

FACULDADES INTEGRADAS DE ARACRUZ – FAACZ
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA MECÂNICA

JONAS ALISSON TEDESCO DE SOUZA
PABLO STOCO FERREIRA

**PROPOSTA DE SUBSTITUIÇÃO DO MATERIAL PARA TUBULAÇÕES DE
SISTEMAS DE ÁGUA SALGADA EM UMA PLATAFORMA DE PETRÓLEO**

Aracruz
2018

JONAS ALISSON TEDESCO DE SOUZA
PABLO STOCO FERREIRA

**PROPOSTA DE SUBSTITUIÇÃO DO MATERIAL PARA TUBULAÇÕES DE
SISTEMAS DE ÁGUA SALGADA EM UMA PLATAFORMA DE PETRÓLEO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à coordenação do curso de Engenharia Mecânica das Faculdades Integradas de Aracruz, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof^a. Me. Uara Sarmenghi Cabral.

Aracruz
2018

JONAS ALISSON TEDESCO DE SOUZA

PABLO STOCO FERREIRA

PROPOSTA DE SUBSTITUIÇÃO DO MATERIAL PARA TUBULAÇÕES DE SISTEMAS DE ÁGUA SALGADA EM UMA PLATAFORMA DE PETRÓLEO

Trabalho de conclusão de curso apresentado à coordenadoria do curso de Engenharia Mecânica das Faculdades Integradas de Aracruz, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovado em 20 de novembro de 2018.

COMISSÃO EXAMINADORA


Prof.^a Me. Uara Sarmenghi Cabral

Faculdades Integradas de Aracruz

Orientador


Prof. Esp. Anderson Fanchiotti da Silva

Faculdades Integradas de Aracruz

Examinador interno


Prof. Esp. Ernandes Marcos Scopel

Instituto Federal do Espírito Santo

Examinador externo


Dr. Eng. Jorge Antonio Merino Muñoz

Petróleo Brasileiro S.A.

Examinador externo

RESUMO

Tubulações servem como elementos para a condução de fluidos entre equipamentos e são de grande importância na indústria. Um dos setores que mais utilizam tubulações é o de extração e produção de petróleo. O presente trabalho, desenvolvido através de pesquisas bibliográficas, dados da empresa e levantamento de custo, tem como objetivo avaliar diferentes materiais para aplicação em tubulações para água salgada que integram um sistema de tratamento e bombeamento para injeção da água do mar por uma plataforma de petróleo. Esta avaliação de materiais visa selecionar o material mais adequado para substituição de tubulações de aço carbono revestido internamente, em um caso apresentado, devido ao surgimento de defeitos no revestimento interno, que causaram a paralisação do sistema de injeção de água devido à obstrução de tubulações, válvulas e outros equipamentos, além de favorecer o processo de corrosão nos componentes integrantes deste sistema. Inicialmente, com informações bibliográficas, definiram-se os materiais que melhor atendem aos requisitos para a substituição foram o PRFV, o super duplex e o cobre-níquel, devido a sua resistência a corrosão e amplo e conhecido uso na indústria. Através das informações do caso estudado, o método utilizado foi comparar os materiais frente a critérios técnicos e econômicos a fim de determinar aquele que melhor atende às necessidades do sistema de água salgada. As análises indicaram que o material que melhor atendeu a relação de critérios técnicos e econômicos foi o PRFV. Este material apresentou mais vantagens em relação aos demais materiais analisados, pois resiste às condições de trabalho no sistema e apresentou o menor custo de aquisição entre os materiais analisados. O presente trabalho foi considerado satisfatório, pois permitiu definir o melhor material para a proposta de substituição de tubulações em um sistema de água salgada de uma plataforma de petróleo, atendendo assim, os objetivos propostos para este estudo.

Palavras Chave: Tubulações. PRFV. Água salgada. FPSO.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Aplicação de revestimento por meio de aspersão eletrostática.	20
Figura 2 - Construção de uma tubulação em PRFV por enrolamento filamentar.	22
Figura 3 - Representação de camada passiva.	23
Figura 4 - Sistema de captação, distribuição e injeção de água do mar e em destaque trecho de tubulação objeto de estudo.	29
Figura 5 - Sistema de bombeamento de água salgada.	29
Figura 6 - Polietileno no interior de um trocador de calor.	30
Figura 7 - Entupimento por polietileno.	31
Figura 8 - Painel de cores - Desempenho do material X parâmetro.	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação das tubulações.	14
Tabela 2 - Comparativo das propriedades de vários materiais para tubulações.	16
Tabela 3 - Limites de temperatura e comportamento em tubulações de aços-carbono.	18
Tabela 4 - Composição de aços inoxidáveis duplex e super duplex.	24
Tabela 5 - Ligas de cobre.	25
Tabela 6 - Composição da água do mar.	34
Tabela 7 - Disposição dos materiais segundo critérios de classe e pressão.	35
Tabela 8 - Custo para aquisição dos itens de tubulação para os diferentes materiais.	40

LISTA DE SIGLAS

ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas

API - American Petroleum Institute

ASME - American Society of Mechanical Engineers

ASTM - American Society for Testing and Materials

AWWA - American Water Works Association

CDA - Copper Development Association

EEMUA - Engineering Equipment and Materials Users Association

FPSO - Floating Production Storage and Offloading

MAG - Metal Active Gas

MIG – Metal Inert Gas

NBR – Norma Brasileira Registrada

PRFV - Plástico Reforçado com Fibra de Vidro

TIG - Tungsten Inert Gas

UNS - Unified Numbering System

URS - Unidade de Remoção de Sulfatos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	OBJETIVOS	12
2.1	OBJETIVO GERAL	12
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	12
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1	MATERIAIS NA INDÚSTRIA DE PETRÓLEO.....	13
3.2	TUBULAÇÕES INDUSTRIAIS.....	13
3.2.1	Tubulações de aço carbono	17
3.2.2	Revestimento Interno	18
3.2.3	Tubulações de Plástico Reforçado com Fibra de Vidro (PRFV)	21
3.2.4	Tubulações de aço inoxidável duplex	23
3.2.5	Tubulações de cobre-níquel	25
3.3	CRITÉRIOS PARA SELEÇÃO DOS MATERIAIS DE TUBULAÇÃO.....	26
4	METODOLOGIA	27
4.1	ESTUDO DE CASO.....	27
4.2	APRESENTAÇÃO DO ESTUDO DE CASO	28
4.2.1	Problemas Encontrados	30
4.3	MÉTODOS.....	31
4.3.1	Critérios Técnicos	32
4.3.2	Critério Econômico	32
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	33
5.1	PARÂMETROS AVALIADOS	33
5.1.1	Fluido de processo	33
5.1.2	Condições de operação do sistema (pressão e temperatura)	34
5.1.3	Experiência prévia	35
5.1.4	Disponibilidade dos materiais	36

5.1.5	Facilidades de fabricação e montagem	37
5.1.6	Custo do material	39
5.2	COMPARAÇÃO DOS MATERIAIS DE TUBULAÇÃO FRENTE AOS PARÂMETROS AVALIADOS	41
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	44
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	45
8	REFERÊNCIAS	46

1 INTRODUÇÃO

A importância das tubulações na indústria é enorme, principalmente naquelas de processamento, nas quais as tubulações são os elementos de ligação entre diversos equipamentos (vasos de pressão, reatores, tanques, bombas, trocadores de calor, etc.), por onde circulam os fluidos em processamento e os de utilidades. Nestas indústrias, o valor das tubulações representa, em média, 20 a 25% do custo total da instalação industrial e a montagem atinge, uma média de, 45 a 50% do custo total da montagem de todos os equipamentos. Além disso, o projeto das tubulações vale, aproximadamente, 20% do custo total do projeto da indústria (TELLES, 2012).

De acordo com Almeida *et al.* (2016), o preço de uma plataforma de petróleo depende de sua escala de produção. Para a construção de uma plataforma do tipo FPSO (*Floating Production Storage and Offloading*), com capacidade de produção de 150 mil barris de petróleo por dia, o custo é de aproximadamente 2 bilhões de dólares. Assim, a partir dos percentuais estimados por Telles (2012), constata-se quão vultosos são os custos acerca do item tubulações.

Segundo Silva *et al.* (2012), um dos setores que mais utilizam tubulações, dos mais diversos diâmetros e materiais, é o de extração e produção de petróleo, por meio das plataformas que realizam a separação de água e gás associados ao óleo, o armazenamento deste óleo, a compressão do gás para as unidades de tratamento em terra, dentre outros processos. As tubulações neste setor são utilizadas para transporte de diversos fluidos, dentre eles: hidrocarbonetos, óleos lubrificantes, ar, gases, água potável e água salgada. As tubulações metálicas para serviço contínuo com água salgada, devido à intensa corrosão a que estão sujeitas, podem originar graves problemas operacionais em caso de falhas.

Como parte das novas tecnologias e técnicas atualmente utilizadas para otimização da produção de petróleo, a injeção de água do mar é apresentada como um método de recuperação secundária, para a manutenção de pressão no reservatório.

Segundo Rosa *et al.* (2006), a aplicação desses métodos visa principalmente acelerar a produção e a eficiência no processo de recuperação do óleo.

A corrosão é agravada pelo aumento da temperatura e também pela velocidade de circulação muito alta ou muito baixa. Além da corrosão há ainda o problema da proliferação de algas e outros organismos marinhos, que causam obstrução das tubulações e ataque biológico ao metal (GENTIL, 2001).

As tubulações em aço com revestimento interno aliam as vantagens da boa soldabilidade, boa resistência mecânica e ampla disponibilidade do aço carbono com as propriedades de resistência a abrasão e corrosão do material do revestimento (TELLES, 2012). Contudo, apesar de suas excelentes propriedades em condições normais, um mínimo defeito no revestimento interno possibilitará o início de corrosão da tubulação e o desprendimento, na forma de placas ou fragmentos diversos, deste revestimento. O acúmulo de placas de revestimento pode bloquear a tubulação e danificar equipamentos do sistema onde se encontram essas tubulações.

O presente trabalho consiste em um estudo de caso para a proposição de um material a ser utilizado nas tubulações de água salgada, devido problemas operacionais causados pelo desprendimento do revestimento interno das tubulações de aço carbono que integram um sistema de injeção de água do mar realizada por uma plataforma de petróleo. Este desprendimento paralisou a unidade de injeção de água do mar devido a obstrução de tubulações e equipamentos, além de causar o início da corrosão nestas tubulações. O objetivo é analisar diferentes materiais atualmente utilizados pela indústria de óleo e gás para a condução de fluidos corrosivos, com pressão e temperatura específicas no caso analisado, visando apresentar materiais alternativos, capazes de substituir o aço carbono revestido por polietileno, sem, contudo, requerer o uso de qualquer revestimento interno e sem propiciar a formação dos produtos de corrosão ou outros sólidos que possam comprometer os processos seguintes de filtragem e desaeramento, tratamentos necessários à água antes de sua injeção no poço de produção.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar diferentes materiais para substituição de tubulações de aço carbono, revestido internamente com polietileno, utilizadas na condução de água salgada de um sistema de tratamento e injeção de água salgada existente em um FPSO.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar levantamento bibliográfico sobre materiais utilizados na indústria *offshore* para a condução de água salgada;
- Apresentar estudo de caso de sistema de tubulação para bombeamento de água salgada, utilizada em FPSO, constituída em aço carbono com revestimento interno de polietileno;
- Analisar critérios técnicos e econômicos para a seleção de materiais para as tubulações de água salgada em sistemas de bombeamento em FPSO;
- Definir critérios de priorização da escolha do material do estudo de caso objeto desse trabalho.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 MATERIAIS NA INDÚSTRIA DE PETRÓLEO

De acordo com Jesus (2012), existe uma vasta gama de materiais que podem ser usados para a construção de equipamentos de processo na indústria de petróleo, os quais podem ser divididos, basicamente, em três grandes grupos: metais ferrosos (aço-carbono, aço-liga, inox, etc.), metais não ferrosos (ligas de cobre, ligas de níquel, ligas de titânio, etc.) e materiais não metálicos (polímeros diversos e materiais compósitos). Nestas indústrias, algumas condições específicas fazem com que seja necessário um grau de confiabilidade mais apurado para os equipamentos, em comparação com o que normalmente é exigido para os equipamentos dos demais ramos industriais. Dentre estas condições citam-se:

- a) regime contínuo de operação, o que submete os equipamentos a condições severas de trabalho;
- b) equipamentos interligados entre si, com potencial risco de paralisação de toda a planta por conta da ocorrência de uma falha individual (de um único equipamento);
- c) operação em condições de grande risco, que envolvam fluidos inflamáveis, tóxicos, explosivos, corrosivos, ou elevadas pressões e/ou temperaturas de operação.

3.2 TUBULAÇÕES INDUSTRIAIS

O termo tubulação industrial se refere a um conjunto de tubos, conexões e outros acessórios. A importância das tubulações deve-se ao fato do ponto de geração ou de armazenagem dos fluidos estarem, em geral, distante do seu ponto de utilização, sendo estas o meio de ligação entre estes dois pontos (TELLES, 2012). Existe uma grande variedade de usos para tubulações industriais. Conforme a Tabela 1, podemos classificá-las da seguinte maneira:

Tabela 1 - Classificação das tubulações.

Classificação das tubulações	Tubulações dentro de instalações industriais	Tubulações de processo
		Tubulações de utilidades
		Tubulações de instrumentação
		Tubulações de drenagem
	Tubulações fora de instalações industriais	Tubulações de transporte
		Tubulações de distribuição

Fonte: Ribeiro (2009)

Chamam-se tubulações de processo às tubulações do fluido ou dos fluidos que constituem a finalidade básica da indústria, nas indústrias cuja atividade principal é o processamento, a armazenagem ou a distribuição de fluidos. Tais são, por exemplo, as tubulações de óleo em refinarias, terminais e instalações de armazenagem ou distribuição de produtos de petróleo, tubulações de vapor em centrais termelétricas, tubulações e produtos químicos em indústrias químicas, etc. (TELLES, 2012).

No caso de tubulações para condução de água salgada em uma plataforma de produção de petróleo faz-se necessário conhecer os diferentes agentes que conferem à água salgada sua característica corrosividade. Gentil (2001) afirma que a água do mar é um meio corrosivo complexo constituído de solução de sais, matéria orgânica viva, gases dissolvidos e matéria orgânica em decomposição. Logo, a ação corrosiva da água do mar não se restringe à ação isolada de uma solução salina, pois certamente ocorre uma ação conjunta dos diferentes constituintes. Dentre os fatores que afetam a taxa de corrosão, Gentil (2001) apresenta os grupos conforme abaixo:

- a) químicos: gases dissolvidos (oxigênio, gás carbônico), salinidade e pH;
- b) físicos: velocidade, temperatura e pressão;
- c) biológicos: *biofouling*, vida vegetal (geração de oxigênio e consumo de gás carbônico) e vida animal (consumo de oxigênio e geração de gás carbônico).

Jesus (2016, apud SBARAI, 2010), alerta que a corrosão é um assunto merecedor de particular e criteriosa consideração, já que apresenta custos bastante elevados

(cerca de 3 % a 4 % do PIB em cada país), custos estes associados com os reparos necessários e horas ociosas dos equipamentos. Henriques (2008) aponta, quase que por unanimidade, o uso de metalurgia especial (entenda-se seleção adequada do material) como meio de atenuação para a grande maioria dos processos corrosivos.

As aberturas e irregularidades existentes nas superfícies, interna ou externa, do material, que são oriundas de um detalhe de projeto, uma falha na execução da soldagem ou formação de depósito na superfície do material (ancoragem de sujeira, produtos contaminantes e incrustações diversas), favorecem a corrosão por fresta. De um modo geral, os meios que contêm cloretos e oxigênio são particularmente perigosos na corrosão por frestas. Possíveis formas de controle deste tipo de corrosão incluem o uso de metalurgia especial, pintura externa, cuidados em detalhes de projeto e revestimento interno (JESUS, 2016).

O *American Petroleum Institute* (API), através da publicação API RP 14E (2013), afirma que o melhor método para aliviar a perda interna de metal depende do tipo e da severidade da corrosão. Cada caso deve ser considerado individualmente. Dentre as soluções potenciais para minimizar a corrosão interna da tubulação de serviço de água, o API lista:

- a) remoção e / ou exclusão de oxigênio;
- b) tratamento químico (inibidores de corrosão, biocidas, anti-incrustantes e controle de pH;
- c) revestimentos e revestimentos protetores (plásticos e cimento);
- d) uso de tubulação não metálica;
- e) controle de sólidos (areia, lama, lodo).

A *Copper Development Association* (CDA, 1986), através da Tabela 2, apresenta os principais materiais competitivos e um resumo das propriedades relevantes para aplicação em sistemas de água salgada. Fazer uma avaliação econômica completa destes materiais, levando em conta todos os fatores enumerados abaixo, é uma questão de extrema complexidade, uma vez que cada material apresenta melhor desempenho para os diferentes fatores considerados.

Tabela 2 - Comparativo das propriedades de vários materiais para tubulações.

Material	Resistência à corrosão	Ataque por depósitos	Micro organismos marinhos	Resistência mecânica	Resistência ao fogo	Fabricação e disponibilidade dos materiais
Cobre Níquel 90/10	2	2	2	1	2	2
Aço carbono	1	1	0	2	2	2
Inox Duplex	2	1	0	2	2	1
Plásticos Reforçados	2	2	0	1	0	1
Titânio	2	2	0	2	2	1

Fonte: Adaptado de Copper Development Association (1986)

A CDA (1986) avaliou cada uma das propriedades, para cada um dos materiais citados, e atribuiu as seguintes pontuações: 0 = Não Resistente; 1 = Potenciais Problemas (vida útil limitada ou restrições de projeto); 2 = Satisfatório.

Considerando a propriedade de resistência à corrosão como mandatória, o material aço carbono será estudado apenas na condição de revestido internamente, pois o aço corrói comparativamente rapidamente na água do mar, a taxas previsíveis (tendendo a aumentar à medida que as taxas de fluxo e o conteúdo de oxigênio aumentam e à medida que a temperatura aumenta). Um sistema de aço, embora comparativamente barato, será relativamente grande e pesado e terá uma vida curta. Falhas podem ocorrer dentro de um ano ou dois e a substituição completa pode ser necessária dentro de cinco anos. Um revestimento protetor amplamente utilizado no aço carbono é a galvanização. A taxa de corrosão do zinco na água do mar é um pouco menor que a do aço, mas os revestimentos galvanizados têm uma vida útil limitada e em quase todas as aplicações, um sistema de tubulação de aço galvanizado precisaria ser substituído uma ou mais vezes durante a vida útil da instalação (CDA, 1986).

O material titânio também não será considerado alternativo para o estudo realizado. A CDA (1986) destaca que este material tem excelente resistência a todos os tipos de corrosão na água do mar e pode ser considerado adequado para quase todas as condições de serviço. No entanto, houveram algumas falhas por corrosão sob fresta em salmoura quente em uma planta de dessalinização. Assim, as considerações que limitam o uso de titânio incluem:

- a) custos de material e fabricação extremamente elevados;
- b) limitações de suprimentos, principalmente de componentes;
- c) favorecimento da corrosão galvânica de componentes adjacentes, a menos que precauções efetivas sejam tomadas;
- d) incrustação marinha em água do mar bruta;
- e) a possibilidade de fragilização por hidrogênio.

Portanto, é provável que o uso de titânio seja limitado a situações especiais em que a necessidade de sua alta resistência à corrosão supera outros fatores.

3.2.1 Tubulações de aço carbono

Devido ao seu baixo custo, excelentes qualidades mecânicas e facilidade de solda e de conformação o aço-carbono é denominado material de uso geral em tubulações industriais, isto é, só se deixa de empregar o aço-carbono quando houver alguma circunstância especial que se apresente inadequada. Desta forma, todos os outros materiais são usados apenas em alguns casos específicos. Em indústrias de processamento, mais de 80% dos tubos são de aço-carbono, que é usado para água doce, vapor de baixa pressão, condensado, ar comprimido, óleos, gases e muitos outros fluídos pouco corrosivos, em temperaturas desde -45°C , e a qualquer pressão (TELLES, 2012).

Conforme a CDA (1986), o aço carbono corrói rapidamente em água salgada em comparação aos materiais usualmente utilizados para serviços corrosivos. Um sistema de aço, embora comparativamente barato, será relativamente grande e pesado e terá uma vida curta. Falhas podem ocorrer dentro de um ou dois anos e a completa substituição pode ser necessária dentro de cinco anos. Além de falhas na

integridade da tubulação, os produtos gerados pela corrosão do aço carbono podem interromper sistemas de filtragem dependendo da granulometria requerida.

Dentre os parâmetros de processo que influenciam no desempenho do aço, está a temperatura. Dependendo da temperatura em que se encontra, a tubulação pode apresentar deformações, oxidação entre outras características. A Tabela 3 exemplifica os limites de temperatura e o comportamento do aço para cada condição de processo em tubulações de aços-carbono.

Tabela 3 - Limites de temperatura e comportamento em tubulações de aços-carbono.

Temperatura	Comportamento
-45°C	O aço torna-se quebradiço
370°C	Começa deformação por fluência
450°C	Temperatura máxima para serviços severos
480°C	Temperatura máxima para serviços não severos
520°C	Pico máximo eventual de temperatura

Fonte: Ribeiro (2009)

Quanto maior a quantidade de carbono no aço maior será a sua dureza e maiores serão os limites de resistência e de escoamento. Em compensação, o aumento do carbono prejudica a ductilidade e a soldabilidade do aço. Por esse motivo, em aços para tubos o percentual de carbono limita-se até 0,35%, sendo que até 0,30% de C a solda é bastante fácil, e até 0,25% de C os tubos podem ser facilmente conformados a frio (RIBEIRO, 2009).

Os aços de baixo carbono (até 0,25%C) têm limite de ruptura da ordem de 31 a 37 kg/mm², e limite de escoamento de 15 a 22 kg/mm². Para os aços de médio carbono (até 0,35%C) esses valores são respectivamente 37 a 54 kg/mm², e 22 a 28 kg/mm² (TELLES, 2012).

3.2.2 Revestimento Interno

Segundo Telles (2012), o revestimento interno em tubulações tem como objetivo aliar as vantagens de boa resistência mecânica, boa soldabilidade e baixo custo do

aço carbono com as propriedades de resistência à corrosão, à altas temperaturas ou à abrasão do material usado no revestimento.

De acordo com Ribeiro (2009), os revestimentos aplicados no interior de tubulações têm diversas finalidades, como por exemplo, revestimentos antiabrasivos e antierosivos, revestimentos para isolamento térmico interno e revestimentos anticorrosivos, como no caso de transporte de água do mar e também foco deste trabalho.

Quando não é possível usar tubulações de polímeros maciços devido ao diâmetro, à pressão ou às condições de segurança exigidas para uma tubulação, são empregados revestimentos internos em tubulações de aço. O revestimento com esse tipo de material é um exemplo de revestimento interno e pode ser utilizado em tubos com diâmetro de 100 mm, ou maiores, sendo possível, em alguns casos, a sua aplicação para diâmetros desde 12 mm (TELLES, 2012).

É de extrema importância que o revestimento interno esteja em perfeitas condições e cubra por completo a área metálica exposta ao fluido corrosivo. Um mínimo defeito no revestimento pode gerar um ponto de corrosão localizada, que poderá causar a perfuração da parede metálica do tubo mais rapidamente do que a corrosão generalizada que haveria se o tubo não tivesse revestimento algum (PYLES, 2012).

A norma N-2843 (PETROBRAS, 2015), que trata de revestimento interno de tubos, define que previamente à aplicação do revestimento, deve-se fazer uma inspeção visual na tubulação a fim de garantir que não existam cantos vivos nem soldas sem acabamento superficial. O acabamento interno deve ser executado até que a região da junta soldada apresente uma superfície lisa. Em tubulações com revestimento interno em polímeros, após o acabamento interno a tubulação é aquecida a fim de garantir a fusão do polímero aplicado internamente na tubulação metálica.

A Figura 1 apresenta uma sequência, simplificada, das atividades realizadas para a aplicação de revestimento por meio de aspersão eletrostática. Este método é um dos mais utilizados para a aplicação do revestimento interno em tubulações industriais. A aspersão eletrostática se trata de um processo no qual a resina em pó

ou líquida é projetada e carregada eletrostaticamente antes de atingir a superfície da peça, para garantir a homogeneidade da película de revestimento, inclusive em geometrias complexas (METALCOATING, 2017).

Figura 1 - Aplicação de revestimento por meio de aspersão eletrostática.



Fonte: Metalcoating corporativo (2017)

Um dos materiais muito utilizados para aplicação de revestimento é o polietileno. Esse material é um termoplástico derivado do eteno, que apresenta uma excelente proteção contra corrosão. O polietileno apresenta uma resistência excelente à agentes químicos, sendo pouco sensível à água, inclusive a fervura, e à umidade, da qual absorve menos de 0,01 % e também apresenta uma alta resistência aos ácidos e bases (TORRES, 2007).

3.2.3 Tubulações de Plástico Reforçado com Fibra de Vidro (PRFV)

A utilização de plásticos vem crescendo e faz desse material um produto essencial à indústria moderna. Os primeiros plásticos que surgiram eram frágeis e quebradiços. Para suprir tais deficiências, uma das medidas tomadas foi o acréscimo de aditivos químicos e/ou fibras de vidro na composição de alguns materiais plásticos, tornando-os mais resistentes a choques, tração e flexão (ORTH, 2012).

A mistura de um reforço (fibra de vidro) a uma matriz polimérica (resina poliéster ou outro tipo de resina) e a uma substância catalisadora de polimerização forma o compósito denominado Plástico Reforçado com Fibra de Vidro (PRFV). O vidro é usado como um material de reforço na forma de fibra, pois, é um material facilmente disponível e pode ser fabricado economicamente em um plástico reforçado, tem facilidade em ser estirado na forma de fibras de alta resistência e quando associado a diferentes plásticos torna o compósito útil em inúmeros ambientes corrosivos. Na formação da matriz polimérica as resinas mais amplamente utilizadas e mais baratas são os poliésteres e os ésteres vinílicos, essas matrizes são as principais na formação dos compósitos reforçados com fibra de vidro. A grande quantidade de formulações dessas resinas proporciona uma ampla variedade de propriedades para esses polímeros (CALLISTER, 2008).

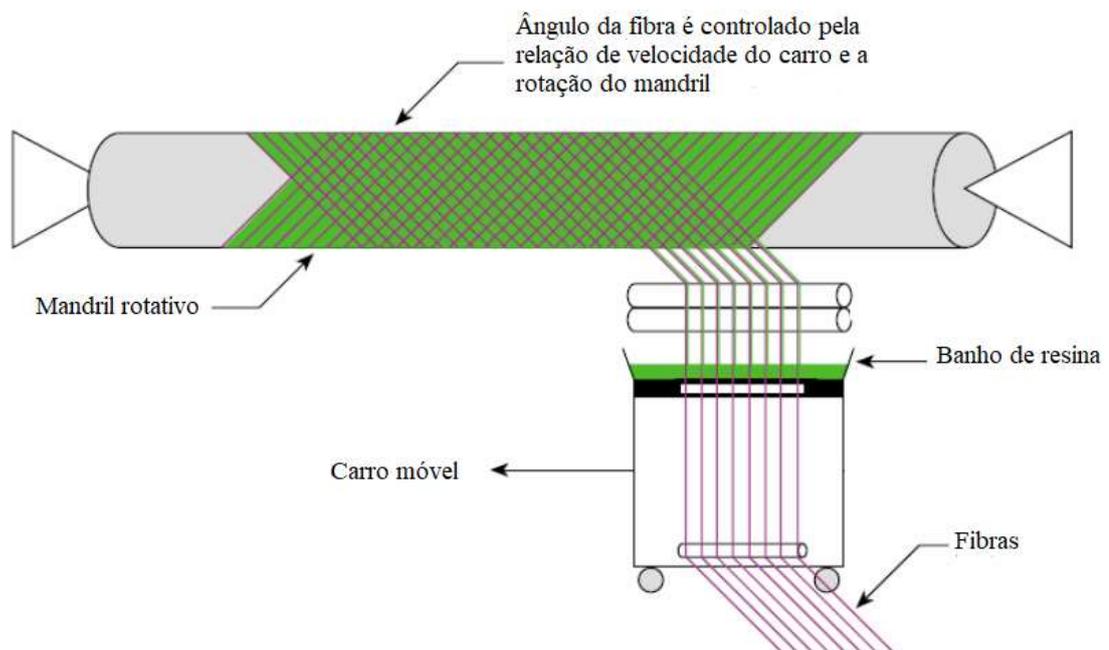
As tubulações em PRFV começaram a ser utilizadas no final dos anos cinquenta pelo mercado da indústria química. Logo após, na década de 1960, estes compósitos passaram a ser utilizados nos sistemas de água e esgoto. A partir de então as tubulações em PRFV conquistaram diversos mercados onde a resistência a corrosão é um dos principais requisitos de projeto (EDRA, 2005).

De acordo com a ABNT NBR 15921 (2011), as tubulações de PRFV podem ser usadas para diversos fins. Na indústria do petróleo estas tubulações são utilizadas para condução de petróleo, gás natural, querosene de aviação e diversos tipos de água, como por exemplo, água potável, produzida, e água do mar.

As tubulações em PRFV são formadas a partir de um processo chamado enrolamento filamentar ou *filament winding*. O enrolamento filamentar é um processo

bastante utilizado na fabricação de produtos sólidos de revolução como tubos, tanques e vasos de pressão. O processo consiste basicamente em uma máquina com um mandril (usado como molde) fixado em suas extremidades em um processo de rotação. Conforme o mandril vai rotacionando, fibras de vidro oriundas de carreteis são bobinadas. As fibras de vidro são impregnadas com resina antes de serem enroladas no mandril e o posicionamento e ângulo das fibras podem ser controlados, de acordo com os requisitos de projeto (MESQUITA, 2008). A Figura 2 exemplifica o processo de construção de uma tubulação em PRFV pelo método de enrolamento filamentar.

Figura 2 - Construção de uma tubulação em PRFV por enrolamento filamentar.



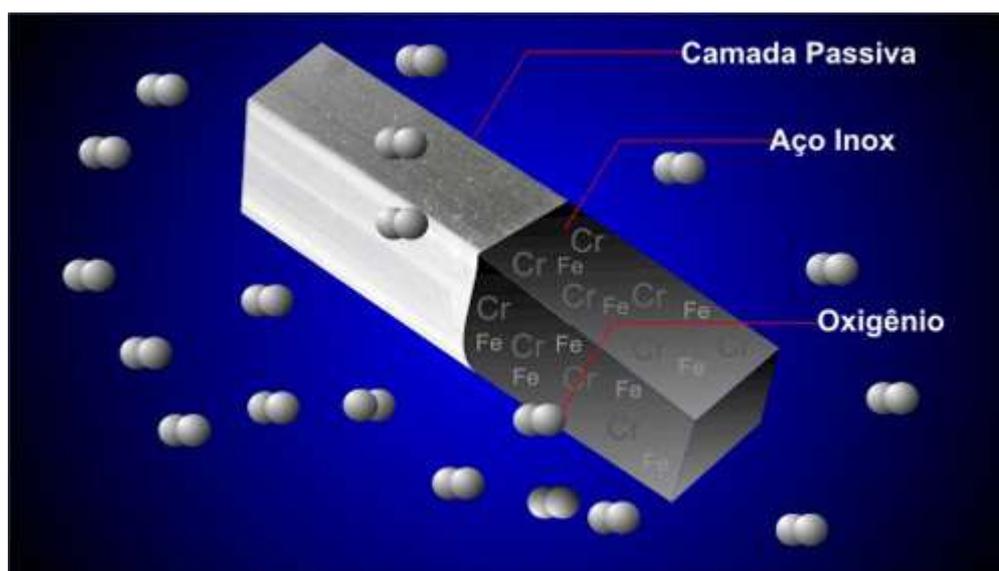
Fonte: Adaptado de Faria (2005)

De acordo com a *American Water Works Association* (AWWA, 1999), as tubulações em PRFV apresentam uma grande variedade de diâmetros que vão desde 25mm até 3600mm e podem trabalhar em pressões desde a atmosférica até milhares de Kpa.

3.2.4 Tubulações de aço inoxidável duplex

Os aços inoxidáveis são ligas metálicas compostas basicamente de ferro e cromo, com cerca de 12% da composição de cromo e são classificados de acordo com a microestrutura em: austeníticos, ferríticos, endurecíveis por precipitação, duplex e martensíticos (RESENDE, 2016). O cromo presente no aço inoxidável entra em contato com o oxigênio formando assim a camada passiva, uma camada muito fina que protege a superfície do material ao ambiente externo. Essa camada é composta basicamente de cromo e ferro, e tem uma grande importância para a prevenção da corrosão nos aços. A Figura 3 apresenta a camada passiva que caracteriza um aço como inoxidável (GALDINO, 2015).

Figura 3 - Representação de camada passiva.



Fonte: Galdino (2015)

Dentre os aços inoxidáveis está o aço denominado duplex, que possui composição mista Austenítica/Ferrítica, mantendo proporção aproximada de 50%, que é obtido pelo processamento termomecânico de uma liga com elementos estabilizadores das fases alfa (ferrita) ou gama (austenita) em equilíbrio. Para garantir esse equilíbrio dos elementos dos materiais devem ser respeitados vários parâmetros como tempo de resfriamento e porcentagens adequadas dos elementos de liga, por exemplo o nitrogênio (SENATORE, 2007).

De acordo com Arthuso (2013), a primeira geração dos aços inoxidáveis duplex foi desenvolvida há mais de 80 anos na Suécia, para uso na indústria de papel sulfite. Esse material foi criado em sua essência para combater os problemas de corrosão em sistemas com fluidos mais agressivos aos materiais comuns de tubos, como ocorre em plantas de indústrias do setor de química. Dentre os aços duplex existe uma classe denominada super duplex, que é um material com propriedades específicas relativamente superiores encontradas de forma proposital devido às alterações nos teores de cada elemento de liga utilizado na sua composição.

Os aços inoxidáveis super duplex são amplamente utilizados nas atividades de exploração e produção de petróleo no setor *offshore*. O super duplex é utilizado em componentes como cabos umbilicais, trocadores de calor, linhas de água salgada e em diversos equipamentos que requeiram uma elevada resistência à corrosão com altos valores de resistência mecânica. Estas características são devidas à sua fina microestrutura bifásica, composta por proporções de austenita e ferrita, e aos elementos de liga Cr, Ni, Mo, N, Cu e W (SOUZA *et al.*, 2014). A Tabela 4 apresenta a composição química de alguns dos aços inoxidáveis duplex e super duplex.

Tabela 4 - Composição de aços inoxidáveis duplex e super duplex.

UNS	NOME	TIPO	%C	%Ni	%Cr	%Mo	%N	%Cu	%W
S3230 4	SAF 2304	Duplex	0,030	4	23	0,2	0,1	-	-
S3220 5	SAF 2205		0,030	5	22	2,8	0,15	-	-
S3255 0	-		0,040	7	25	3,5	0,25	1,5	-
S3275 0	SAF 2705	Super duplex	0,030	7	25	3,8	0,28	-	-
S3276 0	Zeron 100		0,030	7	25	3,5	0,24	0,7	0,7

Fonte: Adaptado de Guedes (2016)

Os ganhos de resistência nas propriedades do material duplex trazem dentre outros benefícios, a vantagem de fabricar um tubo com espessura menor em relação a aços inoxidáveis comuns, mantendo ótima resistência a corrosão, diminuindo o peso

bruto de determinado sistema, otimizando assim os processos de fabricação e montagem das linhas (YAANG, 2016).

3.2.5 Tubulações de cobre-níquel

Dentre os metais não-ferrosos, o cobre é um que apresenta vasta aplicação na sociedade. O cobre tem papel fundamental nas indústrias da energia, construção, do transporte, na eletrônica, na agricultura, na saúde. Tem ainda atuação importante na produção de ligas, na exploração mineral, na fabricação de equipamentos químicos e farmacêuticos. Na área industrial o cobre é usado na fabricação de aparelhos de ar condicionado, rede hidráulica e de gás, através de tubulações e conexões (BRANDÃO, 2010).

As tubulações de cobre são fabricadas em grande variedade, incluindo cobre comercialmente puro, latões (ligas cobre e zinco) e cobre-níquel (ligas cobre e níquel). As tubulações de cobre e suas ligas apresentam excelente resistência ao ataque de água salgada, atmosfera, ácidos diluídos e outros fluidos corrosivos. Entretanto, o emprego desses materiais tem diminuído devido ao seu custo elevado (TELLES, 2012). A Tabela 5 apresenta algumas ligas de cobre, sua classificação e composição química.

Tabela 5 - Ligas de cobre.

Liga	Classificação UNS	Composição
Cobre comercialmente puro	C10100 – C15760	> 99% Cu
Ligas de alto teor de cobre	C16200 – C19600	> 96% Cu
Latões	C20500 – C28580	Cu-Zn
Bronzes	C50100 – C52400	Cu-Sn-P
Cobres ao fósforo e prata	C55180 – C55284	Cu-P-Ag
Outras ligas Cobre-zinco	C66400 – C69900	Cu-Zn
Cobres ao níquel	C70000 – C79900	Cu-Ni-Fe
Alpaca	C73200 – C79900	Cu-Ni-Zn

Fonte: Adaptado de Infomet (2016)

Nestas ligas de cobre os elementos de liga são adicionados com o intuito de melhorar a resistência, a ductilidade e a estabilidade térmica, sem causar prejuízos às condutividades elétrica e térmica e a resistência à corrosão característica do

cobre. As ligas de cobre apresentam excelente ductilidade a quente e a frio, ainda que um pouco inferiores às do metal puro (INFOMET, 2016).

Entre as ligas de cobre, as que apresentam a melhor resistência à corrosão, são chamadas cobre-níquel. A resistência à corrosão destas ligas é atribuída ao efeito da adição de níquel. Dentre as ligas comercialmente importantes e mais resistentes à corrosão aquosa, tem-se o cobre-níquel 70-30 (70%Cu-30%Ni em massa). No entanto, a liga cobre-níquel 90-10 (90%Cu-10%Ni em massa) é muito mais utilizada, pois oferece boa resistência mecânica aliada ao menor custo (LIBERTO, 2004).

A liga cobre-níquel 90-10 apresenta além de cobre e níquel, pequenos teores de ferro e manganês para melhorar a resistência à corrosão-erosão pela ação de águas, inclusive à água do mar. Na construção naval é usada em tubos condutores de água do mar até as mangueiras dos equipamentos de prevenção e combate à incêndio, circuitos de refrigeração a água e serviços sanitários nos navios (INFOMET, 2016).

Segundo Schleich (2005), uma das vantagens da liga cobre-níquel 90-10 é a sua resistência à incrustação biológica sem apresentar variações sensíveis de potencial de corrosão no trabalho com água do mar. Tal combinação de características leva a uma resistência melhorada à corrosão localizada e a eliminação de procedimentos extensivos de monitoramento associados a cloração e a temperaturas mais altas da água do mar que outros sistemas de liga diferentes podem exigir. A liga ainda apresenta alta resistência à corrosão sob fresta e é resistente à corrosão sob tensão em condições marinhas.

3.3 CRITÉRIOS PARA SELEÇÃO DOS MATERIAIS DE TUBULAÇÃO

A *Copper Development Association* e o *Deutsches Kupfer Institut* (CDA Publication, 1986), dizem que a escolha do material para os sistemas de tubulação de água do mar dependerá da situação ambiental específica e da natureza da aplicação. Ela será afetada pela disponibilidade, preço e até considerações políticas, bem como pela expectativa de vida e desempenho anterior em situações semelhantes.

A *American Society of Mechanical Engineers* (ASME), através da norma B31.3 (2014), destaca que materiais adequados devem ser especificados ou selecionados para uso em tubulações e instalações, de modo a garantir a segurança de todo o sistema de tubulações. Devem-se considerar as tolerâncias feitas para os efeitos de temperatura e pressão, as propriedades dos produtos de reação ou decomposição e também considerar os perigos da instabilidade dos fluidos contidos. Deve-se considerar o uso de revestimento, cladeamento ou outros materiais de proteção para reduzir os efeitos da corrosão, erosão e abrasão.

A seleção e especificação correta dos materiais adequados para um determinado serviço é um dos problemas mais difíceis no que diz respeito a tubulações industriais. Seguir simplesmente a tradição de uso de um material é a solução mais rápida e segura, embora nem sempre resulte no material melhor e mais econômico (TELLES, 2012).

4 METODOLOGIA

4.1 ESTUDO DE CASO

Um estudo de caso visa analisar uma situação real e explicar como e porque ela ocorre, identificando os fatores que contribuem para que o tema em questão se materialize. Em outras palavras, o estudo de caso se propõe a identificar um problema, analisar as evidências, desenvolver argumentos lógicos, avaliar e propor soluções (GIL, 2008).

Para realizar o estudo de caso é preciso saber escolher quais procedimentos devem ser adotados para se chegar ao objetivo da investigação. Essa é uma parte fundamental da elaboração do estudo de caso, pois esta abordagem não prescreve métodos rígidos de pesquisa que devem ser seguidos, sendo que o autor do estudo tem a liberdade de escolher a metodologia de coleta de dados mais adequada à sua pesquisa (YYN, 2001).

Situações com exemplos reais são uma ótima abordagem para se utilizar em trabalhos como o proposto, pois geram muitas informações e explicam de forma mais clara um determinado problema a ser solucionado.

4.2 APRESENTAÇÃO DO ESTUDO DE CASO

Em uma plataforma de petróleo, do tipo FPSO, que realiza extração de petróleo no litoral brasileiro, verificaram-se defeitos em tubulações de aço carbono revestido internamente por polietileno em pontos do sistema de captação, distribuição e injeção de água do mar. Os defeitos ocorreram devido ao deslocamento do revestimento interno, vindo a causar obstrução da passagem da água do mar no interior das tubulações, corrosão no aço carbono e interrupção no sistema de nanofiltração.

O sistema de captação, distribuição e injeção de água do mar tem seu início no bombeamento de água do mar através de bombas e filtros. Para evitar o acúmulo de incrustações de vida marinha no sistema e o crescimento de microorganismos, é realizada a injeção de hipoclorito de sódio no ponto de captação, sendo utilizada uma unidade de eletrocloração para produção desta substância.

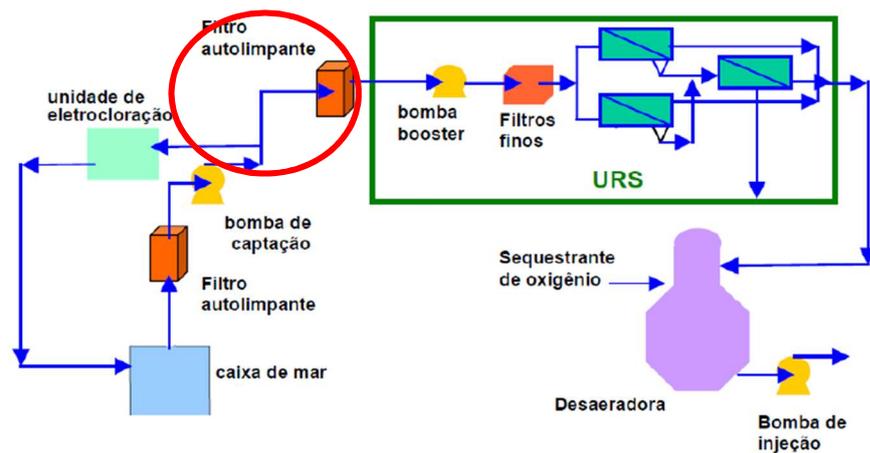
Após ser bombeada, a água do mar passa por um pré-tratamento através de filtros autolimpantes. Após filtrada é então transportada para sistemas de refrigeração ou é bombeada para a unidade de remoção de sulfatos (URS), realizada por meio de um sistema de membranas de nanofiltração.

A URS tem como objetivo reduzir a concentração de sulfato na água a ser injetada nos poços para mitigar a geração de H_2S (gás sulfídrico) que é produzido por bactérias redutoras do sulfato presente no meio. Outro agente a ser removido é o oxigênio, e para tanto, a água passa por uma torre desaeradora, com o objetivo de diminuir sua corrosividade, protegendo assim as tubulações do sistema de injeção.

Na Figura 4 pode ser verificado um modelo esquemático do sistema de captação, distribuição e injeção de água do mar descrito anteriormente. Nesta mesma figura,

destacado por um círculo vermelho, é apresentado o trecho de tubulação objeto deste estudo de substituição.

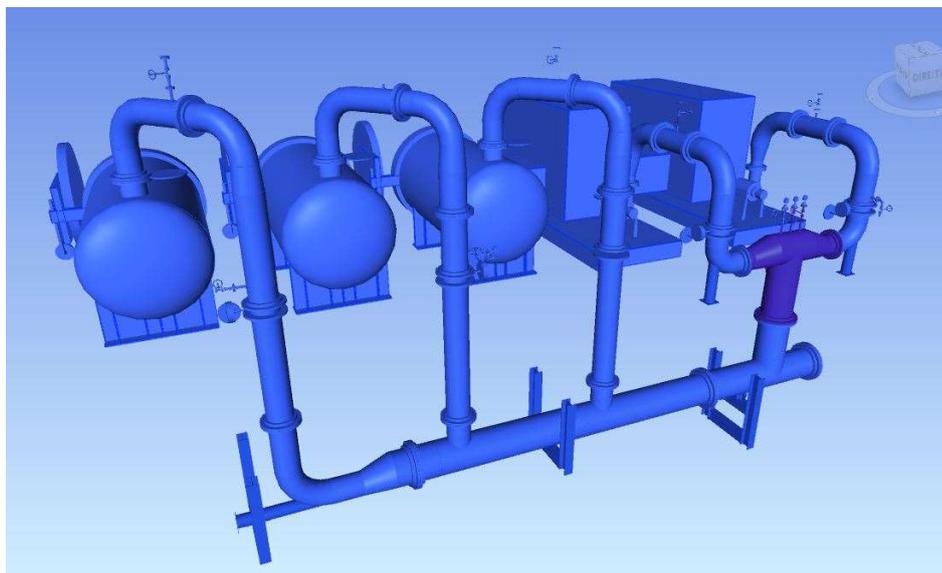
Figura 4 - Sistema de captação, distribuição e injeção de água do mar e em destaque trecho de tubulação objeto de estudo.



Fonte: Guedes (2016)

A Figura 5 exemplifica em um modelo 3D as tubulações e os equipamentos destacados na Figura 4. Estas tubulações interligam as saídas de três filtros às linhas de alimentação de duas moto-bombas.

Figura 5 - Sistema de bombeamento de água salgada.



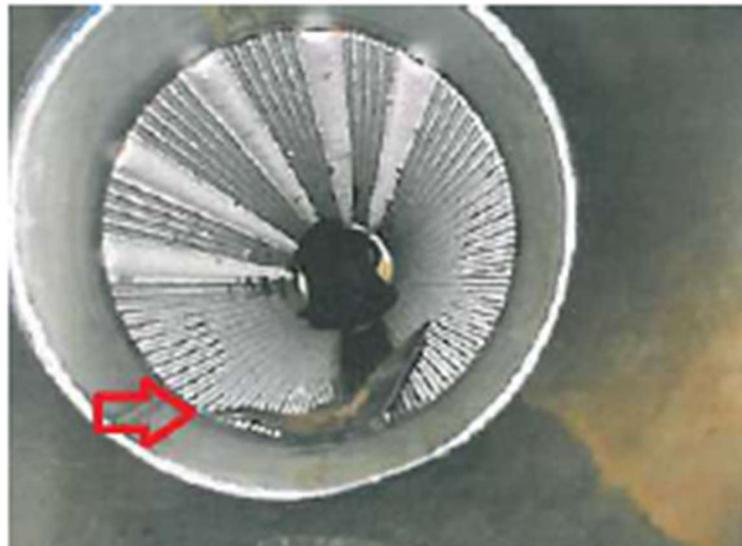
Fonte: Autores (2018)

As tubulações deste sistema têm a água do mar como fluido de processo. São constituídas de aço carbono - API 5L Gr B PSL 1, com diâmetros principais de 14", 16" e 24" e o seu revestimento interno é de polietileno.

4.2.1 Problemas Encontrados

Durante a operação do FPSO foram verificados descolamentos do revestimento, na forma de placas. Com a continuidade do processo de injeção de água os fragmentos do revestimento foram carreados, depositando-se nos pontos de restrição do fluxo de água ao longo do sistema, como em filtros, válvulas e equipamentos, causando perda de carga e entupimento na tubulação. A Figura 6 apresenta a movimentação de polietileno no interior de trocadores de calor e a Figura 7 mostra o entupimento de tubulações causado pelo descolamento do polietileno.

Figura 6 - Polietileno no interior de um trocador de calor.



Fonte: Autores (2018)

Figura 7 - Entupimento por polietileno.



Fonte: Autores (2018)

4.3 MÉTODOS

A partir da revisão bibliográfica realizada, foi constatado que os materiais super duplex, PRFV e cobre-níquel (liga 90-10), são os que melhor atenderam as condições de processo, devido a sua notável resistência a corrosão associada à sua já conhecida e ampla aplicação na indústria. Assim, estes materiais serão analisados a fim de permitir a definição do melhor material para substituir as tubulações de aço carbono revestidas internamente, que apresentaram falhas no revestimento.

Foi realizada uma apresentação de cada um dos fatores avaliados para a definição do material usado na fabricação da tubulação e a comparação entre estes materiais, visando apresentar aspectos positivos e negativos, considerando questões técnicas e econômicas, possibilitando a definição do material que melhor atende aos requisitos do sistema de água salgada, aliando a melhor relação entre custo para aquisição e montagem.

4.3.1 Critérios Técnicos

Serão levantados os aspectos técnicos por meio de dados reais do caso objeto de estudo. As informações de processo são importantes, pois servirão de base para comparação com aquelas obtidas pelo levantamento bibliográfico para verificação do material mais adequado a compor parte do sistema de injeção da FPSO em estudo. Os parâmetros analisados são os que seguem:

- a) composição do fluido - serão considerados os seguintes aspectos relativos ao fluido conduzido: natureza e concentração, impurezas e contaminantes presentes, existência ou não de gases dissolvidos e sólidos em suspensão, caráter corrosivo sobre os materiais, temperatura e pH;
- b) condições de operação do sistema (pressão e temperatura) – pressão e temperatura de serviço serão obtidos através dos valores do caso. Com base em normas de materiais para tubulações, serão selecionados materiais capazes de resistir à pressão e temperatura previstas para o processo;
- c) experiência prévia – será analisada a experiência prévia dos materiais, através de pesquisas bibliográficas, em serviços iguais ou semelhantes ao do caso estudado;
- d) disponibilidade dos materiais – será verificada a disponibilidade, isto é, se os materiais são encontrados no comércio sob todas as formas, diâmetros e espessuras, bem como maior ou menor disponibilidade de estoque, quantidade mínima para compra e necessidades de importação;
- e) facilidades de fabricação e montagem – serão determinadas as características dos materiais quanto às possibilidades de fabricação e de montagem. Entre as características avaliadas incluem-se: cuidados no transporte e manuseio, na preparação, na execução da soldagem, controle de qualidade e tipos de uniões.

4.3.2 Critério Econômico

Custo do material – O custo de aquisição material é um fator decisivo na escolha do material de um projeto de engenharia, visto que o material deve atender as demandas solicitadas no projeto com o melhor custo-benefício.

A fim de comparar os custos de material será montado um comparativo dos custos dos materiais com base em todos os itens de tubulação (tubos, flanges, curvas) utilizados no caso apresentado. O levantamento de preços será feito através de orçamentos junto a fornecedores de tubulações. Todos os materiais serão comparados, inclusive os que apresentarem alguma limitação no que diz respeito aos aspectos técnicos.

Outra parcela do custo é oriunda do valor da mão-de-obra necessária para os serviços de fabricação e montagem. Esta parcela não será considerada, pois segundo Fernandes (2011), a produtividade para estes serviços é muito variável. Depende de fatores como estratégia de montagem, acesso ao local da montagem, condições climáticas, qualificação da mão-de-obra, dentre outros.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 PARÂMETROS AVALIADOS

Com base nos parâmetros técnicos e econômico analisados, os materiais serão comparados em cada aspecto, a fim de determinar qual o mais adequado para substituir as tubulações do caso apresentado.

5.1.1 Fluido de processo

O fluido conduzido pelas tubulações objeto do estudo realizado neste trabalho é a água salgada. Segundo Chiaverini (2015), a água salgada consiste numa solução relativamente uniforme principalmente de cloretos de sódio e magnésio em água. Esses são os principais agentes corrosivos desse meio, embora muitos outros minerais se encontrem dissolvidos na água.

O fluido do caso estudado é água do mar, esta apresenta temperatura de 26 °C, pH entre 7,2 e 8,6, teor de cloro residual entre 0,5 mg/L a 1,0 mg/L e oxigênio dissolvido com 8 mg/L. Na Tabela 6 são apresentados os principais íons presentes na água do mar.

Tabela 6 - Composição da água do mar.

Íon	Símbolo	Concentração (g/kg)
Cloreto	Cl ⁻	19,35
Sódio	Na ⁺	10,76
Sulfato	SO ₄ ²⁻	2,71
Magnésio	Mg ²⁺	1,29
Cálcio	Ca ²⁺	0,41
Potássio	K ⁺	0,38
Bicarbonato	HCO ₃ ⁻	0,14
Brometo	Br ⁻	0,067
Estrôncio	Sr ²⁺	0,008
Fluoreto	F ⁻	0,0013

Fonte: Adaptado de Santiago (2012)

A partir do levantamento bibliográfico realizado, foi concluído que, de uma forma geral, os três materiais apresentam satisfatória resistência à corrosão causada pelo fluido de trabalho, neste caso a água do mar.

5.1.2 Condições de operação do sistema (pressão e temperatura)

De acordo com a pressão de 3 bar e a temperatura de 26 °C, parâmetros de operação obtidos por consulta a documentação de projeto do sistema do caso analisado, foram pesquisadas em normas técnicas de tubulações se os materiais propostos resistem a estas condições de serviço. Na Tabela 7 são apresentados os materiais, as normas aplicáveis e a disposição dos materiais segundo critérios de pressão e temperatura.

Tabela 7 - Disposição dos materiais segundo critérios de classe e pressão.

MATERIAL	NORMAS	PRESSÃO DE OPERAÇÃO	FAIXA DE TEMPERATURA
PRFV	ASTM F1173-01(2018) e N-076 (2016)	10 bar	0 a 60 °C
Super Duplex (UNS S32760)	ASTM A928 (2014) e ASME B36.19M (2004)	20 bar	0 a 140 °C
Cobre-níquel (UNS C70620)	EEMUA 234 (2015)	16 bar	0 a 75 °C

Fonte: Autores, 2018

Com base nestas especificações os três materiais suportam a temperatura e pressão do caso apresentado.

5.1.3 Experiência prévia

A decisão por um material obriga que sempre se investigue e se analise a experiência prévia que possa existir com esse material em condições similares. É arriscado decidir por um material que não se conheça nenhuma experiência anterior em serviço semelhante.

Partindo da importância de se ter uma análise da experiência prévia, foram pesquisados artigos, catálogos e demais publicações na área de tubulações, a experiência dos materiais propostos no trabalho para sistemas de água do mar em plataformas de petróleo em condições de processo similares às do caso estudado.

- Super duplex - Conforme Guedes (2016), tubulações de super duplex já apresentaram defeitos em uso com água do mar. Ocorreram casos de defeito em tubulações de captação de água do mar, onde se tinha uma temperatura superior a 20°C e presença de cloro residual acima de 0,7 mg/L. Além disso, ocorreu o início de corrosão na região da solda devido à dificuldade de se manter as

propriedades mecânicas e de resistência à corrosão originais do metal de base após a soldagem.

- PRFV – Conforme Farias (2012), tubulações em PRFV podem ser empregadas nas plataformas de petróleo em sistemas de captação de água do mar, sistemas de água produzida e drenagem. O PRFV apresentou resistência a meios aquosos corrosivos e reduziu o peso do sistema.
- Cobre-níquel – Devido a sua resistência à corrosão a liga cobre-níquel é muito utilizada em linhas de água do mar. As ligas de cobre são estáveis em vários ambientes potencialmente corrosivos. Sua resistência inerente à bioincrustação aumenta sua utilidade como componente de sistemas de água do mar (Procobre, 2018).

Em condições de serviço semelhantes ao do caso estudado, o super duplex já apresentou defeitos. Assim, no que diz respeito a experiência prévia, é mais aconselhável o uso de tubulações onde não se tenha um histórico negativo no emprego deste material, os melhores materiais para serem empregados neste caso são o PRFV e o cobre-níquel.

5.1.4 Disponibilidade dos materiais

Praticamente todos os materiais para tubulação têm limitações de disponibilidade, ou seja, não se encontram no comércio sob todas as formas e em todos os diâmetros. Além disso, os materiais apresentam uma maior ou menor facilidade de obtenção, podem ter a necessidade de importação e extensos prazos de entrega (90 até 180 dias). Todos esses pontos devem ser considerados na seleção de um material.

Tanto os materiais metálicos especiais, aço super duplex e a liga cobre-níquel, quanto os diversos componentes necessários para a fabricação dos tubos e conexões de PRFV não são produzidos no Brasil. Para o sistema de tubulações

avaliado, os diâmetros de 14 à 24 polegadas não são usuais, o que torna improvável sua pronta entrega. Devido aos altos custos, são fabricados sob encomenda.

Assim, conforme consulta a três diferentes fornecedores e importadores especializados, sediados nas cidades de São Paulo e Rio de Janeiro, a opção pelo uso destes materiais deve considerar o prazo de aproximadamente 150 dias, somados os tempos de manufatura, transporte e desembaraço alfandegário, para a disponibilidade destes materiais nos locais de fabricação e montagem da tubulação.

5.1.5 Facilidades de fabricação e montagem

Todos os materiais têm determinadas limitações quanto às possibilidades de fabricação e de montagem, que devem ser consideradas para sua seleção. Entre essas limitações incluem-se a soldabilidade, usinabilidade, facilidade de conformação, por exemplo. Soldabilidade aqui indica a maior ou menor facilidade de soldagem, a necessidade ou não de tratamentos térmicos ou quaisquer outros cuidados especiais.

Com o objetivo de prevenir problemas nas tubulações, originados nas fases de fabricação e montagem, alguns requisitos e recomendações específicos foram definidos e incluídos em especificações técnicas e memoriais que compõe a documentação contratual para atendimento desde a fase de projeto até a montagem e comissionamento de um FPSO.

Alguns requisitos e recomendações que devem ser atendidos durante a implementação dos projetos, serão apresentados a seguir, considerando a fabricação e montagem das tubulações.

Requisitos e recomendações das tubulações de PRFV com base na norma ABNT NBR 15921 (2011):

- a) para as uniões de campo que requerem desbaste das extremidades, são necessárias ferramentas específicas para sua correta preparação, sendo fundamental o devido controle dimensional;

- b) para o adequado desbaste são necessárias várias interrupções para ajuste da ferramenta de corte;
- c) é necessário que a equipe de montagem siga estritamente o procedimento aprovado pelo fabricante;
- d) na medida do possível, os ajustes dimensionais necessários para as uniões de campo devem ser minimizados, pois acarretam movimentações nos *spools* já instalados, podendo acarretar danos e tensões elásticas residuais;
- e) deve-se ter extremo cuidado ao manusear as tubulações, pois danos mecânicos podem causar defeitos na resina externa, podendo assim comprometer a integridade da tubulação.

Requisitos e recomendações das tubulações de super duplex com base na norma N-133 (2017):

- a) as áreas de armazenamento dos materiais e fabricação de *spools* de super duplex devem ser separadas das áreas que trabalham com os aços inox ferríticos, austeníticos ou martensíticos;
- b) o aporte de calor não deve exceder de 1,5 KJ/mm. Não é permitido o pré-aquecimento nem o pós-aquecimento e a temperatura de interpasse não deve passar de 150 °C;
- c) os dispositivos de montagem devem ser do mesmo material e mesmo *P number* do metal de base;
- d) os gases ou misturas de gases usados para limpeza e purga devem ser inertes e de alta pureza, livres de oxigênio e CO₂;
- e) a região da junta soldada deve ser purgada antes e durante a soldagem;
- f) após cada junta soldada, é necessário medir o percentual, em volume, de ferrita presente na junta.

Requisitos e recomendações das tubulações de cobre-níquel com base na norma N-133 (2017):

- a) os 200mm das extremidades a soldar devem ser limpos com solventes e não podem conter contaminantes como enxofre, chumbo, estanho, zinco, ou seus compostos;
- b) deve ser realizada inspeção visual em 100% das soldas de raiz;
- c) são permitidos no máximo dois reparos na região da junta soldada;

- d) as ferramentas para remoção de escória e limpeza devem ser de liga de cobre, aço inoxidável ou revestidas com aço inoxidável, e utilizadas apenas para soldagem do cobre e suas ligas;
- e) a superfície das peças deve ser protegida contra a contaminação por respingos e demais projeções resultantes da soldagem;
- f) a soldagem pelos processos TIG (*tungsten inert gas*) e MIG/MAG (*metal inert gas/metal active gas*) deve ser realizada com gás de purga para proteção da zona fundida e da zona termicamente afetada. A medição por meio de oxímetro deve indicar teor de oxigênio menor ou igual a 100 ppm antes do início da soldagem.

5.1.6 Custo do material

O custo é um fator muito importante e muitas vezes o decisivo na escolha de um material. Para cada aplicação prática em projetos de engenharia existem sempre vários materiais disponíveis. Geralmente, do ponto de vista empresarial, o melhor material será o que for mais econômico.

Contudo, em instalações *offshore*, a perda de produção pode rapidamente anular qualquer economia feita no primeiro custo da instalação, e a realização de reparos pode ser uma questão de considerável dificuldade e custo (Copper Development Association, 1986).

Com o objetivo de comparar os custos para a aquisição dos materiais necessários para a construção de tubulações para água salgada, foram listados os principais itens (tubo, curva, redução e flange) para substituição do trecho de interesse. A precificação dos materiais mostrados pela Tabela 8 foi realizada através de cotações de mercado, em três fornecedores diferentes. Os menores valores foram os apresentados na Tabela 8, e estes são exclusivamente para o fornecimento dos materiais, entregues na região Sudeste do Brasil.

Tabela 8 - Custo para aquisição dos itens de tubulação para os diferentes materiais.

MATERIAL	ITEM	QUANTIDADE	UNIDADE	CUSTO UNITÁRIO R\$	CUSTO POR ITEM R\$	CUSTO TOTAL R\$
PRFV	Tubo 14", ASTM F 1173-01	7	metro	4620	32340	563.428
	Tubo 16", ASTM F 1173-01	16	metro	6364	101824	
	Tubo 24", ASTM F 1173-01	9	metro	12600	113400	
	Curva 90° 16", ASTM F 1173-01	13	peça	7571	98423	
	Redução 24" X 16" ASTM F 1173-01	3	peça	10500	31500	
	TE 24', ASTM F 1173-01	4	peça	21700	86800	
	Flange com pescoço 10", ASTM D 4024-00	2	peça	3400	6800	
	Flange com pescoço 16", ASTM D 4024-00	13	peça	6583	85579	
Flange cego 24", ASTM D 4024-00	1	peça	6762	6762		
Super duplex	Tubo 14" sch10 ASTM A928	7	metro	9003	63024	1.697.079
	Tubo 16" sch10 ASTM A928	16	metro	10311	164982	
	Tubo 24" sch10 ASTM A928	9	metro	20623	185605	
	Curva 90° 16", ASTM A 182 Grau F 55	13	peça	33165	431145	
	Redução 24" X 16" ASTM A 790	3	peça	31155	93465	
	TE 24', ASTM A 182 Grau F 55	4	peça	88775	355100	
	Flange com pescoço 10", ASTM A 182 Grau F 55	2	peça	18300	36600	
	Flange com pescoço 16", ASTM A 182 Grau F 55	13	peça	26166	340158	
Flange cego 24", ASTM A 182 Grau F 55	1	peça	27000	27000		
Cobre-níquel	Tubo 14" Cu-Ni 90/10 (UNS C70620) EEMUA 144 seamless or welded (E=1)	7	metro	10311	72180	2.151.441
	Tubo 16" Cu-Ni 90/10 (UNS C70620) EEMUA 144 seamless or welded (E=1)	16	metro	16686	266976	
	Tubo 24" Cu-Ni 90/10 (UNS C70620) EEMUA 144 seamless or welded (E=1)	9	metro	35154	316386	
	Curva 90° 16", Cu-Ni 90/10 (UNS C70620)	13	peça	38313	498069	
	Redução 24" X 16" Cu-Ni 90/10 (UNS C70620)	3	peça	35991	107973	
	Te 24", Cu-Ni 90/10 (UNS C70620) EEMUA 144 seamless or welded (E=1)	4	peça	102555	410220	
	Flange com pescoço 10", Cu-Ni 90/10 (UNS C70620) EEMUA 144 seamless or welded (E=1)	2	peça	24700	49400	
	Flange com pescoço 16", Cu-Ni 90/10 (UNS C70620) EEMUA 144 seamless or welded (E=1)	13	peça	30849	401037	
	Flange cego 24", Cu-Ni 90/10 (UNS C70620) EEMUA 144 seamless or welded (E=1)	1	peça	29200	29200	

Fonte: Autores, 2018

A partir das informações mostradas pela Tabela 8, fica evidente a grande economia possibilitada pela opção de compra dos materiais em PRFV. O custo para aquisição do super duplex é 3 vezes maior que o PRFV e analisando a liga de cobre-níquel essa diferença é ainda maior, sendo 3.8 vezes maior que o do PRFV.

5.2 COMPARAÇÃO DOS MATERIAIS DE TUBULAÇÃO FRENTE AOS PARÂMETROS AVALIADOS

Diante das informações e propriedades dos materiais analisados até aqui, foi estabelecida uma priorização para os parâmetros considerados relevantes neste estudo de caso. Faz-se importante observar que esta priorização traduz uma tentativa de conciliação entre critérios de cunhos técnico e perceptivo, em um cenário de grandes projetos industriais. A sequência das prioridades é apresentada abaixo:

- 1º) Condições de operação do sistema (temperatura e pressão)
- 2º) Fluido de processo
- 3º) Experiência prévia
- 4º) Disponibilidade dos materiais
- 5º) Facilidades de fabricação e montagem
- 6º) Custo do material

Em alguns parâmetros os materiais propostos têm a mesma aplicabilidade. Nas condições de temperatura de 26 °C e de pressão de 3 bar, os três materiais se apresentaram adequados ao uso. No quesito disponibilidade dos materiais, os três apresentaram tempos de entregas longos (150 dias), pois os componentes necessários para construção da tubulação, ou partes deles, não são fabricados no Brasil e também os diâmetros utilizados (14", 16" e 24") não serem comumente comercializados. Já em facilidades de fabricação e montagem, foi constatado que os três materiais requerem cuidados específicos durante a execução dos serviços de fabricação e montagem.

No que diz respeito ao trabalho com água do mar, os materiais apresentaram resistência a esse tipo de fluido agressivo. Entretanto, devido temperatura superior a

20 °C e presença de cloro residual acima de 0,7 mg/L, o uso de tubulações de super duplex não é recomendado, pois já apresentou defeitos em condições similares.

No parâmetro custo de material, o PRFV se mostrou mais econômico em relação ao super duplex e a liga cobre-níquel.

A partir da análise e comparação dos parâmetros foi elaborada um painel de cores, apresentado pela Figura 8, visando ilustrar o desempenho de cada material em relação aos parâmetros avaliados. O material aço carbono, na condição de revestimento interno com defeito, também foi considerado pelo painel haja visto que este foi o material originalmente aplicado.

Figura 8 - Painel de cores - Desempenho do material X parâmetro.

Material \ Parâmetro	PRFV	Cobre-níquel	Super duplex	Aço carbono
Condições de operação	Verde	Verde	Verde	Verde
Fluido de processo	Verde	Verde	Verde	Vermelho
Experiência prévia	Verde	Verde	Amarelo	Vermelho
Disponibilidade dos materiais	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Verde
Facilidades de fabricação e montagem	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Verde
Custo	Amarelo	Vermelho	Vermelho	Verde

Fonte: Autores (2018)

Para a criação da Figura 8 os parâmetros foram ordenados conforme a proposta de priorização anteriormente apresentada e para o sistema de cores considerou-se:

- Verde: desempenho satisfatório;
- Amarelo: requer atenção;
- Vermelho: não recomendado.

Analisando o desempenho do aço carbono este material apresentou-se inviável para aplicação no sistema de água salgada do caso proposto. Apesar de apresentar, com base no levantamento bibliográfico, desempenho satisfatório nos parâmetros condições de operação, disponibilidade dos materiais, facilidades de construção e montagem e custo este material não é recomendado para serviços com o fluido de processo sendo água salgada e apresentou falhas em experiências prévias, como inclusive no caso estudado.

Os materiais super duplex e cobre-níquel revelaram parâmetros na cor amarela (requer atenção) e, junto com o aço carbono, também tiveram itens em vermelho (não recomendado). Sendo assim, estes três materiais apresentaram restrições ao serem utilizados no sistema de água salgada do caso proposto. O material PRFV, apesar de apresentar pontos que requerem atenção, não demonstrou em nenhum parâmetro a condição de não recomendado. Ao se comparar os quatro materiais o PRFV se mostrou mais vantajoso no sistema do caso estudado.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Baseados nos critérios analisados anteriormente, os materiais, PRFV, liga cobre-níquel e super duplex, selecionados para substituição do aço carbono revestido internamente apresentaram vantagens e desvantagens para sua implementação na substituição. Considerando as condições de processo, todos se mostraram aptos para cumprir de forma adequada. A análise do custo apresentou uma grande diferença a favor do PRFV em relação aos demais.

A tubulação de PRFV foi a que apresentou as vantagens mais relevantes em relação aos demais materiais analisados. As tubulações desse material podem trabalhar nas condições de temperatura e pressão do caso apresentado, resistem à corrosividade do fluido conduzido, demonstraram bons resultados em experiências prévias em condições semelhantes, de acordo com o levantamento bibliográfico apresentado, e apresentaram o menor custo dentre os três materiais propostos. Apesar de suas vantagens, deve ser levado em consideração que esse material requer uma condição de construção e montagem com mais controle, acarretando em tempos de montagem maiores que o cobre-níquel e o super duplex. Por outro lado, o PRFV também é o mais sensível a danos por impacto mecânico dentre os três materiais, sendo então necessário despender maiores cuidados durante o manuseio nas fases de construção e montagem.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão de trabalhos futuros indica-se a pesquisa sobre os materiais frente aos parâmetros não avaliados neste trabalho, como por exemplo, o tempo de vida útil. Este parâmetro permitirá verificar a compatibilidade de vida útil mínima do material com o tempo de vida útil previsto para a tubulação.

Outro assunto que pode ser abordado são técnicas de inspeção para o controle da qualidade dos serviços de montagem das tubulações de PRFV, pois no desenvolvimento do presente trabalho foi notada a grande atenção dada à soldagem, no caso dos metálicos, e para o material compósito percebemos certa carência de técnicas para as inspeções das uniões coladas.

Além disso, sugere-se ainda realizar ensaios laboratoriais para analisar a resistência mecânica dos materiais PRFV, super duplex e cobre-níquel, e a influência desta propriedade em projetos de tubulações.

8 REFERÊNCIAS

ALMEIDA *et al.* Custos e competitividade da atividade de E&P no Brasil. **Texto para discussão**. Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis. Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <<https://www.ibp.org.br/personalizado/uploads/2016/11/TD-custos-vers%C3%A3o-SITE.pdf>>. Acesso em: 1 jul. 2018.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API RP 14E**: Recommended Practice for Design and Installation of Offshore Production Platform Piping Systems. Texas, 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A106/A106M**: Standard Specification for Seamless Carbon Steel Pipe for High Temperature Service. Pensilvânia, 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A928**: Standard Specification for Ferritic/Austenitic (Duplex) Stainless Steel Pipe Electric Fusion Welded with Addition of Filler Metal, Pensilvânia, 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM F1173-01**: Standard Specification for Thermosetting Resin Fiberglass Pipe Systems to Be Used for Marine Applications. Pensilvânia, 2018.

AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION. **AWWA M45**: Fiberglass Pipe Design Manual. Denver, 1999.

ARTHUSO, Emiliana,. **Influência da taxa de deformação e da temperatura na ductilidade a quente do aço inoxidável duplex UNS S32304**. Tese (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) – Universidade Federal de Minas Gerais. Minas Gerais, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15921**: Indústrias de petróleo e gás natural — Tubulação de compósito. Rio de Janeiro, 2011.

BRANDÃO, Rosana. **Estudo de viabilidade da utilização de pvc, pex e ppr em empreendimentos multifamiliares**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

BUREAU VERITAS. **NR 445.C1 DT R04 E - Part C – Facilities Chapters 1 – 2 – 3 – 4 – 5**. Rules for the Classification of Offshore Units. 2016.

CALLISTER, William D. Jr.. **Ciência e Engenharia de Materiais**: uma Introdução. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e Ferros Fundidos**. 7. ed. São Paulo, 2015.

COPPER DEVELOPMENT ASSOCIATION. **Materials for Seawater Pipeline Systems**. CDA Publication, TN38. Hemel Hempstead, 1986.

DA SILVA, Priscila. **Reinjeção de água produzida: qualificação da água e inovações tecnológicas** - Universidade Federal Fluminense. Rio de Janeiro, 2015. EDRA. **Tubos de PRFV**, 2005. Disponível em: [http://www.sabesp.com.br/sabesp/filesmng.nsf/16E32B8C8E62557F832574F2005D1140/\\$File/amitech_edra_p1.pdf](http://www.sabesp.com.br/sabesp/filesmng.nsf/16E32B8C8E62557F832574F2005D1140/$File/amitech_edra_p1.pdf). Acesso em: 15 out. 2018.

ENGINEERING EQUIPMENT AND MATERIALS USERS ASSOCIATION. **EEMUA 234** - Specification for 90/10 copper nickel alloy piping for offshore applications. London, 2015.

FARIA, Hugo. **Failure analysis of grp pipes under compressive ring loads**. Universidade do Porto, 2005.

FARIAS, Otávio L. de. **Materiais não metálicos**, 2012. Disponível em: <http://www.tecnologiademateriais.com.br/mt/2012/cobertura_paineis/abnt/apresentacoes/Petrobras.pdf> Acesso em: 12 jun. 2018.

FERNANDES, Paulo S. Thiago. **Montagens Industriais**. 3. ed. São Paulo: Artliber, 2011.

GALDINO, Júlio. **Aços inoxidáveis utilizados na indústria petroquímica – microestrutura versus corrosão por pite**- Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas – MG, 2015.

GENTIL, Vicente. **Corrosão**. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2001.

GIL, A. C. **Método e técnicas de pesquisa social**. 6. ed. São Paulo: Atlas S.A, 2008.

GUEDES, Flávia Maciel F.; ANDRADE, Cyntia. Experiência de campo com aços duplex em água do mar e a importância do controle de qualidade destes materiais. INTERCORR2016, **Anais eletrônicos...** Abraco, 2016, Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.abraco.org.br/intercorr2016/arquivos/Cynthia%20Andrade%20e%20Fl%C3%A1via%20Guedes.pdf>>. Acesso em: 20 maio 2018.

HENRIQUES, C.C.D., 2008. Desafios na seleção de materiais na indústria do petróleo, **Palestra apresentada no IX Seminário Brasileiro do Aço Inoxidável**. Disponível em: http://www.abinox.org.br/lib/php/download.php?now=0&arq=downloads/apresent_petrobras_desafios_selecao_materiais_v2.pdf. Acesso em: 01 nov. 2018.

INFOMET. **Cobre e suas ligas**, 2016. Disponível em: <<https://www.infomet.com.br/site/metais-e-ligas-conteudo-ler.php?codAssunto=109>>. Acesso em: 15 out. 2018.

JESUS, Edilson Rosa Barbosa de. Materiais para fabricação de equipamentos de processo. **Revista Científica Eletrônica**. Sertãozinho, 2012. Disponível em: <http://revistailuminart.ti.srt.ifsp.edu.br/index.php/iluminart/article/view/137>. Acesso em: 02 nov. 2018.

LIBERTO, Rodrigo. **Corrosão e propriedades mecânicas de ligas cuproníquel 90-10 com adição de ferro e alumínio**. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

MESQUITA, Fausto. **Simulação do comportamento mecânico de tubos em prfv submetidos à pressão hidrostática**. Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

METALCOATING. **Revestimentos anticorrosivos**, 2017. Disponível em: <http://www.alvenius.ind.br/PDF/metalcoating_corporativo_2017_imp.pdf> Acesso em: 10 set. 2018.

ORTH, C. M.; BALDIN, N.; ZANOTELLI, C. T. Implicações do processo de fabricação do compósito plástico reforçado com fibra de vidro sobre o meio ambiente e a saúde do trabalhador: o caso da indústria automobilística. **Revista Produção Online**, Florianópolis, SC, v.12, n. 2, p. 537-556, 2012. Disponível em: <http://www.producaoonline.org.br/rpo/article/download/943/918>. Acesso em: 10 jun. 2018.

PETROBRAS. **N-2843** – Revestimento interno de tubos. Norma Técnica. Rio de Janeiro, 2015.

PETROBRAS. **N-133** – Soldagem. Norma Técnica. Rio de Janeiro, 2017.

PROCOBRE Brasil. **Publicações....** Disponível em: <<https://www.procobre.org/pt/wp-content/uploads/sites/4/2018/03/sma01-vantagem-do-cobre.pdf>> Acesso em: 30 out. 2018.

PYLES, Sérgio Rodrigues. **Revestimento interno de tubulação por um processo de centrifugação utilizando resina éster-vinílica com adição de cargas**. Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

RESENDE, Washington. **Estudo da resistência à corrosão por pites dos aços inoxidáveis austeníticos aisi 301 e aisi 304 submetidos ao processo de soldagem tig** - Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2016.

RIBEIRO, Antônio. **Curso de tubulações industriais**, 2009. Disponível em: <<http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM141/Conte%FAdos/aula01.pdf>> Acesso em: 30 out. 2018.

ROSA, A. J., CARVALHO, R. S., XAVIER, J. A. D. **Engenharia de Reservatórios de Petróleo**. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2006.

SANTIAGO, Alexandre. **Elementos da água do mar**, 2012. Disponível em: <<http://www2.unifap.br/alexandresantiago/files/2012/04/elementos-da-agua-do-mar.pdf>>. Acesso em: 16 set. 2018.

SCHLEICH, Wilhelm. **Application of copper-nickel alloy uns c70600 for seawater service**, 2005. Disponível em:

<https://www.copper.org/applications/marine/cuni/alloys/uns_c70600.html> Acesso em: 15 de ago. 2018.

SENATORE, Marcelo; FINZETTO, Leandro; PEREA, Eduardo **Estudo comparativo entre os aços inoxidáveis dúplex e os inoxidáveis AISI 304L/316L**. Ouro Preto, 2007.

SILVA *et al.* **Filosofia de seleção de materiais aplicável a unidades de separação óleo-gás**. CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 2012. Universidade do Estado do Amazonas, Manaus, 2012.

Disponível em:

<www.metallum.com.br/20cbecimat/resumos/trabalhos_completos/315-148.doc>

Acesso em: 16 set. 2018.

SOUZA, Guttemberg Chagas de; SILVA, Adriana Loureiro da, TAVARES, Sérgio Souto Maior; PARDAL, Juan Manuel; FERREIRA, Miguel Luiz Ribeiro; FILHO, Ismael Cardote. **Avaliação das propriedades mecânicas e da resistência à corrosão em soldas de reparo pelo processo gtaw no aço inoxidável superduplex uns s32760**. Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2014.

TELLES, Pedro C. Silva. **Tubulações Industriais: Materiais, Projeto, Montagem**. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME B31.3: Process Piping**. New York, 2014.

THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME B36.19M: Stainless Steel Pipe**. New York, 2015.

TORRES, Amelia. **Envelhecimento físico químico de tubulações de polietileno de alta densidade empregadas em redes de distribuição de derivados de petróleo**. PUC, Rio de Janeiro, 2007.

YAANG, Pipe Industry Co. **Advantages and disadvantages of duplex stainless steel pipe and other stainless steel pipe**. Disponível em:

<<https://www.yaang.com/advantages-and-disadvantages-of-duplex-stainless-steel-pipe-and-other-stainless-steel-pipe.html>> Acesso em: 10 de ago. 2018.

YIN, Robert K. **Estudo de Caso: planejamento e métodos**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.