, para a construção de conclusões lógicas, que comparadas à teoria refutaram ou apoiaram hipóteses, buscando testar a capacidade da teoria de explicar o fenômeno estudado em diferentes contextos. Foi a partir destes resultados e da construção da rede causal, que uma narrativa geral do caso foi criada (CAUCHIK, 2007).

## **5 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **5.1 Teste Piloto do Estudo**

Foram identificados 10843 registros de 3 bases de dados com variedade de informações acerca dos incidentes, dentre os quais 2428 registros tinham como causa principal a corrosão, além disso incidentes em dutos onshore compreendem a maior parte dos dados, totalizando 10648 registros, restando apenas 184 registros de incidentes em dutos offshore.

Foi analisado que, com as informações disponibilizadas seria possível analisar questões relevantes no contexto da corrosão, possibilitando um estudo efetivo a respeito do tema com as informações disponíveis.

### **5.2 Coleta de Dados**

Após comparar as informações dos dicionários de dados das 3 bases, notou-se que seria possível uni-las para fazer as principais análises no período de 1986 a 2022. Foi identificado também que, com o passar do tempo, surgiram novas variáveis para a análise dos incidentes e o relatório foi ganhando mais campos para preenchimento e se tornando mais completo. Na base mais antiga havia 68 colunas, enquanto na base mais recente foram identificadas 672 colunas, o que evidencia uma tentativa de obter mais informações acerca de variáveis que podem influenciar nos incidentes e tornar a base de dados mais rica de informações.

Foram analisadas a quantidade de variáveis por cada categoria de informações presente no relatório e descrita no dicionário de dados, para facilitar o processo de limpeza e estruturação dos dados, como mostrado no Anexo A.

Em relação aos relatórios de incidentes, os relatórios de corrosão disponíveis estão representados na Tabela 2, e os principais parâmetros utilizados para a análise e seleção dos relatórios foram a quantidade de informações relevantes (fotos, análises, descrição) e o detalhamento de informações relevantes para o estudo.

**Tabela 2 - Relatórios disponíveis para análise que têm corrosão como causa principal**

Índice	ID (operador)	Tipo de Falha	Operador	Material transportado	Data do Incidente
1	19570	Corrosão Externa	Williams Gas Pipeline	Gás Natural	02/04/2012
2	1845	Corrosão Interna	Buckeye Partners	Gasolina	13/07/2012
3	22610	Corrosão Externa	Magellan Pipeline	Combustível	25/11/2012
4	1845	Corrosão Interna	Buckeye Partners	Diesel	20/08/2014
5	18386	Corrosão Externa	BP Oil Pipeline Co.	Diesel	25/02/2004
6	1845	Corrosão Externa	Buckeye Partners	Gasolina	29/12/2009
7	1845	Corrosão Externa	Buckeye Partners	Diesel	20/03/2011
8	2616	Corrosão Interna	Columbia Gas Transmission Corp	Gás Natural	03/11/2011
9	2616	Corrosão Interna	Columbia Gas Transmission Corp	Gás Natural	04/01/2009
10	31947	Corrosão Interna	Enbridge Pipelines	Petróleo Cru	17/05/2013
11	30829	Corrosão Interna	Enterprise Crude Pipeline	Petróleo Cru	08/04/2012
12	4805	Corrosão Externa	Explorer Pipeline Co	Diesel	17/08/2009
13	11551	Corrosão Externa	Lion Oil Trading & Transportation, Inc.	Petróleo Cru	09/03/2013
14	9175	Corrosão Interna	Jayhawk Pipeline	Petróleo Cru	12/04/2005
15	12470	Corrosão Interna	Mid-Valley Pipeline	Petróleo Cru	01/03/2010
16	13063	Corrosão Externa	National Fuel Gas	Gás Natural	21/12/2009
17	15105	Corrosão Externa	Panhandle Eastern Pipeline	Gás Natural	25/08/2008
18	300	Corrosão Externa	Plains Pipeline	Petróleo Cru	19/05/2015
19	18092	Corrosão Interna	SFPP, LP	Produtos Refinados	16/03/2010
20	18516	Corrosão Externa	Southern Natural Gas	Gás Natural	06/01/2010
21	19270	Corrosão Interna	Texas Gas Transmission	Gás Natural	04/08/2009 e 04/11/2009
22	19160	Corrosão Sob Tensão	Tennessee Gas Pipeline	Gás Natural	03/08/2015
23	19160	Corrosão Interna	Tennessee Gas Pipeline	Gás Natural	08/12/2010
24	19570	Corrosão Externa	William Gas Pipeline	Gás Natural	26/04/2010

Fonte: Própria Autora

### **5.3 Resumo das informações selecionadas para análise final do estudo**

As categorias selecionadas, em conformidade com o objetivo do estudo e as perguntas para as quais deseja-se obter respostas, foram:

- 1º período: Informação do operador, Hora e Local do acidente, Causa do acidente, Substância vazada, Ocorreu no duto de linha, Causado por corrosão.
- 2º período: Informações gerais do relatório, Origem do acidente, Especificação do material, Ambiente, Causa aparente, Corrosão.
- 3º período: Informações chave do relatório, Informações do local, Informações da instalação, Causa aparente, Falha por corrosão, Fatores contribuintes.

Após o segundo filtro, que tinha como objetivo eliminar colunas com informações pouco relevantes, foram identificadas as colunas consideradas essenciais para a primeira análise, que busca obter uma visão geral dos incidentes entre 1986 e 2022. As colunas selecionadas relacionavam: ano do incidente, ID do relatório (importante para evitar duplicidade), causa e subcausas padronizadas para os três períodos, localização do duto (onshore ou offshore) e tipo de líquido transportado.

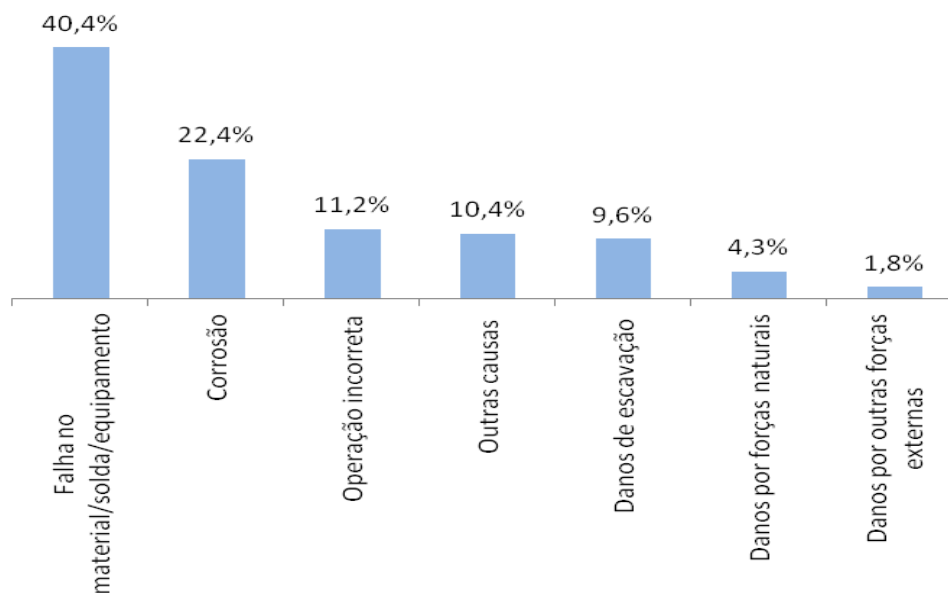
O material do duto seria uma informação importante para a análise da corrosão, mas não foi incluída na primeira análise porque não consta nas bases mais antigas, tendo seu registro iniciado a partir de 2010 na base mais recente, o que levou a sua análise de forma isolada em outro momento do estudo.

### **5.4 Análise dos Dados e construção da narrativa geral do caso**

Foram identificadas duas colunas com valores de causas e subcausas padronizadas, que foram fornecidas pela própria PHMSA, e constam nas três bases de dados, com o intuito de permitir a comparação ou análise em conjunto dos três períodos (Figura 13). As causas identificadas foram:

- I. Falha no Equipamento/Material/Solda
- II. Corrosão
- III. Operação incorreta
- IV. Danos de escavação
- V. Danos de forças naturais
- VI. Danos causados por outras forças externas
- VII. Outros

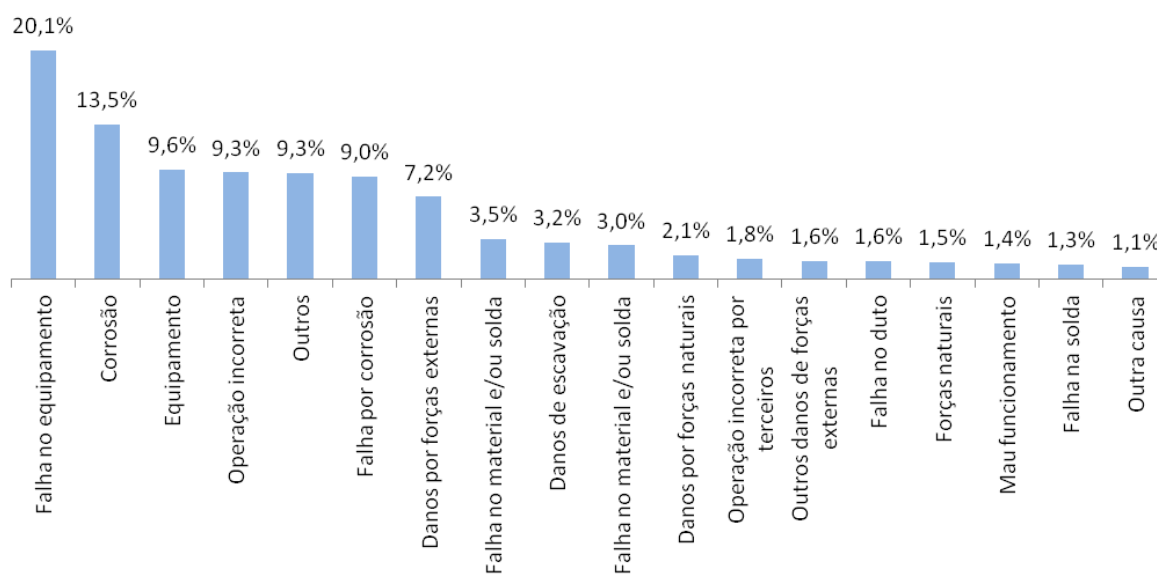
**Figura 13 - Visão geral da quantidade de incidentes por causa (padronizada) PHMSA 1986-2022**



Fonte: própria autora.

Se por outro lado, as causas fossem avaliadas independente do padrão estabelecido pela PHMSA, cada um dos períodos possui também em suas bases a coluna com o valor original atribuído à causa, que foi preenchido no relatório no momento da descrição do incidente e por este motivo não segue um padrão pré-estabelecido. Os valores identificados e a quantidade de incidentes em cada causa podem ser observados no Figura 14.

**Figura 14 - Visão geral da quantidade de incidentes por causa (não padronizada) PHMSA 1986-2022**

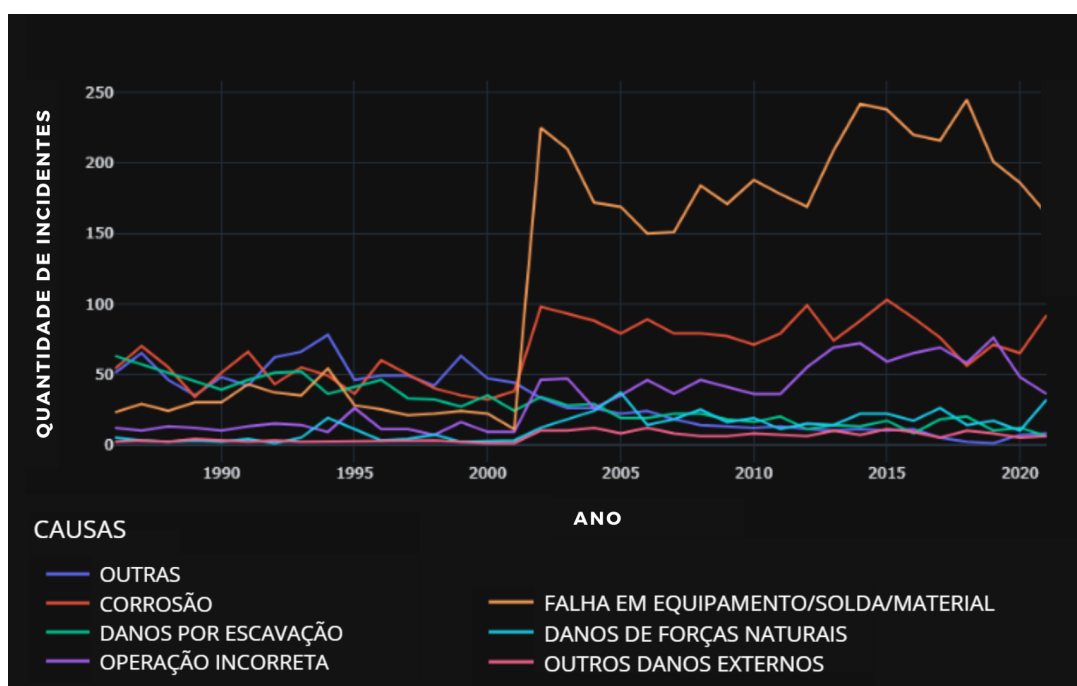


Fonte: própria autora.

Analisando os dados coletados por causa principal do acidente, foi verificado que, no período analisado, a Corrosão também aparece como segunda causa mais recorrente, assim como observado nos estudos de Baker (2008) e Biezma (2019), que também utilizaram a abordagem padronizada para analisar os dados. É evidente que a padronização das informações facilita a identificação e análise das informações, uma vez que, quando não padronizada, pode ser escrita de diferentes formas, mesmo pertencendo a uma mesma categoria, o que dificulta a tomada de decisões baseada em dados.

Outra análise importante, consiste em compreender o comportamento da corrosão ao longo do tempo (Figura 15) de forma a analisar como foi a evolução dos incidentes e se, de fato, as medidas de proteção contra corrosão que foram desenvolvidas ao longo dos anos estão surtindo efeito.

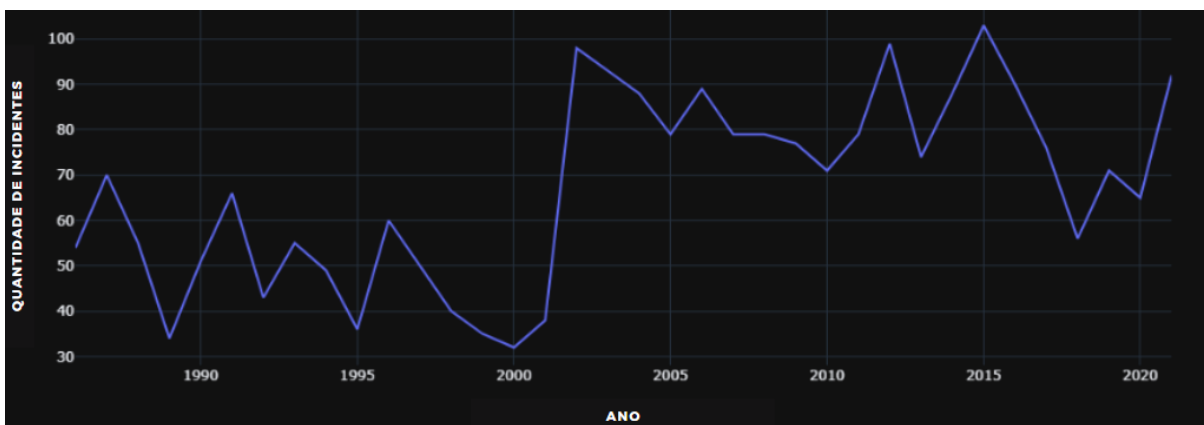
**Figura 15 - Distribuição de incidentes no período de 1986 a 2021 (PHMSA)**



Fonte: própria autora.



Figura 16 - Distribuição de incidentes de corrosão entre 1986 e 2021 (PHMSA)



Fonte: própria autora.

Nas Figuras 15 e 16 é mostrado que o comportamento da corrosão sofreu uma queda entre 2015 e 2018, porém voltou a subir até 2021, o que contrapõe a análise de Baker (2008) que afirmava que os incidentes provocados por corrosão tiveram uma queda ao longo dos anos em decorrência das ações de prevenção aplicadas pelos operadores de dutos. Uma característica muito interessante do gráfico gerado é o pico de incidentes por Corrosão e por Falha em Equipamento/Solda/Material que ocorreu no ano de 2002, que se diferem muito das outras causas na quantidade de incidentes.

A quantidade não se iguala às outras causas nos próximos anos, o que leva a presumir que o dado reflete uma mudança de patamar na quantidade de incidentes das causas citadas, ambas podem estar relacionadas à vida útil dos dutos mais antigos, porém não é possível afirmar isso com base nos dados disponíveis.

O próximo passo consistiu na análise dos dados de incidentes em dutos onshore e offshore. Como verificado anteriormente, os dados de incidentes em dutos offshore representam uma porção muito pequena do total de incidentes. Porém este fato não impede a análise dos dados, uma vez que a baixa ocorrência de incidentes por si só já é um dado que pode trazer considerações importantes sobre o estudo.

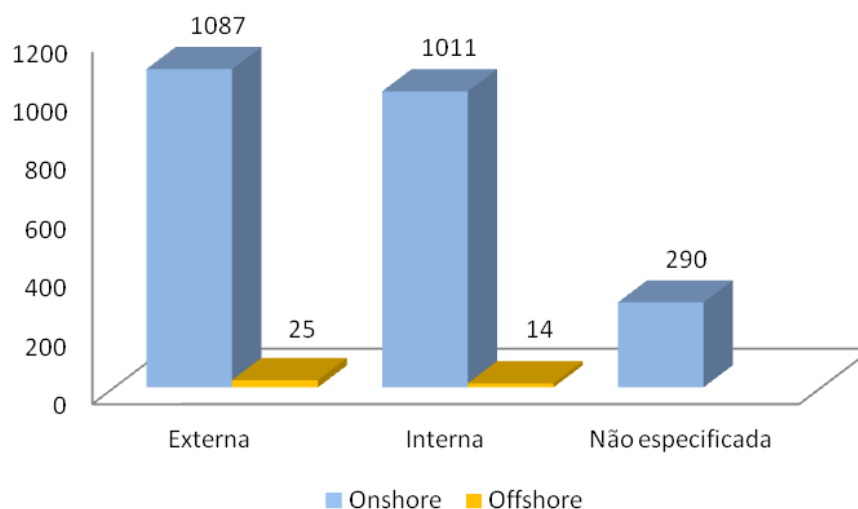
Na Tabela 3 é apresentada a probabilidade de ocorrer corrosão em um duto sabendo que ele é onshore ou offshore. A análise indica que não há diferença significativa na probabilidade de ocorrer corrosão em dutos onshore e offshore, o que leva a inferir que a ocorrência de corrosão pode estar relacionada à substância transportada e que, provavelmente, a cobertura do duto se apresenta como uma proteção satisfatória contra corrosão.

**Tabela 3 - Probabilidade de ocorrer corrosão em dutos onshore e offshore**

	Geral	Onshore	Offshore
Total de incidentes	10843	10648	<b>184</b>
Incidentes de corrosão	2428	2388	<b>39</b>
Probabilidade de ocorrer corrosão	22,39%	22,42%	21,19%

Fonte: própria autora.

Os dutos offshore deveriam apresentar números bem mais elevados de incidentes por corrosão externa, por se encontrarem em ambientes marítimos, de água salgada e salina, que são críticos para a ocorrência de corrosão. Porém, nas análises feitas o resultado não foi tão representativo (Figura 17), e mesmo que a corrosão externa represente 64% dos incidentes em dutos offshore, o baixo número de registros não permite uma análise conclusiva. Sendo assim, uma nova análise indicou a recorrência de corrosão interna e externa, a fim de identificar qual tipo de corrosão causou mais incidentes no geral.

**Figura 17 - Corrosão interna e externa em dutos onshore e offshore entre 1986 e 2022**

Fonte: própria autora.

A análise da ocorrência de corrosão interna e externa é apresentada na Tabela 4 e, para complementar a análise, foi necessário agregar a coluna que trazia as informações de substância transportada para entender como este parâmetro afeta o comportamento da corrosão.

**Tabela 4- Quantidade de incidentes para cada tipo de corrosão de 1986 a 2022 (PHMSA)**

Tipo de Corrosão	Quantidade de incidentes
Corrosão externa	1112
Corrosão interna	1025
Não especificado	291

Fonte: própria autora.

Foram identificadas 444 tipos de substância transportadas, o que indica que o cadastro das commodities não segue um padrão pré estabelecido, como no caso das causas e subcausas. Entretanto, foi identificado que outra coluna apresentava valores que, seguiam um padrão para classificar as commodities. Esta coluna continha diferentes tipos de valores no preenchimento da base de 1986 e das outras duas bases, enquanto na mais antiga a classificação das substâncias era feita através de um número inteiro, nas outras bases foi dado um nome para classificar as substâncias.

Tendo isso em vista, os padrões utilizados nas outras duas bases foram seguidos para melhorar a análise, as substâncias foram classificadas em: ‘petróleo cru’, ‘gasolina, diesel, combustíveis e outros produtos derivados do petróleo’, ‘Produtos altamente voláteis, ou outro fluido tóxico ou inflamável que se transforma em gás em temperatura ambiente’, ‘Gás carbônico, ou outro fluido não-inflamável, não-tóxico que se transforma em gás na temperatura ambiente’, ‘Biocombustíveis, ou combustível de fontes alternativas, incluindo misturas de Etanol’.

Após a análise, nos valores encontrados (Tabela 5) é mostrado que, o percentual de incidentes causados por corrosão em relação ao total de incidentes, para cada substância transportada, apresenta valores mais críticos para Petróleo Cru e Produtos de refino de petróleo, ambos pertencem à Classificação ‘Gasolina, diesel, combustíveis e outros produtos derivados do petróleo’.

**Tabela 5 - Principais substâncias identificadas em incidentes de corrosão entre 1986 e 2022**

Substância transportada	Classificação	Quantidade de incidentes de corrosão	Percentual em relação ao total de incidentes
<b>Petróleo Cru</b>	Petróleo Cru	847	<b>33,65%</b>
Diesel, Querosene e Combustível de Jato	Combustível, Gasolina, diesel, combustíveis e outros produtos derivados do petróleo	156	17,04%
Gasolina	Gasolina, diesel, combustíveis e outros produtos derivados do petróleo	136	17,66%
Gasolina sem adição de Etanol	Gasolina, diesel, combustíveis e outros produtos derivados do petróleo	76	12,95%
LPG e NGL	Produtos altamente voláteis, ou outro fluido tóxico ou inflamável que se transforma em gás em temperatura ambiente	70	13,25%
Diesel	Gasolina, diesel, combustíveis e outros produtos derivados do petróleo	50	14,8%
<b>Mistura de produtos do refino de petróleo</b>	Gasolina, diesel, combustíveis e outros produtos derivados do petróleo	34	<b>20,98%</b>

Fonte: própria autora

Baseado neste resultado foi identificado que, no contexto de petróleo e gás, quando trata-se de incidentes de corrosão, o transporte de petróleo é mais crítico. O que está de acordo com o estudo de Alamri (2020), que indica que os produtos de petróleo das refinarias podem ser contaminados por produtos da corrosão proporcionalmente à idade dos dutos, e que os dutos de petróleo cru e produtos refinados, que são ricos em compostos sulfurosos, são expostos à corrosão constantemente.

A corrosão causada por compostos sulfurosos é denominada “corrosão azeda”, ocorre quando o Sulfeto de Hidrogênio dissolve em água, ocorrendo uma reação anódica na superfície do aço e uma reação catódica na solução de H<sub>2</sub>S. Diversos fatores externos podem influenciar a sua ocorrência, como temperatura, pressão, concentração e dissociação do sulfeto de hidrogênio, entre outras. Porém, não é possível determinar com precisão a influência de cada fator individualmente (ALAMRI, 2020).

A Tabela 4 mostra que a quantidade de incidentes para corrosão externa é maior do que para corrosão interna. O que não corrobora com a teoria de que o principal fator de influência da corrosão em dutos seria a substância transportada. Este fato levou à próxima análise: natureza da corrosão (galvânica, microbiológica, atmosférica, entre outras), local de instalação do duto (subterrâneo, acima do solo, embaixo d’água, entre outras), tipos de revestimentos e material do duto.

A informação dos tipos de corrosão está presente nas três bases, e a análise será feita utilizando o mesmo Data Frame das análises anteriores com a adição das colunas de interesse. Já as informações referentes às outras variáveis estão presentes somente nas 2 bases mais recentes. Por essa razão, foi criado um novo Data Frame, que reúne informações de 2002 a 2022 (período de 20 anos) para fazer esta análise.

Ao iniciar a análise verificou-se que a base de 1986 a 2001 não será representativa para a segunda análise, pois na coluna que registra os tipos de corrosão o único dado cadastrado foi de corrosão galvânica, enquanto os outros eram nulos ou inconclusivos. Para evitar uma análise tendenciosa, o novo Data Frame (2002 a 2022) foi utilizado para as análises seguintes, com exceção dos dados do material dos dutos, que está presente apenas na base de 2010 a 2022.

**Tabela 6 - Quantidade de incidentes para cada tipo de corrosão de 2002 a 2022 (PHMSA)**

Tipo de Corrosão	Quantidade de incidentes
Corrosão interna	816
Corrosão externa	568
Não especificado	272

Fonte: própria autora.

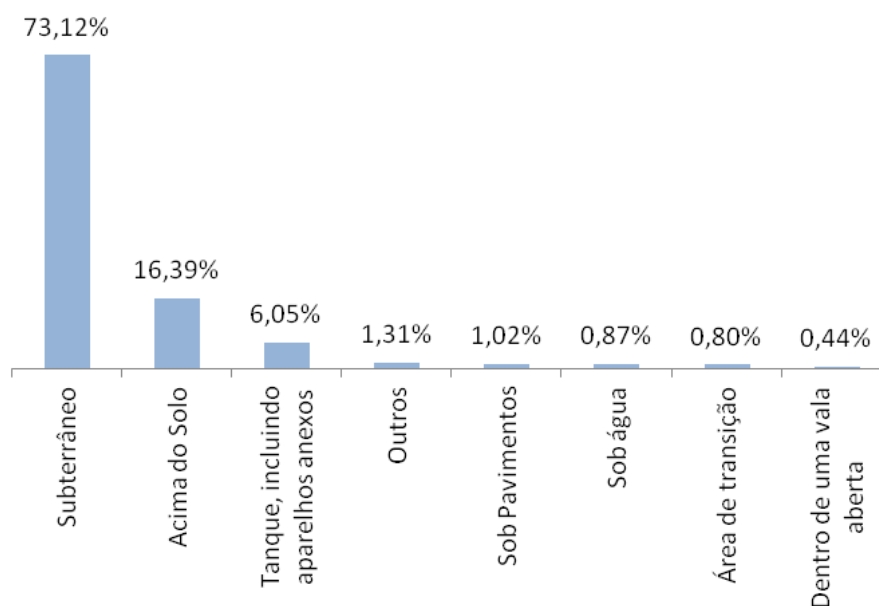
Na análise do Local de instalação do duto verificou-se um dado interessante, que apesar da maior parte dos incidentes ser registrada em dutos acima do solo seguido de incidentes abaixo do solo, o inverso ocorre quando se trata de incidentes de corrosão (Figura

18). Levando em consideração esta análise, optou-se por analisar a quantidade de incidentes para corrosão interna e externa no novo período de análise (Tabela 6), revelando que de 2002 a 2022, o cenário se modifica em relação ao analisado no período de 1986 a 2022, indicando a corrosão interna como subcausa em 49,27% dos casos, enquanto a externa ocorre em 34,30% dos casos.

A corrosão interna ocorre em torno de 15% a mais do que a externa no período de 2002 a 2022, é mais um indicativo de que os incidentes de corrosão não estão relacionados a fatores externos, e que a raiz do problema está de dentro pra fora. As substâncias transportadas também foram analisadas para o novo período, apresentando valores semelhantes com pequenas alterações nos valores, não representativas.

Entretanto, uma análise do local de instalação foi feita para compreender como os fatores externos influenciam na ocorrência da corrosão. Os resultados mostraram que 73,12% dos dutos que apresentaram corrosão se tratavam de dutos subterrâneos.

**Figura 18 - Percentual de incidentes de corrosão por local de instalação de 2002 a 2022 (PHMSA)**



Fonte: própria autora.

De 2002 a 2009 os dados de revestimento são informativos, indicando se havia ou não revestimento, enquanto de 2010 a 2022 os dados indicavam se havia ou não revestimento e caso houvesse, qual era o tipo. Por esta razão, a análise foi feita separadamente e o resultado (Tabela 7) indica que a proporção de incidentes de corrosão de um duto com os revestimentos de Tinta e de Epóxi aplicado em campo, e de dutos sem revestimento, é maior em relação aos

outros revestimentos, quando registrados. Outro ponto importante analisado é a alta ocorrência de corrosão mesmo quando o revestimento é identificado, porém não foi possível identificar se os registros estavam relacionados a revestimento interno ou externo, uma vez que ambos são utilizados na indústria de dutos.

**Tabela 7 - Análise de revestimentos em incidentes de corrosão, por período (PHMSA)**

Período	Revestimento	Tipo de Revestimento	Quantidade	Percentual em relação ao total de incidentes com o mesmo revestimento
2002 a 2009	Sim	-	346	N/A
	Minimamente	-	55	N/A
	Nulo	-	277	N/A
2010 a 2022	Sim	Epóxi Coal Tar	237	49,48%
	Sim	Epóxi termo-curável	129	31,31%
	Sim	Fita aplicada a frio	62	51,66%
	Sim	Tinta	58	<b>76,31%</b>
	Sim	Não especificado	49	47,11%
	Sim	Asfalto	19	38,00%
	Sim	Polietileno extrudado	16	59,26%
	Sim	Epóxi aplicado em campo	13	<b>72,22%</b>
	Sim	Poliiolefinas	3	37,5%
	Sim	Compósitos	2	33,33%
	Não	-	45	<b>72,58%</b>

Fonte: própria autora.

Esta análise não é conclusiva, pois os dados registrados de revestimento são muito inferiores ao total de incidentes registrados, e tendo em vista que o revestimento é um dado importante para análises de corrosão, os valores podem ser tendenciosos. Além disso, não foi possível afirmar que os revestimentos são uma proteção efetiva contra a corrosão. Entretanto, é fato que os revestimentos com maior recorrência merecem uma atenção especial no estudo.

Em relação ao Epóxi aplicado em campo, pode estar relacionado à redução da vida útil do revestimento quando a superfície não é preparada corretamente antes da aplicação, 80% das falhas de revestimento ocorrem por este motivo (ALAMRI, 2020). Por ser aplicado em campo, fatores importantes como a preparação da superfície são responsabilidade de

trabalhadores que precisam ser devidamente treinados, e por ser um trabalho manual muito dificilmente segue um padrão ou é fiscalizado.

Já quando se trata da aplicação de tinta, um efeito adverso deste revestimento ocorre quando utilizado em conjunto com a proteção catódica. A proteção catódica causa um aumento da concentração de íons hidroxila e a alcalinidade relacionada a este composto pode deteriorar a tinta, principalmente quando se trata de tinta a óleo, que é susceptível a este tipo de dano (ALAMRI, 2020). A última análise consiste na identificação dos tipos de corrosão identificados durante a investigação (Tabela 8), tal análise indicou que, na maioria das vezes, quando a corrosão ocorre no interior do duto é de natureza microbiológica, enquanto externamente é de natureza galvânica.

O resultado observado segue a mesma linha de estudos anteriores (ASKARI, ALIOFKHAZRAEI, AFROUKHTEH, 2018) que indicam que a corrosão de natureza microbiológica é a maior ameaça de corrosão interna em dutos, sendo extremamente relevante para os dutos de petróleo. São influenciadas principalmente pela presença de sulfatos, nutrientes, bactérias, pH, taxa de fluxo, salinidade e temperatura. Além disso, os dutos de petróleo cru são os que estão mais susceptíveis a este tipo de corrosão, o que vai de encontro com a análise das substâncias transportadas, feita anteriormente.

Já quando se trata de corrosão externa, o resultado observado indica maior recorrência de corrosão galvânica. A corrosão galvânica se caracteriza pela ocorrência acelerada de corrosão, quando dois metais com atividades eletroquímicas distintas estão em contato elétrico. Os fatores que influenciam esse tipo de corrosão são geométricos, ambientais, metalúrgicos, eletrolíticos, condições superficiais e potencial eletrônico reversível (ALAMRI, 2020). Ocorre muito em locais de soldas e na zona termicamente afetada que atuam como sítios anódicos, resultando em uma corrosão localizada (ASKARI, ALIOFKHAZRAEI, AFROUKHTEH, 2018). Entretanto, tais fatores não foram o foco do presente estudo e portanto não serão aprofundados.



**Tabela 8 - Quantidade de incidentes para cada tipo e natureza de corrosão de 2002 a 2022 (PHMSA)**

Tipo de corrosão	Natureza de Corrosão	Quantidade de incidentes
Interna	<b>Microbiológica</b>	<b>426</b>
	Outra	122
	Água ou ácido identificado	75
	Substância corrosiva	13
	Erosão	12
	Galvânica	12
Externa	<b>Galvânica</b>	<b>233</b>
	Outra	115
	Atmosférica	81
	Microbiológica	50
	Corrosão por corrente parasita	44
	Corrosão seletiva	24
	Stress Cracking	12
	Proteção catódica interrompida	9

Fonte: própria autora

Outra análise importante está relacionada ao material do duto, que como citado anteriormente, está presente apenas na última base de dados, mais recente. A última base contém um total de 4754 incidentes registrados, destes 978 são incidentes de corrosão, dos quais 852 são aço-carbono, 1 é cobre, 1 é um anel de ferro (provavelmente um componente) e 1 é aço inox (transportando ácido acético). Alamri (2020) se atentou a este fato em seu estudo, afirmando que o aço carbono é utilizado por razões econômicas, mas deixa a desejar na resistência à corrosão quando comparado a outros aços.

Importante ressaltar que os dados absolutos obtidos nestas análises não trazem uma perspectiva relativa e proporcional ao parque instalado. Deste modo não foi possível verificar a correlação de número de casos, em um determinado cenário, com a sua proporção de aplicação. Por exemplo, os maiores casos de falhas em trechos subterrâneos comparado com os casos em trechos acima do solo, sem conhecer a proporção de aplicação entre esses dois. Assim, uma abordagem de número de falhas relativa se faz necessária para uma percepção mais assertiva.

## 5.5 Construção do painel e resumo de evidências do estudo

Os principais resultados obtidos na análise dos dados estão dispostos na Tabela 9, e foram determinados pela prática de codificação durante a criação da narrativa geral. Dentre as variáveis analisadas, a relação entre natureza da corrosão, substância transportada e corrosão interna/externa foi o parâmetro utilizado para selecionar os relatórios e compreender como foram feitas as investigações dos incidentes.

**Tabela 9 - Evidências que construíram a narrativa geral do caso**

VARIÁVEIS	PERÍODO		
	1986 a 2002	2002 a 2009	2010 a 2022
ONSHORE/ OFFSHORE	✓	✓	✓
INTERNA/ EXTERNA	✓	✓	✓
SUBSTÂNCIA TRANSPORTADA	✓	✓	✓
NATUREZA DA CORROSÃO	✗	✓	✓
LOCAL DE INSTALAÇÃO	✗	✓	✓
TIPO DE REVESTIMENTO	✗	✗	✓
MATERIAL DO DUTO	✗	✗	✓

Fonte: própria autora.

## 5.6 Análise de múltiplas fontes

No contexto da análise de múltiplas fontes, pode-se afirmar que a base analisada por si só já oferece múltiplas fontes de análise para o estudo, por apresentar dados de incidentes que se diferem, principalmente, em relação a: operadores, localidades, períodos, padrões de análise, e responsáveis pela investigação.

Entretanto, buscando compreender melhor como é feita a determinação das causas dos incidentes e buscando avaliar as variáveis críticas identificadas na etapa anterior, os relatórios foram selecionados da seguinte forma: 1 relatório de Petróleo Cru, 1 relatório de Produtos refinados, 1 relatório de Corrosão Galvânica e 1 relatório de Corrosão Microbiológica.

**Tabela 10 - Relatórios selecionados para análise**

Índice	ID (operador)	Tipo de Falha	Natureza da Corrosão	Operador	Material transportado	Data do Incidente
17	15105	Externa	Galvânica	Panhandle Eastern Pipeline	Gás Natural	25/08/2008
11	30829	Interna	Pite	Enterprise Crude Pipeline	Petróleo Cru	08/04/2012
19	18092	Interna	Galvânica	SFPP, LP	Produtos Refinados	16/03/2010

Fonte: própria autora.

O critério utilizado para seleção, além dos citados anteriormente, foi a quantidade de informação contida nos relatórios, como fotos, análises metalúrgicas e detalhamentos da investigação.

### ***5.7.1 Análise de corrosão Galvânica como subcausa***

O relatório selecionado para análise da corrosão galvânica foi o de índice 17. Este relatório corresponde à investigação de um incidente que ocorreu em agosto de 2008, em uma área rural de Missouri. O controle do gás natural já havia notado uma redução na pressão às 08:51 horas e solicitou a checagem de um possível vazamento, às 09:00 horas um técnico ouviu a explosão do duto e reportou o incidente.

A análise visual inicial indicou uma redução na espessura da parede do duto ocasionada por corrosão externa, a corrosão pode ser facilmente identificada, como mostrado nas Figuras 19 e 20. O duto em questão foi instalado em 1937, e não se enquadra na porção de dutos construídos antes de 1970 que não possuíam proteção catódica citados por Baker (2008), pois teve proteção catódica instalada entre 1951 e 1953. A análise metalúrgica consistiu na utilização das técnicas de espectroscopia de energia-dispersiva (EDS), inoculação de cultura de bactérias, testes utilizando 2N HCl para determinar presença de carbonatos ou sulfetos, e um microscópio eletrônico de varredura (SEM). Uma amostra do duto é extraída para análise e são realizados também testes mecânicos.

**Figura 19 - Foto da corrosão externa identificada no duto**



Fonte: PHMSA Pipeline Failure Investigation Report, 2008.

Na narrativa geral, presente no início do relatório, foi explicado que o duto rompeu criando uma cratera no chão, e que a falha ocorreu devido à sobrecarga de tração em uma região de afinamento da parede causada pela corrosão externa, porém não especifica como e porque ocorreu a corrosão naquele ponto, o que também não foi identificado na análise metalúrgica nem no detalhamento da investigação. Porém podemos verificar a presença de uma solda próximo à região onde a corrosão foi identificada, que é um local propício para ocorrência de corrosão galvânica, como citado por Alamri (2020).

Outro ponto importante é que este incidente não foi identificado na base de dados analisada na etapa anterior do estudo, para eventual comparação das informações registradas na base e reportadas no relatório.

**Figura 20 - Foto mais detalhada da corrosão externa identificada no duto**



Fonte: PHMSA Pipeline Failure Investigation Report, 2008.

### ***5.7.2 Análise de corrosão Microbiológica como subcausa em dutos de Petróleo Cru***

Para análise de incidentes em dutos que transportam Petróleo Cru e que apresentam corrosão microbiológica, o relatório selecionado foi o de índice 11, referente a um vazamento ocorrido em abril de 2012 em Oklahoma. O duto em questão foi construído em 1991 por outro operador, e foi adquirido pela Enterprise em 2007.

A análise visual inicial indicou que um furo havia sido formado na parede do duto, em seu ponto mais baixo, enquanto nas outras partes não havia superfícies de corrosão profundamente perfuradas como a da Figura 21. O duto tinha um revestimento externo de Epóxi por fusão que estava em falta nos arredores do buraco, mas apresentava boas condições no restante do duto.

Os mesmos testes do relatório de corrosão galvânica foram feitos para este incidente, não foram identificadas contribuições da solda para a corrosão e a metalografia indicou que a corrosão se iniciou de dentro pra fora, como previsto. O teste de bactérias para corrosão microbiológica foi inconclusivo, apesar de apresentar algumas bactérias anaeróbias não continha quantidades suficientes para redução de sulfetos e produção de ácidos.



**Figura 21 - Foto do furo que deu início ao vazamento do duto**



Fonte: PHMSA Pipeline Failure Investigation Report, 2007.

A conclusão foi que o pite teve seu tamanho aumentado ao longo do tempo, pois em seus arredores haviam pequenos pites. As bactérias foram detectadas, porém não foi possível tirar conclusões assertivas para indicar a corrosão microbiológica. No entanto, no relatório está indicado corrosão interna com sub-causas: saída de água/ácido e microbiológica. E no registro da base geral consta como corrosão interna em formato de pite com indicativo de corrosão microbiológica.

A corrosão microbiológica em dutos de Petróleo Cru era um resultado esperado de acordo com a análise de dados feita, portanto este relatório foi suficiente para a análise dos dois fatores.

### ***5.7.3 Análise de corrosão em dutos de produtos do refino do Petróleo***

Para analisar incidentes em dutos que transportam produtos do refino do Petróleo foi selecionado o relatório de número 19, que se refere à investigação de um incidente de vazamento ocorrido em março de 2010, em Sacramento, no estado da Califórnia. O vazamento foi identificado pelos trabalhadores que atuavam em uma inspeção em Abril de 2010 e identificaram que haviam migrado areia e sujeira para o ponto de acesso impedindo a inspeção e em seguida foi identificada a substância vazada no solo.

O revestimento foi envolvido com fita e estava em perfeito estado. Foi identificada uma perda na espessura da parede, porém insignificante. A causa foi determinada como corrosão galvânica no conjunto da conexão de sangria do corpo da válvula auxiliar (Figura 22), possivelmente causada por água residual retida, porém não entraram em mais detalhes sobre como a corrosão ocorreu.

**Figura 22 - Local do vazamento no duto de Diesel**



Fonte: PHMSA Pipeline Failure Investigation Report, 2010.

Na narrativa geral é mencionado que não foram encontrados indicativos de corrosão no duto, na válvula de checagem ou na válvula *bypass*. O que é muito confuso e contraditório no contexto de determinação da causa. A base de dados reporta este incidente indicando a causa como corrosão interna e galvânica.

## 6 CONCLUSÃO

A análise das bases de dados da PHMSA e de seus respectivos relatórios de investigação apontaram que a corrosão em dutos onshore e offshore pode ocorrer interna e externamente, e ao contrário do que se esperava, não há maior ocorrência de corrosão externa em dutos offshore causada pelo ambiente aquático e salino, o que levou o foco do estudo para análise da corrosão interna.

Uma variável que foi identificada como fator crítico para corrosão foi o local de instalação dos dutos, pois 73,12% dos incidentes ocorreram em dutos subterrâneos, enquanto no cenário geral, a maior parte dos incidentes ocorreu em dutos acima do solo. O transporte de petróleo se mostrou mais crítico na ocorrência de corrosão, tanto o petróleo cru quanto os produtos de seu refino, o que justifica o aumento do índice de corrosão interna em relação à externa a partir de 2002.

A análise dos relatórios mostrou que, a determinação da corrosão causa dos incidentes se inicia pela análise visual do dano, para identificar a morfologia da corrosão e guiar os estudos. Em seguida é feita uma análise metalúrgica, onde uma amostra é extraída do duto e passa por testes de bactérias, microscopia eletrônica de varredura, espectroscopia de energia-dispersiva e testes que indiquem a presença de carbonatos ou sulfetos em excesso. A corrosão pode ser a causa direta ou indireta do acidente, podendo provocar vazamento ou explosão dependendo da substância transportada e de sua morfologia, em geral a redução da espessura da parede causa uma diminuição na resistência mecânica do duto, levando à ruptura, enquanto a formação de pites provoca a formação de buracos, levando ao vazamento.

O estudo de caso mostrou que a corrosão vem causando incidentes há mais de 30 anos, é muito difícil de ser prevista por acontecer silenciosamente e mesmo com diversas tecnologias desenvolvidas para diminuir sua ocorrência, o que se observou foi um aumento do número de incidentes com o passar dos anos. A ampla utilização de aço-carbono na confecção de dutos é um dos motivos que explicam porque a corrosão continua sendo um problema recorrente, é muito difícil garantir a efetividade dos revestimentos e portanto o material que não é resistente à corrosão pode ficar suscetível a ocorrência deste defeito.

No que diz respeito às técnicas de análise dos dados, foi verificada a importância da utilização de padrões e palavras-chave para fazer um estudo de correlação, entretanto pode-se afirmar que algumas análises são mais representativas do que conclusivas, uma vez que correlação é diferente de causalidade.



## REFERÊNCIAS

ALAMRI, A.H; Localized corrosion and mitigation approach of steel materials used in oil and gas pipelines – An overview. **Elsevier - Engineering Failure Analysis 116**, Saudi Arabia, jul. 2020.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE (API). **API Specification 5L, 46th ed.** Washington DC, 2018

ASKARI, M.; ALIOFKHAZRAEI. M.; AFROUKHTEH, S. A comprehensive review on internal corrosion and cracking of oil and gas pipelines. **Elsevier - Journal of Natural Gas Science and Engineering**, Iran, 2018.

BAKER, M. Jr. Pipeline Corrosion - Final Report. In: **Integrity Management Program of U.S. Department of Transportation Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration Office of Pipeline Safety.** nov. 2008.

BASKARADA, Sasa. Qualitative case study guidelines. **The Qualitative Report**, Camberra, AU, 06 out. 2014.

BELVEDERSI, C.; THOMPSON, M.S.; KOMERS, P.E. Statistical analysis of environmental consequences of hazardous liquid pipeline accidents. **Elsevier - Heliyon 4**, Canadá, 2018.

BIEZMA, M.V.; ANDRÉS,M.A.; AGUDO, D.; BRIZ, E.. Most fatal oil & gas pipeline accidents through history: A lessons learned approach. **Elsevier - Engineering Failure Analysis**, Espanha, 2020.

CHIAVERINI, V. Aços e Ferros fundidos. 7ª Edição – 1996, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM.

CIANCIARULLO, M.I. Green construction reduction in environmental impact through alternative pipeline water crossing installation. **Elsevier - Journal of Cleaner Production 223**, São Paulo, 2019.

CIANCIARULLO, M.I. **Construção de gasodutos e oleodutos [recurso eletrônico]: orçamento e planejamento.** 1. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2022.

DEMITRI, T. 15 mil pescadores prejudicados pelo petróleo cru no Ceará. **Redação O POVO.** Ceará, 6 fev. 2020. Disponível em:  
<<https://mais.opovo.com.br/jornal/reportagem/2020/02/06/15-mil-pescadores-prejudicados-pe-lo-petroleo-cru-no-ceara.html>> Acesso em: 07 maio 2022.

FONTANA, Mars G. **Corrosion engineering.** 3rd ed., New York:McGraw-Hill, Inc., 1987, 555p.

Greve dos caminhoneiros: a cronologia dos 10 dias que pararam o Brasil. **UOL Economia.** 30 maio 2018. Disponível em:

<<https://economia.uol.com.br/noticias/bbc/2018/05/30/greve-dos-caminhoneiros-a-cronologia-dos-10-dias-que-pararam-o-brasil.htm>> Acesso em: 08 maio 2022.

GOODFELLOW, R.; JONSSON, KATHERINE. Pipeline Integrity management systems (PIMS). **In: Oil and Gas Pipelines: Integrity and Safety Handbook**, p. 3-11, 1<sup>a</sup> ed., Canadá, 2015.

KIEFNER, J.F.; ROSENFELD, M.J. The Role of Pipeline Age in Pipeline Safety. **INGAA Foundation, Inc.** Ohio, 2012.

KISHAWY, H.A.; GABBAR, H.A. Review of pipeline integrity management practices, **Elsevier - International Journal of Pressure Vessels and Piping, Canada**, v. 87, Canada, abr. 2010.

KOCH, Gerhardus. **Trends in Oil and Gas Corrosion Research and Technologies**. Dublin: DNV GL USA, Elsevier. 2017. Disponível em:  
<<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101105-8.00001-2>> Acesso em: 06 fev. 2022

NOOR, Khairul B. M. Case Study: A Strategic Research Methodology. **American Journal of Applied Sciences**, 5(11). Universiti Industri Selangor - Malaysia 2008.

PEEBLES, M.W.H; **Evolution of the Gas Industry**. Londres: The Macmillan Press LTD, 1980.

PIPELINE HAZARDOUS MATERIAL SAFETY ADMINISTRATION (PHMSA). **Early Days in the Oil Industry**. [entre 2005 e 2019]

POPESCU, C.; GABOR, M.R. Quantitative Analysis Regarding the Incidents to the Pipelines of Petroleum Products for an Efficient Use of the Specific Transportation Infrastructure. **Processes**, Romania, 9, 1535, 2021.

RUSIN, A. *et al* Analysis of the Effects of Failure of a Gas Pipeline Caused by a Mechanical Damage. **Energies**, 2021, v.14, n.7686.

STANCIN, I.; JOVIC, A. An overview and comparison of free Python libraries for data mining and big data analysis. **Mipro**, Croatia, 2019.

YIN, R. K. **Case study research: design and methods**. Thousand Oaks, CA: SAGE Publications, 2002.

YIN, R. K. **Applications of case study reasearch** (2nd ed.) V.34. Thousand Oaks, CA: SAGE Publications. 2003.

## ANEXO A

Anexo A - Tabela com principais informações do dicionário de dados de cada base

Período	Categoria	Descrição da Categoria	Quantidade de colunas
1º período:	Parte A	<b>Informações do operador</b>	3
1986 a 2001 (15 anos)	Parte B	<b>Hora e Local do acidente</b>	9
	Parte C	Origem da descarga do líquido ou vapor	4
	Parte D	<b>Causa do acidente</b>	2
	Parte E	Morte ou ferimento	6
	Parte F	Total de danos estimado	1
	Parte G	<b>Substância vazada</b>	6
	Parte H	<b>Ocorreu no duto de linha</b>	12
	Parte I	<b>Causado por corrosão</b>	5
	Parte J	Causado por forças externas	7
	Parte K	Narrativa do incidente	3
	-	Não está no formulário	8
		Total	68
	2º período:	Parte A	<b>Informações gerais do relatório</b>
2002 a 2009 (7 anos)	Parte B	Assinatura do preparador e do autorizador	3
	Parte C	<b>Origem do acidente</b>	54
	Parte D	<b>Especificação do material</b>	8
	Parte E	<b>Ambiente</b>	3
	Parte F	Consequências	38
	Parte G	Informação de detecção de vazamento	5
	Parte H	<b>Causa aparente</b>	2
	Parte H1	<b>Corrosão</b>	11
	Parte H2	Forças naturais	6
	Parte H3	Danos de escavação	14
	Parte H4	Outras forças externas	1
	Parte H5	Material e/ou falhas de solda	23
	Parte H6	Equipamento	6
	Parte H7	Operação Incorreta	4
	Parte H8	Outros	2

	Parte I	Narrativa de fatores que contribuíram para o incidente	1
	-	Não está no formulário	17
		Total	68
3º período:	Parte A	<b>Informações chave do relatório</b>	74
2010 a 2022 (12 anos)	Parte B	<b>Informações adicionais do local</b>	37
	Parte C	<b>Informações adicionais da instalação</b>	64
	Parte D	Informações adicionais de consequência	53
	Parte E	Informações adicionais de operação	52
	Parte F	Informações sobre teste de álcool e drogas	6
	Parte G	<b>Causa aparente</b>	2
	Parte G1	<b>Falha por corrosão</b>	51
	Parte G2	Forças naturais	12
	Parte G3	Danos de escavação	40
	Parte G4	Outras forças externas	29
	Parte G5	Material e/ou falhas de solda	32
	Parte G6	Falha no equipamento	37
	Parte G7	Operação Incorreta	12
	Parte G8	Outras causas de incidente	4
	Parte H	Narrativa de descrição do incidente	1
	Parte I	Assinatura do Autorizador e do preparador	13
	Parte J	Inspeção de integridade completa	89
	Parte K	<b>Fatores contribuintes</b>	50
	-	Não está no formulário	19
		Total	672

Fonte: própria autora