
Copyright 2018, ABRACO

Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2018, em São Paulo, no mês de maio de 2018.

As informações e opiniões contidas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade do(s) autor(es).

Considerações sobre os possíveis mecanismos de corrosão no espaço anular de dutos flexíveis

Helio Alves^a

Abstract

Oil and gas production from offshore fields in Brazil exceeds 90% in volume, when comparing to onshore fields. In many cases the development projects have been made feasible based on the utilization of flexible pipes, designed for high pressure conditions and deep waters. In these cases, intrinsic pipe characteristics or aspects related to installation operations, either for flowline or riser function, can be advantageous in relation to the rigid pipe alternative. However, the corrosion processes occurring in the annular space between the internal and external polymeric barriers of flexible pipes is not completely understood. Some aspects contributing to these uncertainties are the corrosive gases consumption, permeations of components from the internal fluid through the internal polymeric barrier and the susceptibility of the metallic materials of the armours to the diverse corrosion and cracking mechanisms. This paper discusses the main corrosion mechanisms occurring in the annular space, including the influence of existing external damages allowing seawater and oxygen entrainment in the confined area.

Keywords: corrosion, flexible pipe, metallic armour, annular space, confinement, corrosion-fatigue

Resumo

A produção de petróleo e gás natural no Brasil proveniente de campos marítimos já supera os 90% em volume em comparação aos campos terrestres. Em muitos casos os projetos de desenvolvimento foram viabilizados pela utilização de dutos flexíveis desenvolvidos para uso em condições de altas pressões internas e elevadas profundidades. Nestes casos, as características intrínsecas ou relativas a aspectos relacionados à instalação destes dutos, seja na função de *flowline* ou de *riser*, podem ser vantajosas em relação à opção de utilização de dutos rígidos. No entanto, os processos corrosivos que ocorrem no espaço anular entre as camadas poliméricas externa e interna destes dutos flexíveis ainda não são perfeitamente entendidos. Alguns aspectos que contribuem para essas incertezas dizem respeito ao consumo de gases corrosivos, à permeação de componentes do fluido interno através da camada polimérica interna e à susceptibilidade dos materiais das armaduras metálicas aos diversos mecanismos de corrosão e trincamento. Neste trabalho os principais mecanismos de corrosão

^a Mestre, Engenheiro Metalúrgico – 4Subsea

no espaço anular são discutidos, incluindo a influência da existência de danos externos que possibilitem a entrada de água do mar e oxigênio no espaço confinado.

Palavras-chave: corrosão, duto flexível, armadura metálica, espaço anular, confinamento, corrosão-fadiga

Introdução

O desenvolvimento dos dutos flexíveis de alta pressão mostrou-se uma alternativa bastante interessante para o projeto de campos de petróleo offshore, tanto em sistemas de coleta quando de exportação, além de uso em sistemas de injeção de água e gás, sistemas de *gas lift* e linhas de serviço. As principais vantagens da utilização dos dutos flexíveis são a sua versatilidade em termos de absorver com facilidade os movimentos de unidades flutuantes, e possibilitar simplificações nas operações de transporte e instalação, com muitas possibilidades de redução de custo, apesar de do alto custo de fabricação. Os dutos flexíveis podem ser utilizados em diversas aplicações, como *risers*, *flowlines* ou *jumpers* que conectam equipamentos submarinos.

Os dutos flexíveis são compostos por diferentes camadas sobrepostas, de diferentes materiais, de forma a combinar as propriedades de cada uma e obter o efeito final necessário aos requisitos de cada projeto. Normalmente as camadas são compostas por polímeros ou por armaduras metálicas enroladas em espiral, intertravadas ou não. A Figura 1 apresenta uma estrutura típica de duto flexível.

As camadas metálicas promovem resistência aos diversos esforços mecânicos atuantes, seja os resultantes da pressão externa (carcaça interna), da pressão exercida pelo fluido interno (armadura de pressão) ou das forças trativas e de torção (armadura de tração).

A função de barreira física e química de contenção do fluido interno para que este não passe para o exterior, e do fluido externo (água do mar) para que esta não atinja as camadas intermediárias, é exercida pelas camadas poliméricas interna (barreira de pressão) e externa (capa externa). No espaço entre essas duas camadas são inseridas as armaduras metálicas de pressão e tração. Esse espaço entre as barreiras poliméricas interna e externa é chamado espaço anular, cujas características químicas e eletroquímicas do ambiente local irão influenciar diretamente nos processos corrosivos das armaduras metálicas. Esta condição toma um grau de importância relevante quando se considera que os materiais utilizados nas armaduras normalmente possuem baixa resistência à corrosão, os ambientes variam sobremaneira tanto na direção radial quanto ao longo do duto, e ainda os diversos esforços mecânicos estáticos e dinâmicos associados.

Esse trabalho descreve algumas observações relevantes sobre as condições específicas que ocorrem no espaço anular de dutos flexíveis, e suas possíveis consequências relativas aos diferentes mecanismos que podem atuar sob estas condições.



Figura 1- Estrutura típica de um duto flexível (1)

Corrosão no Espaço anular

O espaço anular em dutos flexíveis com camadas não coladas (*unbonded*) é definido como o espaço entre as camadas poliméricas de barreira interna (barreira de pressão) e externa (capa externa). A Figura 2 apresenta um corte de um duto flexível típico com indicação dessas camadas.



Figura 2: Corte de um flexível tipo *unbonded* com indicações das barreiras poliméricas interna (*pressure sheath*) e externa (*outside cover*) (1)

Como se observa na Figura 2, as armaduras metálicas de pressão e de tração estão situadas nesse espaço anular. Ao contrário da carcaça interna, normalmente construída em aço ou liga resistente à corrosão, os materiais das armaduras não são selecionados com propriedade anti-corrosiva. Essa susceptibilidade pode resultar em processos corrosivos significativos, caso as condições do espaço anular sejam favoráveis aos fenômenos de corrosão.

As armaduras de tração e pressão, junto com as fitas poliméricas normalmente usadas para prevenir abrasão por fricção entre armaduras adjacentes, ocupam de 85 a 95% do espaço anular. Os intervalos entre armaduras e entre fitas anti-fricção são inicialmente preenchidas com ar ou gás inerte, e muitas vezes óleo lubrificante. Dutos com função estática (*flowlines*) podem não apresentar as fitas anti-abrasão, facilitando a circulação de fluidos dentro do espaço anular.

As composições químicas dos aços usados em armaduras de pressão e tração variam, podendo variar de 0,1 a 0,75% de carbono (2), e conter alguns elementos de liga (aços baixa liga). A determinação das taxas de corrosão previstas para as armaduras é uma tarefa complexa, e bastante diferente quando se compara a mesma tarefa executada para um duto rígido. Os parâmetros controladores do processo são diferentes, por exemplo, deve-se considerar as taxas de permeação de espécies corrosivas do fluido produzido, a distribuição dessas espécies no espaço anular, a taxa de consumo das espécies devido à corrosão e o acúmulo de produtos de corrosão dissolvidos e insolúveis (3). O pequeno volume associado à extensa área metálica resulta em um grande acúmulo de produtos de corrosão por volume de eletrólito, resultando em baixas taxas de corrosão, mesmo para caso onde o anular se encontra inundado. Entretanto, a presença de oxigênio e sua taxa de renovação podem acelerar a taxa de corrosão de forma significativa.

Permeação de espécies para o espaço anular

Logo após a fabricação, o espaço anular apresenta-se normalmente preenchido com ar a baixa pressão. Qualquer processo inicial de corrosão neste ambiente selado irá provocar uma redução do oxigênio presente no ar. Quando em operação, é possível (e provável) a ocorrência de permeação de moléculas de pequeno tamanho do interior do duto para o espaço anular através da barreira polimérica interna. Dentre essas espécies destacam-se H₂O, CO₂, metano, etano, H₂S, ácido fórmico e ácido acético.

A permeação através das camadas poliméricas para o anular dependem de vários parâmetros, como as características dos polímeros (constante de permeabilidade), as pressões parciais dos gases, temperatura, espessura, entre outras. A taxa de permeação varia com o tempo, pois depende de parâmetros que também variam ao longo do tempo. Essa é mais uma dificuldade relacionada à previsão de ocorrência de processos corrosivos no espaço anular de dutos flexíveis.

Cabe ressaltar que também ocorre permeação de espécies através da capa externa, tanto presentes na água do mar e na atmosfera, ou seja, de fora para dentro, quanto de dentro para fora, ou seja, do espaço anular para o ambiente externo. Essa permeação, no entanto, é considerada como sendo muito lenta, devido às pequenas diferenças de pressão parcial e baixas temperaturas. Nos casos de corrosão por CO₂ no espaço anular, pode haver migração de hidrogênio gerado no processo corrosivo para o exterior.

Ambientes do espaço anular

Diversos tipos de ambientes podem ocorrer no espaço anular de dutos flexíveis. Inicialmente, o ambiente será dominado pelos gases permeados do interior do duto. Nesse caso, a pressão total no espaço anular será determinada pelo critério de alívio pelo sistema de *vent*. No caso de *risers*, o sistema de alívio é instalado na superfície, através de válvulas que aliviam o gás para um sistema em pressão atmosférica ou muito próxima a esta. A pressão ao longo do *riser* é praticamente uniforme e baixa.

No caso de *flowlines* e trechos profundos de *risers*, o alívio é feito diretamente para o oceano, e a pressão de alívio é acrescida da pressão hidrostática relativa à profundidade. Desta forma, a pressão total nos *flowlines* é maior que nos *risers*, mantidas as condições normais de alívio. Assim, espera-se que as pressões parciais dos gases que contribuem para a corrosão (como H₂S e CO₂) sejam maiores nos *flowlines* que nos *risers*.

Ainda considerando uma capa externa íntegra, pode haver condensação de vapor de água permeado para o anular, dependendo da temperatura ambiente e do ponto de orvalho. Dessa forma uma fase aquosa contínua pode ser formada sobre as armaduras, servindo de eletrólito para os processos corrosivos. Durante paradas de produção a queda de temperatura incentiva a condensação, que pode ser revertida quando do reinício de operação, com a evaporação da água.

O espaço anular também pode ser preenchido com água do mar e ar atmosférico, no caso de ocorrência de danos na capa externa. A distribuição da água do mar ao longo do anular depende do local do dano, da configuração do duto e como a água permeia entre as armaduras. É comum a existência de bolsões de gás adjacentes a trechos inundados. Esses bolsões tendem a se acumular em trechos altos (corcova superior em *risers* e pontos de maior elevação em *flowlines*).

Na parte superior dos *risers*, danos na capa externa podem facilitar a entrada de ar no espaço anular. Se o dano ocorrer na zona de respingo (*splash zone*), as armaduras serão expostas a ar úmido e água do mar com alto teor de oxigênio. Acima da zona de respingo, haverá o ingresso de ar da atmosfera, normalmente saturado com água, além de água da chuva e água do mar pulverizada. Em casos de danos de pequena dimensão, a entrada de ar pode ser reduzida pela pressão contrária exercida pelo gás percolado e aliviado através do dano. Para danos maiores, é possível uma exposição permanente ao oxigênio do ar, influenciando significativamente nos processos corrosivos. Em alguns casos o projeto do sistema de alívio permite o ingresso de ar no espaço anular, principalmente em situações de parada, quando a temperatura no duto cai.

Processos corrosivos no espaço anular

Conforme mencionado anteriormente, o espaço anular é um ambiente bastante singular em função de suas características específicas:

- a) Não há contato direto das armaduras com o fluido transportado nem com o ambiente externo
- b) O ambiente é influenciado pela permeação de pequenas moléculas (H₂O, CO₂, H₂S, CH₄) através da barreira polimérica de pressão.
- c) O ambiente é extremamente confinado.

O espaço anular pode conter água proveniente do fluido interno (através de permeação) ou resultante de inundação de água do mar devida a danos na capa externa. Portanto, a presença

de gases permeados a partir do fluido interno para o espaço anular irão influenciar diretamente nos processos corrosivos naquele ambiente. Oxigênio porventura presente no anular pode promover corrosão pela sua própria ação ou influenciando nos processos corrosivos existentes, principalmente na corrosão pelo CO_2 .

Uma das dificuldades para se prever a ocorrência de processos corrosivos no espaço anular é a diversidade de possibilidades de composição e condições do ambiente. No caso de anular seco, as concentrações dos gases permeados a partir do fluido interno irão refletir proporcionalmente as pressões parciais no fluido, associadas aos coeficientes de permeação. Sem a ocorrência de inundação pela água do mar, os processos corrosivos neste caso dependem da permeação de vapor de água junto com os outros gases. Importante salientar que a ocorrência de corrosão no espaço anular pode resultar em alteração da composição dos gases, como por exemplo ocorre na corrosão por CO_2 , onde é gerado hidrogênio gasoso que passa a fazer parte do ambiente.

Em espaços anulares parcialmente preenchidos com água, é possível a ocorrência de bolsões de gás que são pressurizados por trechos de colunas de água. Essa situação pode levar a pressões parciais mais elevadas que as previstas com base em permeação apenas, influenciando nas taxas de corrosão pelos gases dissolvidos.

Existem basicamente três tipos de mecanismos de corrosão de armaduras de dutos flexíveis:

- Corrosão generalizada, com redução de seção dos arames das armaduras, acompanhada de redução de capacidade de carga, podendo levar a ruptura com perda de contenção.
- Redução da resistência à fadiga pela combinação de redução de seção (aumento do nível de tensão) com o aumento de concentração de tensões pelas irregularidades e pites provocados pela corrosão.
- Alterações na curva real de fadiga por efeito da corrosão.

Um quarto mecanismo menos comum tem ganhado importância em função de eventos divulgados recentemente na mídia especializada na indústria do petróleo. O trincamento induzido por tensão e corrosão, também denominado corrosão sob tensão, está sendo considerado como possível causa principal em falhas ocorridas no Brasil. O fenômeno se caracteriza pelo efeito combinado de tensão atuante e meio corrosivo resultando em trincamento superficial que progride com o tempo. O efeito combinado da corrosão sob tensão e fadiga é bastante severo em aplicações dinâmicas (*risers*), podendo ocorrer falhas em curto tempo por antecipação da nucleação da trinca e aceleração de sua propagação pelo efeito combinado do meio corrosivo e das tensões atuantes. Esse mecanismo ainda é alvo de estudos para identificar as condições favoráveis à ocorrência de trincamento induzido por corrosão e tensão em armaduras de dutos flexíveis.

Corrosão por CO_2

A corrosão por CO_2 clássica é definida pela acidificação da água condensada ou do mar em função da dissolução do gás formando ácido carbônico (H_2CO_3). A velocidade de corrosão nesse caso depende do pH, que por sua vez depende de diversos fatores, como a pressão parcial de CO_2 , a temperatura, composição da água e presença de outros ácidos (principalmente orgânicos).

A reação de corrosão do ácido carbônico com o ferro resulta principalmente em carbonato de ferro (FeCO_3) e hidrogênio gasoso. A taxa de corrosão por CO_2 é fortemente dependente das

características mais ou menos protetoras do FeCO_3 formado. Em condições normais em anulares de dutos flexíveis é esperado na maioria dos casos uma condição protetora do carbonato formado, resultando em baixas taxas de corrosão. Entretanto, é importante notar que falhas localizadas em camadas protetoras são causadoras de mecanismos de corrosão localizada e/ou trincamento induzido por corrosão e tensão.

Um aspecto bastante importante na corrosão por CO_2 no espaço anular é a relação entre volume de água e área metálica exposta (V/S). O volume de água no espaço anular é muito pequeno comparado com a área metálica, valores de V/S da ordem de $0,03 \text{ ml/cm}^2$ são usuais (4). O espaço limitado também reduz a renovação do líquido aquoso, podendo levar a um acúmulo de espécies provenientes de reações de corrosão. Ropital et al. (4) num dos primeiros trabalhos sobre o assunto já identificou o efeito do espaço confinado na corrosão pelo CO_2 , como pode ser observado na Figura 3. Clements (5) resumizou as observações de diversos trabalhos anteriores em dois pontos principais:

A taxa de corrosão decresce com o tempo, em função de alterações no pH e saturação de íons de ferro no meio confinado, combinado com a formação de produtos de corrosão protetores na superfície metálica.

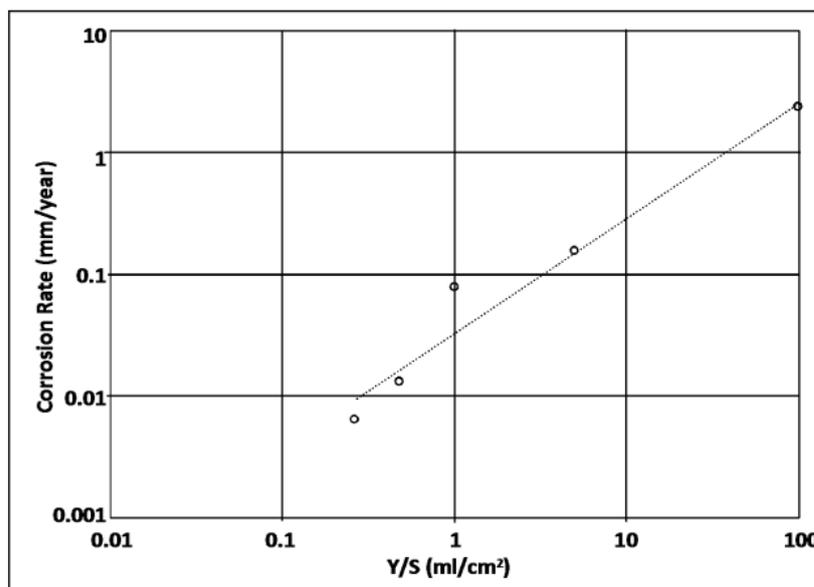


Figura 3 – Taxa de corrosão em função da razão entre volume de líquido e área superficial metálica (4)

As taxas de corrosão finais são significativamente afetadas pelo nível de confinamento, tendendo a uma redução significativa com o aumento da relação entre área metálica e volume de água. Entretanto a presença de ácidos orgânicos provenientes do fluido produzido pode causar variações de pH, interferindo nas taxas de corrosão pelo CO_2 . A presença de outros gases no espaço anular provenientes do fluido produzido (como H_2S) ou do meio exterior (como O_2) também irão influenciar na corrosão pelo CO_2 , como descrito nos próximos parágrafos.

Um outro ponto de atenção diz respeito à ocorrência de corrosão localizada em anulares com CO_2 . Distúrbios causados em camadas protetoras por ação mecânica ou química (ou ação

combinada) tendem a favorecer a ocorrência de corrosão localizada. Porém, esse tipo de corrosão ainda precisa ser melhor investigado, e é necessário reunir informações da ocorrência desse mecanismo em casos reais, através de avaliações baseadas em dissecações e estudos pós falhas.

Corrosão por H₂S

O H₂S pode estar presente naturalmente em reservatórios de petróleo, mas pode também sua produção ser estimulada pela ação de bactérias redutoras de sulfato (BRS). Esse estímulo na maior parte das vezes decorre da injeção de água do mar para recuperação secundária, ou contendo as BRS na própria água, ou estimulando os microorganismos presentes no reservatório em estado latente.

O H₂S normalmente provoca uma corrosão com formação de camada de sulfeto de ferro na superfície dos aços comuns e de baixa liga. Esse sulfeto normalmente possui características protetoras, porém danos nessa camada pode resultar em corrosão localizada. O H₂S também pode influenciar na corrosão pelo CO₂, às vezes contribuindo para uma maior proteção da camada de carbonato, porém também podendo agir reduzindo essa proteção de forma localizada.

Um dos aspectos a ser considerado no espaço anular é a possibilidade de consumo do H₂S por reações com a superfície metálica. Alguns autores tem reportado sobre a rápida reação entre o H₂S e o FeCO₃ (1), que em espaço confinado levaria a um gradiente de concentração de H₂S radialmente, reduzindo a capacidade do H₂S de atingir as camadas mais externas. Este é um outro ponto que ainda precisa ser melhor investigado.

Além dos efeitos no pH, nas características dos filmes formados pela corrosão e nas taxas de corrosão, o H₂S também é um agente gerador de trincamento pelos fenômenos de corrosão sob tensão e fragilização pelo hidrogênio, sendo essas as maiores preocupações quando da operação de *risers* flexíveis conduzindo fluidos contendo H₂S. O H₂S, assim como o CO₂, permeia pela camada polimérica da barreira de pressão do interior do duto para o espaço anular. A ação do H₂S no trincamento das armaduras metálicas é proporcional à sua pressão parcial naquele meio, e depende da susceptibilidade do material das armaduras. Em aplicações normais, as armaduras são fabricadas em aços de alta resistência, que em tese são mais susceptíveis à corrosão sob tensão por sulfetos. Razões econômicas e relacionadas ao peso dos *risers* e *flowlines* justificam esta utilização.

O H₂S presente no espaço anular reage com o material das armaduras metálicas gerando sulfeto de ferro. Essa reação promove um consumo do H₂S, que alguns autores reportam como não sendo totalmente repostado através da permeação desde o interior do duto, na maioria dos casos práticos (6, 7). Pelo menos uma referência (7) menciona o desenvolvimento de uma metodologia para cálculo de concentração de H₂S no espaço anular levando em consideração o seu consumo nas reações de formação de sulfeto de ferro. Estudos para determinação do gradiente radial de concentração de H₂S podem ser benéficos para o projeto de dutos flexíveis que operam com H₂S.

Um outro aspecto a ser considerado é a possível ocorrência de fragilização por hidrogênio. Esse mecanismo, porém, é mais usualmente relacionado com a microestrutura do material das armaduras em termos de presença de inclusões e impurezas. Casos de trincamento induzido por H₂S em armaduras de dutos flexíveis tem sido encontrados na indústria, o que mostra a necessidade de um melhor entendimento dos mecanismos decorrentes de sua presença neste ambiente.

Efeito do oxigênio

A influência do oxigênio na corrosão dos aços carbono e baixa liga é um fenômeno bastante conhecido. A reação eletroquímica resulta na formação de óxidos hidratados de ferro, e a velocidade de corrosão depende diretamente da disponibilidade do oxigênio no meio. Quando dissolvido na água do mar, a corrosão depende também das características da camada de carbonato de cálcio (CaCO_3) formada na superfície metálica, que pode ser mais ou menos protetora. De qualquer forma, alguma redução na taxa de corrosão é sempre esperada, mesmo com possibilidade de movimento relativo entre o meio e a superfície, promovendo remoção contínua da camada de CaCO_3 . Em meios confinados e estagnados, a influência do O_2 na corrosão é mais notada no início do processo corrosivo, sendo a taxa estabilizada em valores muito baixos, devido a restrições na renovação do O_2 disponível.

Entretanto, no caso de falhas externas na região da zona de variação de maré (ZVM), as armaduras ficam expostas à água do mar e ao ar com grande frequência de alternância. Desta forma pode-se considerar que em uma região considerável em torno da falha as armaduras estarão cobertas permanentemente com água do mar e com uma alta disponibilidade de O_2 . Nestes casos, taxas de corrosão da ordem de 0,4 mm/ano podem ocorrer (1).

O oxigênio também pode ter um efeito significativo em sistemas de corrosão dominados por CO_2 . O principal mecanismo seria a quebra da capacidade de proteção dos carbonatos formados na superfície, facilitando a ocorrência de corrosão localizada (8). Em espaço confinado como os anulares de dutos flexíveis, a situação deve ser semelhante, porém estudos dedicados a essa condição ainda estão sendo realizados.

Dentre os possíveis cenários de ingresso de oxigênio no espaço anular, inclui-se não apenas os decorrentes de falhas na capa externa, mas também a possibilidade de ingresso via ponto de alívio (*vent*).

Em sistemas de corrosão dominados pelo H_2S , o ingresso de oxigênio no espaço anular também será relevante. O oxigênio reage com o sulfeto de ferro formando enxofre elementar, que é sabidamente um produto agressivo aos aços carbono e de baixa liga. A influência do ingresso de oxigênio no espaço anular no processo de trincamento por corrosão sob tensão por sulfetos é um tema que merece um aprofundamento.

Corrosão-Fadiga

Além do efeito da corrosão no aumento da tensão atuante relacionado à redução da seção resistente ao longo do tempo, dois tipos de efeito relevantes são observados: primeiramente, um efeito de concentração de tensões decorrente da ocorrência de corrosão localizada (corrosão por pites). Adicionalmente, a corrosão pode influenciar no processo de nucleação e propagação da trinca de fadiga, por efeitos microscópicos decorrentes de dissolução anódica e sua influência no deslizamento de bandas de discordâncias, na fragilização pelo hidrogênio, na corrosão sob tensão, dentre outros micro-mecanismos. Quando se trata de dutos flexíveis, a grande quantidade de possíveis cenários e mecanismos atuantes inviabiliza a quantificação das influências em modelos preditivos. Dessa forma, o problema tem sido tratado com base em resultados de testes extensivos.

As avaliações de vida à fadiga de *risers* flexíveis durante o projeto são baseadas em curvas S-N. A determinação de curvas de projeto de fadiga para as diversas condições possíveis nos anulares de dutos flexíveis encontra limitações em função da diversidade de condições possíveis de ocorrer.

Algumas iniciativas para determinação de curvas de projeto de fadiga em ambientes corrosivos de dutos flexíveis estão em andamento há alguns anos. Entretanto, poucos resultados são de domínio público, o que dificulta uma avaliação mais criteriosa do problema. Um dos aspectos a ser considerado, como já citado acima, é o efeito do consumo de H₂S na avaliação da corrosão-fadiga em *risers* conduzindo fluidos contendo este contaminante. Desta forma, uma avaliação mais profunda das condições dominantes para a determinação de critérios de projeto e avaliações de integridade em operação deverá ser objeto de futuros artigos.

Efeito da Proteção Catódica

Recentemente tem sido prática comum na indústria de dutos flexíveis com armaduras metálicas a utilização de proteção catódica para redução da corrosão em conectores e as próprias armaduras. Normalmente é adotada a proteção galvânica através de anodos de alumínio ou zinco, montados na forma de braceletes ou em braçadeiras em torno dos conectores terminais (*end fittings*). A adequada proteção catódica das armaduras internas no caso de inundação do anular depende de um perfeito contato elétrico entre o conector e as armaduras já que os anodos são conectados eletricamente aos conectores.

Uma das preocupações nos projetos de dutos flexíveis protegidos catodicamente é o de garantir uma proteção eficiente ao longo de todo o comprimento do duto. Note-se que no caso de *riser* a parte emersa não pode ser protegida por meio de proteção catódica convencional. Porém, mesmo para as partes submersas, não está completamente entendido o alcance da proteção catódica para as armaduras a partir do dano externo que permita a inundação do anular. Da mesma forma, a atuação do mecanismo de proteção para as armaduras mais internas carece de mais investigações.

Discussão e recomendações

Com base nas informações disponíveis na literatura e experiências compartilhadas em diversos meios de divulgação de informações, é possível notar que, apesar dos avanços no entendimento dos processos corrosivos atuantes no espaço anular de dutos flexíveis, ainda há necessidade de muitas investigações. Falhas cujos mecanismos não são completamente entendidos ainda ocorrem, sendo, portanto, de difícil previsão.

Com base no que foi descrito neste trabalho, é possível listar algumas recomendações para futuros trabalhos, tanto a nível mais acadêmico quanto de engenharia, de modo a elevar o nível de conhecimento dos mecanismos atuantes no espaço anular dos dutos flexíveis, a saber:

- Muitos estudos tem utilizado a relação volume de líquido/área metálica para estimar a taxa de corrosão no espaço anular. Entretanto, a presença de filme de óleo proveniente do processo de fabricação na superfície metálica pode significar uma considerável redução na área metálica disponível para reações de corrosão. Neste caso a relação (V/S) pode se afastar da condição de confinamento, e a redução de taxa de corrosão por esse motivo pode não se aplicar. Assim, é recomendada uma investigação sobre o efeito protetor do filme de óleo na superfície das armaduras metálicas.
- O efeito do oxigênio na integridade da camada protetora de carbonato proveniente da reação de corrosão entre o CO₂ e a superfície da armaduras metálicas deve ser melhor investigada. Pode ser necessário estabelecer estratégias de gerenciamento de integridade diferentes quando da ocorrência de danos externos para dutos

transportando fluidos com CO₂ e H₂S, na eventualidade de ocorrência de um dano externo que propicie a entrada de oxigênio ou água do mar aerada.

- A extensão do efeito da proteção catódica nas diferentes camadas de armaduras metálicas radialmente e ao longo do comprimento é um assunto a ser melhor estudado. A possibilidade de fragilização pelo hidrogênio dos aços de alta resistência utilizados nas armaduras pode ser facilitada pela produção de hidrogênio induzida na reação catódica. Esse possível efeito, mais provável nos métodos de proteção catódica por corrente impressa, deve ser também melhor investigado.
- Outro ponto a ser investigado é a possibilidade de aumento da pressão parcial nos bolsões de gás resultantes de alagamentos parciais em *risers* e *flowlines*. A coluna de água nas partes superiores podem “comprimir” estes bolsões de gás contendo H₂S e/ou CO₂, resultando em pressões parciais mais altas que as previstas em modelos, com consequente maiores taxas de corrosão.
- O efeito do oxigênio no sentido de favorecer o trincamento por corrosão sob tensão por sulfetos é outro aspecto a ser estudado. Este efeito também deve ser considerado nos estudos de casos de corrosão sob tensão dominados por CO₂. Estudos para determinar as condições de susceptibilidade ao trincamento por corrosão sob tensão na presença de CO₂ em dutos flexíveis são esperados em função da suspeita de ocorrência desse fenômeno em dutos flexíveis divulgados na mídia, baseado em informações preliminares a serem confirmadas com estudos consistentes.
- Por fim, com relação aos aspectos relacionados à corrosão-fadiga, apesar de muitos estudos em andamento priorizarem o aspecto de projeto, com determinação de curvas S-N de projeto para diversas condições de composição de ambiente em contato com as armaduras, também são necessários estudos para determinar as influências dos fatores puramente de corrosão nos processos de nucleação e crescimento de trincas.

Conclusões

- 1- Desde o início da utilização extensiva dos dutos flexíveis para transporte de óleo e gás natural em campos de petróleo marítimos estudos tem sido realizados para determinar os mecanismos atuantes no espaço anular onde se localizam as armaduras metálicas com função estrutural.
- 2- O fato de se situar entre camadas de barreira de contenção não significa que o espaço anular está isento de ambientes agressivos, tendo em vista a possível permeação de gases como CO₂ e H₂S e vapor de água desde o interior do duto, e a possibilidade de entrada de água do mar e ar rico em oxigênio através de falhas na capa externa.
- 3- O efeito do confinamento do espaço anular, onde um pequeno volume de solução aquosa está em contato com uma grande área metálica, tem sido estudado em diversos trabalhos, onde se demonstra a ocorrência de reduzidas taxas de corrosão nessas condições.
- 4- A influência da corrosão na redução da vida à fadiga é um assunto ainda em estudo na indústria de óleo e gás, com poucos dados divulgados. Ênfase tem sido dada a determinação de critérios de projeto baseado em curvas S-N de projeto para diversas condições de ambiente corrosivo.
- 5- Alguns aspectos são recomendados como estudos futuros, como o alcance da proteção catódica radialmente ou longitudinalmente no espaço anular, a corrosão localizada pelo CO₂ e sua influência nos mecanismos de corrosão sob tensão fraturante e corrosão-fadiga, e o efeito do oxigênio na corrosão sob tensão por sulfetos e por CO₂.

Referências bibliográficas

- (1) NTNU, 4SUBSEA e SINTEF, **Handbook on design and operation of flexible pipes**, Norway, 2017
- (2) REMITA, E., ROPITAL, F., KITTEL,J., TRIBOLLET,B., SUTTER, E., TARAVEL-CONDAT, C., DESAMAIS, N., Experimental and theoretical investigation of the uniform corrosion in the annulus of offshore flexible pipes, paper 08538. In: NACE CORROSION 2008, NACE International, 2008.
- (3) DUGSTAD, A., BORVIK, L., PALENC SAR, S., EIKREM, P. A., Corrosion testing of steel armour wires in flexible pipes – a parametric study, paper 5829, In: NACE CORROSION 2015, NACE International, 2015.
- (4) ROPITAL, F., TARAVEL-CONDAT, C., SAAS, J., Methodology to study the general corrosion of steel armours in simulated conditions of flexible pipe annulus – influence of confinement and evaluation of the pH, In EUROCORR 2000 - European Corrosion Congress, 2000.
- (5) CLEMENTS, R., Corrosion assessment prediction for a confined flexible pipe annulus, In EUROCORR 2008 – European Corrosion Congress, 2008.
- (6) DESAMAI, N., TARAVEL-CONDAT, C., A new methodology allowing the use of high strength steel with H₂S in ultra-deep water flexible pipe, In Deep Offshore Technology Conference, 2010.
- (7) KE, L. , TARAVEL-CONDAT, C., KITTEL, J., MINGANT, R., DURET-THUAL, C., QUEREZ, V., Optimising the design of unbonded flexible pipelines with more realistic predictions of pH and H₂S content in the annulus, paper 61129, In International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE2017, 2017.
- (8) SCHMITT, G., HORSTEMEIER, M, Fundamental aspects of CO₂ metal loss corrosion part II: influence of different parameters on CO₂ corrosion mechanism, In NACE CORROSION 2006, NACE International, 2006.