

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO SUCKOW DA
FONSECA**

Engenharia Mecânica

Hugo Cosendey Massa

Rafael Roseira Ramos

**Estudo de Caso sobre Retorno Operacional em Duto de Gás sob Efeito de
Corrosão**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

RIO DE JANEIRO

2023

Hugo Cosendey Massa

Rafael Roseira Ramos

**Estudo de Caso sobre Retorno Operacional em Duto de Gás sob Efeito de
Corrosão**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca.

Orientador: Prof. Laís Amaral Alves

Co-orientador: Prof. Alexandre Ali
Guimarães

RIO DE JANEIRO

2023

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

M414 Massa, Hugo Cosendey

Estudo de caso sobre retorno operacional em duto de gás sob efeito de corrosão / Hugo Cosendey Massa [e] Rafael Roseira Ramos. — 2023.

58f. : il.(algumas color). ; enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2023.

Bibliografia : f. 53-58

Orientador: Laís Amaral Alves

1. Engenharia mecânica. 2. Corrosão. 3. Manutenção. 4. Gasodutos – Manutenção e reparo. I. Ramos, Rafael Roseira. II. Alves, Laís Amaral (Orient.). III. Guimarães, Alexandre Ali. IV. Título.

CDD 621

Elaborada pela bibliotecária Tania Mello – CRB/7 nº 5507/04

AGRADECIMENTOS

Estes parágrafos certamente não irão atender a todos que fizeram parte da nossa caminhada até aqui e de uma das fases mais importantes de nossas vidas. Agradecemos a todos que se fizeram presente, de toda e qualquer forma, tal momento é devido a cada um de vocês.

Aos nossos orientadores, Prof. Lais Amaral e Prof. Alexandre Ali, por todos os conselhos, ajuda e paciência com a qual guiaram o nosso conhecimento.

Menção para os amigos que colhemos durante esses anos, na instituição, no estágio e aos encontros da vida, pelo apoio incondicional ao longo de todo o período. Em especial ao grupo MF.

Gostaríamos de deixar registrado o reconhecimento às nossas famílias. Acreditem, sem o apoio de todos, superar todos os percalços que acompanham a vida acadêmica seria impossível.

RESUMO

MASSA, Hugo. ROSEIRA, Rafael. **Estudo de Caso sobre Retorno Operacional em Duto Gás sob Efeito de Corrosão**. 2023. 59 folhas Trabalho de Conclusão de Curso – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca. Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2023.

A indústria brasileira de óleo e gás tem experimentado um desenvolvimento significativo nos últimos anos, mas também tem enfrentado desafios relacionados à corrosão dos dutos de produção. A problemática se dá devido à dissolução de gases presentes nas operações, como CO₂, O₂ e H₂S. Este estudo tem como objetivo identificar os pontos de corrosão após a passagem de um dispositivo de inspeção conhecido como PIG instrumentado, a fim de permitir o desenvolvimento de um reparo adequado que viabilize o retorno operacional do duto. O estudo foi conduzido por meio de pesquisas bibliográficas e implementação de um estudo de caso, abordando uma questão real e amplamente discutida no setor de óleo e gás. A falta de tratamento e soluções adequadas para a corrosão pode resultar em problemas ambientais, financeiros e operacionais, afetando o fluxo de trabalho e o valor das empresas envolvidas. Na primeira etapa do estudo, é apresentada uma contextualização sobre a indústria de óleo e gás, juntamente com uma explicação detalhada do processo de corrosão, o método de análise de integridade utilizando o PIG, a importância da elaboração de um plano de manutenção dos dutos e o tipo de reparo necessário para restaurar a operacionalidade do duto. Na segunda etapa do trabalho, é realizado um estudo de caso que ilustra a problemática mencionada anteriormente. São apresentados os dados coletados durante a inspeção com o PIG instrumentado, destacando os pontos de corrosão identificados e a definição do reparo a ser utilizado durante o processo. Por fim, são apresentadas as análises, resultados e considerações obtidos a partir do estudo. O objetivo final é viabilizar o retorno operacional do duto por meio de um plano de manutenção adequado e um reparo eficiente. Através dessa abordagem, busca-se minimizar os impactos da corrosão, garantir a segurança e integridade dos dutos, e permitir o fluxo contínuo das operações na indústria de óleo e gás.

Palavras-chave: Corrosão. Manutenção. PIG. Integridade. Reparo.

ABSTRACT

MASSA, Hugo. ROSEIRA, Rafael. **Case Study of Operational Return in an Gas Production Pipeline Under the Effect of Corrosion**. 2023. 59 pages. Trabalho de Conclusão de Curso - Federal Center of Technological Education – Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2023.

The Brazilian oil and gas industry has experienced significant development in recent years, but it has also faced challenges related to corrosion in production pipelines. The problem is due to the dissolution of gases present in operations, such as CO₂, O₂ and H₂S. This study aims to identify the corrosion points after the passage of an inspection device known as an instrumented PIG, in order to allow the development of an adequate repair that enables the return to operation of the pipeline. The study was conducted through bibliographic research and implementation of a case study, addressing a real and widely discussed issue in the oil and gas sector. The lack of treatment and adequate solutions for corrosion can result in environmental, financial and operational problems, affecting the workflow and the value of the companies involved. In the first stage of the study, a contextualization of the oil and gas industry is presented, along with a detailed explanation of the corrosion process, the integrity analysis method using the PIG, the importance of drawing up a maintenance plan for the pipelines and the type of repair needed to restore pipeline operability. In the second stage of the work, a case study is carried out that illustrates the previously mentioned problem. The data collected during the inspection with the instrumented PIG are presented, highlighting the identified corrosion points and the definition of the repair to be used during the process. Finally, the analyses, results and considerations obtained from the study are presented. The ultimate goal is to enable the pipeline to return to operations through an adequate maintenance plan and efficient repair. Through this approach, the aim is to minimize the impacts of corrosion, guarantee the safety and integrity of the pipelines, and allow the continuous flow of operations in the oil and gas industry.

Keywords: Corrosion. Maintenance. PIG. Integrity. Repair.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Evolução dos Aços ARBL	17
Figura 2 – Processo Corrosivo	19
Figura 3 – Corrosão por Pite em Aço Carbono	20
Figura 4 – PIG em Deslocamento em Duto	21
Figura 5 – PIG MFL	23
Figura 6 – Formação de um Material Compósito	26
Figura 7 – Teste Hidrostático	28
Figura 8 – Ferramenta PIG MFL	33
Gráfico 1 – Relação de Espessuras	36
Figura 9 – Preparo de Superfície	41
Figura 10 – Exemplo de Máquina Monti	42
Figura 11 – Suavização da Superfície	43
Figura 12 – Resinador	43
Figura 13 – Montagem Final do Resinador	44
Figura 14 – Resina Epóxi	45
Figura 15 – Mistura da Resina Epóxi e Agente de Cura	45
Figura 16 – Impregnação da Fibra na Bandagem	46
Figura 17 – Aplicação de Camada Primer	47
Figura 18 – Envolvimento da Tubulação com Bandagem Impregnada	48
Figura 19 – Aplicação do Filme de Compressão	49
Figura 20 – Aplicação da proteção contra UV	50
Figura 21 – Manômetro	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades Fundamentais do Duto	32
Tabela 2 – Propriedades Estruturais do Duto	32
Tabela 3 – Especificações Técnicas da Ferramenta	33
Tabela 4 – Maiores Descontinuidades após Passagem da Ferramenta	34
Tabela 5 – Dados do Material Compósito	37
Tabela 6 – Dados do Projeto	38
Tabela 7 – Taxa de Mistura do Compósito	44

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

LISTA DE ABREVIATURAS

C	Curva
E	Espessura
M	Massa
MO	Mossa com Ovalização
NR	Norma Regulamentadora
O	Ovalização
PLH	Profissional Legalmente Habilitado
PT	Permissão de Trabalho
PTH	Pressão de Teste Hidrostático
RD	Redução de Diâmetro
TH	Teste Hidrostático
U	Uniforme
UV	Ultravioleta

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
API	American Petroleum Institute
ARBL	Alta Resistência e Baixa Liga
ASCI	Anomalia em Solda Circunferencial
ASLO	Anomalia em Solda Longitudinal
ASM	American Society of Metals

ASME	American Society of Mechanical Engineers
ASTM	American Society for Testing and Materials
COGR	Corrosão em Grupo
COSC	Corrosão em Solda Circunferencial
ERF	Estimated Repair Factor
IBP	Instituto Brasileiro de Petróleo
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
ISO	International Organization for Standardization
MFL	Magnetic Flux Leakage
NACE	National Association of Corrosion Engineers
OIEP	Oferta Interna de Energia Primária
PIB	Produto Interno Bruto
PIG	Pipeline Inspection Gauge
PMAO	Pressão Máxima de Operação Admissível
PMO	Pressão Máxima de Operação do Duto
PMP	Ponto de Medição de Potenciais
ZTA	Zona Termicamente Afetada

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1. MOTIVAÇÃO.....	13
1.2. OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS DO ESTUDO.....	13
1.3. METODOLOGIA	14
1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1. A INDÚSTRIA DE ÓLEO E GÁS.....	16
2.2. DUTOS	16
2.3. CORROSÃO	18
2.4. CORROSÃO EM DUTOS	19
2.5. MÉTODO PIG INSTRUMENTADO	21
2.5.1. PIG MFL.....	22
2.6. MANUTENÇÃO DE DUTOS E SUA IMPORTÂNCIA	23
2.7. MATERIAIS COMPÓSITOS.....	25
2.8. REPAROS NORMATIVOS.....	27
2.9. TESTE HIDROSTÁTICO.....	28
2.10. PLANO DE MANUTENÇÃO	29
3. ESTUDO DE CASO	31
4. ANÁLISE E RESULTADOS.....	40
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	52
REFERÊNCIAS	54

1 INTRODUÇÃO

O processo de extração e transporte de óleo e gás se dá por um fluxo complexo e segmentado, no qual a interligação de unidades produtoras e de refino são realizadas através de estruturas majoritariamente metálicas denominadas dutos. Estes, por sua vez, são considerados um meio de transporte confiável e de segurança com um bom custo devido ao volume que é levado e as grandes distâncias (THOMAS, 2001).

Durante o período operacional de um duto, é esperado que ocorram problemas que possam afetar suas características e, principalmente, sua integridade, devido à exposição ao ambiente e utilização constante. Dentre esses problemas, a corrosão é considerada o principal ponto de falha e uma preocupação constante (SILVA, 2011), uma vez que resulta na diminuição da espessura da parede do duto, podendo levar à ocorrência de furos e vazamentos que comprometem a produção e o transporte do fluido.

A fim de evitar os efeitos prejudiciais da corrosão e monitorar a perda de espessura, a detecção de defeitos é crucial. Nesse sentido, é necessário que os dutos sejam inspecionados periodicamente em locais onde a corrosão é evidente ou não. Após a detecção, técnicas adequadas, tais como ensaios de campo e ensaios eletroquímicos (MITTELSTADT, 1993) devem ser aplicadas para avaliar a criticidade do defeito.

O monitoramento da integridade dos dutos através do método conhecido como PIG – *Pipeline Inspection Gauge* (ZHANG, 2020) instrumentado pode detectar esses defeitos, com a avaliação do duto, enterrado ou não, a partir dos dados que forem obtidos através da passagem do PIG pelo duto. O resultado da corrida gera um relatório com os pontos medidos e a situação apresentada neles. A partir dos resultados, é possível checar a integridade do duto e realizar um reparo, se necessário, e montar um plano de manutenção que servirá de base até que haja uma nova corrida ou inspeção.

Com a identificação da situação atual da integridade do duto, a etapa de reparos normativos é de grande importância, visto que nela são implementadas todas as etapas de análise, preparação e aplicação do reparo necessário. Ao final do processo, é permitido que a operação de extração e transporte retorne à normalidade.

1.1 MOTIVAÇÃO

A motivação deste estudo decorre da enorme relevância desse tema no setor global de petróleo e gás. A corrosão é amplamente reconhecida como um dos maiores desafios enfrentados na manutenção de dutos de produção, exigindo uma abordagem eficiente para prevenir possíveis danos econômicos, ambientais e operacionais. A corrosão se torna um ponto de atenção relevante quando se trata de um ativo maduro, visto que são instalações que possuem maior deterioração oriundas do tempo de operação. Por isso, é fundamental buscar soluções eficazes para mitigar esse problema, tal como a abordagem do reparo normativo através da utilização de materiais compósitos e a sua influência e eficácia no retorno operacional dos dutos.

Estima-se que a indústria de produção de petróleo e gás tenha um custo anual total de corrosão de aproximadamente US\$ 1.372 bilhões. Esse valor é distribuído da seguinte forma: US\$ 589 milhões em custos relacionados às instalações e dutos de superfície, US\$ 463 milhões em despesas anuais com tubos de fundo de poço e outros US\$ 320 milhões em despesas de capital relacionadas à corrosão (SIMMONS, 2008).

Adicionalmente, é importante ressaltar que a prevenção e o controle da corrosão em dutos de produção podem contribuir significativamente para a sustentabilidade ambiental, já que vazamentos de óleo e gás podem causar impactos negativos ao meio ambiente e à saúde humana. Portanto, a busca por soluções eficazes para mitigar a corrosão em dutos é essencial não apenas para garantir a segurança operacional e econômica das empresas de petróleo e gás, mas também para proteger o meio ambiente e promover a sustentabilidade do setor. Com isso, o aprimoramento dos métodos de inspeção em dutos, análise e estudo de soluções modernas e eficazes são fundamentais para garantir a sustentabilidade e operacionalidade do duto a longo prazo.

1.2 OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS DO ESTUDO

O presente trabalho tem como principal objetivo realizar um estudo de caso acerca de uma análise de integridade em dutos de produção de óleo e gás, através do método de PIG MFL - *Magnetic Flux Leakage* (Fuga de Fluxo Magnético), com trechos em material de aço carbono, como: API 5L Gr B e API 5L X60 e seu devido

processo de manutenção. Desta forma será possível verificar os pontos de maior redução de espessura do duto, decorridos da corrosão, permitindo realizar um mapeamento de defeitos para a elaboração de um reparo normativo eficiente, através da utilização de materiais compósitos, que será responsável pela mitigação deste problema ao longo dos anos, garantindo a produtividade e qualidade do processo e o retorno operacional do duto.

Além disso, o estudo tem como objetivos específicos instigar um maior aprofundamento acerca da problemática da corrosão em dutos e seus métodos de resolução, não limitando à produção *onshore*, mas expandindo futuras pesquisas para a produção *offshore*. A produção *offshore* apresenta desafios adicionais para a análise de integridade em dutos, como a corrosão induzida por microrganismos e a corrosão sob isolamento térmico. Portanto, é importante que futuras pesquisas abordem esses desafios e busquem soluções para a garantia da integridade dos dutos *offshore*.

1.3 METODOLOGIA

Para a elaboração deste estudo, a metodologia utilizada foi segmentada em etapas. Na primeira parte, foram realizadas diversas pesquisas bibliográficas para um maior aprofundamento teórico acerca da temática abordada. Posteriormente, foi elaborado um estudo de caso específico, responsável por expor o conteúdo apresentado e permitir a análise de integridade propriamente dita, tal como sua manutenção. Em etapa seguinte, foram organizadas as informações encontradas a partir da elaboração do estudo de caso, permitindo o desenvolvimento de um reparo normativo para o duto, através da aplicação de materiais compósitos. Por fim, foram expostos os resultados e análises realizados ao longo do estudo, permitindo uma análise crítica acerca da situação e a importância deste tipo de trabalho para o setor de óleo e gás no Brasil.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Com o objetivo de correlacionar as informações e apresentar argumentações coesas, de acordo com a seção 1.3, o referente trabalho foi estruturado em tópicos

que seguem uma linha de raciocínio fluída. Dessa maneira, o capítulo 1 é responsável por expor a introdução, objetivos gerais, específicos e a metodologia adotada para a realização do trabalho.

O capítulo 2 explicita a revisão bibliográfica utilizada como base para a aplicação do estudo de caso, apresentando a indústria do óleo e gás, os dutos e sua exposição ao processo de corrosão e seus métodos de identificação. Adicionalmente, o capítulo 2 também desenvolve acerca dos reparos normativos, a aplicação de materiais compósitos e a importância do processo de manutenção.

Em passo posterior, o capítulo 3 se dá pela aplicação e contextualização do estudo de caso, demonstrando a problemática do estudo, o processo de identificação de corrosão em um duto de produção de óleo, as propriedades do duto e da ferramenta, as etapas necessárias para a manutenção, as características do material compósito a ser aplicado e todas as propriedades fundamentais do projeto.

O capítulo 4, por sua vez, é responsável pela análise e resultados do estudo de caso aplicado, demonstrando as premissas necessárias para a elaboração da manutenção normativa, as etapas utilizadas pela empresa responsável pelo reparo do duto e os resultados após a elaboração de todo o processo.

Por fim, o capítulo 5 se encarrega das considerações finais do trabalho, com um consolidado do processo elaborado nos capítulos precedentes e finalizando com a conclusão do projeto, referente ao retorno operacional do duto. Em passo adicional, é instigado acerca do estímulo ao estudo e aprofundamento desta temática em trabalhos futuros, possibilitando a busca por novas abordagens e métodos de manutenção, permitindo a expansão para o ambiente de extração *offshore*.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta seção do trabalho está dedicada à contextualização e exposição de conceitos teóricos e informações relevantes que tangenciam a situação-problema abordada no estudo, permitindo seu desenvolvimento com o devido embasamento.

2.1 A INDÚSTRIA DE ÓLEO E GÁS

A produção e exploração de petróleo e gás é um setor de grande relevância para a economia global e tem sido alvo de intensas discussões (ANP, 2022). Com o objetivo de contextualizar o tema do presente estudo, esta seção tem como propósito apresentar uma breve introdução ao petróleo e ao cenário no qual o objeto de estudo está inserido.

O petróleo é um líquido natural, inflamável, oleoso, de cheiro característico e com densidade menor que a da água. É uma mistura complexa de hidrocarbonetos, ou seja, de substâncias orgânicas formadas apenas por hidrogênio e carbono. Na sua maioria são hidrocarbonetos alifáticos, ali cíclicos e aromáticos (Serviço Geológico do Brasil, 2014). Paralelamente, o Gás Natural é uma mistura de compostos leves constituídos de carbono e hidrogênio, que na temperatura ambiente e na pressão atmosférica permanece no estado gasoso. Ele é encontrado acumulado em rochas porosas no subsolo, frequentemente acompanhado por petróleo, constituindo um reservatório. (Petrobras, 2022).

O setor de óleo e gás natural é a base da matriz energética brasileira e responsável por 15% do PIB industrial. Em 2021, o petróleo e o gás natural representaram 47% da oferta interna de energia primária (OIEP) no Brasil, sendo 34% desse montante apenas petróleo. (IBP, 2022).

2.2 DUTOS

Como visto na seção 2.1. a matriz energética brasileira possui uma grande expressividade vinda do petróleo e do gás natural. Segundo Yshii e Chiodo (2007) esta grande ampliação, aliada ao objetivo de elevar a eficiência das operações e reduzir custos tornou necessário aumentar o nível de segurança e confiabilidade

estrutural nos sistemas de dutos. Dessa maneira, foi estimulada a utilização de aços de alta resistência e baixa liga (ARBL) como maneira de solucionar esta questão.

Os aços categorizados como ARBL são os que obtêm limite de escoamento acima de 276 MPA na condição laminado, a partir de pequenas adições de elementos de liga. Devido ao baixo teor de carbono, esses aços garantem uma boa soldabilidade ao serem comparados aos aços carbono convencionais (ASM, 1997).

Os aços para tubulações na indústria do petróleo são classificados segundo a API (American Petroleum Institute) em função de sua aplicação, composição química e resistência mecânica. Os aços que são utilizados especificamente para a fabricação de tubos direcionados para linhas de transmissão seguem a classificação API 5L (YSHII E CHIODO, 2007).

Durante os anos 70 e início dos anos 80, os materiais utilizados na produção de tubos eram principalmente os aços carbono (C) e aços carbono-mangânês (C-Mn4). Os graus de tubos API 5L mais comuns naquela época eram B, X42 e X52 (ALIPIO, BARBOSA, BRITO, NUNES E RATNAPULI, 2000). Com o passar das décadas esses materiais passaram por desenvolvimentos para a otimização de suas aplicações. A Figura 1 representa a evolução dos aços de grau API ao longo de 35 anos. É possível observar que com os tratamentos e a adição dos elementos de liga, foi permitida a redução do teor de carbono, enquanto houve o aumento da resistência mecânica dos materiais, indo do grau X-52 ao X-100.

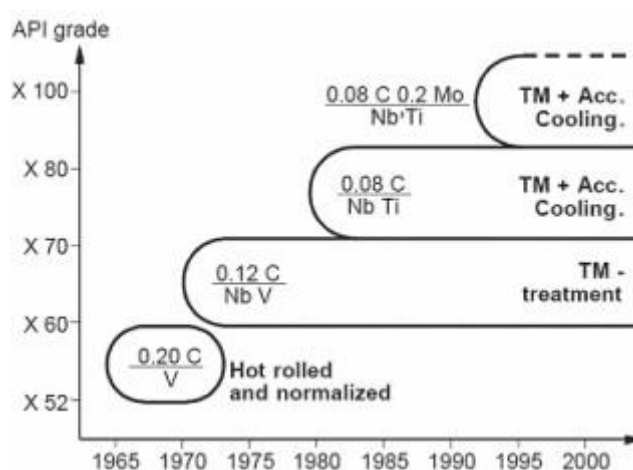


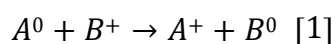
Figura 1 - Evolução dos aços ARBL

Fonte: Gorni e Mei (2003)

2.3 CORROSÃO

A corrosão pode ser definida como a deterioração de um material, metálico ou não, através de ação química ou eletroquímica do meio ambiente, podendo ser aliada a esforços mecânicos. Esta degradação que é gerada através da interação físico-química entre o material e o meio de operação, sendo uma reação natural, é chamada de oxirredução e resulta em diversas alterações prejudiciais ao material, tais como modificações estruturais e o desgaste (GENTIL, 1996).

Para a compreensão da oxidação-redução, ou oxirredução, se faz necessário o entendimento dos seus agentes responsáveis. Este fenômeno ocorre através de um agente redutor, doador de elétrons, e um agente oxidante, receptor de elétrons. Dessa maneira, os elétrons são transferidos de um reagente para outro. (SKOOG, 2009). Um exemplo ocorre na reação modelo [1], no qual A faz o papel de redutor, enquanto B faz o papel de oxidante:



O efeito de corrosão pode ocorrer de diversas formas, e seu conhecimento é importante para a realização das análises e estudos destes processos. As formas corrosivas podem ser reconhecidas através de sua morfologia, causas, fatores mecânicos e meio corrosivo (GENTIL, 1996). Portanto, alguns dos principais tipos de corrosão (GASPARONI E RODRIGUES, 2020) são: Corrosão uniforme; Corrosão por placas; Corrosão alveolar; Corrosão por pite; Corrosão intergranular; Corrosão transgranular; Corrosão filiforme; Corrosão por esfoliação; Corrosão por empolamento pelo hidrogênio; Corrosão em torno do cordão de solda.

Para a ocorrência da corrosão, são necessários três elementos coexistindo: material, oxigênio e eletrólito. Portanto, para que a corrosão seja evitada, é necessário que um destes componentes seja isolado ou eliminado. Métodos mais usuais são: diminuição da umidade do ambiente, emprego de revestimentos inorgânicos ou orgânicos no metal, adição de inibidores de corrosão no eletrólito ou no revestimento (GASPARONI E RODRIGUES, 2020).

A partir disso, é possível analisar e compreender o efeito de corrosão em dutos utilizados em Polos dentro do ambiente *onshore*, evidenciado na seção 2.4 do presente trabalho.

2.4 CORROSÃO EM DUTOS

O efeito de corrosão em dutos pode ocorrer de maneira interna ou externa. De maneira geral, a corrosão interna se dá pelas reações químicas do produto transportado com a superfície interna, enquanto a corrosão externa ocorre, em sua maioria, por danos na capa de revestimento (MAZZINI, 2009), como pode ser observado na Figura 2.



Figura 2 – Processo Corrosivo

Fonte: Sinergia, 2021

Como mencionado na seção 2.2. a corrosão é, na maior parte das ocorrências, resultante de uma reação eletroquímica que envolve um eletrólito e um metal. Portanto, visto que o gasoduto tratado no estudo se encontra na superfície (*onshore*), o solo possui um grande impacto ao se tratar de corrosão. Segundo Mazzini, (2009) quando uma tubulação de aço ou de ferro é enterrada, ela fica sob ação de processos corrosivos.

Com relação à corrosão externa, as heterogeneidades do solo ou metal possuem grande influência. Isso ocorre, pois, ao estar enterrada, a tubulação está em contato com um eletrólito, no caso, o solo ou a água. Dessa maneira, poderá haver diferenças de potencial elétrico em diferentes posições do duto devido à existência de regiões anódicas e catódicas, resultando na corrosão. Dos tipos de corrosão mencionados na seção anterior, a corrosão por pites se destaca para o referente estudo, visto que apresenta características localizadas e puntiformes, com pequenos diâmetros, porém elevadas profundidades. Este processo decorre da diferença de regiões anódicas e catódicas mencionadas. A Figura 3 ilustra este tipo de corrosão em um aço carbono, liga presente nas tubulações terrestres.



Figura 3– Corrosão por pite em Aço Carbono

Fonte: Sulcromo, 2023

Segundo Gentil, (1996) questões adicionais podem apresentar uma influência no processo de corrosão em estruturas metálicas, tais como as condições climáticas do ambiente, a incidência de chuvas, temperatura, umidade e a profundidade na qual a estrutura está instalada.

Ao se tratar de corrosão interna em dutos, conforme mencionado anteriormente, a presença de água com oxigênio é um grande fator responsável pelo efeito. A água, quando presente, é responsável pela formação de um filme que adere à superfície do duto, tornando sua parede molhável. Devido o gás, ao ser retirado do poço, possuir em sua composição CO_2 , O_2 e H_2S , a água em contato com a parede do duto e esses gases provoca a sua corrosão (SILVA, 2011).

Dessa maneira, a corrosão interna em dutos transportadores de petróleo é responsável por diversos problemas relacionados à operação e a qualidade do produto, tais como: Perda de espessura do duto; Falha do duto e contaminação do meio ambiente; Maior rugosidade do duto; Contaminação do produto (FERREIRA e MOTA, 1998).

Considerando esses fatores como os principais focos de observação do presente trabalho, é possível, por meio do estudo de caso, realizar uma análise concreta do impacto da corrosão resultante da utilização do método PIG instrumentado, bem como das medidas que devem ser adotadas para minimizar esse efeito.

2.5 MÉTODO PIG INSTRUMENTADO

Os “PIG’s” são equipamentos que viajam através de toda a extensão do duto, sendo impulsionados pela própria vazão do fluido e responsáveis pela execução de diversas funções (MAZZINI, 2009). Estes equipamentos são classificados de duas maneiras: “*Utility PIG’s*”, responsáveis pela realização de limpeza, remoção de água e separação de produtos e “*In-line Inspection Tools*”: Também conhecidos como “PIG’s” instrumentados, são responsáveis pelo fornecimento de informações acerca do condicionamento do duto, assim como a extensão e localização de empecilhos (BACELAR, 2018). A Figura 4 representa a passagem de um PIG instrumentado através de um duto.



Figura 4 - PIG em Deslocamento em Duto

Fonte: (SILVA E GALVÃO, 2014)

Portanto, dentro da indústria onshore e do setor de integridade de dutos, os PIG’s instrumentados são muito utilizados para a identificação de perda de material, principalmente ocasionados pela corrosão. Dessa forma, é um método capaz de realizar a identificação de defeitos com dimensões muito pequenas, como é o caso dos pites, mencionado no tópico 2.2 deste trabalho, como um possível causador de corrosão.

O PIG tem o seu funcionamento baseado no impulso que é provocado pelo líquido ou gás que esteja presente na tubulação. O diâmetro da tubulação é premissa para o PIG a ser utilizado, visto que é necessário o perfeito encaixe na linha.

Recomenda-se que haja uma inspeção a cada 4 (quatro) anos, tempo suficiente para o surgimento de avarias.

Sua aplicação não está restrita à indústria de óleo e gás, haja visto o uso do equipamento em distribuidoras de água para a passagem do PIG dentro de uma adutora para verificar a integridade.

2.5.1 PIG MFL

O denominado PIG MFL é um dispositivo de inspeção de corrosão nos dutos, que consiste na utilização da tecnologia MFL – *Magnetic Flux Leakage* (Fuga de Fluxo Magnético), ou seja, a ocorrência de uma fuga de campo magnético com a passagem da ferramenta por uma área corroída. Essa ferramenta é composta de sensores e ímãs em sua estrutura, no qual é inserido um grande fluxo magnético na parede da tubulação.

Com a inspeção, é possível perceber as discontinuidades causadas por perda de material, porém sem a distinção entre perdas na parede interna ou externa. Para que isso seja possível, são utilizados sensores Hall e sensores discriminadores na estrutura do PIG, onde caso o discriminador identificar anomalias, se trata de uma corrosão interna, enquanto a identificação apenas pelo sensor Hall é resultado de uma corrosão externa (CURVELO, 2016).

Para que seu funcionamento seja possível, o PIG MFL é dividido em módulos. O tipo mais comum utilizado se trata da composição por quatro módulos, sendo inclusive o caso apresentado no estudo de caso deste projeto, porém é possível que sejam encontrados dentro dos campos PIGs compactados com quantidades menores de módulos. Dessa maneira, o PIG de quatro módulos é dividido da seguinte maneira: O primeiro módulo é composto por baterias, responsáveis pela energização do sistema.

O segundo módulo é composto pelo sistema eletrônico da ferramenta, onde são encontradas, por exemplo, placas de conversão analógico-digital e placas de multiplexação. No terceiro módulo da ferramenta é encontrado o sistema de medição magnético. Por fim, no quarto e último módulo são encontrados os sensores discriminadores e os hodômetros. (CURVELO, 2016)

Com a Figura 5, observa-se um exemplo de PIG MFL utilizado nas inspeções de dutos, assim como a identificação das seções e os pontos mencionados no parágrafo anterior.

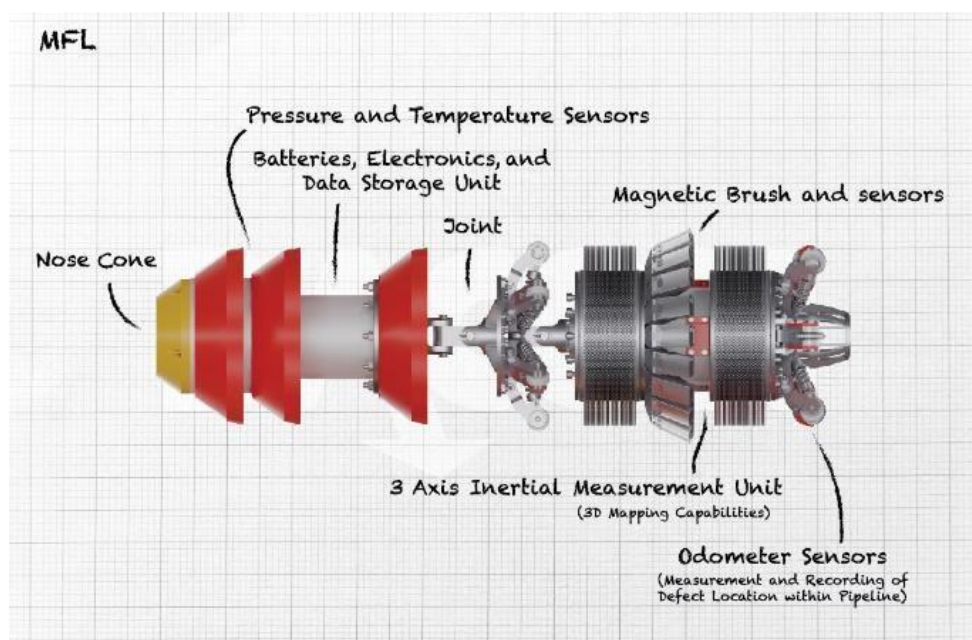


Figura 5 - PIG MFL

Fonte: Dexon Technology

Na Figura 5, lê-se, da esquerda para a direita: Cone de Nariz; Sensores de Pressão e Temperatura; Baterias, Eletrônicos e Unidade de Armazenamento de Dados; Junta; 3 Unidades de Medida de Inércia Axial; Escova Magnética e Sensores; Odômetros.

2.6 MANUTENÇÃO DE DUTOS E SUA IMPORTÂNCIA

As tubulações e todos os demais acessórios que fazem parte de todo o sistema, são parte vital no que se refere à produção e ao funcionamento de uma instalação. Com isso, é possível citar que a manutenção dos dutos é parte intrínseca do processo, a fim prolongar a sua vida útil, evitando toda e qualquer avaria que venha a ocorrer durante os anos (TELLES, 2001).

Como parte dos procedimentos para as manutenções dos dutos, vale destacar:

- Inspeção visual: A inspeção visual é uma das técnicas mais simples e eficazes de manutenção de dutos. Ela envolve a verificação visual do duto para identificar possíveis problemas, como vazamentos, rachaduras ou corrosão;
- Limpeza: A limpeza é outra técnica importante de manutenção de dutos. Ela pode ser realizada com a ajuda de equipamentos de limpeza, como escovas ou jatos de água de alta pressão, para remover detritos, sujeira ou corrosão que possam obstruir o fluxo do duto;
- Testes de pressão: Os testes de pressão são usados para verificar a integridade estrutural do duto. Eles envolvem a aplicação de pressão ao duto e a observação de qualquer vazamento ou deformação;
- Reparo: É a correção de danos, defeitos ou falhas em algo, como equipamentos, estruturas ou sistemas. Visa restaurar a funcionalidade e integridade do objeto, podendo ser feito por profissionais ou usuários para prolongar a vida útil, reduzir custos de substituição e garantir um bom desempenho.
- Monitoramento: O monitoramento contínuo dos dutos é outra técnica importante de manutenção. Ele pode ser realizado por meio de sensores de pressão, temperatura ou fluxo, que ajudam a identificar possíveis problemas antes que eles se tornem críticos.

A partir disso, realizar o acompanhamento periódico da situação no qual a tubulação se encontra evita maiores problemas que podem vir a ocorrer caso não haja esse acompanhamento.

Toda anomalia encontrada necessita de uma avaliação mais profunda da situação encontrada. Uma falha simples pode ser resolvida com reparos considerados básicos, de baixo custo, ou com revestimento, para evitar que o problema se torne maior, prolongando assim a vida útil do duto. Entretanto, o acompanhamento e validação dos reparos é essencial para que haja um histórico que permita a elaboração de um mapeamento eficiente capaz de auxiliar no monitoramento das tubulações e na retenção de lições aprendidas das operações. Com isso, é possível a realização de análises críticas por parte das equipes acerca do tipo de defeito e a

manutenção adequada a ser executada, permitindo um aprendizado contínuo e o desenvolvimento de uma cadeia de ajuda durante os projetos.

Para isso, os reparos necessitam ser realizados por uma equipe qualificada, terceirizada, que tenha conhecimento das técnicas a serem aplicadas em cada situação. A utilização de procedimentos internos é considerada um ponto importante para as empresas, uma vez que deve ser compartilhado e apresentado à todas as partes interessadas do processo.

Os defeitos mais comuns que são encontrados em dutos são:

- Perda de espessura externa e interna: Geralmente, causada por corrosão interna ou externa. Pode ser encontrada através de depressões ou no surgimento de pites;
- Trincas: Encontrada em soldas, riscos e ranhuras, são ocasionadas devido à corrosão sob tensão;
- Mossas e Sulco: Ocasionalmente, geralmente, por atividades terceiras como escavações.

O tipo de material, fluido transportado, classe de pressão que seja de acordo com a capacidade suportada do equipamento ou tubulação, diâmetro nominal, espessura, entre outros, são fatores que precisam ser considerados quando um reparo é necessário. O conhecimento desses pontos pela equipe responsável pela manutenção faz com que o resultado seja mais apropriado, sendo executadas atividades condizentes com a falha.

2.7 MATERIAIS COMPÓSITOS

De acordo com Mazumdar (2001), materiais compósitos são resultado da combinação de dois ou mais materiais, para concedê-los uma única combinação de propriedades. Ainda de acordo com Mazumdar (2001), o conceito principal de um compósito é de que ele contém materiais de matriz. De maneira geral, os materiais compósitos são compostos de fibras ou partículas de reforço e uma matriz em resina, metais, plástico ou cerâmica, como mostrado na Figura 6.

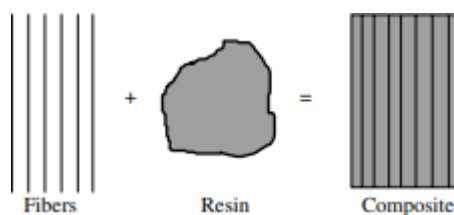


Figura 6 - Formação de um Material Compósito

Fonte: Mazumdar, 2001

Essa junção de matriz com o reforço, permitiu que os materiais desenvolvidos possuíssem propriedades mecânicas melhores do que os materiais originais, além de proporcionar uma melhor relação peso/resistência.

Ao se tratar de materiais compósitos, é importante ressaltar que suas características mecânicas não dependem apenas das propriedades da fibra, mas também de seu comprimento crítico. A maioria das combinações de matriz-fibra dos compósitos apresenta o comprimento crítico próximo a 1 mm, ou seja, 20 a 150 vezes maior do que o diâmetro da fibra utilizada. As fibras que possuem comprimento acima de 15 vezes ao comprimento crítico, são chamadas de fibras contínuas. Em contrapartida, abaixo do comprimento crítico, as fibras são definidas como descontínuas ou curtas. Portanto, para a obtenção de melhores resultados acerca da resistência do material compósito, é esperado que as fibras sejam contínuas (CALLISTER, 2012).

Com isso, dos materiais compósitos mais conhecidos para o reparo do referente estudo, é possível destacar: Fibra de Vidro de Poliuretano; Adesivos Estruturais; Reforço Estrutural de Fibra de Vidro Epóxi e Fibra de Carbono; Carbono Epóxi Ativado. Esses produtos necessitam estar alinhados com normas como a ASME PCC-2, ISO 24817, API 570 entre outras.

Portanto, a boa relação peso/resistência tornou o material compósito uma ferramenta capaz de ser aplicada nas mais variadas situações. Seu desenvolvimento está ligado as mais altas tecnologias e setores industriais, como o naval, industrial, automobilístico e aeroespacial. Se aplicados de acordo, podem ser considerados materiais confiáveis e além da resistência mecânica, também possuem elevada resistência química à corrosão e temperaturas. O reforço estrutural apresenta como principais vantagens:

- Extensão da vida útil da tubulação até a aplicação de um reparo definitivo;
- Pode ser aplicado em linha viva;
- Eliminação de tempo ocioso;
- Não necessita de trabalho a quente;
- Alternativa eficaz perante a utilização de abraçadeiras ou troca de trecho;
- Podem ser aplicados em tubulações de qualquer diâmetro e extensão, incluindo cordão de solda e curvas.

2.8 REPAROS NORMATIVOS

Os reparos normativos em tubulações referem-se às modificações ou correções feitas em sistemas de tubulação existentes para garantir que eles atendam aos requisitos de segurança e desempenho estabelecidos pelas normas e regulamentações aplicáveis.

Esses reparos podem incluir a instalação de dispositivos de segurança adicionais, como válvulas de alívio de pressão, ou a substituição de tubos danificados ou corroídos. Além disso, os reparos normativos também podem exigir que as tubulações sejam inspecionadas regularmente para garantir que continuem a atender aos padrões exigidos.

A necessidade de reparos normativos em tubulações pode ser motivada por vários fatores, incluindo alterações na legislação e regulamentação aplicáveis, mudanças na demanda ou na configuração do sistema de tubulação, e falhas ou acidentes anteriores. Dentre as normas mais utilizadas, pode-se destacar:

- ASME B31.1 e B31.3: são normas americanas que estabelecem os requisitos para projetar, construir, inspecionar e operar tubulações em diferentes aplicações industriais. Essas normas definem os critérios para reparos em tubulações, incluindo a qualificação de soldadores, o controle de qualidade dos materiais e a realização de testes de pressão; (ASME, 2022)
- API 570: é uma norma da American Petroleum Institute (API) que estabelece os requisitos para inspeção, avaliação e reparo de tubulações em instalações de petróleo e gás. Essa norma define as condições que

exigem reparos em tubulações, os critérios para avaliar a integridade das tubulações e os procedimentos para realizar reparos; (API, 2016)

- ISO 14692-4: é uma norma internacional que estabelece os requisitos para reparos em tubulações de plástico reforçado com fibra de vidro (PRFV). Essa norma define os critérios para avaliar a integridade das tubulações, os procedimentos para realizar reparos e as técnicas de inspeção e testes para garantir a qualidade do reparo; (ISO, 2017)
- ASME PCC-2: é uma norma técnica criada pela *American Society of Mechanical Engineers* (ASME) que estabelece os requisitos e diretrizes para reparo, alteração e revestimento de equipamentos e tubulações em serviço. O objetivo principal dessa norma é fornecer orientações para reparos de alta qualidade, eficazes e duráveis, com foco na segurança e confiabilidade das instalações industriais. (ASME, 2022)

2.9 TESTE HIDROSTÁTICO

O Teste Hidrostático é um dos métodos utilizados para avaliar a resistência e a integridade de equipamentos pressurizados, como vasos de pressão, tubulações, tanques e cilindros. O procedimento consiste em aplicar pressão hidrostática em um sistema, utilizando água, para verificar a presença de vazamentos ou falhas estruturais no local desejado. Os instrumentos de medição, como manômetros, são utilizados para monitorar a pressão e garantir que a mesma permaneça dentro dos limites de segurança (NR-13, 2018), como mostra a Figura 7.



Figura 7 – Teste Hidrostático

Fonte: STD, 2016

Na fase de fabricação, é necessário submeter os vasos de pressão a um Teste Hidrostático (TH), sendo obrigatório apresentar um laudo assinado por um Profissional Legalmente Habilitado (PLH) que comprove o teste. Além disso, é necessário fixar o valor da pressão de teste na placa de identificação do vaso (NR-13, 2018).

Durante o teste hidrostático, o equipamento ou tubulação é preenchido completamente com o líquido afim de evitar bolsões de ar. Em seguida, a pressão é gradualmente aumentada até atingir um nível predeterminado. A pressão é mantida estável por um período especificado, permitindo a observação de vazamentos ou deformações (ASTM E1003, 2013).

Os resultados do teste hidrostático são avaliados com base nos critérios estabelecidos pelos códigos e normas pertinentes. Se não forem detectados vazamentos ou deformações excessivas dentro dos limites permitidos, o equipamento é considerado seguro e adequado para uso (API 598, 2004). Caso sejam identificados problemas, medidas corretivas apropriadas, como reparos ou substituição de componentes defeituosos, devem ser tomadas.

É fundamental que o teste hidrostático seja realizado por profissionais qualificados, que possuam conhecimento dos procedimentos adequados e dos riscos envolvidos. A aplicação de pressão excessiva ou inadequada durante o teste pode resultar em falhas catastróficas, causando danos materiais significativos, lesões pessoais ou até mesmo perda de vidas (ASTM E1003, 2013).

2.10 PLANO DE MANUTENÇÃO

O plano de manutenção em tubulações é um conjunto de procedimentos e atividades programadas com o intuito de garantir a integridade, confiabilidade e segurança das tubulações em longo prazo. Segundo a American Society of Mechanical Engineers (ASME), a manutenção preventiva é uma das maneiras mais eficazes a fim de evitar falhas e reduzir o tempo de inatividade do sistema (ASME, 2022).

Para desenvolver um plano de manutenção efetivo, é imprescindível identificar as necessidades específicas do sistema de tubulação, tais como os tipos de materiais, as condições de operação, as cargas, as pressões e as temperaturas

envolvidas. Também é fundamental considerar os requisitos regulatórios e de segurança aplicáveis. Seguindo a recomendação do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO), a elaboração de um plano de manutenção deve ser baseada em uma avaliação de riscos, levando em consideração os possíveis cenários de falhas (INMETRO, 2012).

O plano deve incluir uma série de atividades, tais como inspeções regulares, limpezas, reparos, substituições e atualizações. De acordo com a American Petroleum Institute (API), as inspeções podem incluir o uso de técnicas de ensaios não destrutivos, como ultrassom, radiografia ou líquidos penetrantes, para detectar possíveis falhas e desgaste (API, 2015).

A limpeza pode ser realizada por meio de lavagem, jateamento de areia ou outros métodos para remover a corrosão e os resíduos. Os reparos podem envolver a substituição de tubos ou a aplicação de revestimentos protetores para restaurar a integridade do sistema. A substituição pode ser necessária quando os tubos estão danificados, corroídos ou desgastados. As atualizações podem envolver a instalação de novos dispositivos de segurança ou a adaptação do sistema a novas condições de operação.

É importante salientar que um plano de manutenção em tubulações deve ser adaptado às necessidades específicas de cada sistema e deve ser atualizado regularmente para garantir a sua efetividade. A execução regular do plano de manutenção pode ajudar a prolongar a vida útil do sistema de tubulação e garantir a segurança e eficiência das operações, conforme a norma técnica ABNT NBR 14037 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (ABNT, 2011).

3 ESTUDO DE CASO

Para a implementação da contextualização e revisão bibliográfica apresentada no capítulo 2, foi proposta a elaboração de um estudo de caso que tem como principal objetivo realizar a análise de integridade de um duto de produção de óleo e gás, com a implementação de uma proposta de um reparo através de reforço estrutural com material compósito para o retorno operacional do duto.

Dessa maneira, a empresa “ABCD Petróleo” visa reparar uma linha de produção de óleo e gás, localizada no “Polo XYZ”, despressurizada e fora de operação há aproximadamente três anos, com a maior brevidade possível para seu retorno operacional. Devido a periodicidade indicada para a realização da passagem de PIG, em um primeiro momento, o processo se dá através da passagem do PIG MFL em toda a extensão do duto, com o objetivo de identificar anomalias, tal como o processo de corrosão, responsável pelas reduções de espessura ao longo do duto.

Para isso, houve a contratação da empresa “PIGTech”, líder de mercado e especializada na realização de passagem da ferramenta. A partir deste processo, é possível identificar os pontos de atenção necessários, assim como as medidas a serem tomadas por parte da “ABCD Petróleo” para que o duto retorne à operação.

O duto analisado se encontra fora de operação, ou seja, despressurizado. Portanto, para que as atividades possam ser executadas com maior segurança, este ponto se torna crucial. Qualquer tubulação que necessite de reparo com a linha viva, ou seja, pressurizada e em operação, necessita que a contratada e contratante estejam de acordo para a execução da atividade, visto que há um risco potencial elevado de acidente.

Previamente à atuação da empresa “PIGTech”, a contratante informou as propriedades fundamentais do duto a ser analisado e mantido, sendo estas evidenciadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Propriedades Fundamentais do Duto

Material	API 5L Gr B / API 5L X60
Diâmetro Nominal	14"
Extensão	5,3 Km
Espessura da Parede	6,35 mm
Produto de Operação	Gás Natural
Pressão de Operação	10,0 kgf/cm ²
Pressão Máxima de Projeto	19,0 kgf/cm ²
Temperatura Máxima de Operação	34°C
Vazão Máxima de Operação	1458,379 m ³ /h

Fonte: Elaborado pelos autores, 2023

Adicionalmente, foi informado pela empresa contratante que o duto utilizado para estudo apresenta dois tipos de materiais ao longo de seu trecho total. A Tabela 2 compreende estes dados estruturais com os fatores de acordo com a ASME.

Tabela 2- Propriedades Estruturais do Duto

Material	Trechos	Espessura (mm)	Extensão (m)	Pressão de Projeto (Kgf/cm ²)	Diâmetro Externo (mm)	Fator de Projeto	Fator de Segurança
API 5L Gr B	7	5,6	4.176,306	19	355,6	0,6	1,67
API 5L X60	6	6,4	1.060,360	19	355,6	0,6	1,67
API 5L Gr B	2	9,5	19,813	19	355,6	0,6	1,67

Fonte: Elaborado pelos autores, 2023

Dessa maneira, é possível perceber que o duto por completo apresenta nove trechos com o aço API 5L Gr B e 6 trechos com o aço API 5L X60. Com isso em vista, a inspeção foi realizada por parte da "PIGTech" com a passagem do PIG MFL com a finalidade de reportar: Perdas de metal com profundidade superior a 10%; Todas as

anomalias em região de solda circunferencial; Outras anomalias diversas, caso encontradas.

Para a realização da análise, foi utilizada a ferramenta PIG MFL, que se trata de uma família de PIG's Magnéticos de corrosão com múltiplos sensores, capaz de realizar o registro de tempo, posição dos eventos e aquisição digital de dados. Dessa forma, é possível permitir uma identificação clara e precisa das anomalias. A Tabela 3 indica as especificações da ferramenta que foi utilizada para a elaboração da identificação de anomalias, permitindo o posterior processamento dos dados para a análise.

Tabela 3 - Especificações Técnicas da Ferramenta

Diâmetro	14"
Comprimento	2415 mm
Número de Sensores MFL	144
Espaçamento Nominal dos Sensores	5,91
Velocidade de Operação	0,5 a 4 m/s
Pressão de Operação	20 a 150 Kg/cm ²
Temperatura de Operação	0 a 60 °C
Autonomia (Distância)	200 Km
Autonomia (Tempo)	60 h
Número de Módulos	4
Peso	385 Kg

Fonte: Elaborado pelos autores, 2023

A Figura 8 ilustra a ferramenta utilizada no estudo de caso, com suas respectivas dimensões longitudinais, de acordo com suas seções.

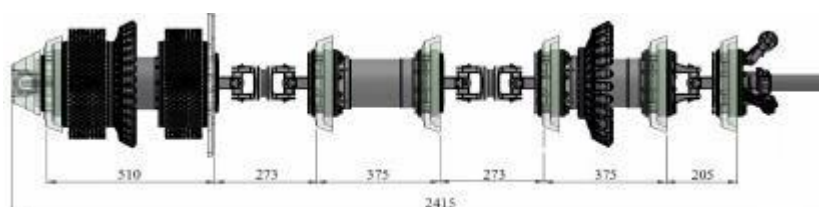


Figura 8 - Ferramenta PIG MFL

Fonte: Autor

Tendo isso em vista, após a passagem da ferramenta ao longo de toda a extensão do duto em questão, foram encontradas 2687 descontinuidades individuais de acordo com a especificação de falhas solicitadas pelo cliente. Para o referente estudo, foram destacadas as cinco maiores descontinuidades encontradas ao longo da inspeção, desconsiderando a interação entre anomalias, listadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Maiores Descontinuidades após Passagem da Ferramenta

Posição	Tipo	IE	Profundidade (%)	Espessura de Parede Restante (mm)	Comprimento (mm)	Largura (mm)	ERF	Pressão Segura (kgf/cm ²)
12,856	COR	E	44	3,11	65	72	0,4	44,01
4.834,939	COR	I	42	3,75	19	27	0,4	47,50
5.118,457	COR	I	48	3,30	39	51	0,4	47,50
5.240,573	COR	I	48	2,89	44	357	0,4	45,77
5.247,613	COR	E	67	1,83	68	54	0,5	38,47

Fonte: Elaborado pelos autores, 2023

onde:

COR: Corrosão

I/E: Interno/Externo

ERF: *Estimated Repair Factor*

Um dado importante na corrida do PIG MFL é a velocidade que ele apresenta, uma vez que o equipamento utilizado apresenta um valor para o limite de operação, nesse caso, de 4,0 m/s. Ao observar a Tabela 4, é possível observar que a passagem do PIG MFL permitiu a identificação da posição das descontinuidades, assim como seu tipo, sendo externo ou interno. Conforme introduzido no capítulo 2 deste estudo, a situação da tubulação e o tipo de produto que transporta impactam diretamente nos efeitos corrosivos, visto que o duto a ser mantido é responsável pelo transporte de gás natural no “Polo XYZ” e apresenta diversos trechos enterrados, em condições climáticas adversas, submetido a chuvas e mudanças de temperatura ao analisar toda a sua extensão.

Adicionalmente, ao observar a Tabela 4, é possível perceber que a menor Pressão Segura é maior do que a Pressão Máxima de Projeto. Este valor é encontrado

através da divisão da Pressão Máxima de Operação pela ERF, encontrado na ASME B31G. Embora não seja necessária a realização de reparos imediatos em ERFs menores do que 1, foi observada por parte da contratada “PIGTech” a necessidade da verificação da espessura mínima da tubulação, para a confirmação da necessidade acerca da manutenção desta tubulação de maneira provisória e preventiva, até que seja feito o posterior reparo definitivo com a troca de trechos.

Portanto, para a elaboração do estudo e posterior análise, em observação com a Tabela 4, foi realizado o cálculo de espessura mínima requerida de parede da tubulação para a verificação da viabilidade e necessidade da realização do reparo normativo. Com isso, foi utilizada a Equação 2, encontrada na norma ASME B31.8.

$$t_{req} = \frac{P * D}{2 * S * F * E * T} + C \quad [2]$$

onde:

t_{req} – Espessura Mínima Requerida

P – Pressão de Projeto

D – Diâmetro da Tubulação

S – Tensão de Escoamento

F – Fator de Projeto

E – Fator de Junta

T – Fator de Redução de Temperatura

C – Margem de Corrosão

Retirando as informações necessárias da Tabela 1 e Tabela 2 e substituindo na Equação 2, foi possível encontrar a espessura de 5,25 mm mínima para que não fosse necessário o reparo. É importante ressaltar que o Fator de Junta e Fator de Redução de Temperatura foram utilizados como 1 e a Margem de Corrosão como 3mm, devido à referência ASME para cálculo, visando o balanço entre peso e custo. Portanto, visto que as espessuras remanescentes encontradas na Tabela 4 foram inferiores à mínima, foi decidido pela “ABCD Petróleo” a necessidade do reparo normativo.

Considerando os valores de espessura nominal do duto, no material API 5L Gr B, espessura mínima requerida e as espessuras remanescentes encontradas nos pontos de maior perda de material, pode-se observar no Gráfico 1 a relação entre essas medidas.

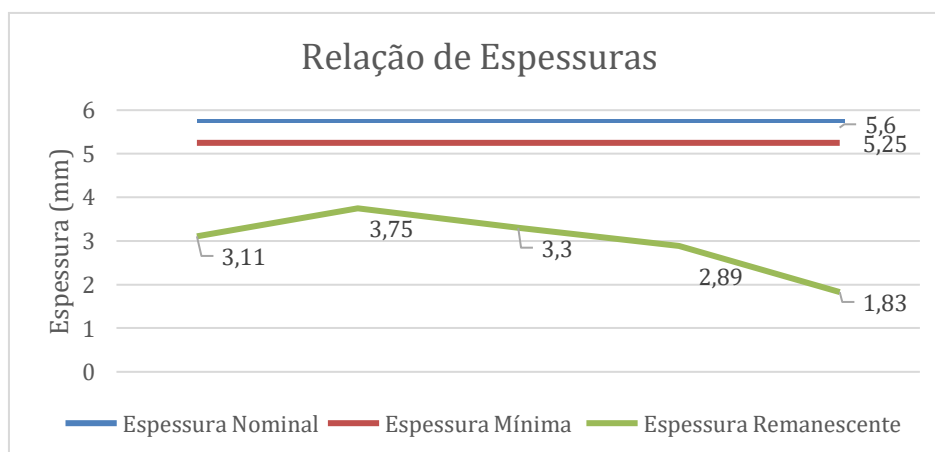


Gráfico 1 – Relação de Espessuras

Fonte: Elaborado pelos autores, 2023

Com as informações iniciais relatadas pela “PIGTech” após a passagem da ferramenta ao longo de toda a extensão do duto, se fez necessária a contratação de uma empresa especializada para a aplicação de um reforço estrutural com material compósito. A referente escolha se dá pelas diversas vantagens da utilização do material compósito, tais como, boa resistência mecânica e resistência à corrosão. Adicionalmente, a utilização deste tipo de material permite a extensão da vida útil da tubulação até que seja possível a realização de um reparo definitivo, como exemplo a substituição dos trechos, onde demandaria um tempo consideravelmente superior a aplicação do material compósito, acarretando um impacto econômico maior para a contratante.

Por se tratar de um reparo provisório, o material compósito apresenta uma excelente aplicabilidade em tubulações terrestres, visto que não possuem grandes restrições de dimensionamento, podendo ser utilizados em dutos de diferentes extensões, diâmetros e materiais. Com isso, tal medida é capaz de prover o retorno operacional do duto em questão sem que seja necessário a troca dos trechos indicados com baixa espessura.

Com o intuito do retorno operacional o mais breve possível do duto em questão, se faz necessário um reparo do tipo emergencial temporário com materiais

que sejam capazes de suportar a pressão de operação e de projeto de tal forma que se haja segurança e eficiência para a operação.

Para a execução do reparo, foi contratada, por parte da “ABCD Petróleo”, a “ComposiDutos”, empresa especializada na utilização de técnicas modernas para a execução de reparos com materiais compósitos. As especificações dos materiais a serem utilizados foram providos pela “ComposiDutos”, com o aval do PLH – Profissional Legalmente Habilitado da contratante. A Tabela 5 apresenta as características do compósito a ser utilizado. Os dados de deformação circunferencial permissível e deformação axial permissível são retirados da Tabela 401-3.4.4-1 da ASME PCC-2.

Tabela 5 - Dados do Material Compósito

Dados do Compósito

Descrição	
Módulo de Elasticidade	26300 MPa
Circunferencial	
Módulo de Elasticidade Axial	15600 MPa
Deformação Circunferencial	0.0025 mm/mm
Permissível	
Deformação Axial Permissível	0.0025 mm/mm
Coeficiente de Poisson	0.17
Tensão Cisalhante	4.97 MPa
Modulo de Rigidez	3430 MPa

Fonte: “ComposiDutos”

Considerando os diferentes tipos de materiais presentes no duto em questão, é possível verificar uma diferença na espessura nominal, como ilustrado na Tabela 6. É importante ressaltar que, para o referente estudo, os pontos de descontinuidade encontrados através dos relatórios de passagem de PIG por parte da “PIGTech” se encontram nos trechos de material API 5L Gr. B.

Tabela 6 - Dados do Projeto

PROJETO		
Material	API 5L Gr B	API 5L X60
Carga Axial	184923.91 N	184923.91 N
Fator de Redução de Temperatura	1	1
Fator de Serviço	0.333	0.333
Deformação Axial de Projeto	0.002178 mm/mm	0.002178 mm/mm
Deformação Circunferencial de Projeto	0.0021783 mm/mm	0.0021783 mm/mm
Comprimento Mínimo de Ancoragem	78.603753 mm	002604 mm 84.
Espessura Mínima do Reparo	5.2874846 mm	5.2874846 mm
Número Mínimo de Camadas	11.749	11.749
Comprimento Mínimo Axial Total do Reparo	310.082 mm	320.880 mm
Espessura Mínima do Reparo Adotado	5.4 mm	5.4 mm
Número Mínimo de Camadas Adotado	12	12
Comprimento Mínimo Axial Total do Reparo Adotado	1000 mm	1000 mm
Comprimento Mínimo do Afinamento Adotado	27 mm	27 mm

Fonte: “ComposiDutos”

A Tabela 6 foi construída pela empresa contratada para realizar o reparo e teve como base os dados que foram informados pela contratante para encontrar o número de mínimo de camadas e o comprimento mínimo axial do reparo, tendo a ASME PCC-2 como referência para a realização dos cálculos. O número de camadas é determinado através da divisão da espessura total obtida pela espessura de cada camada do compósito.

Pode-se notar que, a pedido da contratante, o comprimento do reparo foi alterado para um valor superior ao necessário. Essa mudança se deve ao fato de a topografia local não ser precisa o suficiente para indicar o ponto exato do reparo.

Posteriormente ao reparo do duto com o material compósito, é necessário a realização de um teste hidrostático para aferir a confiabilidade do reparo realizado e liberar o duto para operação. O teste é realizado conforme instruções abaixo, designadas pela NBR 15280-2.

- Realizar o teste com 1.3x a pressão de operação do duto (10 kgf/cm²);
- Pressurizar o duto até 50% da Pressão de Teste Hidrostático – PTH e manter por 24h;
- Elevar a pressão para 75% da PTH com taxa de no máximo 1,0bar/min;
- Elevar a pressão para 95% da PTH com taxa de no máximo 1,0bar/3min;
- Elevar a pressão para 100% da PTH, na mesma taxa do último patamar;
- Aguardar 30 min para estabilização da pressão;
- Manter pressurizado a 100% por 4h, acompanhando a variação de pressão que
 - não deve ser superior ou inferior a 0,5%;
- Após esse período de 4h, reduzir a pressão para 65% da PTH e manter por 24h;
- Não tendo perda de estanqueidade, o ensaio estará aprovado e deve seguir com despressurização do duto;
- Todo o ensaio deve ser acompanhado com registro fotográfico dos manômetros nos patamares de pressão.

Tendo em vista os dados e informações apresentadas, com o objetivo do retorno operacional do duto com a maior brevidade possível por parte da “ABCD Petróleo”, para que não haja maiores prejuízos econômicos e ambientais, faz-se necessário a elaboração de um plano para o reforço estrutural mediante utilização do material compósito apresentado por parte da empresa subcontratada “ComposiDutos”. A análise está demonstrada no capítulo 4 e contemplará o passo a passo procedimental que possibilitará o reparo do duto, assim como os resultados e sua eficiência.

4 ANÁLISE E RESULTADOS

Com os dados encontrados no capítulo 3, é possível realizar um estudo para solucionar as questões abordadas no presente trabalho. Dessa maneira, algumas abordagens se fazem necessárias e são comentadas.

Para que esse tipo de reparo seja possível, é recomendado que as empresas mais especializadas no assunto tenham como premissas: Avaliação em Campo, Soluções Eficazes, Controle de Qualidade e Documentação. Portanto, como pré-requisito para a execução do serviço, a contratada e contratante do serviço devem estar alinhadas a fim de propor o melhor ambiente possível antes, durante e após a execução das atividades, sendo elas:

- Obtenção da permissão de trabalho (PT);
- Disposição do ferramental;
- Liberação do acesso ao redor da linha;
- Preparação da superfície de reparo;
- Remoção de apoios e/ou suportes que venham a atrapalhar a execução da atividade;
- Tubulação seca e com temperatura acima de 5°C;
- Umidade local abaixo de 85%;
- Temperatura do substrato de 3°C acima do ponto de orvalho no local;
- Iluminação adequada se necessário;
- Registro fotográfico das etapas de execução.

A qualidade e garantia do reparo está diretamente ligada a qualidade da instalação, dependendo da habilidade e conhecimento por parte de quem está executando o reparo, além do seu prévio delineamento. Para isso, a qualificação e treinamento da equipe executante da atividade são fundamentais para que o reparo seja bem-sucedido.

Para defeitos considerados tipo A, ou seja, onde não há furos ou vazamentos, as seguintes etapas são adotadas:

- Preparação da superfície em toda a região do reparo;

- Utilização de resina de suavização para recomposição de geometria do substrato;
- Aplicação do reforço estrutural.

O preparo da superfície é parte vital para que o reparo seja bem executado. Para isso, esta etapa consiste na limpeza e remoção da corrosão visando atingir o padrão Sa 2½ ou NACE 2, próximo ao metal branco, retirando o revestimento como pinturas, óxidos e outras impurezas contaminantes e, principalmente, na criação do perfil de rugosidade ideal para aderência máxima do produto junto à tubulação.

A limpeza deve ser de acordo com o Padrão Sa 2½, onde a superfície a ser reconstituída e mantida deverá estar isenta de poeira, pontos de corrosão, salpicos de soldas e outras substâncias contaminantes. As carepas de laminação, ferrugem e materiais estranhos necessariamente devem ser removidos de maneira que seus vestígios não sejam vistos. A superfície em questão pode ser limpa através com escova, aspirador ou ar comprimido. A superfície deve apresentar cor cinza e rugosidade mínima de 45 micrômetros.

Essa etapa é realizada com uma máquina qualificada para uso em áreas classificadas como atmosfera explosivas, mesmo com duto em questão fora de operação e despressurizado. Na Figura 9 é possível visualizar um técnico manuseando o equipamento de forma a atender as exigências mínimas necessárias para o cumprimento desta etapa, de acordo com o Padrão Sa 2½.



Figura 9 - Preparo de Superfície

Fonte: Elaborado pelos autores, 2023

Portanto, para que esta etapa seja cumprida, é necessário em um primeiro momento, realizar a remoção de todo o revestimento presente na tubulação, tal como

ferrugens soltas, tinta ou qualquer outro material. Com isso, é executado o preparo propriamente dito, através da utilização da máquina Monti, ilustrada na Figura 10, na qual as suas cerdas devem atingir o substrato a uma distância de aproximadamente 1 polegada do pino do acelerador da máquina, para que o padrão NACE seja atingido.



Figura 10 - Exemplo de Máquina Monti

Fonte: MontiPower, 2023¹

A etapa seguinte, denominada “suavização da superfície”, consiste no preenchimento dos espaços vazios com material formulado a base de resina epóxi contendo cargas de cerâmica em sua composição, suavizando a região irregular para recomposição da geometria do duto, garantindo assim que haja maximização da superfície de contato do produto com o substrato, além de transferir a carga de pressão interna da tubulação para o material compósito, como constatado na Figura 11.

¹ <https://montipower.com/pt-pt/produtos/ferramentas-motorizadas/mbx-pneumatico/>



Figura 11 - Suavização da Superfície

Fonte: Elaborado pelos autores, 2023

Posteriormente a preparação da superfície e sua devida suavização, realiza-se a aplicação do sistema de materiais compósitos. Primeiramente há a aplicação do primer de resina, responsável por proporcionar maior aderência da bandagem ao substrato, realizar proteção anticorrosiva e transferir para o sistema de reparo as tensões existentes na tubulação, através de nanotecnologia.

Para a aplicação do material compósito, é necessário que haja a garantia da proporção exata da matriz polimérica no elemento de reforço, permitindo confiabilidade nas propriedades mecânicas ideais ao sistema. Para isso, é utilizado um equipamento denominado “Resinador”, sendo montado previamente à preparação dos demais componentes. A Figura 12 ilustra este equipamento.



Figura 12 - Resinador

Fonte: Elaborado pelos autores, 2023

Com a montagem do equipamento, é necessário o posicionamento do eixo com a manivela no equipamento, para que seja recebida a bandagem a qual será feita a impregnação do material compósito. A montagem final do “Resinador” está ilustrada na Figura 13.



Figura 13 - Montagem Final do Resinador

Fonte: Elaborado pelos autores, 2023

Portanto, para a impregnação da fibra, é utilizada uma resina industrial, composta por dois componentes, a Resina Epóxi e um Agente de Cura, com uma taxa de mistura identificada pela Tabela 7.

Tabela 7 - Taxa de Mistura do Compósito

Produto	Volume/Volume
Resina Epóxi	5
Agente de Cura	1

Fonte: Elaborado pelos autores, 2023

Para a sua aplicação, é necessário a realização da mistura uniforme destes dois componentes em um recipiente, visando atingir as propriedades de cura adequadas. A Figura 14 ilustra a Resina Epóxi a ser misturada, enquanto na Figura

15 é possível visualizar a mistura propriamente dita, realizada com o auxílio de um equipamento rotativo.



Figura 14 - Resina Epóxi

Fonte: Elaborado pelos autores, 2023



Figura 15 - Mistura da Resina Epóxi e Agente de Cura

Fonte: Elaborado pelos autores, 2023

Com a realização da mistura e o atingimento da homogeneidade, é realizado o despejo na bandeja do Resinador, com o subsequente ajuste de posicionamento da bandagem, composta por um tecido de fibra de vidro, e início da impregnação da fibra por todo o seu comprimento, conforme ilustra a Figura 16. É importante ressaltar que, durante a etapa de impregnação, é necessário assegurar que toda a extensão da bandagem esteja composta com a resina, apresentando uniformidade em seu aspecto.



Figura 16 - Impregnação da Fibra na Bandagem

Fonte: Elaborado pelos autores, 2023

Com a finalização da preparação do material compósito a ser utilizado como reparo dos trechos do duto, a etapa subsequente consiste na aplicação de camada de primer em todos os trechos do duto analisados no capítulo três do referente estudo. Esta aplicação se dá através da passagem da mistura dos componentes, previamente ao processo de impregnação e devidamente separados e armazenados.

Para esta etapa, é importante que a mistura realizada seja utilizada dentro de um prazo útil de vinte minutos, evitando que haja uma aceleração do processo de cura devido às reações exotérmicas da mistura. A Figura 17 representa a aplicação da camada de primer em um dos trechos do duto a ser reparado.



Figura 17 - Aplicação de Camada Primer

Fonte: Elaborado pelos autores, 2023

Após a aplicação da camada de primer, é aplicada a bandagem de reforço composta pela fibra de vidro impregnada com resina epóxi. Dessa maneira, a partir dos cálculos fornecidos no capítulo três para cada trecho a ser mantido, é realizada a medição da distância total do reparo e número de voltas a serem realizadas.

Em momento seguinte, o rolo de bandagem é desenrolado em posição horizontal com a fita a ser aplicada a partir da borda inferior da tubulação, objetivando manter a tensão adequada do processo, conforme ilustra a Figura 18.



Figura 18 - Envolvimento da Tubulação com Bandagem Impregnada

Fonte: Elaborado pelos autores, 2023

Durante o processo de passagem, deve-se atentar para que na volta inicial e nas voltas de borda, não seja realizado o transpasse de 50% na largura da fita. No início, faz-se necessária a aplicação de duas camadas ao redor do trecho a ser reparado da tubulação, sendo as camadas adicionais realizadas com base no memorial de cálculo para cada trecho, representados no capítulo três do estudo.

Com a finalização da aplicação da fita de fibra de vidro impregnada com a resina epóxi, a área é envolvida com um filme de compressão, que objetiva mitigar espaços restantes entre as camadas de resina. Esta etapa é de extrema importância para que se assegure a perfeita adesão entre as camadas do compósito, portanto, conforme procedimentos padrão, são realizadas duas voltas do filme de compressão. A Figura 19 demonstra a aplicação deste filme.



Figura 19 - Aplicação do Filme de Compressão

Fonte: Elaborado pelos autores, 2023

Este filme aplicado é removido em etapa posterior, com o alcance do tempo inicial de cura por parte da resina. Com isso, o trecho reparado deverá estar pronto para utilização ao passo que a resina estiver curada suficientemente para proporcionar aderência entre as camadas e atingir a dureza de 85 shore D, que é uma medida que avalia a resistência de um material à penetração de uma agulha sob uma força definida, geralmente aplicada por um durômetro, aparelho responsável pela medição da dureza do material. Essa propriedade é quantificada em uma escala numérica de 0 a 100, podendo ser expressa nas escalas A ou D. Quanto maior o número obtido nessa escala, maior será a dureza do material.

Por fim, com o objetivo de garantir a integridade do sistema de reparo com material compósito, após a execução do mesmo, aplica-se o revestimento de proteção contra raios ultravioleta (UV), como procedimento padrão da empresa contratada.

O material utilizado para a proteção contra raios UV é composto de tinta poliuretano acrílico alifático, adicionado de um agente de cura. Dessa maneira, após o tempo de cura e retirada do filme de compressão, é feito o preparo da superfície para adesão do produto junto ao laminado de reparo. Este, por sua vez, é realizado com uma lixa grão 80.

Em etapa posterior, é utilizado álcool isopropílico para eliminar gorduras, graxas, partículas soltas e umidade. Com isso, é realizada a mistura dos dois componentes até atingir a homogeneidade do produto para que seja aplicado na

superfície com a utilização de um rolo. A segunda demão é aplicada após 20 minutos de serviço. A Figura 20 ilustra este processo de aplicação.



Figura 20 - Aplicação da proteção contra UV

Fonte: Elaborado pelos autores, 2023

Posteriormente a realização do reparo com compósito, realiza-se o teste hidrostático para aferir a confiabilidade do reparo e verificar se o mesmo possibilita o retorno operacional do duto.

Seguindo conforme instruções citadas no capítulo três, o teste foi realizado e teve o resultado aprovado, com a pressão estabilizada em 13 kgf/cm², conforme Figura 21.



Figura 21 - Manômetro

Fonte: Elaborado pelos autores, 2023

Um teste hidrostático aprovado proporciona confiança de que o sistema de tubulação é capaz de suportar as pressões e condições operacionais previstas, minimizando o risco de falhas e vazamentos futuros. No entanto, é importante ressaltar que a manutenção e inspeção regular do sistema de tubulação são necessárias para garantir a sua integridade contínua ao longo do tempo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo a elaboração de um estudo de caso acerca do processo de identificação real de corrosão e consequente manutenção de um duto de produção de óleo e gás. Foi apresentada uma metodologia de trabalho através da elaboração de uma revisão bibliográfica, responsável pelo embasamento teórico acerca das temáticas abordadas. A partir disso, sua aplicabilidade foi demonstrada no estudo de caso proposto, explicitando todas as particularidades e características do projeto. Ao final do trabalho, foi realizada a análise e resultado do estudo, com base na utilização do material compósito para o reparo provisório e subsequente retorno operacional do duto, através da utilização das respectivas normas e aprovação no teste hidrostático, com o menor impacto econômico e ambiental.

Em um primeiro momento, é possível concluir acerca da importância da utilização do PIG MFL para a identificação de anomalias ao longo da extensão da tubulação, com o fornecimento de dados sobre defeitos de corrosão e interna e externa. A identificação de redução de diâmetro causada pela corrosão, assim como suas coordenadas e classificação de defeitos, foi fundamental para a elaboração de um plano de reparo normativo eficiente que permita a prolongação da vida útil do duto.

Em passo posterior, observada a necessidade de manutenção, foi abordado acerca de todo o processo de reparo realizado na tubulação, através das etapas de preparo de superfície, utilização de resina, suavização de superfície e por fim a aplicação do reforço estrutural propriamente dito realizado pela empresa “ComposiDutos”. O processo como um todo foi fundamental para que a empresa “ABCD Petróleo” mantivesse a operacionalidade do “Polo XYZ”, evitando maiores impactos econômicos e ambientais.

Tendo este processo em vista, é possível concluir que o estudo de caso abordado foi solucionado com sucesso, permitindo o retorno operacional do duto com o menor impacto econômico e ambiental possível para a empresa “ABCD Petróleo”.

Com isso, através da aplicação do estudo de caso e sua resolução, é possível observar a importância do estudo e aplicação de materiais dentro da engenharia e sua magnitude dentro da indústria, permitindo a completa análise e elaboração de um reparo normativo de um duto de produção de óleo e gás.

Adicionalmente, é importante ressaltar a relevância de toda a organização e processo normativo utilizado dentro do setor óleo e gás. Todas as etapas procedimentais são fundamentais dentro da engenharia para que sejam identificados padrões com soluções previstas dentro dos quesitos de segurança do trabalho, em conjunto com toda a qualidade do processo. Dessa maneira, é de extrema importância que no ambiente acadêmico sejam introduzidas disciplinas que contemplem os processos normativos e de confiabilidade de processo e produto, trabalhando em conjunto com disciplinas de materiais e engenharia. Com isso, é possível estimular o pensamento crítico do estudante e agregar valor ao ambiente acadêmico, visto que retrata situações verossímeis a realidade.

A elaboração deste trabalho foi crucial para o desenvolvimento pessoal e profissional como futuros engenheiros, permitindo a tangibilidade com situações reais e demonstrando as habilidades técnicas e interpessoais que o engenheiro deve possuir dentro da indústria, ressaltando a relevância do curso de engenharia mecânica.

Por fim, apesar da metodologia abordada enquadrar o estudo de caso acerca de um duto localizado em um polo de extração onshore, estimula-se para temas de trabalhos futuros a busca por abordagens de métodos eficientes e tecnológicos acerca da identificação de anomalias e manutenção de dutos em campos de extração e produção offshore, visto que se trata de uma indústria em constante desenvolvimento e evolução dentro do Brasil.

REFERÊNCIAS

ALÍPIO, P. H; BARBOSA, C. H; BRITO, V. L. O; NUNES, C. A; RATNAPULI, R.C. Evolução dos aços para tubos api utilizados no transporte de óleo e gás. Dissertação – USIMINAS, 2000.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. API 570, Piping inspection code. API, 2016.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. API 574, Inspection practices for piping system components. API, 2015.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. API 598 Valve Inspection and Testing. 8nd Edition. API, 2004

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. API 598, Valve inspection and testing. 8th Edition. API, 2004

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM. Disponível em: <<https://www.astm.org/e1003-13r22.html>> Acesso em: 6 de maio de 2023.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. ASME B31.1, Power piping. 7th Edition. ASME, 2022.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. ASME B31.3, Process piping. 9th Edition. ASME, 2022.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. ASME B31.8, Gas transmission and distribution piping systems. 8th Edition. ASME, 2022.

ANDRADE, M. M. **Competências requeridas pelos gestores de Instituições de ensino superior privadas:** um estudo em Curitiba e região Metropolitana. 2005. 173 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Tecnologia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2005.

ANP – AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Anuário estatístico 2022. Disponível em: www.anp.gov.br. Acesso em: 11.6.2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14037 - Diretrizes para elaboração de manuais de uso, operação e manutenção das edificações - Requisitos para elaboração e apresentação dos conteúdos. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023:** informação e documentação: referências: elaboração. Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS INVENTORES, ANI, Pig Geométrico. Disponível em: <http://www.invencoesbrasileiras.com.br/PIG-geometrico/#:~:text=A%20tecnologia%2C%20denominada%20PIG%20Geom%C3%A9trico,e%20o%20Cenpes%2C%20da%20Petrobras> Acesso em: 15 de maio de 2023.

BACELAR, L. S. DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS SEM FIO PARA PIG DE LIMPEZA INSTRUMENTADO. Tese de Graduação, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Bahia, 2018.

BARROS, A. J. S; LEHFELD, N. A. S. **Fundamentos de metodologia:** um guia para a iniciação científica. 2. ed. São Paulo: Makron, 2000.

CALLISTER, William D. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

CÓDIGO de Catalogação Anglo-Americano. 2. ed. São Paulo: FEBAB, 1983-1985.

CONHEÇA O SETOR DE ÓLEO E GÁS NATURAL EM NÚMEROS. Além da superfície, 2022. Disponível em: <<https://alemdasuperficie.org/setor/conheca-o-setor-de-oleo-e-gas-natural-em-numeros>>. Acesso em: 10 de março de 2023.

CURVELO, E. V. (Abril de 2016). ESTUDO PARA PROJETO DE MÓDULO DISCRIMINADOR DE UM PIG MFL . p. 56.

FERREIRA, P. A., MOTA, C. V. **Gerenciamento da Corrosão em Dutos: Corrosão Interna em Dutos de Óleo, Gás e Derivados**, Apostila, 1998.

GALVÃO, L.; SILVA A. **A utilização de PIG´s na Inspeção e Manutenção de Dutos**. 2014. Disponível em: <https://silo.tips/download/a-utilizaaao-de-pigs-na-inspeao-e-manutenao-de-dutos#>. Acesso em 12 de abril de 2023.

GASPARONI, G. A.; RODRIGUES, M. L. **Corrosão de Estruturas Metálicas em Água e sua Proteção**. 1. Ed. Belém: RFB Editora, 2020. Disponível em: <https://deposita.ibict.br/handle/deposita/210>.

GENTIL, V. **Corrosão**. 3. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 1996.

GORNI, A. A.; MEI, P. R. **Aços alternativos ao HY80 sem a necessidade de aplicação de têmpera e revenimento**. Metalurgia e Materiais, v. 56, p. 287- 293, 2003.

HIGH- Strength Structural and High-Strength Low-Alloy Steels: HSLA Steels. Properties and Selection: Iron Steels and High Performance Alloys. Metals Handbook, Vol 6. American Society of Metals. 10^o Ed., 1997. p. 1009 – 1102

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. INMETRO. Orientações sobre planos de manutenção, inspeção e reparo de tubulações em empresas de petróleo e gás. Disponível em: <<https://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC001854.pdf>>. Acesso em: 4 de fevereiro de 2023.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 14692-4: Petroleum and natural gas industries -- Glass-reinforced plastics (GRP) piping -- Part 4: Fabrication, installation, and operation. 2nd Edition. ISO, 2017.

MAZZINI, Carlos E. **Comparação de Métodos de Integridade de Dutos: Método FIG e CIS/DCVG**. Tese de Graduação, Universidade Federal do Espírito Santo, Espírito Santo, 2009.

MAZUMDAR, Sanjay K. **Composites manufacturing: materials, product, and process engineering**. Boca Raton: CRC Press, 2001.

MFL PIGGING TOOLS AND INLINE INSPECTION SERVICES, DEXON. Disponível em: < <https://www.dexon-technology.com/pipeline-services/intelligent-PIGging/mfl-PIGging/>> Acesso em: 10 de janeiro de 2023.

MITTELSTADT, Friedrich. **Avaliação eletroquímica da resistência a corrosão do aço ABNT 4140 nitretado por plasma**. Tese de pós graduação, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, Brasil, 1993.

MONTEIRO, S. **Breve espaço entre cor e sombra: o romance da maturidade literária de Cristóvão Tezza**. Revista de Letras, Curitiba (PR), v. 13, n. 11, p. 183-200, dez. 2009.

MONTIPOWER SURFACE PREPARATION TECHNOLOGIES. Disponível em: <<https://montipower.com/pt-pt/produtos/ferramentas-motorizadas/mbx-pneumatico/>> Acesso em: 5 de fevereiro de 2023.

SIMMONS, M. R. **Report of Offshore Technology Conference**. Presentation - NACE International Oil and Gas Production, Houston, TX, 2008).

ANDRADE, M. M. **Competências requeridas pelos gestores de Instituições de ensino superior privadas: um estudo em Curitiba e região Metropolitana**. 2005. 173 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Tecnologia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2005.

PREPARAÇÃO DA SUPERFÍCIE METÁLICA PARA PINTURA. Tintas anticorrosivas. Disponível em: <<https://www.tintasanticorrosivas.com.br/informacoes-tecnicas/preparacao-da-superficie-metalica-para-pintura/>>. Acesso em: 3 de março de 2023.

RENAUX, D. P. B.; et al. **Gestão do conhecimento de um laboratório de pesquisa: uma abordagem prática**. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE GESTÃO DO CONHECIMENTO. 4., 2001, Curitiba. **Anais**. Curitiba: PUC-PR, 2001. p. 195-208.

SILVA, A. A. R. **Avaliação da corrosão em dutos por técnica gravimétrica e de resistência elétrica**. Dissertação (Mestrado). Programa de pós-graduação em ciência e engenharia de petróleo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2011.

SINERGIA. Entenda mais sobre o processo corrosivo. Disponível em: <<http://blog.sinergiaufv.com/2021/02/08/entenda-mais-sobre-o-processo-corrosivo-o-que-e-impacto-e-solucao/>>. Acesso em: 1 de julho de 2023.

STD ENGENHARIA. Teste Hidrostático. Disponível em: <<http://stdengenharia1.blogspot.com/2016/03/teste-hidrostatico-th.html>>. Acesso em: 1 de julho de 2023.

SULCROMO. Corrosão por pites: como evitar esse problema na indústria. Disponível em: <<https://www.sulcromo.com.br/blog/corrosao-por-pites-como-evitar-esse-problema-na-industria/>>. Acesso em: 3 de julho de 2023.

TELLES, PC da S. **Tubulações industriais: materiais, projeto, montagem**. 10^a Edição, LTC, 2001, p. 253

THOMAS, J. E. **Fundamentos de engenharia de petróleo**. 2 ed. Rio de Janeiro, 2001.

TIRATSOO, J. (1992). PIPELINE PIGGING TECHNOLOGY (2nd Edition ed.). (T. J.N.H, Ed.) Originally published by Gulf Publishing Company

YSHII, L. N., **Aplicação de aços de alta resistência em dutos de transporte de óleo e gás: Implicações sobre o projeto e construção**. Tese de Graduação, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2007.

ZHANG, H. **Dynamic characteristics of the pipeline inspection gauge under girth weld excitation in submarine pipeline**. College of Mechanical and Storage and Transportation Engineering, China University of Petroleum-Beijing. Beijing, 2020.