

VICTTÓRIA LUIZA RODRIGUES PORTELLA

ANÁLISE CRÍTICA DO *BUBBLE TEST* PARA A INDÚSTRIA DO ÓLEO E GÁS

**Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção
do diploma de Engenharia de Petróleo.**

SANTOS

2022

VICTTÓRIA LUIZA RODRIGUES PORTELLA

ANÁLISE CRÍTICA DO *BUBBLE TEST* PARA A INDÚSTRIA DE ÓLEO E GÁS

**Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção
do diploma de Engenharia de Petróleo.**

**Área de concentração: Produção de
Petróleo**

Orientador: Prof. Dr. Jean Vicente Ferrari

SANTOS

2022

FICHA CATALOGRÁFICA

Portella, Victória Luiza Rodrigues
ANÁLISE CRÍTICA DO BUBBLE TEST PARA A INDÚSTRIA DE
ÓLEO E GÁS / V. L. R. Portella -- São Paulo, 2022.
36 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo.

1. Corrosão 2. Inibidores de corrosão 3. Bubble test 4. Seleção de
inibidores I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica.
Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo II.t.

AGRADECIMENTOS

À minha família, por sempre apoiarem meus estudos. À minha mãe e meu pai por concederem condições para que eu pudesse me dedicar e incentivo nas horas difíceis. Aos meus avós por me ajudarem a chegar até aqui, seja me levando até a escola, ou cuidando de mim sempre que possível.

Aos também meus colegas e amigos de curso que estiveram comigo e me ajudaram nos momentos difíceis da graduação. Ao Guilherme Reis da Silva, à Gabryella Alves, à Denise Lidiane, à Dan Ni Lin, à Cecília Garcia, ao João Gabriel Teixeira, Júlia Corrêa e Lucas Lara por sempre me escutarem, ajudarem e acompanharem nos trabalhos em grupo. Aos meus colegas do módulo vermelho, Luís Gustavo Gonçaves, Gustavo Morishita, Guilherme Pegorario e Matheus Casagrandi, que me ajudaram nesse último período da faculdade para que pudesse finalmente me formar. Sem vocês não teria chegado até o fim.

Ao Capítulo Estudantil SPE da USP e a todos que fizeram parte da diretoria comigo por me proporcionarem uma experiência incrível de trabalho voluntário e muito aprendizado.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Jean Vicente Ferrai, por me ajudar e orientar nesse processo e ser um ótimo professor.

A todos que participaram da minha trajetória nesse período, muito obrigada.

RESUMO

A corrosão é um processo que danifica o material metálico, deteriorando-o, por ação química ou eletroquímica que pode envolver também ação mecânica. Ela afeta diversos setores da indústria, principalmente a indústria petrolífera, pois geralmente são usados tubos metálicos, como de aço carbono, durante a produção e transporte de petróleo. O dano aos tubos é um grande problema para a indústria, então é necessário realizar a mitigação da corrosão. O uso de inibidores de corrosão é um dos métodos mais utilizados para evitar a corrosão. Assim, é essencial uma seleção entre diversas substâncias para que uma possa trabalhar como um inibidor com alta eficiência. Para isso são realizados testes iniciais, conhecidos como screening tests, sendo o bubble test um dos mais usados. O trabalho tem como objetivo analisar criticamente os trabalhos publicados que utilizaram o bubble test, por meio de uma revisão bibliográfica, apresentando suas vantagens, limitações e importância para a indústria do petróleo, pois apesar de um experimento fácil de realizar, não tem a capacidade de simular todas as condições do campo.

Palavras-chave: corrosão, inibidor, *bubble test*, óleo e gás

ABSTRACT

Corrosion is a process that damages metallic materials, deteriorating them by chemical or electrochemical action, which may also involve mechanical action. It affects several sectors of the industry, especially the oil industry, as metallic tubes, such as carbon steel, are usually used during the production and transport of oil. Damage to pipes is a big problem for the industry, so it is necessary to mitigate corrosion. Corrosion inhibitors are one of the most used methods to avoid corrosion. Thus, a selection among several substances is essential so that one can work with an inhibitor with high efficiency. For this, initial tests, known as screening tests, are performed, with the bubble test being one of the most used. This work aims to critically analyze published works that used the bubble test through a bibliographic review, presenting its advantages, limitations, and importance for the oil industry because although it is an easy experiment to perform, it cannot simulate all field conditions.

Keywords: corrosion, inhibitor, bubble test, oil and gas

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ilustração do mecanismo por traz dos inibidores por filme protetor. Fonte: UNDHEIM (2021)	19
Figura 2 - Ilustração do esquema de equipamentos do <i>bubble test</i> . Fonte: PAPAVINASAM (2014).....	20
Figura 3 - Foto de uma montagem padrão dos equipamentos de um teste LPR. Fonte: UNDHEIM (2021).....	23
Figura 4 - Ilustração do processo de avaliação de desempenho de inibidores. Fonte: BIERI et al. (2006).....	25
Figura 5 - Mapa de palavras relevantes em publicações com temas relacionados a corrosão, aço carbono e inibidores de corrosão. Fonte: SciVal (2022).....	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Constantes K para cálculo de perda de massa (PAPAVINASAM, 2014)	22
Tabela 2 – Compilado dos resultados obtidos.....	31

LISTA DE ABREVIASÕES

BT *Bubble Test*

RCE *Rotating Cylinder Electrode* ou Eletrodo Cilíndrico Rotatório

LPR *Linear Polarization Resistance* ou Resistência de Polarização Linear

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
1.1. Organização do trabalho	11
2. OBJETIVOS.....	12
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
3.1. Importância da corrosão metálica na indústria de óleo e gás	13
3.2. Princípios da corrosão	13
3.3. Mecanismos da corrosão	14
3.4. Proteção contra corrosão.....	15
3.4.1. Escolha dos materiais - Ligas	15
3.4.2. Proteção catódica	15
3.4.3. Uso de revestimentos.....	16
3.4.4. Inibidores de corrosão	16
3.5. Classificação qualitativa dos inibidores de corrosão.....	17
3.5.1. Inibidores condicionadores ambientais	17
3.5.2. Inibidores de interface.....	17
3.6. Seleção de inibidores	19
3.7. <i>Bubble test</i>.....	19
3.7.1. Ensaio de perda de massa	21
3.7.2. Testes eletroquímicos	22
3.7.3. Procedimentos do <i>bubble test</i>.....	24

3.7.4. Propriedades secundárias.....	25
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	27
5. RESULTADOS.....	29
6. CONCLUSÃO	33
 6.1. Contribuições do trabalho.....	33
 6.2. Sugestões para trabalhos futuros	33
REFERÊNCIAS.....	34

1. INTRODUÇÃO

A corrosão pode ser definida como sendo a tendência espontânea do metal, produzido e conformado, em reverter ao seu estado original, de energia inferior. Outra definição aceita é a que, a corrosão é a deterioração que ocorre quando um material reage com o ambiente. O estudo desse processo é de grande importância para a indústria de óleo e gás dado que a maior parte de seus equipamentos e estruturas são feitos de metais. A adversidade deste processo é a perda de material, ou seja, partes do sistema começam a se corroer e podem ocorrer vazamentos de óleo, paradas de produção ou até consequências negativas para o meio ambiente (AFFONSO; ANDRADE, 2017).

Apesar das taxas de corrosão variarem de acordo com as condições de cada campo, a presença da combinação de dióxido de carbono (CO_2), gás sulfídrico (H_2S) e água é um dos principais fatores que originam a corrosão em tanque e dutos de petróleo nas três diferentes áreas (produção, transporte e refino). Então, para poder proteger os equipamentos usados na indústria de hidrocarbonetos, são comumente usados os inibidores de corrosão. O uso de inibidores, como os formadores de filmes, tem como objetivo reduzir a taxa de corrosão pela adsorção na superfície do metal e sua eficiência é dada pela concentração e o tempo de contato com a superfície (RAJENDRAN, 2014).

Os inibidores possibilitam gerenciar a corrosão interna de dutos, tornando-se então crucial a elaboração de testes para avaliar a eficácia desses produtos. A eficiência da mitigação da corrosão depende da escolha do produto químico que agirá como inibidor e das condições que esse produto estará no campo. Logo a seleção dos inibidores mais eficazes para aplicações práticas requer testes que simulam as condições próximas ao ambiente real. Existem dois tipos de testes para qualificação de inibidores, os testes chamados de pilotos e os testes laboratoriais. Os testes pilotos são demorados, trabalhosos e caros, além disso não garantem de forma segura que a seleção será bem feita, ou seja que o inibidor mais adequado será escolhido. Portanto, é vantajoso realizar testes laboratoriais antes, já que o inibidor será selecionado a partir de um grande número de produtos químicos comercialmente disponíveis. Assim, é viável descartar os produtos que se mostram inapropriados já

no teste laboratorial e identificar quais produtos são mais promissores para mitigar a corrosão (SIVOKON; ANDREEV, 2012).

Um tipo de teste laboratorial é o *bubble test* (BT). Segundo Papavinasam (2014), esse teste é uma variação do teste estático, podendo ser realizado com os mesmos equipamentos. A composição e a temperatura podem ser simuladas e a taxa de fluxo da bolha de gás pode ser variada no BT. Logo, o tamanho e a velocidade das bolhas de gás são controlados com precisão e o único movimento do fluido é criado por elas, permitindo a análise do produto em condições específicas. Realizar uma análise crítica dessa técnica torna-se relevante para permitir verificar se esse teste é adequado, suas vantagens, desvantagens e mostrar possíveis lacunas na utilização exclusiva dele.

1.1. Organização do trabalho

Esse trabalho está dividido em 6 capítulos. No primeiro capítulo é introduzido o tema e sua importância para indústria. Seguindo pelo segundo capítulo determinando os objetivos e o tipo de pesquisa científica que será realizada. No terceiro capítulo será realizado a revisão bibliográfica do tema, tocando em pontos teóricos que abordam o tema e analisando criticamente artigos que já abordaram tópicos relacionados. A metodologia empregada será apresentada no Capítulo 4. Os resultados são apresentados no Capítulo 5 e a conclusão do trabalho no Capítulo 6. E por fim, são apresentadas as referências utilizadas durante o processo.

2. OBJETIVOS

O *bubble test* é um experimento realizado frequentemente para a seleção de potenciais inibidores de corrosão na exploração e transporte de petróleo. O objetivo deste trabalho é analisar criticamente o uso do *bubble test* na indústria do óleo e gás e verificar até que ponto é adequado, suas vantagens, desvantagens e mostrar possíveis lacunas na utilização exclusiva dele em pesquisas.

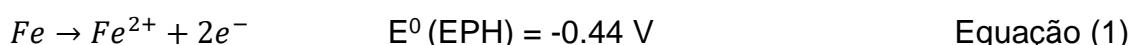
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Importância da corrosão metálica na indústria de óleo e gás

A extração de petróleo visa explotar hidrocarbonetos de rochas sedimentares localizadas no subsolo para emprego como fonte de energia. Uma infraestrutura segura é necessária para explorar os poços a quilômetros de distância do solo, onde encontram-se os reservatórios. A menos que o meio seja suficientemente agressivo, não permitindo o uso dos aços-carbonos, geralmente os equipamentos de exploração e produção de óleo e gás são feitos com este material. Dado que essas estruturas estarão em contato com elementos como água, dióxido de carbono e ácido sulfúrico em conjunto, problemas como a corrosão dos materiais podem ocorrer. A grandeza do problema da corrosão nos sistemas petrolíferos pode ser observada pois, em torno de 70% das falhas estão relacionadas à corrosão, sendo uma das principais causas, das quais 58% estão relacionadas à corrosão interna. E vazamentos podem derivar dessas falhas, sendo que aproximadamente 40% dos vazamentos são causados em consequência da corrosão. Além da importância para manutenção da estabilidade do sistema, a corrosão é significativa também na contribuição de gastos para a indústria do petróleo. O custo anual de capital associado à proteção contra corrosão chega até 8% dos custos anuais totais da indústria, totalizando mais de US\$ 320 milhões para sistemas de *onshore*. Já nos sistemas *offshore*, os custos são ainda maiores, devido à dificuldade de reparar e substituir equipamentos ser maior (PAPAVINASAM, 2014).

3.2. Princípios da corrosão

Segundo Muthukumar (2014), há dois princípios seguidos para a ocorrência da corrosão: termodinâmicos e os eletroquímicos. A termodinâmica indica se a reação eletroquímica da corrosão é teoricamente factível ou não, por meio da espontaneidade da direção da reação. Consequentemente, é viável analisar as propriedades cinéticas da reação eletroquímica, que determinam o comportamento do processo corrosivo. Essas reações podem ser representadas por reações parciais, a oxidação (anódica) e redução (catódica) do metal, ambas ocorrendo simultaneamente, principalmente na interface metal-ambiente e são dadas pelas Equações (1) e (2):

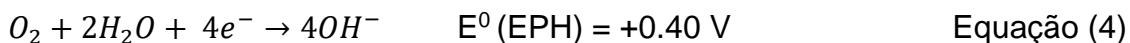




E devido aos potenciais padrão de redução – $E^0(\text{EPH})$ – da série eletroquímica, resultando na Equação global (3) a seguir, considerando um meio ácido:



Além da reação catódica apontada na Equação (2), a reação catódica de redução do gás oxigênio também é muito importante nos processos corrosivos, tendo como produto íons hidroxila (OH^-), segundo a Equação (4) representativa para meio neutro ou alcalino.



3.3. Mecanismos da corrosão

Determinado que a maior fonte de falhas se dá por corrosão interna, é fundamental definir como funcionam os mecanismos dessa atividade. Segundo Nalli (2010) e Magalhães et al. (2008), a corrosão causada por CO_2 , que também pode ser chamada de *Sweet Corrosion*, tem o seguinte mecanismo: em elevadas pressões parciais de CO_2 , este gás se mistura com a água, dissolvendo-se e formando o ácido carbônico (H_2CO_3), tornando o fluido ácido, reduzindo o valor do pH. A redução do pH aumenta a taxa de corrosão, devido a maior fornecimento de íons H^+ (Equação 2) o que gera como produto de corrosão os íons ferrosos (Equação 1). Ainda, em temperaturas mais elevadas, a formação de incrustação de carbonato de ferro ($FeCO_3$) pode ser favorecida, criando um filme protetor e reduzindo a taxa de corrosão que, porém, pode impedir o fluxo. A corrosão pode aumentar na presença de oxigênio e ácidos orgânicos que dissolvem na incrustação protetora de carbonato de ferro e previnem a formação de mais crostas. Portanto esse tipo de corrosão é bastante influenciada pela temperatura e pH.

Magalhães et al. (2008) também pontuam outros mecanismos que influenciam a corrosão por CO_2 , como pressão parcial de CO_2 , composição da água, fluxo e outros parâmetros operacionais. Com destaque para a pressão parcial que aumenta a taxa de corrosão, quando ela também aumenta.

Já a corrosão por ácido sulfúrico (H_2S), que também pode ser chamada de *Sour Corrosion*, há preocupação com o ataque de hidrogênio no metal dos equipamentos, pois isso faz com que o metal se fragilize. O mecanismo, assim como de CO_2 , é devido a presença de água, pois quando dissolvido, o H_2S forma um ácido fraco (HS^-), mas também uma fonte de íons de hidrogênio que são corrosivos. Esse tipo de corrosão é influenciada pela pressão, temperatura e pH (NALLI, 2010; JAYASINGHE, 2021).

3.4. Proteção contra corrosão

Com o aumento da demanda do óleo e gás, são perfurados cada vez mais poços profundos e consequentemente em ambientes mais corrosivos e assim, há a demanda de encontrar novas soluções para evitar falhas e acidentes (GARVERICK, 2011). Segundo Roberge (2000), os principais métodos de controlar ou evitar a corrosão são: escolha de materiais, proteção catódica, proteção anódica, uso de revestimentos e uso de inibidores de corrosão. Este trabalho foca um teste para a seleção de inibidores, sendo dedicado tópicos da revisão bibliográfica para eles (a partir do item 3.4.4).

3.4.1. Escolha dos materiais - Ligas

A seleção da liga é dada por diversas condições como: resistência a corrosão geral, resistência a ataques localizados e corrosão sob tensão, pH, severidade ambiental, entre outros. A escolha da composição do aço é normalmente feita pelo projetista dos dutos (GARVERICK, 2011). Muthukumar (2014) menciona que a escolha de materiais mais resistentes ocorreu pelo aumento da demanda quando da migração de produção para ambientes mais corrosivos. Neste sentido, foram desenvolvidas ligas de alta resistência contendo como por exemplo, cromo (Cr) e níquel (Ni).

3.4.2. Proteção catódica

A proteção catódica é uma forma de redução ou prevenção da corrosão que tem duas formas de ser aplicadas. A escolha do método a ser utilizado depende de considerações técnicas e financeiras. Esse método utiliza ânodos de sacrifício, no qual um metal ativo, como o zinco por exemplo, é usado como ânodo de sacrifício e entra em contato com o meio corrosivo e o metal que deve ser protegido. Com o

contato entre esses metais, é formado uma célula galvânica, com terminais em curto-círcito. E a proteção por corrente impressa é dado por uma fonte externa de corrente contínua que é conectada à estrutura a ser protegida e ao ânodo, que pode ser composto de grafite, sucata de ferro, platina ou ligas de chumbo-prata. Neste caso, o terminal negativo da fonte de alimentação é ligado à estrutura a ser protegida (cátodo). Vale lembrar que os sistemas de ânodo de sacrifício e o sistema de anodo de corrente impressa são complementares entre si (MUTHUKUMAR, 2014).

3.4.3. Uso de revestimentos

A corrosão pode ser evitada separando o metal do ambiente corrosivo usando revestimentos protetores. Há dois tipos de revestimentos, os metálicos e os não metálicos, e ambos devem ter como características: uma boa resistência à corrosão, perfeita aderência ao metal subjacente e continuidade para poder cobrir completamente a superfície metálica. A descontinuidade no revestimento resultará em um ataque localizado. Podem-se citar exemplos de revestimentos metálicos o latão, o cromo, o ouro e o zinco; e de revestimentos não metálicos os esmaltes vítreos e o revestimento de cimento. Os revestimentos de conversão química são como vernizes, tintas, esmaltes e lacas (MUTHUKUMAR, 2014). É importante destacar que os sistemas de proteção contra a corrosão catódica (Seção 3.4.2), normalmente são combinados com o uso dos revestimentos.

3.4.4. Inibidores de corrosão

Inibidores de corrosão são substâncias químicas que, quando compatíveis com o ambiente, minimizam a corrosão, mesmo adicionadas em pequenas quantidades, geralmente na ordem de partes por milhão (ppm). Apesar de partículas sólidas poderem impedir o acesso dos inibidores, em condições de deposição, o uso de inibidores ainda é o método mais confiável e usado nos diversos setores da indústria do petróleo. A operação desses setores como produção, transporte e refino do petróleo não seriam possíveis sem a atividade de inibidores (FINK, 2012; PAPAVINASAM, 2014). Na área de óleo e gás os inibidores formadores de filmes são os mais utilizados.

A composição destes inibidores é composta normalmente por moléculas orgânicas polares e ativas na superfície, na sua maioria são derivados de aminas ou

sais de amina, podendo ter propriedades tensoativas. Eles são aptos a interagir com interfaces óleo-água, água-gás, óleo-gás, metal-óleo, metal-água e metal-gás. Em geral, a eficiência aumenta com o aumento na concentração de inibidor (PAPAVINASAM, 2014). Segundo Fink (2012), a eficácia dos inibidores é promovida pela garantia de expelir a fase aquosa corrosiva da superfície do metal e, desse modo, impedir a corrosão.

Apesar dos inibidores serem frequentemente classificados de acordo com a solubilidade, por causa das concentrações serem mais altas nas interfaces do que no resto do volume do tubo, na prática, são classificados qualitativamente. Assim como Muthukumar (2014), Papavinasam (2014) e Undheim (2021) os classificam, como por exemplo, condicionadores ambientais e de interface.

3.5. Classificação qualitativa dos inibidores de corrosão

3.5.1. Inibidores condicionadores ambientais

Os inibidores chamados de condicionadores ambientais controlam a corrosão removendo as espécies corrosivas do meio (MUTHUKUMAR, 2014). Uma espécie comum eliminada por estes inibidores é o oxigênio, pelo uso dos sequestrantes de oxigênio. Portanto, neste caso a reação catódica do oxigênio representada pela Equação (4), já apresentada (PAPAVINASAM, 2014), é reduzida.

3.5.2. Inibidores de interface

Os inibidores de interface controlam a corrosão formando um filme na interface entre o metal e o ambiente e por isso, também são conhecidos como formadores de filmes. Estes podem ser classificados em inibidores de vapor e de fase líquida, que por sua vez, pode ser classificado entre anódicos, catódicos ou mistos (MUTHUKUMAR, 2014).

Os inibidores anódicos são os mais usados em soluções quase neutras, onde o produto da corrosão é pouco solúvel, como óxidos, hidróxidos ou sais. Eles formam ou facilitam a formação de filmes passivos que inibem a reação de dissolução do metal, ou seja, inibem a reação anódica. Porém em concentrações insuficientes, pode acarretar a aceleração da corrosão, pois enquanto o metal não passa do estado ativo para passivo, a adição de inibidor aumenta a corrosão. Até que o metal finalmente

chegue ao ponto crítico, passando a ser passivo, a corrosão aumenta com a adição desse tipo de inibidor (MUTHUKUMAR, 2014; PAPAVINASAM, 2014).

Já os inibidores catódicos são usados em soluções ácidas ou alcalinas. Eles controlam a corrosão diminuindo a taxa da reação eletroquímica de redução ou precipitando seletivamente nas áreas catódicas do substrato metálico. Quando usados em soluções ácidas, a reação catódica que é impedida é a de redução de íons hidrogênio, seguida da formação de gás hidrogênio, como mostram as Equações (5) e (6):



E quando usados em soluções alcalinas ou quase neutras, a reação catódica impedida é a redução do oxigênio já apresentada (Equação 4). Neste caso, ânions inorgânicos, como fosfatos, silicatos e boratos formam películas protetoras que diminuem a taxa da reação catódica e a difusão do oxigênio para a superfície do metal (MUTHUKUMAR, 2014).

No entanto, a maior parte dos inibidores são compostos orgânicos, que não tem uma característica específica de atuarem como anódicos ou catódicos, sendo assim classificados como inibidores mistos. A eficácia dos inibidores mistos estará relacionada então com o ponto de adsorção deles e o quanto eles recobrem a superfície do metal. Esses tipos de inibidores protegem o metal de três formas diferentes: pela adsorção física, pela quimissorção e com a formação de filme. Sendo a adsorção física o bloqueio físico da superfície metálica, impedindo o contato com o meio, que é pouco eficaz, pois ocorre com rapidez, mas também por um curto período. A quimissorção ou adsorção química é a interação entre inibidor e a superfície metálica que acontece com a formação de uma ligação mais forte que a adsorção física, sendo assim, mais eficaz. E por fim, quando o inibidor é adsorvido quimicamente, ele pode sofrer uma reação que forma um filme protetor. A inibição por filme protetor é a forma de inibir a corrosão mais usada na indústria do petróleo. (MUTHUKUMAR, 2014; PAPAVINASAM, 2014).

Pode-se considerar que estes filmes de proteção podem funcionar como surfactantes, pois sua estrutura molecular possui uma cauda com caráter apolar e a cabeça com caráter mais polar. Ou seja, uma parte hidrofílica polar, que é adsorvida no metal, e uma parte hidrofóbica não polar, que fornece a barreira. Isso pode ser observado na Figura 1 a seguir.

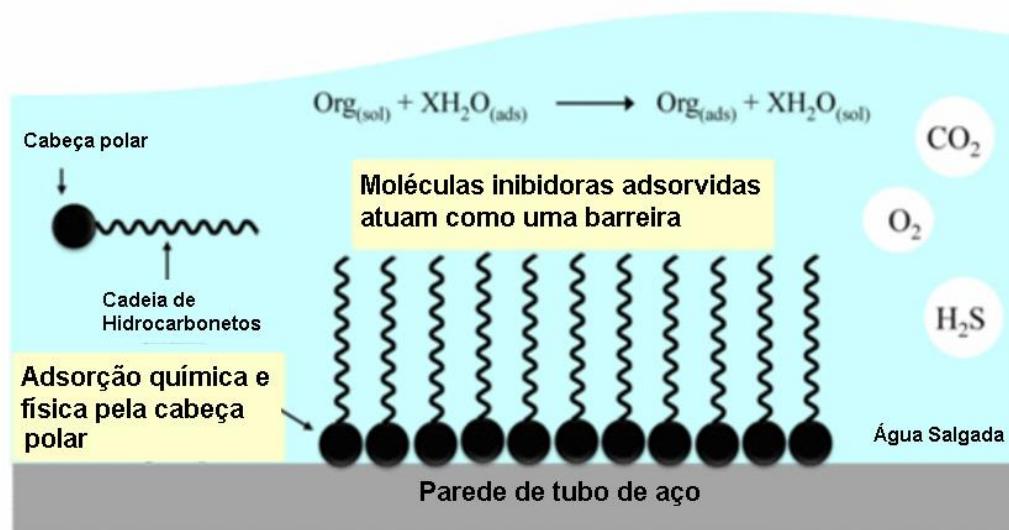


Figura 1 - Ilustração do mecanismo por trás dos inibidores por filme protetor. Fonte Adaptada: UNDHEIM (2021)

3.6. Seleção de inibidores

Apesar do grande número de estudos envolvendo os inibidores, a maior parte do que se conhece têm origem de experimentos empíricos, tanto nos laboratórios, quanto no campo, dificultando o entendimento de seus desempenhos (ROBERGE, 2000). Com isso é um grande ofício realizar uma seleção para um inibidor. Segundo Papavinasam (2014), a seleção do inibidor é dada essencialmente por 3 etapas: avaliação da eficiência, avaliação das propriedades, classificação com relação aos custos e outras considerações. Um tipo de avaliação de eficiência de inibidores é o *bubble test*, objeto deste trabalho.

3.7. *Bubble test*

Vários testes diferentes podem ser realizados para realizar uma seleção de inibidores e avaliar seu grau de desempenho (UNDHEIM, 2021). Esses testes são importantes para avaliar a suscetibilidade dos materiais a corrosão, já que muitas

vezes não é viável monitorar a corrosão diretamente em campo. O teste estático, por exemplo, é um teste básico para avaliar o desempenho de um inibidor na ausência de fluxo, simulando variáveis como composição e temperatura. O resultado é dado por meio da medida de perda de massa ou por técnicas químicas (PAPAVINASAM, 2014).

O *bubble test*, também conhecido como *kettle test*, é uma modificação do teste estático, utilizando o mesmo equipamento, porém controlando a velocidade e tamanho de bolhas de gás que são introduzidas, ou seja, é simulado um fluxo. Além disso, há simulação da composição química do meio e das bolhas de gás e a simulação da temperatura. A entrada do gás que causa a corrosão (geralmente CO₂, pois H₂S é uma substância com alta toxicidade) é feita por meio da inserção de tubos de vidro na tampa de um recipiente fechado por meio de bolhas de gás. E para cada teste, duas ou mais amostras são suspensas por um fio de plástico ou por sondas para que não entrem em contato com as paredes do frasco ou as outras amostras (PAPAVINASAM, 2014; 2013). O desenho esquemático do BT é mostrado na Figura 2 a seguir:

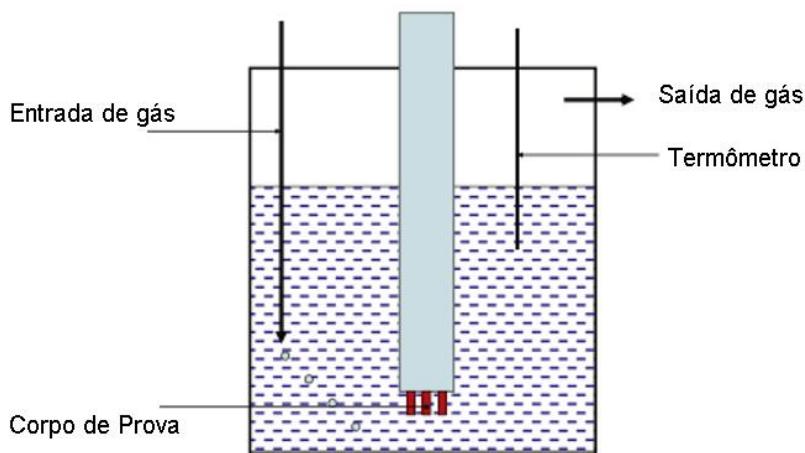


Figura 2 - Ilustração do esquema de equipamentos do *bubble test*. Fonte Adapatado: PAPAVINASAM (2014)

O *bubble test* não é um teste sofisticado, porém tem suas vantagens, como a de poder ser preparado com facilidade e de ser empregado com rapidez em uma grande quantidade de amostras. A principal vantagem de realizar testes de laboratório como esse, é poder controlar muitas variáveis que não são possíveis de serem controladas em campo, facilitando a investigação da influência de uma variável individualmente na corrosão geral. Contudo, é preciso levar em consideração que a capacidade desse teste é limitada, em virtude do fato que, o fluxo do fluido que é

fornecido tem taxas muito menores do que as dos fluxos reais encontradas nos dutos (SIVOKON; ANDREEV, 2012 ; PAPAVINASAM, 2014).

Os testes de taxa de eficiência dos inibidores são simulações em pequena escala, por isso, o ambiente do teste deve estar o mais próximo possível das condições reais para obter um resultado confiável (UNDHEIM, 2021). O que não é possível obter com o BT, já que o único fluxo que está sendo introduzido é pelas bolhas de gás, não realizando mudanças na pressão.

Segundo Papavinasam (2013; 2014), a metodologia mais adequada para simular as condições do ambiente do campo é a de gaiola rotativa, porém, as taxas de corrosão em testes de gaiola rotativa são medidas geralmente apenas pelo princípio de perda de massa. Já o BT, em uma mesma montagem de experimento, pode tanto usar dos princípios dos ensaios de perda de massa, como o uso dos testes eletroquímicos utilizando equipamentos e medições do *Linear Polarization Resistance* (LPR) descritos na Seção 3.7.2.

Além de investigar a eficiência do inibidor, o BT também investiga a cinética da proteção. Uma vez que, inibidores que levam muito tempo para formar as películas protetoras podem futuramente levar a uma condição de proteção mais desfavorável, pois a integridade do duto poderá ficar sujeita a períodos maiores do que o desejável sem proteção. Por exemplo, caso ocorram variações de vazão que gerem tensões de cisalhamento suficientes para danificar o filme formado em algum trecho do duto, um inibidor com uma boa cinética, ou seja, que garanta uma refilmagem rápida, pode manter a proteção do duto. Agora, os inibidores que levam mais tempo para formar o filme acabam permitindo que o aço fique exposto, o que em médio ou longo prazo pode comprometer a integridade do duto (MAGALHÃES et al., 2008).

3.7.1. Ensaio de perda de massa

A eficiência do inibidor analisada pelos princípios de perda de massa é realizada por meio de corpos de prova, também chamados de cupons, expostos a um ambiente corrosivo por um período de tempo. Para essa medição, as amostras, ou cupons, são limpos e pesados antes e depois do teste. A taxa de corrosão é calculada então com a seguinte fórmula da Equação (7):

$$CR = \frac{K \cdot W}{A \cdot t \cdot D} \quad \text{Equação (7)}$$

Onde K é uma constante que depende da unidade de medida da taxa de corrosão, cujos valores estão mostrados na Tabela 1 a seguir, W é a quantidade de massa perdida em gms, A é a área de superfície da amostra em cm^2 , t é a duração da exposição da amostra em horas e D é a densidade da amostra em g/cm^3 (PAPAVINASAM, 2014).

Tabela 1 - Constantes K para cálculo de perda de massa.

Unidade Taxa de Corrosão	K
Milhas por ano (mpy)	$3,45 \times 10^6$
Polegadas por ano (ipy)	$3,45 \times 10^3$
Polegadas por mês (ipm)	$2,87 \times 10^2$
Milímetros por ano (mm/y)	$8,76 \times 10^4$
Micrometros por ano ($\mu\text{m}/\text{y}$)	$8,76 \times 10^7$
Picômetros por segundo (pm/s)	$2,78 \times 10^6$
Miligramas por decímetro quadrado por dia (mdd)	$2,40 \times 10^6 \times D$
Microgramas por metro quadrado por segundo ($\mu\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)	$2,78 \times 10^6 \times D$
Gramas por metro quadrado por hora ($\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$)	$1,00 \times 10^4 \times D$

Fonte Adaptado: PAPAVINASAM (2014)

3.7.2. Testes eletroquímicos

A eficiência do inibidor também pode ser medida por princípios da eletroquímica. Quando um eletrodo, por meio de dispositivo externo é afastado do potencial de corrosão, diz-se que está polarizado. Por esta razão, a maioria das técnicas eletroquímicas são chamadas de técnicas de polarização (PAPAVINASAM, 2014).

Acoplando um sistema de eletrodos a um potenciómetro e um medidor de corrente, é possível medir a aplicação de um sinal eletroquímico à amostra e a resposta do eletrodo a esse sinal. Os eletrodos usados serão o eletrodo de trabalho, o contra-eletrodo e o eletrodo de referência, além também do eletrólito condutor, com todos esses elementos é representado um circuito elétrico geral fechado. Deste modo, o eletrodo de trabalho retém a amostra de metal onde a corrosão está sendo

analizada, o contra-eletrodo introduz ou remove o excesso de corrente no circuito e o eletrodo de referência mede o potencial do eletrodo de trabalho (UNDHEIM, 2021).

O potencial de um eletrodo isolado não pode ser medido. Assim, somente a diferença entre dois eletrodos pode ser medida. Por esse motivo, são usados eletrodos de referência com potenciais estáveis e reproduzíveis como os de Prata-Cloreto de Prata ou de Calomelano saturados com cloreto de potássio (KCl). O eletrodo trabalho é o eletrodo primário, onde se mede a taxa de corrosão (UNDHEIM, 2021, PAPAVINASAM, 2014). Com este sistema de medida, a técnica de resistência de polarização linear (LRP) é uma das mais utilizadas por ser não destrutiva pois polariza o eletrodo em poucos milivolts (10 mV) do potencial de corrosão. A taxa de corrosão pode ser determinada instantaneamente com essa técnica.

Uma ilustração da montagem do sistema de medida eletroquímica pode ser vista na Figura 3.



Figura 3 - Foto de uma montagem padrão dos equipamentos de um teste eletroquímico com célula da marca Gamry. Fonte Adaptado: UNDHEIM (2021)

Uma limitação do método *Bubble Test* com o uso do LPR é que ele não fornece informações sobre o efeito da tensão de cisalhamento no desempenho de um determinado inibidor de corrosão (ABBASOV et al., 2014). Arismendi e Ferrari (2019) também citam que para simular efeitos de fluxo sobre a corrosão na área de óleo e gás, o BT normalmente não é considerado. O LPR pode ser aplicado em outras configurações de teste também, como por exemplo em equipamentos de teste estático, ou então como os testes eletroquímicos realizados por Junior (2021), que

utilizaram com autoclave, porém tiveram muita dificuldade de isolar os eletrodos, comprometendo o resultado do teste, o que não acontece quando acoplado ao BT.

3.7.3. Procedimentos do *bubble test*

Como dito anteriormente, o *bubble test* é um teste preliminar na qualificação dos inibidores. As células deste teste são equipadas com suportes que permitem a inserção do eletrodo de trabalho (metal) diretamente na fase aquosa, já que sistemas contendo água/hidrocarbonetos também podem ser testados, impedindo que ele seja molhado pela fase de hidrocarboneto, assegurando uma melhor reprodutibilidade do teste (SIVOKON; ANDREEV, 2012).

O procedimento para o experimento tanto para o BT, com ou sem LPR, pode seguir o descrito a seguir. Primeiramente, é de extrema importância que antes de iniciar o ensaio, além dos cupons, a vidraria também seja bem limpa, pois até em pequenas quantidades vestígios residuais da salmoura de testes anteriores podem afetar o resultado, visto que é uma simulação em pequena escala. Depósitos remanescentes menores que 1 ppm já podem contaminar e alterar os produtos finais. Após a limpeza dos equipamentos, inicia-se o monitoramento da taxa de corrosão não inibida (na ausência do inibidor) por um mínimo de 2 horas ou até que a linha de base da taxa de corrosão esteja estável. Em seguida é injetado o inibidor de corrosão na fase de hidrocarbonetos para gerar a concentração de inibidor alvo, enquanto registra a taxa de corrosão para estabelecer uma curva de resposta, então é registrado por 8 horas a taxa de corrosão com a introdução do inibidor. A concentração de inibidor pode ser aumentada após 8 horas, e demais adições são feitas quando a taxa de corrosão se estabiliza (aproximadamente 10% ao longo de um período de 60 min), porém não se deve passar mais que 12 horas para até a próxima adição (ABDELMOEZA et al., 2020). Para o LPR será medida a resistência a reação de corrosão, utilizando técnicas eletroquímicas, já para o BT será medida a perda de massa, utilizando técnicas gravimétricas (VESPA, 2017).

Além do *bubble test*, para consolidar uma avaliação e desempenho de um inibidor com objetivo de seu uso em campo, é necessário realizar uma série de outros testes laboratoriais. Isso é necessário pois, além de cada teste avaliar um atributo de desempenho específico, não é possível desenvolver um único teste que simule todas

as condições de campo em laboratório. Um exemplo típico do processo é mostrado na Figura 4. É possível observar que esse é um processo contínuo, uma vez que o conhecimento adquirido em cada estágio do ciclo de desenvolvimento fornece uma nova informação que é usada em atividades futuras como a síntese de novos inibidores de corrosão (BIERI et al., 2006).

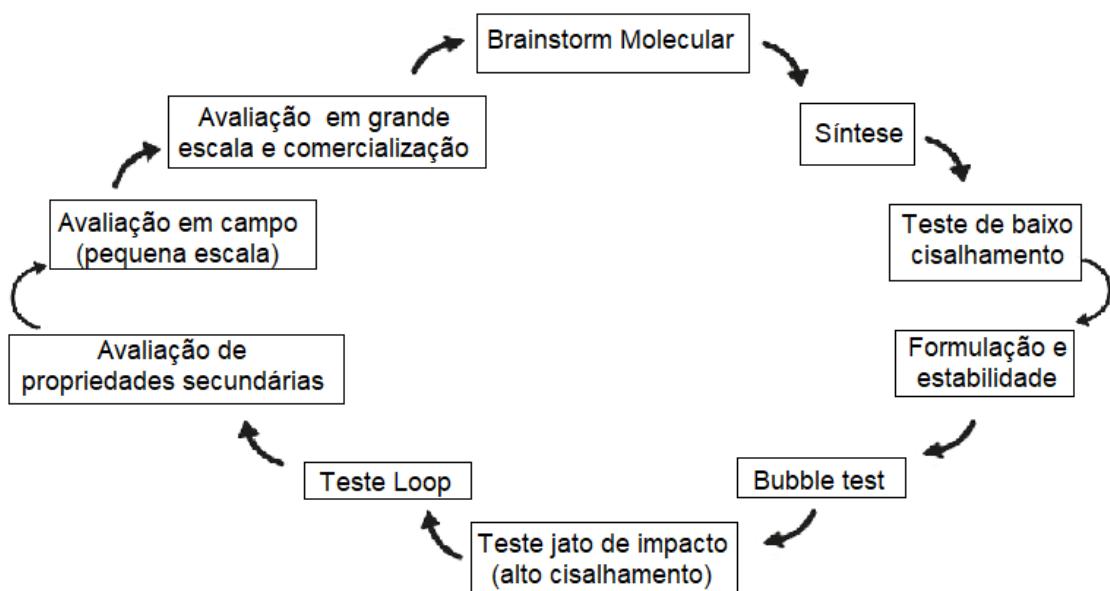


Figura 4 - Ilustração do processo de avaliação de desempenho de inibidores. Fonte Adaptada: BIERI et al. (2006).

Portanto, o processo de desenvolvimento de um inibidor passa pelas seguintes etapas: indicação de uma nova molécula, sintetização dessa molécula, teste de cisalhamento baixo, estabilidade da formulação, teste de partição (*bubble test*), testes de alto cisalhamento, testes de propriedades secundárias (compatibilidade), teste de campo em pequena escala e testes de campo em larga escala para comercialização. É importante destacar que, como os inibidores de corrosão são agentes tensoativos, eles tendem a promover emulsificação e formação de espuma. Logo, a avaliação dessas chamadas “propriedades secundárias” é importante para obter o real desempenho do inibidor (BIERI et al., 2006).

3.7.4. Propriedades secundárias

Para avaliar a compatibilidade do inibidor com o meio são necessário testes no que diz respeito à solubilidade, formação de emulsão, de resíduos sólidos e de espuma. O **teste de solubilidade** é aplicado para verificar a solubilidade de um inibidor na fase orgânica e aquosa, os critérios de aceitação podem ser dados em

faixas, como por exemplo, de 1:1 a 1:10. O **teste de emulsificação** é necessário para verificar se o inibidor, adicionado aos fluidos produzidos, promove emulsão estável, o que prejudica a separação das fases água/óleo/gás, nas etapas de produção de óleo, o critério de aceitação é dado pela porcentagem de quebra de emulsão dentro de 5 minutos nas fases água. O **teste chamado de Gunk** é aplicado para avaliar a possibilidade de formação de resíduo, com critério de aceitação dado pela porcentagem de retenção em peso do inibidor no papel de filtro de uma solução com inibidor e hidrocarboneto, que deve ser um número pequeno, como por exemplo 1%. E por fim, o **teste de espuma** para avaliar a tendência do inibidor na formação de espuma, a fim de evitar problemas operacionais nas unidades de desidratação, dentre outros, que usa critérios como a altura de espuma formada e o tempo de quebra dela. Se o inibidor tiver um bom desempenho no *bubble test*, porém um desempenho não favorável nos testes de propriedades secundárias, ele pode deixar de ser escolhido para aplicação em campo (MAGALHÃES et al., 2008).

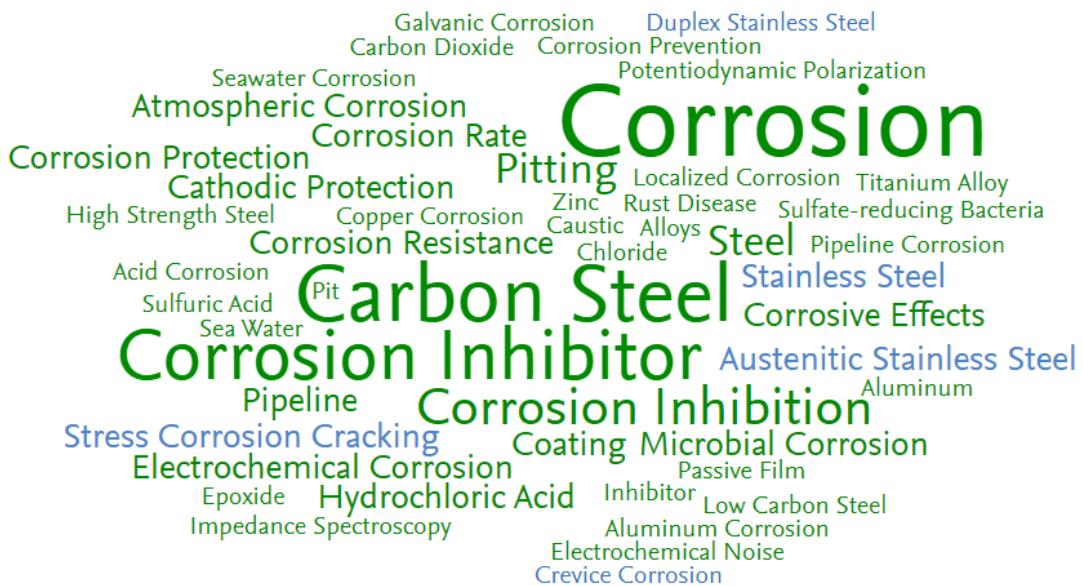
4. MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa é uma investigação desenvolvida de acordo com as normas da metodologia científica. Uma pesquisa bibliográfica é elaborada a partir de outros materiais científicos já publicados, sendo eles livros, artigos de periódicos, revistas científicas, publicações avulsas ou materiais disponibilizados na internet. Alguns objetivos de se realizar um estudo dessa maneira é analisar a quantidade de trabalhos envolvendo o tema escolhido, quais aspectos já foram abordados, quais aspectos estão em carência na literatura e verificar as opiniões similares e diferentes a respeito do tema. Além de também evitar a repetição de publicações com o mesmo enfoque no assunto (SILVA; MENEZES, 2005).

Para a procura de trabalhos como fontes para a revisão da literatura, foram empregadas as seguintes palavras-chave em sites como *One Petro*, *Science Direct*, *Scopus*, *Google Scholar* e *SciVal*: corrosão, corrosão CO₂, petróleo, inibidores de corrosão, *bubble test*, *kettle test*, teste de inibidores, avaliação de inibidores de corrosão, testes de corrosão, seleção de inibidores.

Realizando a pesquisa da palavra-chave *bubble test* no dia 19 de julho de 2022, 18.215 resultados de artigos científicos são mostrados dentro do *One Petro*. Para *kettle test* que é outra designação para o *bubble test*, os resultados na mesma data foram bem menores, com apenas 345 resultados. Para os demais sites foi necessário acrescentar mais palavras chaves ao termo *Bubble test* para obter resultados de trabalhos relacionados a indústria do petróleo. Para *bubble test* e *inhibitors*, o *One Petro* teve 2.192 resultados, o *Science direct* 86.159 resultados e o Google Acadêmico 33.800, também na mesma data.

Dentro do *SciVal* é possível obter alguns dados de relevância de temas para diferentes conjuntos de palavras. O resultado gerado no dia 19 de julho de 2022 para o conjunto corrosão, aço carbono e inibidores de corrosão para as top 50 palavras de relevância com base em 35.050 publicações foi dada a seguir pela Figura 5. A demonstração da relevância é dada por tamanho da letra e cor das palavras. As com menores letras e cor azul as menos relevantes e as com maiores letras e com cor verde escuro a mais relevantes.



A A A relevance of keyphrase | declining A A A growing (2012-2021)

Figura 5 - Mapa de palavras relevantes em publicações com temas relacionados a corrosão, aço carbono e inibidores de corrosão. Fonte: SciVal (2022)

A palavra chave *bubble test* não aparece no mapa de palavras do *SciVal* e não tem um conjunto de palavras próprio, mostrando como um estudo de revisão da literatura é importante, pois apesar de empregado com frequência na indústria, é possível que poucos estudos sistemáticos ou de revisão sobre o tema tenham sido realizados.

5. RESULTADOS E DISCUSSOES

É proposta uma análise crítica sobre o uso do *bubble test* na indústria do óleo e gás que será elaborada por meio da composição de revisão bibliográfica. Assim, reunindo um série de artigos publicados é possível reconhecer qual a sua relavância. Os resultados obtidos serão constituidos por meio da observação da citação do objeto de estudo nos artigos estudados, examinando com qual objetivo se realizou o teste, ou quando com o mesmo objetivo ele não foi realizado, e se teve a necessidade de outros métodos de experimentos além dele.

Vasques et al. (2021) realizaram o *bubble test* e mostram suas limitações também, pois expressa que para poder ter condições mais próximas às condições do campo de petróleo é necessário aumentar a pressão, algo que somente com o uso do BT não é possível, devido as células normalmente utilizadas serem de vidro. Então é essencial a execução de outro teste de eficiência do inibidor, chamado de autoclave, no qual a mudança da pressão é obtida. A solubilidade e estabilidade do produto também foi medida para as condições necessárias.

Assim como Vasques et al. (2021), Magalhães et al. (2008) também fazem uso de outros testes além do BT, além da mudança de pressão, é citada também a limitação do *bubble test* quanto ao regime do fluxo. Para medir a eficiência do inibidor de corrosão em condições de fluxos mais agitados é necessário usar o método de jato de impingimento. Com esse teste, é simulado o grau de turbulência nas paredes dos tubos. O fluxo é produzido por um jato circular que chega numa superfície plana, com o eixo central perpendicular a essa superfície. É importante reparar que para as substâncias testadas nesse artigo, os resultados do BT e do outro teste realizado com fluxo, o Eletrodo de Cilindro Rotativo (RCE), foram positivos (a eficiência dos inibidores foram maiores do que o patamar decidido de 95%). Porém, o resultado do teste de jato de impingimento, para as mesmas substâncias, não foram medidas altas o suficiente para serem classificados como bons inibidores, e então foram descartados como produtos para produção e uso na indústria. Essa conclusão é dada pois, se o produto não suporta a alta tensão de cisalhamento, ele não pode ser considerado com desempenho adequado para o tratamento a que se destinam, ou seja, para produção de petróleo. É feito também testes qualificatórios (como de jato impingimento e testes em *loop*) e testes de compatibilidade (solubilidade, emulsão,

teste de borra e teste de espuma) para as substâncias examinadas. Vasques et al. (2021) apenas verificaram a solubilidade das substâncias, o que pode dificultar o real uso do inibidor na produção de petróleo, pois ele pode não ser compatível com o meio.

Thomson et al. (2016) usaram o *bubble test* como um teste eliminatório preliminar de produtos voláteis como inibidores de corrosão, passando para o próximo teste, o autoclave, apenas aqueles que tiveram resultados satisfatórios no BT. E também não foram realizados testes qualificatórios ou de compatibilidade. Parte do experimento do BT foi feito em condições longes das representativas do campo, pois o objetivo era determinar se algum componente volátil era susceptível de inibir a corrosão. Já o teste de autoclave foi realizado com as condições mais próximas do campo.

Normalmente, os estudos de novos inibidores de corrosão realizam testes gravimétricos, ou seja, com técnicas de perda de massa e testes eletroquímicos. Em sua maioria, para testes eletroquímicos é usado o LPR. Porém, para os testes gravimétricos, nem sempre é usado o BT e por vezes nem é mencionado. Por exemplo, Junior (2020) utiliza LPR e o autoclave e não menciona o BT. Porém, é possível observar a importância de se realizar ambas as técnicas nesse estudo, já que, apesar de resultados abaixo do aceitável para eficiência de um inibidor de corrosão, os teste de LPR obtiveram resultados de inibição para substâncias testadas, enquanto os testes gravimétricos mostraram que após um período de tempo, a corrosão aumentava utilizando as mesmas substâncias.

Silva (2013) menciona o BT e suas limitações em relação ao fluxo do borbulhamento ser menor que ao encontrado nas condições de campo e opta por realizar o teste estático como uma primeira eliminação das substâncias, seguindo para o teste em *Loop* para avaliação da eficiência dos inibidores. O *Loop* consiste no escoamento do fluido em um sistema de circuito fechado, permitindo condições do fluxo similares ao do campo.

Compilando as informações dos artigos analisados, a Tabela 2 a seguir mostra os resultados obtidos.

Tabela 2 - Compilado dos resultados obtidos.

Referência	Objetivo	Realiza bubble test?	Realiza outro teste de eficiência?	Realiza testes de compatibilidade?	Mostra vantagens do bubble test?	Mostra limitações do bubble test?
VASQUES et al. (2021)	Investigar o éster de fosfato como inibidor de corrosão	Sim	Sim, autoclave	Apenas calcula a isoterma de adsorção	Não	Sim, não poder aumentar a pressão
MAGALHÃES et al. (2008)	Apresentar a estratégia adotada para a qualificação de inibidores de corrosão para condições de alta velocidade de escoamento	Sim	Sim, cilindro rotatório	Sim, solubilidade, emulsão, <i>gunk</i> e espuma	Sim, a cinética também ser calculada e a facilidade de realizar o teste	Sim, não poder aumentar a tensão de cisalhamento
AFFONSO et al. (2017)	Desenvolver e validar um combo anticorrosivo e anti-incrustante	Sim	Sim, autoclave	Sim, estabilidade em altas temperaturas, emulsão, espuma, solubilidade, compatibilidade com a água de formação e química	Não	Sim, não poder aumentar a tensão de cisalhamento
SIVOKON; ANDREEV (2012)	Discutir a avaliação laboratorial do desempenho de inibidores de corrosão para dutos de campos petrolíferos	Sim	Sim, estático, <i>wheel</i> , tubo U, cilindro e disco rotatório	Não	Sim, ser um teste simples	Sim, não ser o teste de eficiência mais confiável e fluxos menores que no campo
JUNIOR (2020)	Avaliar o desempenho da imidazolina quaternária como inibidor de corrosão para aço carbono em solução salina acidificada	Não	Sim, autoclave	Não, apenas confere a isoterma de adsorção	Não	Não
VESPA (2017)	Avaliar a possível ação de polímeros hiper-ramificados como inibidores de corrosão para aço carbono em água do mar sintética acidificada com HCl	Não	Sim, estático	Não, apenas confere solubilidade e calcula a isoterma de adsorção	Não	Não

SILVA (2013)	Estudar a corrosão do aço carbono em solução com elevada salinidade contendo não somente íons cloreto, outros íons presentes na água produzida e CO ₂	Não	Sim, estático, Loop e disco rotatório	Não, apenas verifica as mudanças na salinidade	Não	Sim, a velocidade do fluxo ser menor que as reais
THOMSON et al. (2016)	Avaliar formulações para inibição de corrosão no topo de linha	Sim	Sim, autoclave	Não	Sim, ser rápido de realizar	Sim, as condições do teste serem longes da do campo

Observa-se a falta de realização de testes secundários de compatibilidade nos estudos de formulações de novos inibidores. E também que na sua maioria o BT é pelo menos mencionado, não trazendo tantas vantagens, mas algumas desvantagens e assim justificando o uso de outro teste de eficiência. Muitas das limitações mostradas na Tabela 2 foram citadas como uma vantagem do outro teste que também foi realizado, deixando implícito que o BT não tem essa capacidade. Alguns trabalhos, como Thomson et al. (2016) e Magalhães et al. (2008), foram apresentados em conferências sobre corrosão com a participação de profissionais na autoria, mostrando assim a relevância do BT para a indústria.

6. CONCLUSÃO

6.1 Contribuições do trabalho

O *bubble test* não é o suficiente para classificar um produto como um bom inibidor isoladamente. Apenas com os resultados de seu experimento não é possível partir para a produção e aplicação de soluções para a indústria de óleo e gás. Dos artigos analisados é possível observar que todos que utilizam do teste, também realizam outro teste para obter resultados da eficiência de inibição da corrosão com simulações mais próximas do que se é encontrado no campo.

Também é possível observar que, em sua maioria, realizam tanto testes com técnicas gravimétricas e eletroquímicas, geralmente utilizando LPR para a eletroquímica, porém para estudos de perda de massa nem sempre o BT é utilizado. O teste estático é ainda mais simples e também pode ser utilizado como um teste preliminar de eliminação de substâncias não inibidoras. E há estudos tentando implementar o LPR em testes mais sofisticados que ambos o BT e o estático. Além disso, os estudos não mostram os resultados dos demais testes para as substâncias que tiveram resultados ruins no BT, eliminando como possível inibidor, apesar de gastos para indústria seria interessante para verificar se há mudanças no comportamento dessas substâncias para condições diferentes.

Portanto, o BT ainda é bastante aplicado em estudos recentes de eficiência de inibidores de corrosão, mostrando sua importância para a área de óleo e gás dado que pode trazer ganhos no tempo e econômicos em experimentos com novas substâncias possíveis inibidoras de corrosão, pois ele é rápido e simples.

6.2 Sugestões para trabalhos futuros

1. Estudar mais exemplos do LPR acoplado a outros teste de eficiência
2. Estudar a viabilidade econômica do *bubble test* comparado ao uso do estático como teste eliminatório, ou seguindo direto para outros testes mais robustos.

REFERÊNCIAS

- ABBASOV, V. M.; ISNAYILOV, I. T.; EL-LATEEF, H. M. A.; AKHMADBEOVA, S. F. Anti-corrosive activities of some novel surfactants based on vegetable oils. **Eur. Chem. Bull.**, 3(5), 437-440, 2014.
- ABDELMOEZA, W.; ALI, M.M.; EL-SHAMY, A. M. Solitary Formula for Commercial Use as Corrosion Inhibitor Related to Tubing Corrosion in Production Wells of Oil and Gas Industry. International **Journal of Scientific & Engineering Research** Volume 11, Issue 10, 2020.
- AFFONSO, B. F.; ANDRADE, C. P. S. **Estudo sobre corrosão e incrustação inorgânica na indústria de petróleo com ênfase no desenvolvimento de um combo comercial para tratamento químico**. Trabalho de conclusão de Curso, Universidade Fluminense, Niterói, RJ, 2017. Disponível em: <https://app.uff.br/riuff/handle/1/4000>. Acesso em: 27 mai. 2022.
- ARISMEND, F. J. J., FERRARI J. V. Fluid flow effects on CO₂ corrosion: a review of applications of rotating cage methodology. **Anti-Corrosion Methods and Materials**. 2019;66(4):507-19
- BIERI, T. H.; HORSUP, D.; READING, M.; WOOLLAM, R. C. Corrosion Inhibitor Screening Using Rapid Response Corrosion Monitoring. **Corrosion NACExpo 2006**. Paper No. 06692. 2006.
- FINK, J. K. **Corrosion Inhibitors**. In: Petroleum Engineer's Guide to Oil Field Chemicals and Fluids. Gulf Professional Publishing. p. 217-252, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-383844-5.00006-4>. Acesso em: 19 jul. 2022.
- GARVERICK, L. Corrosion in the Petrochemical Industry. **ASM International**, 2011.
- JAYASINGHE, D. **Internal Corrosion of Pipelines Carrying Crude Oil**. Corrosionpedia. 2021 Disponível em: <https://www.corrosionpedia.com/internal-corrosion-of-pipelines-carrying-crude-oil/2/7282>. Acesso em: 10 de jul. 2022.
- JUNIOR, P. E. da S. **Estudo de inibidor de corrosão a base de imidazolina quaternária para aplicação na indústria de petróleo e gás em condições de altas temperatura e pressão**. Dissertação de mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2020.
- MAGALHÃES, A. A. O.; GUISSO, R. M.; BRITO, R. F.; PAIVA, E. M. O.; TORRES, F.; BONFIN, A. L. Seleção de inibidores de corrosão para duto submarino de gás úmido e não associado em condição de alta velocidade. Trabalho apresentado durante o **INTERCORR 2008**, Recife. Mai. 2008.

MUTHUKUMAR, N. **Petroleum Products Transporting Pipeline Corrosion - A Review**. In: The Role of Colloidal Systems in Environmental Protection. [s.l.] p. 528-567. Elsevier, 2014.

NALLI, K. **Corrosion and its Mitigation in the Oil & Gas Industry – An overview**. PM-Pipeliners Report, 2010.

PAPAVINASAM, S. Monitoring – **Internal corrosion**. In: Corrosion control in the oil and gas industry. [s.l.] p. 425–528. Elsevier, 2014.

PAPAVINASAM, S. Standards for Evaluating Oil Field Corrosion Inhibitors in the Laboratory. **NACE International**, 2013.

RAJENDRAN, S. **Corrosion problems in petroleum industry and their solution**. 2014. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/260383261>. Acesso em: 27 mai. 2022.

ROBERGE, P. R. **Handbook of Corrosion Engineering**. McGraw-Hill Companies, 2000.

SILVA, A. B. **Avaliação de inibidores de corrosão para o aço carbono em ambiente de elevada salinidade contendo CO₂**. Tese (doutorado) da Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Rio de Janeiro, 2013.

SILVA, E. L. da; MENEZES, E. M. **Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação**. Ed. rev. atual. UFSC. 2005.

SIVOKON, S.; ANDREEV, N. N., Laboratory assessment of the efficiency of corrosion inhibitors at oilfield pipelines of the West Siberia region I. **International Journal of Corrosion and Scale Inhibition**, v. 1, n. 1, p. 065–079, 2012.

THOMSON, H.; MCCALL, M; STEPHENS, A.; SIMPSON, C. M. E.; RAY, J.; FRIGO, D. M.; GRAHAM, G. M. Development of New Laboratory Test Methods for Measuring Top of the Line Corrosion and Assessing Corrosion Inhibitor Performance. SPE-179940-MS. Trabalho apresentado durante o **SPE International Oilfield Corrosion Conference and Exhibition**, Aberdeen, Scotland, UK, 9 –10 Mai. 2016.

UNDHEIM, C. An established manual for corrosion testing and corrosion inhibitor analysis. **Bubble testing and Linear Polarization Resistance Measurement**. Bachelor's Thesis University of Stavanger, 2021.

VASQUES, R. B.; LEVY, M. M.; RODRIGUES, M. S.; NETO, F. W. de Q. A.; SILVA, L. P.; VAZ, G. L.; MAGALHÃES, A. A. O.; de LIMA-NETO, P.; ARAÚJO, W. S. A Theoretical and Experimental Study Of Phosphate Ester Inhibitors For AISI 1018 In Carbon Dioxide-Saturated 3.5 wt% NaCl Solution. **Materials and Corrosion**; 72:1417–1432. 2021.

VESPA, A. S. Avaliação de inibidores de corrosão em meios agressivos que simulam os de produção de petróleo. Dissertação de mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2017.