



**Felipe De Oliveira Lima**

**Avaliação de alternativas de isolamentos térmicos para  
prevenção de corrosão sob isolamento aplicado à indústria  
Offshore.**

**Projeto de Graduação**

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia  
Mecânica da PUC-Rio

Orientador: José Roberto Moraes d'Almeida

Rio de Janeiro

Julho de 2018

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a meus pais, Mônica Lima e Eduardo Lima, pelo amor, incentivo e apoio incondicional em todos os momentos, que sempre me incentivaram a estudar e perseguir meus sonhos.

A Pontifícia Universidade Católica por proporcionar um ambiente amigável, acolhedor e de extremo incentivo ao estudo e preparo para vida profissional.

A Chevron Brasil, empresa a qual estagiei e pude entrar em contato com o ambiente profissional da engenharia pela primeira vez, proporcionando diversos aprendizados assim como a introdução ao tema que aprofundo neste trabalho.

Ao corpo docente do departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio e ao meu orientador, José Roberto Moraes d'almeida, pelo apoio e confiança para realizar este trabalho.

Aos meus colegas de curso que sempre me auxiliaram durante a jornada da graduação em Engenharia mecânica, com especial agradecimento ao meu grande amigo Gabriel Warwar Tavares Boullosa, que sempre esteve comigo nos momentos bons e ruins enfrentados ao longo dos anos.

## RESUMO

### **Avaliação de alternativas de isolamentos térmicos para prevenção de corrosão sob isolamento aplicado à indústria Offshore.**

A corrosão sob isolamento térmico é um problema que assola todas as empresas de exploração offshore. Essa situação envolve perdas significativas em qualidade de processo, aumento de tempo de trabalho de operadores e perda de materiais e equipamentos, resultando em gastos significativos para a indústria de Óleo e Gás. Apesar dos problemas recorrentes, a indústria de Óleo e Gás utiliza os mesmos isolantes térmicos há décadas, enquanto novas tecnologias, ainda pouco conhecidas, prometem atacar a questão e resolver o problema de corrosão sob isolamento térmico. A partir da pesquisa e análise técnica dos atuais e novos isolantes, pode-se estabelecer uma relação comparativa quantitativa e qualitativa para auxiliar a escolha de cada um, além de informar sobre os benefícios que o uso das novas tecnologias pode estabelecer. Além disso, esse documento faz orientações de como se pode evitar casos comuns de corrosão em equipamentos e prolongar a vida útil dos que possuem isolantes térmicos (novos e velhos) instalados. Os resultados obtidos apontam para conclusões simples e fáceis de como atacar o problema de corrosão sob isolamento e a forma como a escolha do isolante influencia no seu aparecimento. Não menos importante, a análise realizada mostra, a partir de gráficos e tabelas visualmente claras, os pontos positivos e negativos de cada isolante térmico que pode ser utilizado em operações offshore, porém sem descartar por completo o uso de qualquer um deles. Esse trabalho irá auxiliar estudantes, engenheiros e profissionais da área a compreender melhor todos os fatores relevantes ao desgaste de tubulações e equipamentos que requerem o uso de isolamento térmico, além de encaminhar através do pensamento crítico, como solucionar os eventuais problemas de corrosão, desgaste e alto custo de operação. Aliado a esse ponto, esse trabalho espera contribuir com a comunidade acadêmica de forma a estimular a continuidade da pesquisa acerca de isolantes térmicos industriais e suas aplicações para a área de exploração de Óleo e Gás.

Palavras chaves: Isolamento térmico. Corrosão sob isolamento. Corrosão. Offshore. Óleo e Gás.

## **ABSTRACT**

### **Thermal insulation alternatives evaluation for corrosion under insulation prevention applied to offshore industry.**

The corrosion under insulation is an issue that devastate all offshore exploration companies. This situation involves huge losts to process assurance, men hour increase and waste of equipments and materials, leading it to significant costs to Oil and Gas industry. Despite recurrent problems, the industry still uses same insulations for the past decades, while new and unknow tecnologies promisses to attack and mitigate CUI occurrence. Through research and thecnical analyses of current and new insulations, it is able to establish a quatitative and quality comparative relation between thesee insulations options to guide smartests choices, also report benefits of the new coming insulations. This document, in addition, guides how to avoid regular corrosion cases in equipments and extent lifetime of equipment with termal insulation installed. The results aim to simple conclusions regarding the attack of corrosion under insualtion issue and the way insulation choice affects the CUI appearence. Also importante, the study expose, through clear grafics and ilustrations the pros and cons of each insulation that can be applied to offshore operations. This paper will help students, engineers e professionals to understand better the relevant facts to pipes and equipments wear that requires the use of thermal insulation, also how to solve corrosion, material wear and high operation cost problems through analitical and logic thinking. Allied to that idea, this study hopes to contribute to academic community in the way to estimulate the research on industrial thermal insulation and its applications to the Oil and Gas exploration industry.

Key words: Thermal insulation. Corrosion under insualtion. Corrosion. Offshore. Oil and Gas.

## Sumário

1.	Introdução.....	6
2.	Revisão Bibliográfica .....	8
2.1.	Área de atuação .....	8
2.1.1.	Mercado Óleo e Gás.....	8
2.1.2.	Condições ambientais offshore no Brasil.....	10
2.2.	Embasamento teórico.....	13
2.2.1.	Objetivo do isolamento térmico .....	13
2.2.2.	Tipos de Isolamento térmicos.....	15
2.2.3.	Corrosão .....	16
2.2.3.1.	Corrosão Molhada.....	18
2.2.3.2.	Corrosão a seco.....	23
2.2.3.3.	Corrosão Biológica .....	24
2.2.4.	Corrosão sob isolamento .....	26
2.3.	Avaliação comparativa de isolantes térmicos.....	29
2.3.1.	Metodologia para escolha de isolantes térmicos .....	29
2.3.2.	Principais isolantes térmicos da indústria offshore .....	34
2.3.2.1.	Lã de Rocha .....	34
2.3.2.2.	Lã de vidro.....	35
2.3.3.	Isolantes térmicos inovadores para minimização de CUI .....	36
2.3.3.1.	Aerogel de Sílica .....	37
2.3.3.2.	Tintas térmicas.....	40
2.3.4.	Análise comparativa entre isolantes térmicos.....	42
3.	Considerações finais .....	47
4.	Referência Bibliográfica .....	49

## 1. Introdução

As condições ambientais da indústria offshore são as mais nocivas a equipamentos e estruturas a base de ferro e metais em geral. Um problema que assola especialmente tubulações, tanques e equipamentos nesse ambiente é a corrosão, que é agravada no caso dos itens estarem isolados termicamente. Essa questão está presente em todas as instalações de óleo e gás que operam afastados da costa, onde o ambiente de alta umidade e variações de temperatura são fatores comuns e determinantes para o aparecimento do CUI (sigla em inglês- *Corrosion under Insulation* – para corrosão sob isolamento).

O acúmulo de água/umidade embaixo do isolamento térmico leva a corrosão do equipamento metálico de forma imperceptível, por estar fora do campo de visão, uma vez que está entre o tubo e o isolamento. Tal problema gera custos elevados no reparo e troca desses itens além de poder comprometer a operação e segurança dos trabalhadores a bordo. Diante desse cenário novas tecnologias de isolantes térmicos vêm surgindo no mercado e prometem ser a solução para a corrosão sob isolamento.

O objetivo desse trabalho de conclusão de curso é avaliar as novas tecnologias de materiais isolantes que podem ser utilizados no lugar dos mais tradicionais, mitigando e/ou extinguindo o problema de corrosão sob isolamento. Tal estudo contará com avaliações técnicas das especificações de cada alternativa a fim de comprovar a viabilidade e funcionalidade dos materiais a serem apresentados, além de levantar as vantagens e desvantagens de cada um para que se torna mais fácil decidir quais apresentam melhor rendimento e eficiência e em que situações, que podem variar de acordo o objetivo do isolamento e das preferências de quem os utiliza.

Um caso pertinente ao tema é de um equipamento conhecido como vaso separador de três fases, que se encontra hoje em uma plataforma de exploração na bacia de Campos. Esse vaso tem como função decantar o fluido e separá-lo em óleo cru, água e gás, sendo fundamental no processo de filtragem. Ele é constituído por aço carbono e é revestido por uma manta térmica conhecida como lã de rocha. Apesar de cumprir a função de manter a temperatura interna constante, ela viabiliza o acúmulo de umidade entre o isolamento e a superfície metálica, o que ao longo do tempo gerou uma corrosão profunda na superfície do vaso (Figura 1). Tal corrosão não pode ser

detectada com inspeção prévia pois o isolamento impossibilita a visualização a olho nu ou com qualquer outro equipamento, tornando-se um problema de alto impacto para as equipes de inspeção e construção da operadora da plataforma em questão.



*Figura 1: ilustração de CUI com isolante térmico de lã de rocha em plataforma offshore [5]*

## **2. Revisão Bibliográfica**

### **2.1. Área de atuação**

Este tópico visa introduzir e apresentar a situação vigente da indústria de exploração de Óleo e Gás no Brasil e no mundo, além de situar as condições ambientais especiais que as estações de exploração *offshore* (Plataformas fixas, Barcos de exploração (FPSO) e sondas de perfuração) estão sujeitas em seu dia a dia, o que influencia as decisões acerca da escolha dos materiais, equipamentos e processos que as equipes buscam utilizar a fim de mitigar efeitos de corrosão.

#### **2.1.1. Mercado Óleo e Gás**

O caminho do petróleo, desde as pesquisas para sua descoberta até sua chegada ao consumidor em forma de combustível, ou produto derivado, passa pelas mãos de diversos profissionais e especialistas. As mais variadas áreas estão envolvidas no processo de exploração do petróleo. São geólogos, químicos, engenheiros, administradores, ecologistas, entre outros profissionais que trabalham de forma conjunta para garantir a extração de reservas de óleo e gás com o mais alto desempenho para as empresas petrolíferas.

O petróleo, no estado líquido, é uma substância oleosa, inflamável, menos densa que a água, com forte odor e cor escura. É constituído, basicamente, por uma mistura de compostos químicos orgânicos (hidrocarbonetos), sendo inviável separá-los por completo. Dessa forma, o petróleo é normalmente separado em frações de acordo com a faixa de ebulição dos compostos [3]. A Tabela 1 mostra essas frações típicas obtidas do petróleo e seus respectivos usos.

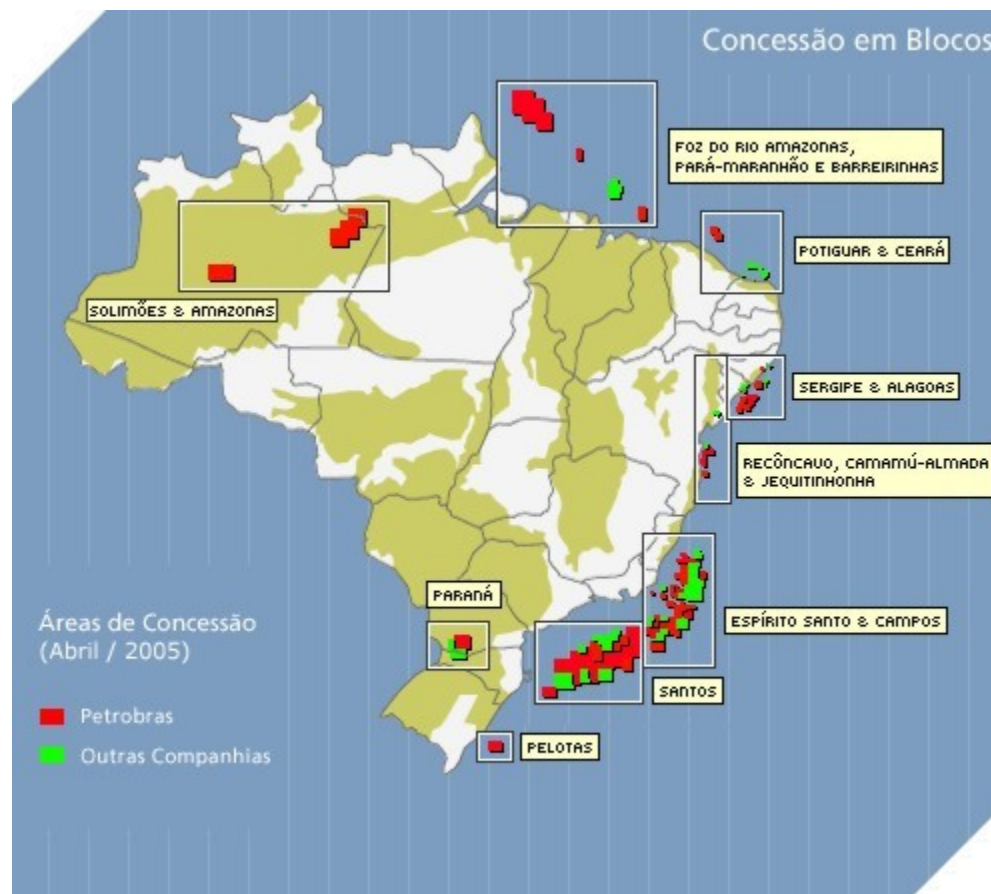


Fração	Temperatura de ebulição (°C)	Usos
Gás residual	-	gás combustível, gás combustível engarrafado, uso doméstico e industrial
Gás Liquefeito de petróleo (GLP)	Até 40	
Gasolina	40 - 175	combustível de automóveis, solvente
Querosene	175 - 235	iluminação, combustível de aviões a jato
Gasóleo Leve	235 - 305	Diesel, fornos
Gasóleo pesado	305 - 400	combustível, matéria-prima para lubrificantes
Lubrificantes	400 - 510	óleo lubrificantes
Resíduo	Acima de 510	asfalto, piche, impermeabilizantes

*Tabela 1: Frações típicas de petróleo e seus empregos [3].*

O Brasil produziu, em 2017, 2,78 milhões de barris ao dia (b/d), e as projeções sugerem um aumento de produção em 2018 para 2,89 milhões b/d. A demanda esperada para 2018 será de 1,4 milhões de barris/dia, representando um aumento de 8% em relação ao consumo de 2017, segundo dados da Agência Internacional de Energia (IEA, na sigla em inglês *International Energy Agency*).

O Brasil possui inúmeras reservas de petróleo marítimas ao longo do seu litoral, muito concentradas nas áreas do litoral do Espírito Santo, Campos e São Paulo (Figura 2), das quais a maioria pertence a exploradora brasileira – Petrobras e 23% da produção é oriunda de investidores globais [1].



*Figura 2: Ilustração da localização de bacias de exploração no Brasil [2].*

Diante dos dados apresentados, fica evidente a expressividade econômica e social que o mercado de Óleo & Gás possui em solo brasileiro, representando uma significativa contribuição para geração de empregos, aquecimento de mercados diretos e indiretos, aumento da qualidade de vida via produtos e empresas além de fomentar investimentos externos, contribuindo, a longo prazo, para crescimento do PIB.

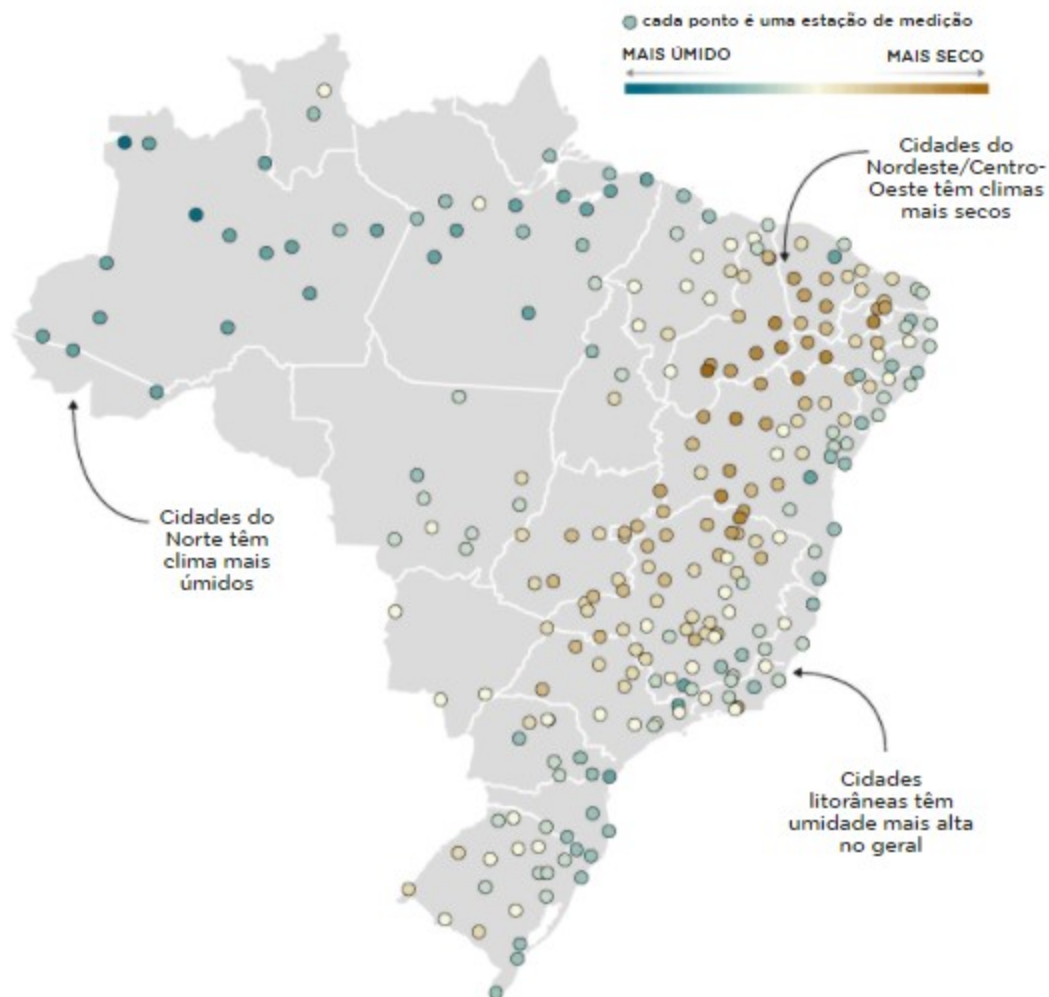
### **2.1.2. Condições ambientais offshore no Brasil**

A operação de exploração em alto mar através navios-sonda, FPSO ou plataformas fixas envolve diversas dificuldades inerentes ao ambiente em que se encontram. Fora a complexidade logística de transportar equipamentos, móveis, pessoas e mantimentos, o fator natural é de extrema influência nas questões de conservação de equipamentos e estruturas para qualquer plataforma *offshore*, o que

afeta a integridade, funcionalidade e vida útil de toda a plataforma e o que ela contém, especialmente quando se trata de materiais sensíveis à presença de água, esteja ela no estado líquido ou gasoso. Dessa forma, a umidade relativa do ar é considerado o agente mais responsável para o desgaste de superfícies a base metálica.

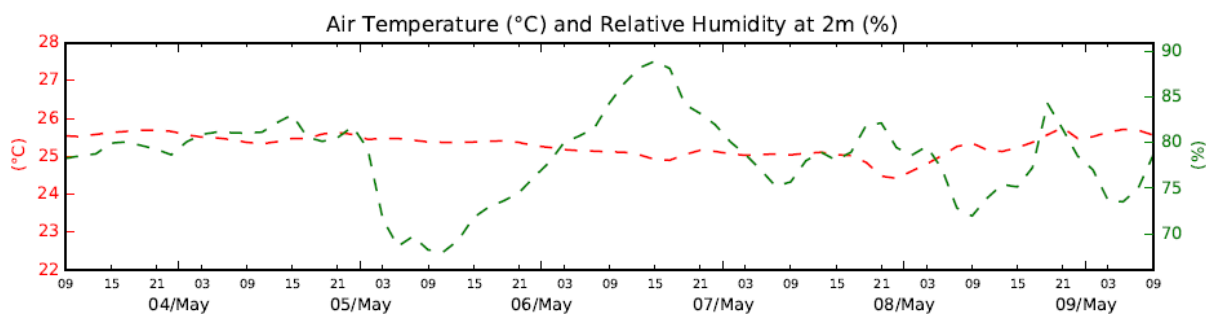
A umidade relativa do ar é um indicador que mede o quanto de água, na forma de vapor, existe na atmosfera em dado momento em relação ao total máximo que poderia existir naquela temperatura.

As taxas de umidade variam de acordo com diversos fatores como as estações do ano, hora do dia e proximidade a rios, represas e mar. As taxas para as cidades do Brasil já são consideradas elevadas em relação a outros países do mundo [10]. Pode-se notar isso usando a ilustração da Figura 3, da média de umidade das cidades brasileiras [10].



*Figura 3: Umidade Relativa anual média do ar no Brasil [10].*

Para o ambiente que este estudo irá focar, tem-se uma intensificação da umidade relativa, enfrentando taxas maiores que as registra das em terra. A Figura 4 ilustra os dados registrados de umidade relativa durante 5 dias no período de Maio, em um FPSO localizado na Bacia de Campos, Espírito Santo.



*Figura 4: Umidade relativa de um FPSO*

Nota-se que as taxas são consideravelmente mais elevadas, chegando a 90%, trazendo consigo dificuldades de manutenção de linhas de processos e equipamentos, tanto para desgastes do material assim como aumento de tempo necessário para secagem de produtos poliméricos (tintas plásticas) aplicados às estruturas.

Além disso, as diferenças bruscas no ambiente *offshore* da temperatura facilitam a intermitência dos estados da água, o que corrobora para desgastar as superfícies metálicas.

## 2.2. Embasamento teórico

Este tópico irá abordar de forma conceitual os principais pontos envolvendo o estudo desse trabalho. Os conhecimentos aqui descritos são a base para a compressão do problema a ser atacado, assim como eles se associam e influenciam as decisões feitas em campos de exploração *offshore*.

### 2.2.1. Objetivo do isolamento térmico

O isolante térmico tem como principal característica a capacidade de retardar/dificultar a propagação natural de energia térmica entre dois ou mais corpos, considerando que, segundo as leis físicas de propagação de calor, a soma das quantidades de calor trocado deve ser sempre nula. Essa troca ocorre até que os

corpos envolvidos no "sistema isolado" atingiam o equilíbrio térmico e estejam à mesma temperatura [12].

Nenhum isolante térmico é 100% eficiente, ou seja, todo material ou estrutura constituído por alguma composição de material sempre conduz calor. Porém, para efeitos práticos e dependendo de cada caso, os isolantes cumprem a sua função e impedem a dissipação indesejada de energia térmica.

Um exemplo simples para o entendimento da atuação prática de um isolante é pensar no uso de caixas de isopor para conservar as baixas temperaturas de bebidas e alimentos. Devido a "baixa" condutividade térmica do isopor, a troca de energia entre o ambiente externo e interno é mitigada, fazendo com que as baixas temperaturas no interior da caixa se mantenham por um maior período.

A melhor aproximação matemática para equacionar o fluxo de calor entre dois corpos é a lei de Fourier (Eq.1). A partir dela verifica-se a relação direta entre a condutividade térmica ( $k$ ) do material/meio de troca e o fluxo de calor ( $q$ ) [11]:

$$q = -kA \frac{dT}{dx}$$

*Lei de Fourier – Eq.1*

tal que:

- $A$  – Área de seção transversal
- $\frac{dT}{dx}$  - Gradiente de temperatura na direção do fluxo

Os princípios apresentados acima também são aplicados para ambientes industriais e, conseqüentemente, de exploração de Óleo e Gás. No caso da exploração de petróleo, o controle de temperatura durante todo o processo demanda materiais e ferramentas que conservem temperaturas em diferentes situações.

Desde a extração de fluido dos reservatórios até a estocagem e distribuição para as refinarias, o óleo passa por tubulações e equipamentos que devem ter sua temperatura regulada para garantir, principalmente, a decantação entre em óleo, água e gás. Considerando uma temperatura externa na plataforma de 28 °C a 30 °C com a do fluido extraído a 80 °C (valor aproximado), faz-se necessário o controle da

temperatura da mistura (óleo, água e gás) a fim de garantir o maior aproveitamento do processo de tratamento e separação [6].

Além disso, o controle da temperatura em uma base de exploração *offshore* auxilia em outros pontos como, por exemplo, evitar a condensação de água, reaproveitar temperatura das linhas para aquecer água e gerar vapor para os compressores na planta, entre outros [6].

Diante desse quadro, fica clara a dependência das plataformas de exploração do uso de isolantes térmicos para assegurar a qualidade do processo em alto mar. Os isolantes térmicos são, portanto, vastamente aplicados em tubulações e equipamentos que necessitam conservar sua temperatura interna, normalmente temperaturas elevadas.

### **2.2.2. Tipos de Isolamento térmicos**

Na indústria de óleo e gás, os isolantes térmicos são divididos em dois grupos e se diferenciam pela sua necessidade de aplicação e objetivo final de instalação, eles são:

- Isolamento térmico para proteção pessoal
- Isolamento térmico para conservação de energia

O isolamento térmico para proteção pessoal, como já explícito pelo nome, tem como objetivo proteger e garantir a integridade física de pessoas no campo de trabalho contra queimaduras leves e graves. Pode ser instalado de diversas maneiras, contanto que impossibilite o contato direto de pessoas a linhas, equipamentos e estruturas acima de 60 °C (temperatura padrão de segurança adotada pela indústria de Óleo e Gás brasileira) [6].

Esse tipo de isolamento não proporciona a ocorrência de corrosão sob isolamento em materiais, uma vez que o espaçamento entre a proteção e a superfície quente (em torno de 300 mm) permite a rápida vaporização de água, entre outras razões a serem apresentadas em breve.

Por outro lado, o isolamento térmico para conservação de energia tem como objetivo preservar as altas temperaturas no interior de linhas, vasos, tanques e equipamentos. Torna-se, neste caso, um potencializador da aparição de corrosão sob isolamento (CUI).

Muitas empresas utilizam o isolamento para conservação também para casos de isolamento para proteção pessoal. Isso se deve ao fato de, em geral, serem de fácil instalação e mais comumente conhecidos e utilizados pelos profissionais responsáveis.

Apesar de ser corriqueiro, essa prática tem a desvantagem de custar mais caro para realizar a proteção em campo, já que materiais de isolamento para conservação tem custos elevados e essa proteção favorece o aparecimento de corrosão sob isolamento.

É importante ressaltar que a proteção pessoal leva o nome em inglês de *isolation* (sinônimo de afastamento/separação) o que é pertinente e de mais fácil entendimento para engenheiros e técnicos quando discutem sobre o isolamento em questão. Já a proteção para conservação de energia é denominada em inglês *Insulation* (sinônimo de isolamento térmico propriamente dito) [6].

Outro procedimento comum para referenciar isolamentos na indústria se aplica aos documentos das plantas de processos de uma base de exploração *offshore*. Os equipamentos e tubulações representados, que possuem proteção pessoal instalada, tem a letra P (do inglês *Personnel* – pessoal) na sua descrição. Caso possua isolamento para conservação de energia estará representado com HC (do Inglês *Heat Conservation* – conservação de calor), se não possuir nenhum isolante instalado terá a letra N (do inglês *Not Insulated* – não isolada) [6].

### **2.2.3. Corrosão**

O estudo sobre corrosão é fundamental para empresas que trabalham em ambientes *offshore* e visam garantir a maior qualidade de seus processos e atendimentos a cronogramas a bordo. Devido ao fato de que a maioria dos equipamentos, tubulações e dutos das plataformas de produção são constituídos de



aço (em geral, aço carbono), a indústria de exploração de Óleo e Gás estará sempre convivendo com a corrosão metálica.

A corrosão é um processo natural e espontâneo e pode ser resumida como a deterioração ou destruição de um material ou suas propriedades, devido a sua reação com o ambiente [8]. Como todo ambiente é de alguma forma corrosivo, a corrosão não pode ser evitada a longo prazo, porém pode ser mitigada por inibidores de corrosão ou não potencializada por proteções anódica/catódicas. Se bem executadas, essas medidas podem fazer com que a taxa de corrosão se aproxime de zero.

O processo corrosivo está relacionado com a oxidação de um metal para a formação de um composto mais estável termodinamicamente nas condições em que está submetido. Mais especificamente, o fenômeno corrosivo representa uma situação em que duas ou mais reações químicas ou eletroquímicas diferentes ocorrem de forma simultânea e espontânea, sendo uma de natureza anódica e uma catódica [8]. Geralmente, a superfície metálica faz o papel de anodo, cedendo elétrons para reação de oxidação do metal, que serão recebidos por uma substância ou oxidante existente no meio corrosivo.

Nos processos de corrosão, os metais reagem com os elementos não metálicos presentes no meio -  $O_2$ , S,  $H_2S$ ,  $CO_2$ , entre outros - produzindo compostos semelhantes aos encontrados na natureza, dos quais os metais foram extraídos.

O processo de corrosão só é possível diante da presença de 6 fatores [8]:

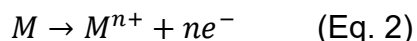
1. Meio corrosivo – meio que está em contato com a superfície do metal.
2. Anodo – local onde a corrosão vai ocorrer, pois ocorrem reações de oxidação.
3. Catodo – eletrodo que recebe os elétrons vindos do anodo, não sofre mas colabora com a oxidação do anodo.
4. Ligação elétrica entre os eletrodos – o meio que contém os eletrodos (catodo e anodo) deve permitir a transferência de elétrons.
5. Ligação elétrica entre os meios corrosivos – se os meios corrosivos do anodo e catodo forem diferentes, é necessária uma união elétrica entre estes meios, ou seja, uma ponte salina.
6. Diferença de potencial entre anodo e catodo – para dois metais distintos, anodo e catodo têm naturalmente potenciais elétricos distintos.

Na indústria offshore a corrosão normalmente é dividida em classes. Essa divisão facilita a discussão em torno das possíveis causas de cada uma. Elas são válidas para um maior entendimento das principais razões para a corrosão do material e facilitam a busca de uma solução a fim de mitigar o efeito corrosivo. As três classes são [8]:

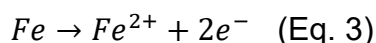
- Corrosão molhada (*Wet Corrosion*)
- Corrosão a seco (*Dry Corrosion*)
- Corrosão biológica (*Biological Corrosion*)

A corrosão molhada é a mais comumente conhecida e estudada por ser o caso cuja frequência observada é a maior entre as três classes. Assim como o nome indica, esse tipo de corrosão ocorre na presença de solução aquosa (incluindo condensação de umidade) ou de eletrólitos. É um processo eletroquímico e pode ser explicada pelas reações eletroquímicas [8].

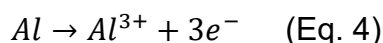
A forma geral para oxidação (ou corrosão) de um metal M é [13]:



Alguns exemplos comuns de reações de oxidação são:



e



#### **2.2.3.1. Corrosão Molhada**

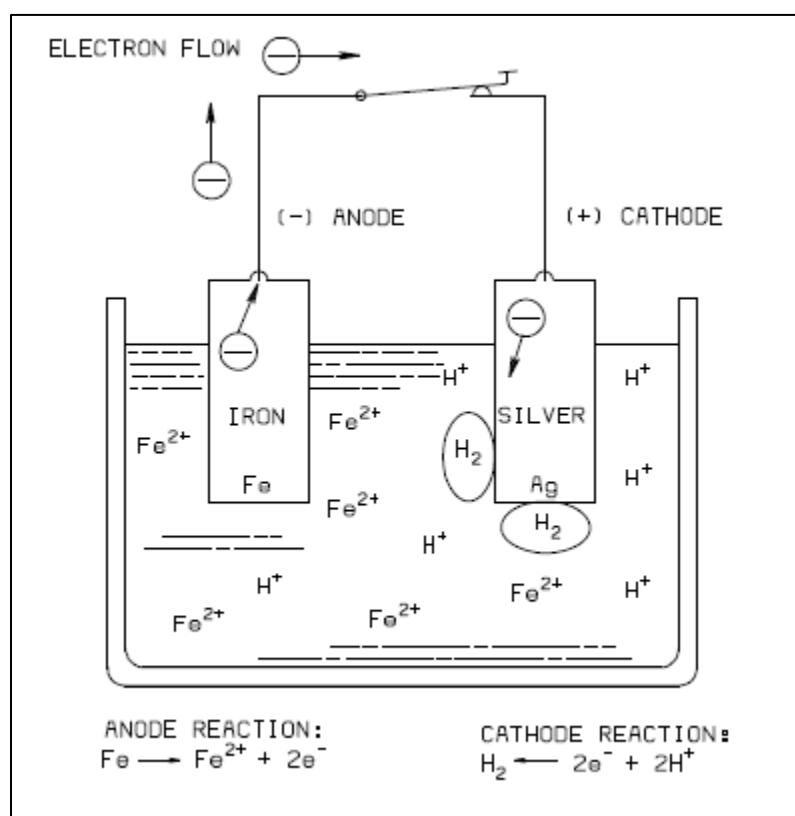
A corrosão molhada pode ser manifestada de 8 formas diferentes, classificadas pela forma como a corrosão se manifesta e se propaga [8]:

- Corrosão Uniforme
- Corrosão Galvânica
- Corrosão Alveolar
- Corrosão Pontual
- Corrosão Intergranular
- Corrosão por Erosão

- Corrosão sob Tensão

A corrosão uniforme leva esse nome pois o desgaste corrosivo resultante da oxidação ocorre de forma uniforme em todo o objeto corroído. As taxas de corrosão da superfície exposta são frequentemente em mm/ano (milímetro por ano) [9].

A corrosão galvânica ocorre quando metais distintos formam uma célula corrosiva (ou par corrosivo). Os resultados dessa célula ocorrem devido a diferença de potencial eletroquímico dos metais imersos em um eletrólito. Se esses metais estão conectados eletricamente, seus elétrons vão fluir em um circuito elétrico, do anodo até o catodo. Esse processo é conhecido como pilha galvânica (Fig. 5).



*Figura 5: Representação de uma pilha galvânica [8].*

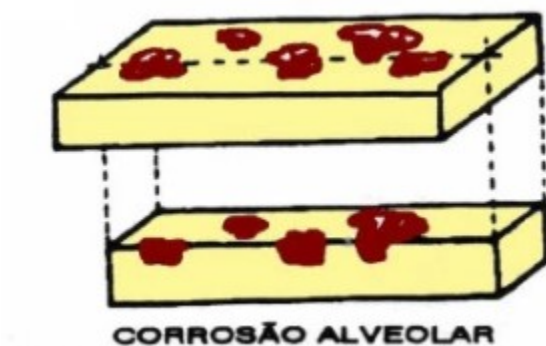
A tendência que um metal tem em ceder elétrons (anodo) e ganhar elétrons (catodo) varia de acordo com valores pré-determinados em uma tabela chamada série galvânica (ou série eletroquímica) para metais e ligas (Tabela 2).

Analisando a tabela, pode-se concluir que um metal tem maior tendência a corroer quando ligado a outro metal mais catódico do que ele. Por exemplo, o aço carbono tende a corroer se ligado por um eletrólito ao aço cromo.

É válido notar, via a Tabela 2, que como a maior parte dos equipamentos, vasos e tubos instalados em plataformas são compostos de aço carbono, a presença da corrosão é inerente em tais ambientes; uma vez que aço carbono apresenta uma alta tendência ativa de ceder elétrons (anodo) em relação a outras ligas metálicas.

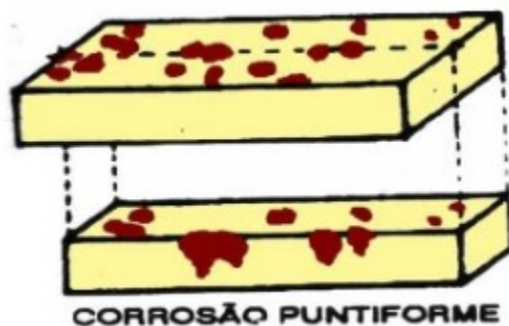


meio corrosivo [8]. É comum aparecer abaixo de cabeças de parafusos, entre e embaixo de superfícies de juntas. Esses locais têm em comum a formação de frestas entre metais, nas quais a água pode se alojar, ou então favorecer o depósito de materiais não metálicos sobre a superfície (Fig. 6) [8].



*Figura 6: Exemplificação de corrosão alveolar [14].*

A corrosão pontual também é uma forma de corrosão localizada, que gera furos localizados em superfícies metálicas. Ela é ocasionada pela presença de cloretos, particularmente, em aço inoxidável. Geralmente ocorre em condições uniformes e o metal corroído irá apresentar pequenas perfurações que atingem uma profundidade maior no corpo metálico (Fig. 7). Esta forma de corrosão é uma das principais ocorridas em ambientes *offshore* em tanques e vasos revestidos de aço inoxidável [8].

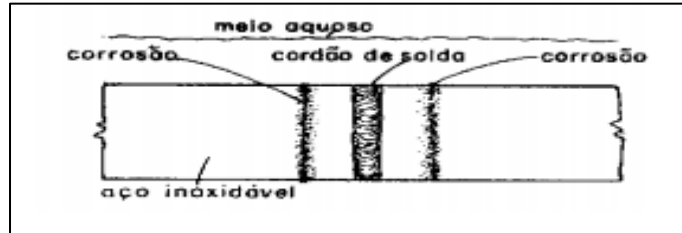


*Figura 7: Exemplificação de corrosão pontual [14].*

A corrosão intergranular se manifesta de forma localizada e seu processo se inicia na superfície e segue o caminho formado pelos grãos que constituem o metal (Fig. 8). Este tipo de corrosão é muito comum de surgir em torno de áreas metálicas que passaram por processo de soldagem (Fig. 9) [8].



*Figura 8: Exemplificação de Corrosão Inter granular [14].*



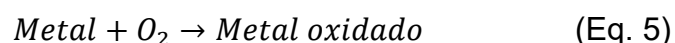
*Figura 9: Corrosão Inter granular em cordão de solda [14].*

A corrosão por erosão é o aumento da taxa de corrosão causado pelo movimento relativo do fluido corrosivo em relação ao metal. A corrosão varia de forma direta com a velocidade pois os filmes protetores do metal são arrancados [8]. Por exemplo, para movimentação e transporte de ácido sulfúrico, à temperatura ambiente, aço inox é o mais recomendando, contanto que a velocidade relativa seja baixa (menor que 3,3 km/h) [8].

A corrosão sob tensão é a fratura causada por uma tensão de tração, seja ela externa ou residual, devida a um tratamento térmico sofrido pelo metal [8].

#### **2.2.3.2. Corrosão a seco**

A corrosão a seco ocorre especificamente acima do ponto de orvalho do ambiente. Está normalmente associada a altas temperaturas e gases são seus agentes corrosivos. Um exemplo mais comum quando se trata de corrosão a seco é a oxidação de alta temperatura (Eq. 5) [8]:



Em altas temperaturas, a maioria dos metais reage com oxigênio (O<sub>2</sub>), formando um metal oxidado. Em muitas indústrias, o termo oxidação remete ao processo de reação a altas temperaturas com o ar e não às reações eletroquímicas a baixas temperaturas apresentadas anteriormente.

#### **2.2.3.3. Corrosão Biológica**

Muitos tipos de micro-organismos alteram as taxas de corrosão de materiais. Históricos de empresas exploradoras de petróleo mostram que a corrosão biológica pode degradar por completo dutos em até 3 semanas [8]. Por isso é fundamental a prevenção dessa forma de corrosão e o estudo sobre o meio ambiente em que os materiais, metálicos principalmente, serão inseridos.

Os micro-organismos vivos alteram as taxas de corrosão ingerindo o alimento e eliminando resíduos que geram reações químicas que afetam o material por:

- Influenciar reações anódicas e catódicas
- Alterar a composição dos filmes protetores de superfícies
- Criar condições favoráveis de corrosão ou produzir depósitos.

O que se inicia devido a corrosão biológica acaba, na maioria dos casos, se enquadrando em corrosão localizada (Alveolar ou Pontual). Os principais micro-organismos associados a corrosão, principalmente de ferro e aço, tanto os microscópios quanto macroscópios são:

##### **Organismos Microscópios**

- Bactéria
- Alga
- Fungo

##### **Organismos Macroscópios**

- Alga Marinha
- Esponja
- Moluscos
- Craca
- Bryozoa



Os micro-organismos influenciam a corrosão de materiais de uma forma específica. As bactérias, por exemplo, são encontradas em ambientes que misturam terra e água, sendo essa condição de mistura ideal para a sobrevivência de micro-organismos. Ainda assim, podem sobreviver por longos períodos sob condições desfavoráveis e podem ser classificadas como aeróbica (requer oxigênio para sobreviver) ou anaeróbica. As bactérias costumam causar danos corrosivos com uma maior frequência do que fungos e algas [8].

Um tipo de bactéria que possibilita a corrosão de materiais é a bactéria sulfato-redutora. Esse tipo de micro-organismo anaeróbico usa íons de sulfato ao invés de oxigênio como agente oxidante para assimilar nutrientes orgânicos. Essa bactéria, extremamente comum de ser encontrada, pode reduzir sulfato para sulfito na falta de oxigênio; essa ação é frequentemente encontrada em associação à uma fonte de íons ferrosos (por exemplo: tubulações, proteção de tanques, etc.). O sulfito se combina com o ferro dissolvido para formar camadas de sulfito de ferro características desse processo, ocasionando a corrosão do material [8].

Os métodos de controle de corrosão biológica por micro-organismos, além de ambientes limpos, que podem ser efetivos são [8]:

- Uso de tratamentos químicos
- Remoção de água do ambiente
- Mudar material ferroso para um material anticorrosivo
- Usar um revestimento isolante para o metal
- Uso de proteção catódica

A influência de macro organismos na corrosão de materiais ocorre com a ligação e grande crescimento do macro organismo desde o início da sua vida, desenvolvendo uma dependência de ligação à superfície metálica para sobreviver.

Três diferentes características de crescimento distinguem os tipos de corrosão a serem desenvolvidas [ref]:

- O macro organismo cresce de forma uniforme pela superfície;
- A adesão ou o crescimento é irregular ocasionando concentração de oxigênio desigual na superfície metálica;

- O crescimento estabelece condições anaeróbias, provocando a mesma situação das bactérias sulfato-redutoras.

#### **2.2.4. Corrosão sob isolamento**

A corrosão sob isolamento é um dos principais problemas de integridade mecânica na indústria de exploração de Óleo e Gás atualmente. Além dos gastos para substituição/manutenção de equipamentos, perdas de tempo de trabalho estão associadas a esse fenômeno inerente às tubulações e equipamentos que possuem algum tipo de isolante térmico aplicados a sua superfície [7].

A corrosão sob isolamento (sigla CUI, do inglês: *Corrosion Under Insulation*) [4], assim como outros processos corrosivos, é, essencialmente, uma reação eletromecânica que ataca, principalmente, materiais à base de aço carbono [7].

As pré-condições necessárias para o aparecimento de corrosão sob isolamento em tubulações e equipamentos são as presenças de [4]:

- Aços Ferrosos
- Oxigênio
- Umidade

Os três fatores apresentados anteriormente são os fundamentais para a corrosão galvânica (principal tipo de corrosão sob isolamento), porém a rápida corrosão típica de CUI requer o apoio dos seguintes elementos [4]:

- Material isolante térmico
- Temperatura da superfície na faixa suscetível ao CUI
- Condições ambientais que favorecem umedecimento do isolante

Nota-se que os elementos que apoiam o aparecimento de CUI são fatores que não podem ser evitados de estarem presentes. A temperatura de operação é definida pela necessidade do processo e, geralmente, não pode ser alterada. As condições ambientais são forças da natureza e estão fora de controle pelo homem. Por último, a escolha do material ferroso deve atender as expectativas de custos do projeto, uma vez que investir em materiais anticorrosivos (titânio, aço inox, etc.) tornaria o projeto caro demais, inviabilizando um retorno financeiro positivo aos investidores.

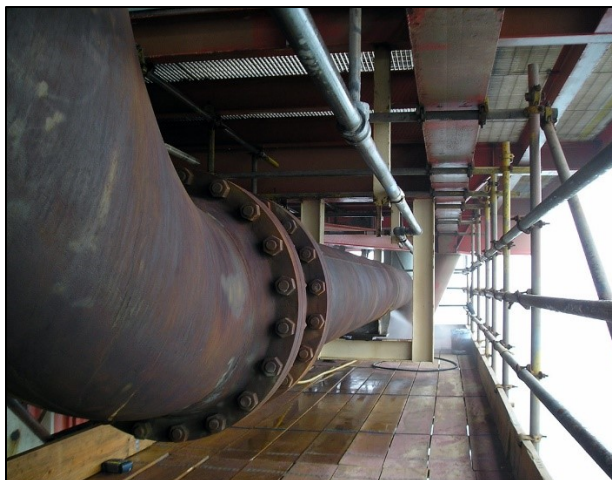
Os padrões da indústria química defendem que os sistemas de tubulações isoladas termicamente, que operam com a temperatura entre  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$  até  $122\text{ }^{\circ}\text{C}$  (aproximadamente) possuem o maior risco de desenvolverem corrosão sob isolamento [7]. Porém, os casos mais severos de corrosão sob isolamento ocorrem na faixa de temperatura entre  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$  [4].

Atualmente, todas tubulações e equipamentos que se enquadram no range na faixa de temperatura de operação padrão da indústria e são isolados termicamente fazem parte do plano de inspeção de CUI. Essa inspeção envolve encontrar falhas físicas no isolamento, aberturas principalmente, até a remoção do mesmo nas áreas sob suspeita.

A inspeção para CUI começa com a averiguação visual do isolamento. Nessa fase procura-se por falhas que possam permitir que umidade adentre o sistema (camada entre isolante térmico e superfície da liga ferrosa). Baseado na orientação do fluxo da tubulação, áreas mais críticas são selecionadas para retirada do isolamento.

As áreas críticas estão associadas, geralmente, ao acúmulo de umidade/água entre isolamento térmico e superfície, alguns exemplos são [4]:

- Pontos suscetíveis a vazamentos como juntas, válvulas e flanges
- Curvas de  $90^{\circ}$  localizadas em pontos baixos (ação gravitacional favorece escorrer umidade e acumular no ponto mais baixo, Figura 10).



*Figura 10: Tubulação com curva  $90^{\circ}$  em ponto baixo [26]*

- Amassados no revestimento externo de tubulações isoladas



*Figura 11: Tubulação com amassados críticos [26]*

Os critérios que orientam a preferência de manutenção preventiva de linhas *offshore*, que possam apresentar CUI, segue a seguinte orientação [4]:

- I. Criticalidade – Equipamentos cuja falha tenha maiores consequências devem ter maior atenção na prevenção de danos causados na superfície da linha/equipamento. Ex: linhas de gás  $H_2S$  (gás inflamável e letal).
- II. Confiança na efetividade do isolante – A robustez no isolamento e revestimento utilizado podem prover um maior tempo entre inspeções e garantir uma menor necessidade de reparos.
- III. Condições ambientais – Plantas localizadas em ambientes áridos não esperam apresentar muitos casos de CUI quando comparados com unidades em ambientes mais úmidos.
- IV. Nível de atividade da unidade – unidades *offshore* com substancialmente mais projetos em menores intervalos de paradas esperam sofrer mais com aparecimento de danos mecânicos e mais exposição a casos de CUI.

É válido ressaltar que o segundo tópico desses critérios é suscetível a questões do tipo de trabalho da linha/equipamento, além das condições externas do ambiente. Linhas intermitentes, por exemplo, operam de forma a variar sua temperatura com alta frequência. É o caso de linhas usadas para aquecer e resfriar outros equipamentos, como trocadores de calor. Nesse caso, o aparecimento de vapor de água e água na forma líquida favorece o aparecimento de corrosão sob isolamento, fator que é considerado na análise para definir o período de intervalo de manutenção [4].

Nota-se que a inspeção, reparo e restauração de linhas, equipamentos e barreiras (revestimento e/ou isolante e revestimento) representam uma significativa demanda de recursos e ativos da indústria de Óleo e Gás. Apesar de envolver diversas equipes e responsabilidades, a manutenção preventiva de isolantes consiste em rotina, pesquisa minuciosas a procura de falhas e danos às barreiras.

Nota-se que a prevenção total dos casos de corrosão sob isolamento é uma tarefa complicada de ser atingida. Os principais fatores causadores desse fenômeno que se alastra em plataformas do mundo dependem de fatores ainda incontrolláveis pela ação do homem.

### **2.3. Avaliação comparativa de isolantes térmicos**

Neste tópico são avaliados os isolantes térmicos mais usados na indústria de óleo e gás, além de serem exploradas novas opções que estão surgindo no mercado com a proposta de mitigar os efeitos de corrosão sob isolamento. Será realizada uma comparação quanto a funcionalidade de alguns isolantes considerando os critérios de escolhas da indústria do petróleo.

#### **2.3.1. Metodologia para escolha de isolantes térmicos**

A seleção de isolamentos térmicos costuma se iniciar com a avaliação de que a tubulação/equipamento em questão realmente demanda a instalação de isolamento térmico. No caso da indústria de óleo e gás, são os equipamentos e tubulações que visam a conservação de energia do fluido de processo (HC). Após comprovada a real necessidade do seu uso, o isolamento deve seguir as seguintes garantias para seu uso ser viabilizado (adaptado de [12] [15] [17]):

- Segurança na utilização – Não apresentar riscos a saúde de quem trabalha com a manipulação do isolante térmico, vide técnicos de instalação.
- Condutibilidade térmica – Material deve apresentar baixa capacidade em conduzir calor.
- Reação ao fogo – Apresentar baixa reação e propagação de fogo.

- Período de vida útil – O isolamento deve suportar as condições em que estará exposto sem perder o aspecto funcional por razões banais e em pouco tempo, por exemplo: Resistência a radiação UV, resistência temperaturas externas, resistência a atmosferas agressivas e a microrganismos.
- Fator de resistência ao vapor de água – é representado pela quantidade de vapor de água que, por unidade de tempo e espessura, atravessa por difusão uma amostra do material.
- Custo – O isolante deve apresentar preço de acordo com o mercado e corresponder as expectativas associadas ao seu custo/benefício.
- Reciclabilidade – Capacidade de o material ser reutilizado e/ou reciclado.
- Energia incorporada – Parâmetro que permite quantificar o impacto ambiental através de todo o processo que constitui o produto, desde a sua concepção até a colocação em campo.
- Emissão de CO<sub>2</sub> – Impacto ambiental do material pelo balanço de CO<sub>2</sub>.

A condutibilidade térmica é avaliada de acordo os seguintes critérios de avaliação [15]:

Condutibilidade térmica (W/m.K)	Avaliação
0 - 0,031	6
0,031 - 0,034	5,5
0,034 - 0,037	5
0,037 - 0,04	4,5
0,04 - 0,043	4
0,043 - 0,046	3,5
0,046 - 0,049	3
0,049 - 0,052	2,5
0,052 - 0,055	2
0,055 - 0,058	1,5
> 0,058	1

*Tabela 3 : Critérios de avaliação para condutibilidade térmica [15]*

A avaliação da segurança contra-fogo utilizada nesse trabalho seguirá a orientação do laboratório de engenharia civil de Portugal. A qualificação dos materiais contra-fogo compreende as seguintes classes indicativas [17]:

- Classe M0 – Materiais não combustíveis.
- Classe M1 – Materiais não inflamáveis.
- Classe M2 – Materiais dificilmente inflamáveis.
- Classe M3 – Materiais moderadamente inflamáveis.
- Classe M4 – Materiais facilmente inflamáveis.
- Classe M5 – Materiais muito facilmente inflamáveis.

A atribuição da avaliação das classes segue o seguinte padrão [15]:

<b>Classes da reação ao fogo</b>	M0	M1	M2	M3	M4	M5
<b>Avaliação</b>	6	5	4	3	2	1

*Tabela 4 : Critério de avaliação para reação ao fogo [15]*

O período de vida útil de um material corresponde ao período durante o qual o material apresenta um eficiente desempenho térmico:

<b>Longevidade (anos)</b>	0 - 20	21 - 40	41 - 60	61 - 80	81 - 100	> 100
<b>Avaliação</b>	1	2	3	4	5	6

*Tabela 5 : Critério de avaliação para longevidade [12]*

Para o custo tem-se a relação do preço de mercado por metragem quadrada do material, obtendo-se a seguinte relação [15]:

<b>Custo (€/m²)</b>	0 - 5	6,0 - 10	11 - 15,0	16 - 20	21 - 25	> 25
<b>Avaliação</b>	1	2	3	4	5	6

*Tabela 6 : Critério de avaliação para custo por metro quadrado [15]*

Para avaliar a reciclabilidade dos materiais isolantes, foi estabelecida a seguinte relação [15]:

<b>Reciclabilidade</b>	<b>Avaliação</b>
Não reciclável	1
Muito dificilmente reciclável	2
Dificilmente reciclável	3
Parcialmente reciclável	4
Reutilizável	5
Totalmente reciclável	6

*Tabela 7 : Critério de avaliação para reciclabilidade [15]*

A energia incorporada do material segue uma relação com a sua condutibilidade térmica, de forma que é avaliada da seguinte forma [15]:

<b>Energia incorporada (kWh/m³)</b>	<b>Avaliação</b>
0 - 75	6
76 - 150	5,5
151 - 225	5
226 - 300	4,5
301 - 375	4
376 - 450	3,5
451 - 525	3
526 - 600	2,5
601 - 675	2
676 - 750	1,5
> 750	1

*Tabela 8 : Critério de avaliação para energia incorporada[15]*

Por último, para as emissões de CO<sub>2</sub>, pode-se usar a seguinte relação:



<b>Emissões de CO<sub>2</sub> (Kg equivalente CO<sub>2</sub> / m<sup>2</sup>)</b>	<b>Avaliação</b>
0 -30	6
31 - 60	5,5
61 - 90	5
91 - 120	4,5
121 - 150	4
151 - 180	3,5
181 - 210	3
211 - 240	2,5
241 - 270	2
271 - 300	1,5
> 300	1

*Tabela 9 : Critério de avaliação para emissões de CO<sub>2</sub>[15]*

Esses critérios para a metodologia utilizada são os pontos que devem nortear a avaliação de forma comparativa entre os isolantes térmicos. É notório que a maioria dos isolantes térmicos disponíveis no mercado não atendem a todas as exigências, porém a ponderação de cada situação fica a cargo do cliente/usuário de acordo os critérios mais críticos, dependentes de cada situação.

É importante ressaltar que o isolamento e proteção completo de uma tubulação, com o intuito de se conservar energia, contempla, além do isolamento térmico, o uso de revestimento externo (do inglês, *cladding*). Apesar de compor parte importante em sustentar o isolamento térmico na tubulação e não permitir a entrada de água, evitando o aparecimento de CUI, ele não será debatido a fundo nesse trabalho por seguir critérios mais padronizados de uso na indústria de óleo e gás. Sendo assim, as possibilidades de mudanças para se melhorar a sua funcionalidade não são variadas muitas [4]. Embora não seja foco principal desse estudo, vale realizar uma explicação sobre a sua função, importância e constituição.

O revestimento externo é utilizado para proteger o isolamento do ingresso de água, dano mecânico e fogo. Dessa forma, o revestimento é parte fundamental para garantir o prolongamento da vida útil e bom funcionamento do isolamento térmico. O tipo mais comum de material usado na indústria química e de petróleo é o alumino, aço inox e ligas de aço revestidas de alumínio. A sua funcionalidade e boa conservação dependem, principalmente, pela utilização de isolamento térmicos rígidos e fabricação com pequenas tolerâncias [4]. Revestimentos metálicos demandam autocuidado para design e instalação a fim de evitar a entrada de água. Uma vez instalado, a manutenção emergencial é fundamental, pois a deformação ou abertura do material podem ocasionar problemas como a corrosão sob isolamento, que se desenvolve rapidamente após aparecimento de um ambiente propício ao acúmulo de água ou umidade [12].

### **2.3.2. Principais isolantes térmicos da indústria offshore**

Apesar de existirem diversos tipos de isolantes térmicos para conservação de energia em equipamento/tubulações metálicas em linhas de processo industriais, alguns são recorrentes na indústria do petróleo. As principais exploradoras do Brasil, tais como, Petrobras, Shell e Chevron utilizam, mais comumente, os isolantes de origem mineral.

Os dois isolantes térmicos mais comuns de serem observados instalados nas plataformas de exploração *offshore* no Brasil de origem mineral são: Lã de Rocha e Lã de vidro [12].

#### **2.3.2.1. Lã de Rocha**

A lã de Rocha (em inglês, *Rockwool*) é um isolante térmico de origem mineral produzida a partir de uma rocha vulcânica, a diábase, por fusão. Trata-se de um material incombustível e completamente permeável ao ar e ao vapor de água, porém, não absorve água. Além disso, é caracterizada por uma elevada compressibilidade, mas, no entanto, apresenta uma fraca resistência ao corte [15]. Devido a esses fatores, costuma ser encomendada pré-fabricada pelas indústrias e empresas usuárias do produto.

A lã de rocha é embalada em forma de rolos e painéis (Figura 11). É um isolante classificado pela Agência Internacional como um potencial carcinogênico humano.

Nesse sentido é recomendando evitar o contato direto com o material sem utilizar o equipamento de proteção pessoal adequado, além de evitar contato com o ar em ambientes de habitação fechados.



*Figura 12 – Rolo e painéis de Lã de rocha [16]*

Na tabela 10 estão listados alguns parâmetros técnicos relevantes da lã de rocha [15]. Permite-se, a partir deles, uma avaliação geral do material.

<b>Densidade</b>	20 à 150 kg/m <sup>3</sup>
<b>Condutibilidade térmica</b>	0,037 W/ m.°C
<b>Reação ao fogo</b>	M1
<b>Fator de resistência à difusão de vapor de água</b>	Rolos: 1 à 2
	Painéis rígidos: 3 à 4
<b>Energia incorporada</b>	150 kWh/m <sup>3</sup>
<b>Emissões de CO<sub>2</sub></b>	45 kg de CO <sub>2</sub> eq/m <sup>3</sup>

*Tabela 10 : Especificações técnicas da lã de rocha [15]*

#### **2.3.2.2. Lã de vidro**

A lã de vidro é um material composto essencialmente de areia e cacos de vidro reciclado, obtida por extrusão desses minerais fundidos. Apresenta reação passiva ao fogo. Apresenta boa resistência a água por curto prazo, porém, quando submetida a alta umidade, seu desempenho fica abaixo do esperado [12] [15].

A durabilidade da lã de fibra de vidro para um desempenho ótimo é de dez anos e seu armazenamento pode se dar de diversas formas, desde painéis até em rolos, Figura 13. Sua colocação é simples em virtude da flexibilidade e elasticidade [15].



*Figura 13 – Ilustração de rolo de Lã de vidro [18]*

A especificação técnica da Lã de vidro para análise dos parâmetros empregados na metodologia do estudo está mostrada na Tabela 11 [15]:

<b>Densidade</b>	13 à 100 kg/m <sup>3</sup>
<b>Condutibilidade térmica</b>	0,039 W/ m.°C
<b>Reação ao fogo</b>	M1
<b>Fator de resistência à difusão de vapor de água</b>	1 à 4
<b>Energia incorporada</b>	225 kWh/m <sup>3</sup>
<b>Emissões de CO<sub>2</sub></b>	75 kg de CO <sub>2</sub> eq/m <sup>3</sup>

*Tabela 11 : Especificações técnicas da lã de vidro [15]*

### **2.3.3. Isolantes térmicos inovadores para minimização de CUI**

Menos comuns que os isolantes minerais, porém com alto poder de crescimento em instalações *offshore*, principalmente pela promessa de mitigar os efeitos da corrosão sob isolamento, estão os isolantes sintéticos, com especial destaque aos materiais à base de aerogel de sílica.

Ainda pouco usados quando comparados às lãs minerais, os isolantes sintéticos vêm conquistando o mercado de exploração de Óleo e Gás no Brasil [4]. Embora ainda carentes de vastas aplicações nesse mercado, já vêm sendo aplicados em diversas indústrias com resultados favoráveis, podendo atingir mais empresas e indústrias ao longo dos próximos anos.

#### **2.3.3.1. Aerogel de Sílica**

“Os aerogeis são materiais altamente porosos preparados pelo processo sol-gel e secos por um processo especial chamado de hipercrítico. Aerogeis de sílica podem atingir até 99% do volume de espaço vazio com uma densidade média de até 0,01 g/cc, bem inferior dos vidros de sílica convencionais (2,2 g/cc)” [19]

Produzido pela primeira vez nos anos 30 por Kistler, não foi dado muita atenção aos aerogeis já que na época não possuíam nenhum valor prático. No início dos anos 90, um grupo de pesquisadores franceses sugeriu seu uso como detectores de radiação de Cerenkov para partículas relativísticas e desde então seu uso foi sendo disseminado em outras aplicações [19].

Devido a composição por nanopartículas de sílica, óxido de silício, o material forma uma estrutura sólida de densidade extremamente baixa, porém apresentando propriedades isolantes elevadas. A manta flexível constituída por aerogel possui elevado desempenho térmico, além de apresentar baixa espessura necessária a aplicação e alta flexibilidade para ser instalada; costuma apresentar características favoráveis à ambientes sujeitos a alta umidade [15].

O grande interesse acerca do uso de aerogeis, especialmente o aerogel de sílica, são suas propriedades incomuns quando comparadas aos isolantes térmicos regularmente utilizados. Tais propriedades são [15] [20]:

- Micro porosidade
- Condutividade térmica

Apesar de serem propriedades diferentes, elas estão diretamente relacionadas. A microporosidade, ou seja, os pequenos diâmetros das cavidades variam desde micro poros (2mm de diâmetro) até macroporos (maior que 50 mm de diâmetro). Entretanto, ele é composto em sua maior parte de mesoporos (2mm de até 50 mm diâmetro). Dessa forma, um aspecto desenvolvido pelo aerogel é a sua natureza aberta de interconectividade, o que permite a passagem de gás através do material [15] [20].

Devido a essa mesma porosidade e tamanho dos poros, o aerogel de sílica é um material que apresenta uma condutibilidade térmica muito baixa. Esse valor de condutividade é da ordem de 0,02 W/m.K à temperatura ambiente e pressão do ar constante [20].

Para aplicações do dia a dia, a tecnologia do aerogel de sílica mais conhecida é a manta flexível (Figura 13).



*Figura 14: Manta flexível de aerogel de sílica [20]*

A partir do desenvolvimento do aerogel de sílica, uma empresa norte-americana em parceria com uma escocesa desenvolveu uma manta flexível de aerogel, que além de incorporar o aerogel original, tem fibras flexíveis adicionadas a sua constituição, permitindo obter um isolamento térmico com elevado desempenho e fácil instalação [20].

As especificações técnicas para avaliação mais específica da manta flexível de aerogel se encontra Tabela 12 (adaptado de [20]):

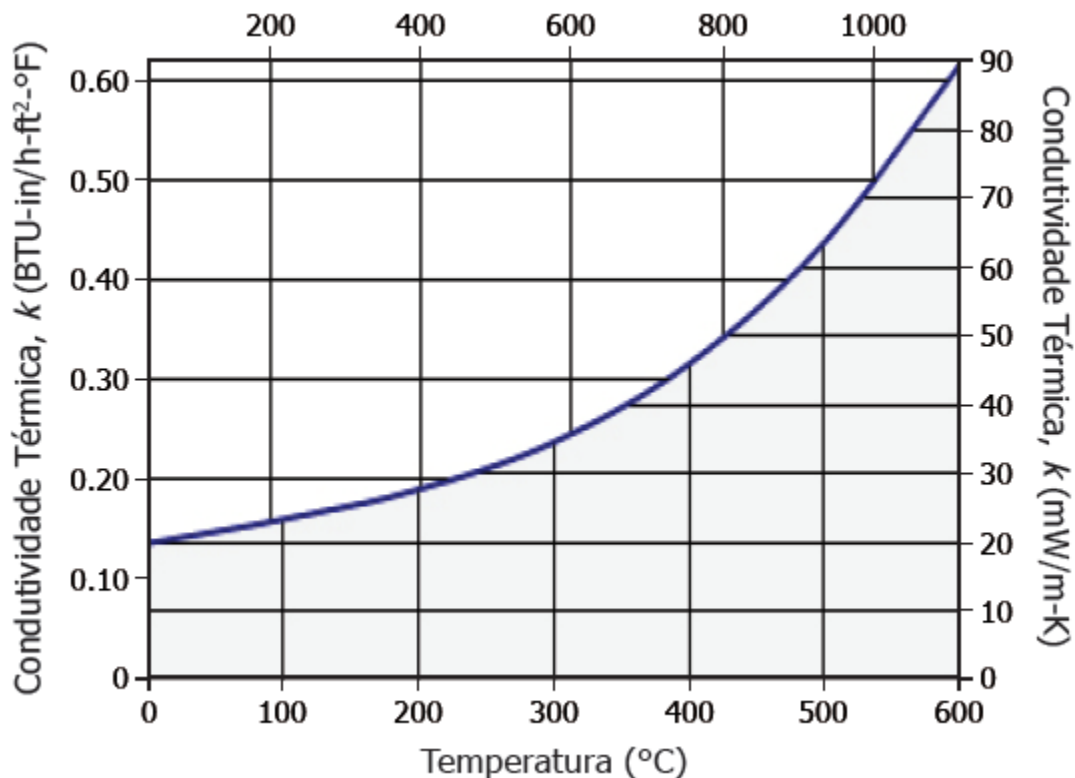
<b>Espessuras</b>	0.20 in (5 mm)	0.40 in (10 mm)
<b>Forma do material</b>	Rolos de 140 m <sup>2</sup>	Rolos de 80 m <sup>2</sup>
<b>Temperatura máx. uso</b>	1200°F (650°C)	
<b>Densidade</b>	12.5 lb/ft <sup>3</sup> (0.20 g/cc)	
<b>Hidrofóbico</b>	Sim	
<b>Resistência a Compressão</b>	> 40,7 kPa a 10% de deformação	
<b>Absorção de Vapor de água</b>	< 5% (de acordo com peso)	
<b>Resistência a fungos dos materiais de isolamento</b>	sem crescimento	
<b>Queima de superfície (ASTM E84)</b>	Índice de espalhamento: < 5 (anti-fogo)	

*Tabela 12 : Especificações técnicas do aerogel de Sílica [20]*

Este isolante térmico tem a característica hidrofóbica (não interage com a água) devido a sua estrutura nanoporosa responsável por limitar a absorção de umidade, o que o torna um forte aliado a instalações que apresentam alta umidade no ar ambiente. Além disso, possui elevada resistência a extremas variações de temperatura, até 200 °C e até 650 °C para aplicações corta-fogo [15] [20].

A manta oferece forte flexibilidade, permitindo se adaptar a formas diferentes de aplicação (tubulações, painéis, paredes curvas, etc) e fácil colocação, mesmo em pequenos espaços [20]. Mecanicamente, a manta apresenta boa resistência à compressão [15].

Esse material apresenta um comportamento específico em relação a sua propriedade térmica, sendo a condutividade a mais relevante. Pode-se observar esse comportamento pelo gráfico na Figura 15 [20]:



*Figura 15: Relação de condutividade térmica e temperatura da manta de aerogel [20]*

A partir do gráfico pode-se concluir que a condutividade térmica da manta de aerogel aumenta de forma aproximadamente exponencial com o aumento da temperatura da superfície em contato. Observa-se que sua condutibilidade térmica se apresenta na ordem de 0,013 W/m.K na temperatura de 0°C, porém tem-se uma condutibilidade térmica que atinge 0,023 W/m.K na temperatura de 260°C [15] [20].

#### **2.3.3.2. Tintas térmicas**

Dentre os materiais disponíveis, a tinta térmica é o mais recente da indústria. Ainda pouco utilizado no mercado *offshore* brasileiro, suas características técnicas podem favorecer a disseminação de seu uso na área, uma vez que seus resultados de uso em outros tipos de indústrias, como refinarias, vêm se mostrando satisfatório [24].

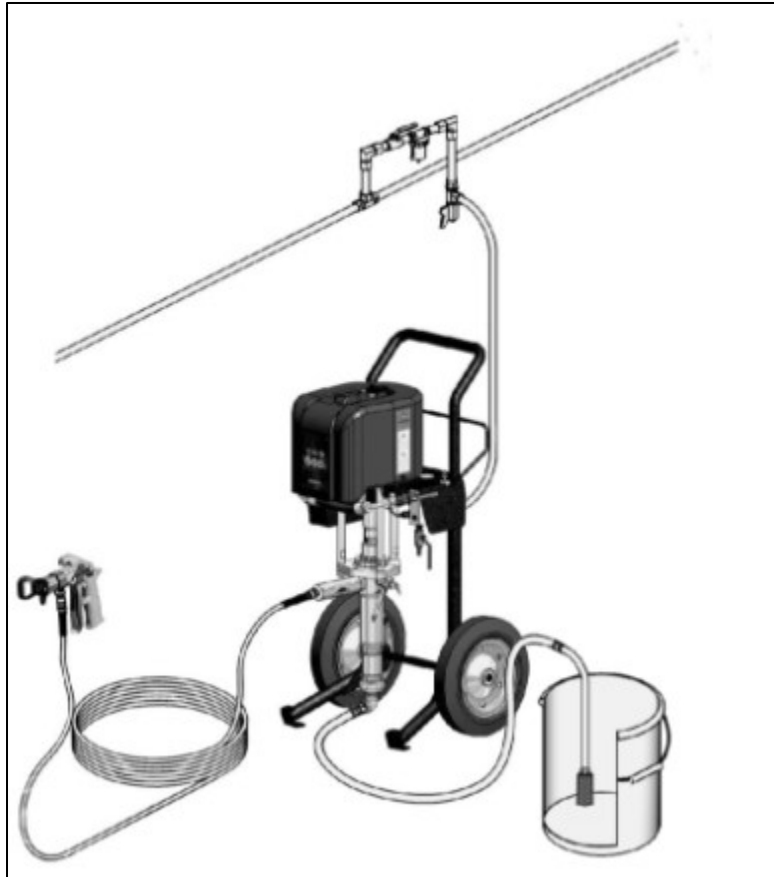
As tintas térmicas são um compósito de cerâmica e sílica que promove isolamento térmico às superfícies em que é aplicada [23]. Devido a ser uma tinta acrílica a base de água, apresenta ótima aderência as superfícies que é aplicada (Figura 16), oferecendo proteção contra corrosão sob isolamento por não permitir a criação de um ambiente com umidade e oxigênio em contato com a superfície em questão [21].



*Figura 16 : Vaso após aplicação de tinta térmica da marca MASCOAT [21]*



As tintas térmicas podem ser aplicadas aos mais variados equipamentos como tubulações, válvulas, tanques, filtros, trocadores de calor, processadores e caldeiras durante a operação, uma vez que sua aplicação se dá por meio de jateamento, processo no qual uma pistola de tinta borrifada, à alta pressão, a tinta térmica na superfície que pretende ser isolada (Figura 17).



*Figura 17: Ilustração de uma máquina jateadora de alta pressão [25]*

A tinta térmica possui diversas propriedades técnicas, sendo as mais relevantes para o estudo as listadas na Tabela 13 (Adaptado de [21] [22] [23]):

<b>Teste de envelhecimento (ASTM B -177)</b>	> 2100 horas
<b>Condutividade</b>	0,097 W/m.K
	0,670 Btu.in/ft².°F
<b>Emissividade</b>	0,15
<b>Reflexividade</b>	0,85
<b>Transmissividade</b>	0
<b>Reflexão raios UV</b>	99,90%
<b>Propagação de chama (ASTM E84)</b>	< 5
<b>Classificação de inflamabilidade</b>	Classe A
<b>Método de aplicação</b>	Pulverização

*Tabela 13: Especificações técnicas da tinta térmica (Adaptado de [21] [22] [23])*

#### **2.3.4. Análise comparativa entre isolantes térmicos**

A partir dos dados coletados e com as avaliações técnicas apurada nos tópicos anteriores, pode-se avaliar de forma comparativa os dois isolantes térmicos mais utilizados na indústria de Óleo e Gás (Lã de rocha e Lã de Vidro). Além disso, é válido ressaltar as características favoráveis e desfavoráveis dos isolantes térmicos inovadores, potenciais atenuantes dos casos de corrosão sob isolamento em plataformas, sondas e FPSO.

As vantagens e desvantagens dos isolantes minerais Lã de rocha e Lã de vidro estão explicitadas na Tabela 14 [12] [15]:

Isolante	Vantagens	Inconvenientes
<b>Lã de Rocha</b>	Baixo custo, aproximadamente 7 €/m <sup>2</sup> para uma configuração de 100 mm de espessura de painéis. Os rolos têm um preço menor, podendo atingir 3,5 €/m <sup>2</sup>	Danos mecânicos e baixo desempenho térmico na presença de umidade
		Proteção necessária para a sua colocação
		Recurso não renovável
		Impacto na saúde e ambiental
		material inflamável
<b>Lã de Vidro</b>	Baixo custo, aproximadamente 7 €/m <sup>2</sup> para uma configuração de 100 mm de espessura.	Mau desempenho mecânico e mau desempenho térmico na presença de umidade
		Proteção limitada da estrutura em caso de incêndio
		Recurso não renovável
		Impacto na saúde e ambiental
		material inflamável

*Tabela 14: Vantagens e inconvenientes de isolantes minerais [12] [15]*

A partir dos valores de alguns parâmetros previamente definidos como relevantes e já quantificados nesse trabalho para os isolantes minerais (tópico 2.3.1.),

pode-se obter um diagrama visual de fácil comparação dos materiais (Figura 17) (Adaptado de [12] [15]):

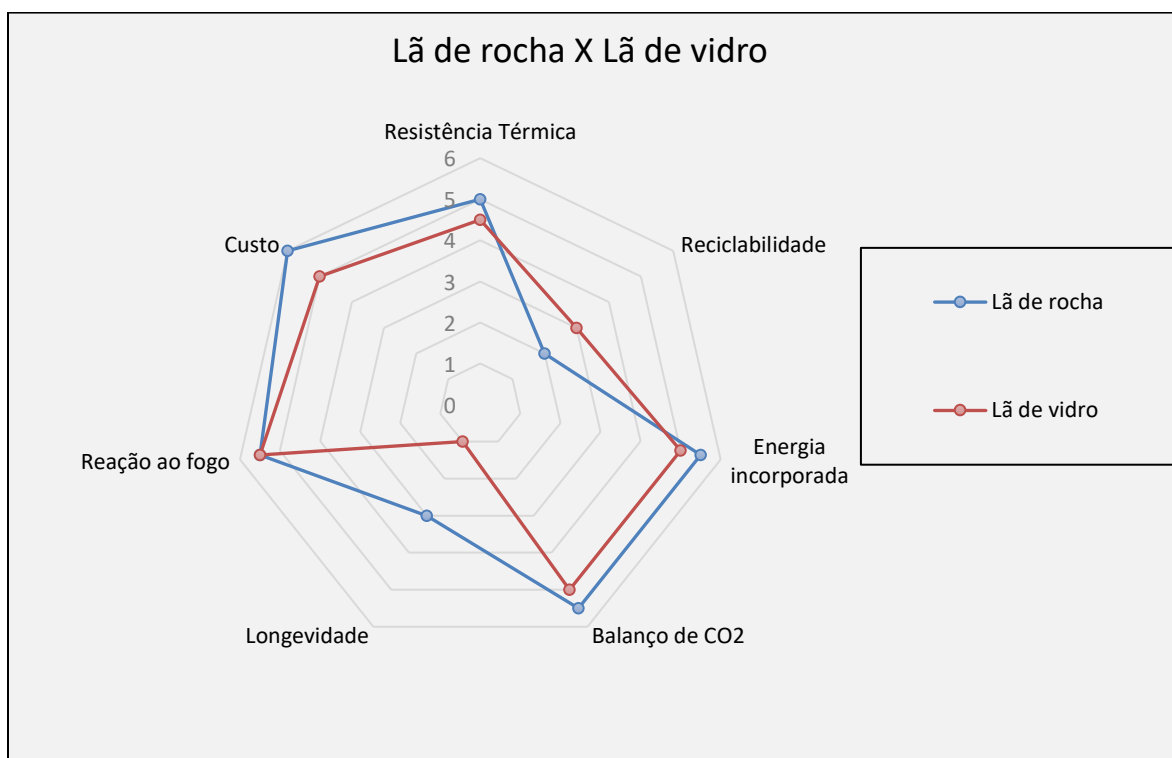


Figura 18: Diagrama radar Lã de rocha X Lã de vidro (Adaptado de [12] [15])

É evidente pelo gráfico radar gerado a partir dos parâmetros que o material que possui maior área possui mais características favoráveis ou grande peso em cada uma, o que torna mais fácil a discussão sobre pontos forte e fracos para cada material, auxiliando na escolha final de uso. É importante ressaltar que para o gráfico radar da Lã de rocha, utiliza-se as características associadas ao rolo, e não aos painéis. Isso se deve porque esse isolamento é aplicado de forma unânime em rolos nas indústrias de exploração *offshore*.

Para os novos isolantes não se pode avaliar de acordo o mesmo gráfico empregado para os isolantes minerais (Figura 18), pois seu custo, assim como a sua condutividade térmica, varia de acordo a espessura. Ainda assim, os isolantes térmicos inovadores podem ter suas características comparadas por meio de pontos positivos e

negativos. Na Tabela 15 seguem as vantagens e desvantagens para o Aerogel de Sílica e a tinta térmica [15] [21] [20] [22] [23] [24]:

Isolante	Vantagens	Inconvenientes
<b>Aerogel de Sílica</b>	Alta Flexibilidade, permitindo diversas formas de aplicação	Alto custo
	Aplicação fácil sem necessidade de pré moldar	
	Alta Resistência a compressão	Proteção necessária para a sua colocação
	Hidrofóbico	
	Reutilizável após inspeção	Alta variação de condutividade térmica
	material não inflamável	
<b>Tinta térmica</b>	Alta Flexibilidade, permitindo diversas formas de aplicação	Alto e variável custo de acordo espessura necessária
	Hidrofóbico	
	Fácil instalação e descarta proteção externa	requer cuidados específicos de armazenamento
	Facilita a inspeção de equipamentos e reparos	Alta Perda de material durante aplicação por jateamento
	material não inflamável	

*Tabela 15: Vantagens e inconvenientes de isolantes inovadores[15] [21] [20] [22] [23] [24]*

No caso do Aerogel de Sílica e tintas térmicas, tem-se uma variação significativa com a espessura de aplicação conforme a temperatura da superfície se altera, o que gera influências significativas no custo do isolante a ser adquirido para garantir a

qualidade do processo. A partir de pesquisa de mercado de custos dos materiais[20] [24], aerogel da marca *Pyrogel* e tinta térmica *Mascoat*, considerando a orientação desses fornecedores de camadas a serem aplicadas por temperatura da superfície, pode-se traçar um gráfico comparativo em relação a temperatura de operação da superfície a ser isolada (Figura 18) (adaptado de [20] [24] [6]):

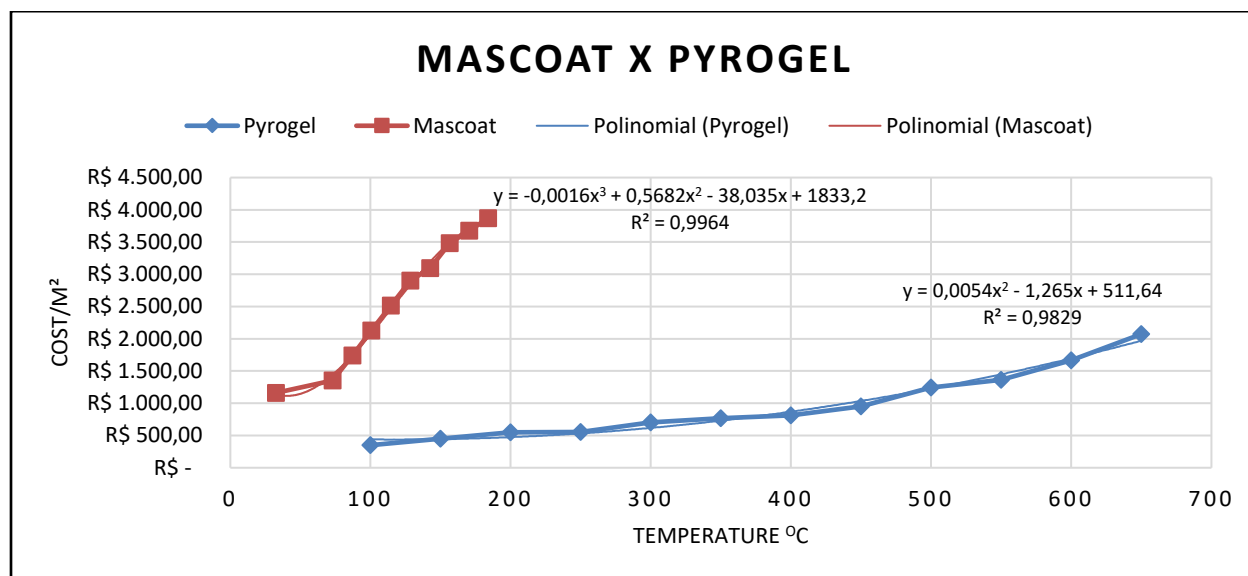


Figura 19: Gráfico custo/m² por temperatura entre Aerogel e Tinta térmica (adaptado de [20] [24] [6])

Nota-se pelo gráfico da Figura 19 a discrepância do custo de aquisição entre tintas térmicas e aerogéis a serem instalados em uma unidade *offshore*. Para temperaturas comuns de operação *offshore*, por volta de 100 °C, a discrepância de valores é de R\$ 2.500,00 por metro quadrado.

### 3. Considerações finais

A avaliação de isolamentos térmicos para uso em ambientes *offshore* é ainda um desafio considerando os diversos fatores que a operação de Óleo e Gás em alto mar envolve. Fatores aquém dos ligados diretamente a instalação e uso dos isolantes térmicos podem alterar procedimentos para seleção e aquisição dos materiais foco desse estudo. Entretanto, independente das unidades *offshore*, seja no Brasil ou em qualquer outra parte do mundo, os problemas envolvendo isolamento térmico, em especial os resultantes de corrosão sob isolamento, estão presentes. Diante dos fatores incontornáveis para esse problema (como umidade do ar, temperatura de operação e material dos equipamentos) se torna fundamental se fomentar o estudo e a discussão sobre isolantes térmicos com o potencial de mitigar o desenvolvimento de CUI.

Após a análise das características técnicas, a partir de critérios pré-estabelecidos dos isolantes minerais, ainda os mais utilizados por instalações *offshore* de exploração de petróleo, e dos isolantes térmicos apontados como futuro substitutos devido a tecnologia mais avançada no combate a corrosão sob isolamento, foram apresentados alguns esclarecimentos sobre cada uma das alternativas propostas:

A partir da interpretação dos dados do gráfico radar comparativo entre Lã de rocha e Lã de vidro (Figura 17), nota-se um equilíbrio entre os isolantes (áreas similares), porém com uma leve superioridade para lã de rocha, de acordo os critérios empregados nos estudos.

Apesar de cada empresa/indústria poder declarar suas próprias preferências de critérios a fim de orientar uma escolha, pode-se considerar a Lã de rocha uma escolha mais inteligente economicamente quando comparada com Lã de vidro, uma vez que os custos e longevidade são superiores ao material concorrente.

Entretanto, considerando casos de CUI, ambos são potenciais percussores do problema, já que no quadro de desvantagens para os isolantes minerais (Tabela 14), os pontos de danos mecânicos e resistência ao fator água estão mal avaliados. Dessa forma possíveis impactos podem abrir fendas que possibilitam a entrada de umidade e a não resistência do material a penetração de fluidos permitirá a infiltração até atingir a superfície metálica do equipamento.

Os isolantes sintéticos, cotados como novas tecnologias para o isolamento *offshore*, apresentam características bem distintas dos isolantes minerais.

A partir da curva que relaciona o custo/m<sup>2</sup> dos isolantes sintéticos com a temperatura de operação (Figura 18), nota-se a principal discrepância entre os materiais e um dos principais fatores para a sua escolha. Apesar disso, ambos são potenciais solucionadores do aparecimento de corrosão sob isolamento, pois ambos apresentam características hidrofóbicas, como avaliado pelo quadro comparativo (Tabela 15). Além disso, os isolantes sintéticos apresentam maior facilidade de inspeção já que suas respectivas aplicação e retirada são mais simples, especialmente no caso das tintas térmicas, uma vez que não demanda proteção externa após instalação.

Diante dos objetivos iniciais desse trabalho de investigar e comparar de forma mensurável os isolantes que são atualmente utilizados e os novos visando, especialmente, o combate a corrosão sob isolamento *offshore* encerra-se a avaliação desse estudo. É pertinente que os estudos na área prossigam para que as qualidades dos novos isolantes sejam testadas em ambientes controlados e no campo, além dos aprimoramentos em cima das suas falhas.

O trabalho *offshore* é um fator decisivo na contribuição para o fornecimento de energia e combustível para a sociedade moderna. O mercado, porém, ainda demanda de análises mais profundas dos custos envolvidos nas operações, a fim de valorizar os profissionais e baratear o fornecimento ao consumidor final. A análise de novos isolamentos que possam contribuir para redução de custos a longo prazo a partir da garantia de qualidade de processo e conservação das instalações é parte fundamental para o esse objetivo e impacta empresas e pessoas envolvidas diretas ou indiretamente.



#### 4. Referência Bibliográfica

- [1] Site Agência Nacional Do Petróleo (ANP): [www.anp.gov.br](http://www.anp.gov.br)
- [2] Site Petrobras: [www.petrobras.com.br](http://www.petrobras.com.br)
- [3] Correia, Carlos Alberto et. Al., FUNDAMENTOS DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO, Rio De Janeiro: Editora Interciência. 2ª Edição, 2004
- [4] CHEVRON U.S.A. Corrosion Under Insulation standard. Houston, U.S.A: 2016
- [5] CHEVRON U.S.A. Corrosion of Specific equipments. Houston, U.S.A: 2016
- [6] CHEVRON U.S.A. Thermal Insulation for Hot Lines, Vessels and Exchangers. Houston, U.S.A: 2016.
- [7] WEST LAKE CHEMICAL CORPORATION. Corrosion Under insulation. U.S.A: 2007.
- [8] CHEVRON U.S.A. Fundamentals of corrosion Mechanisms. Houston, U.S.A: 2006
- [9] Terzi, Rafael, Monitoramento da Corrosão interna em Plataformas Offshore. 2008. Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro.
- [10] Site BDMEP (Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa): [www.inmet.gov.br](http://www.inmet.gov.br).
- [11] Milcent, Paul Fernand, Noções de isolamento térmico de Tubulações. 2007. Universidade Federal do Paraná
- [12] Isolamento Térmico. 2006. Instituto politécnico de TOMAR -Escola Superior de Tecnologia.
- [13] Machado e silva, Alexandre, Análise comparativa do comportamento mecânico entre um aço ao carbono e um aço HTS após sofrerem corrosão. 2016. Dissertação de graduação – Universidade do Rio De Janeiro, Rio De Janeiro. 2016.
- [14] Site Mega arquivo: [megaarquivo.wordpress.com/2012/08/15/6519-bioquimica-o-processo-de-corrosao](http://megaarquivo.wordpress.com/2012/08/15/6519-bioquimica-o-processo-de-corrosao)

- [15] Maunel Fernandes Silva, Filipe, Estudo de materiais de isolamento térmico inovadores. 2013. Dissertação de Mestrado – Universidade do Porto, Portugal.
- [16] Site Você Constroi: voceconstroi.com.br
- [17] Decreto regulamentar num 34 95 Anexo 1. Qualificação dos materiais e dos elementos de construção. 1995
- [18] Site Mercado Livre: MercadoLivre.com.br/ladevidro
- [19] Antônio da Silva, Adão, Aerogel de Sílica: Caracterização Estrutural e Estudo da Propriedade da Água Absorvida na Superfície. 1992 – Tese de Doutorado – Universidade de São Paulo, São Carlos.
- [20] Site Aspen Aerogels: <http://www.aerogel.com>
- [21] Site Perfil Térmico:  
[www.perfiltermico.com.br/divisoos/materiais/revestimentos/mascoat-industrial-dti](http://www.perfiltermico.com.br/divisoos/materiais/revestimentos/mascoat-industrial-dti)
- [22] Site Mascoat: [intertintas.com/wp-content/uploads/2016/06/Fichatecnica-MascoatIndustrialDTI.pdf](http://intertintas.com/wp-content/uploads/2016/06/Fichatecnica-MascoatIndustrialDTI.pdf)
- [23] Site mascoat: [https://www.mascoat.com/evo\\_elements/pdf/MI-DTI\\_SpecSheet.pdf](https://www.mascoat.com/evo_elements/pdf/MI-DTI_SpecSheet.pdf)
- [24] Site Asphalt: <https://www.mascoat.com/asphalt-tank-case-study1.html>
- [25] Site Pintura airless Kenex:  
[https://www.cmv.com.br/bomba\\_pintura\\_airless\\_kenex.htm](https://www.cmv.com.br/bomba_pintura_airless_kenex.htm)
- [26] Site Hita: <http://www.hita.com.br/pt/industries/oil.aspx>