

Tudo é Ciência: do Big Bang ao Metaverso

1º Congresso Brasileiro de Ciência
e Saberes Multidisciplinares

Corrosão sob tensão em dutos flexíveis utilizados na exploração de petróleo e gás

Gabriel Gomes Lemos¹; [0000-0003-4800-4986](tel:0000-0003-4800-4986)
José Mauro Moraes Junior¹; [0000-0002-0355-2682](tel:0000-0002-0355-2682)
Lucas Benini¹; [0000-0002-5850-1399](tel:0000-0002-5850-1399)
Janaína da Costa Pereira Torres de Oliveira²; [0000-0002-6580-7687](tel:0000-0002-6580-7687)

1 - UFF, Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ

lemosgabriel@id.uff.br

2 – UniFOA, Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda, RJ.

Resumo: O objetivo do presente trabalho foi realizar uma pesquisa exploratória do tipo levantamento bibliográfico sobre falhas por corrosão sob tensão na armadura de tração de dutos flexíveis. Dos trabalhos que foram encontrados selecionou-se os que apresentavam uma investigação sobre as causas e fatores que levam à falha. Os resultados mostram que a corrosão sob tensão ocorre na presença de três fatores concomitantes, tensões mecânicas, meio corrosivo e material suscetível. As tensões mecânicas atuantes na corrosão sob tensão são tensões residuais inerentes ao processo de fabricação por conformação plástica das armaduras de tração. O meio corrosivo, por sua vez, estará presente quando ocorrer o alagamento do espaço anular, seja pela falha na capa externa, resultando na entrada de água do mar, ou por permeação de gases como dióxido de carbono, sulfeto de hidrogênio e vapor d'água pela barreira de pressão, dependendo das características do produto transportado. Por fim, em relação à susceptibilidade dos materiais, estudos mostram que as principais características que influenciam na ocorrência de corrosão sob tensão é a composição química e a microestrutura, sendo que resultados contraditórios deixam a discussão a respeito da influência da microestrutura inconclusivos. Não foram encontrados estudos que apresentassem formas de evitar pelo menos um dos fatores de maneira definitiva, eliminando a possibilidade de ocorrência de corrosão sob tensão, o que oportuniza e motiva a realização de estudos experimentais nesta área.

Palavras-chave: Corrosão sob tensão. Dutos flexíveis. Petróleo e gás.

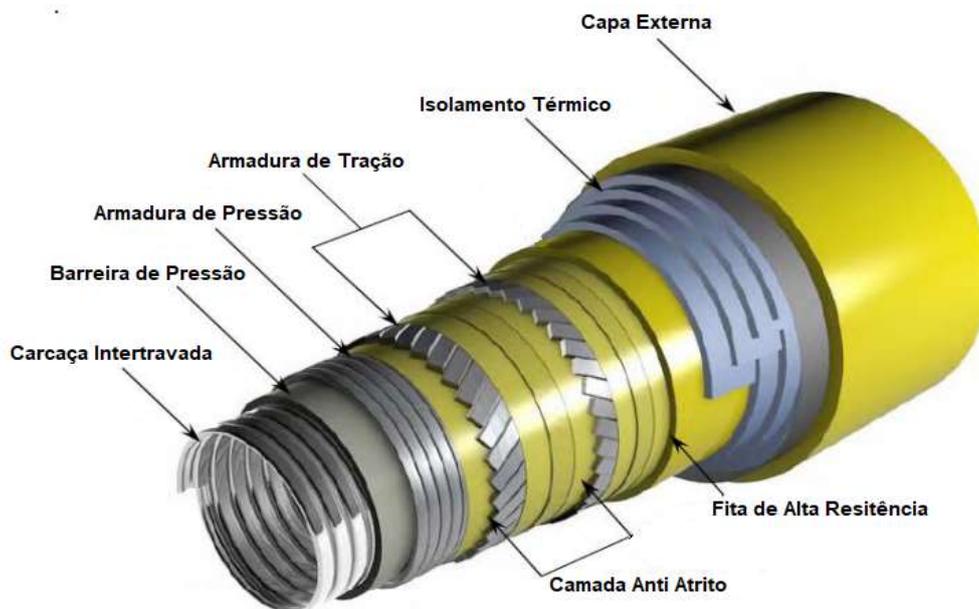
Tudo é Ciência: do Big Bang ao Metaverso

1º Congresso Brasileiro de Ciência
e Saberes Multidisciplinares

INTRODUÇÃO

Os dutos flexíveis são estruturas utilizadas pela indústria de petróleo e gás para transporte de fluidos do poço de exploração para as unidades flutuantes, como também para injeção de fluidos no poço de exploração. Esses dutos são formados pela superposição de camadas concêntricas de material metálico e polimérico, esquematizadas na figura 1, tendo cada camada sua função específica (COELHO, 2013).

Figura 1 - Camadas típicas de um duto flexível.



Fonte: (COELHO, 2013).

A carcaça intertravada tem contato direto com o fluido transportado, podendo ser fabricada por diferentes materiais com resistência à corrosão, e tem a função principal de proteger o duto de colapsos em sua estrutura advindos de carregamentos aplicados externamente. A barreira de pressão é uma camada termoplástica, também resistente quimicamente ao fluido transportado, extrudada sobre a carcaça, e tem a função de conferir estanqueidade ao duto. A armadura de pressão é composta por perfis de aço carbono de alta resistência, intertravados e dispostos em helicóide, com a função de reforçar estruturalmente o duto contra as pressões internas de operação. A fita de alta resistência é uma fita adesiva que é colada na parte externa da armadura de tração e tem o intuito de garantir o posicionamento dos arames, evitando que os

Tudo é Ciência: do Big Bang ao Metaverso

1º Congresso Brasileiro de Ciência
e Saberes Multidisciplinares

arames se desalinham. A camada de isolamento térmico é a camada responsável por restringir a perda de calor interno do duto para o ambiente externo, usada com intuito de manter a temperatura do petróleo cru extraído evitando a formação de cera e hidratos. As camadas anti atrito são compostas por camadas poliméricas utilizadas entre duas camadas metálicas para reduzir o atrito gerado no contato metal-metal. A capa externa, feita de material polimérico, deve ser capaz de resistir as intempéries da água do mar, como também absorver choques mecânicos provenientes de seu transporte e instalação sem comprometer a integridade do duto (ANDRADE, 2018; BENDIA, 2019; COELHO, 2013; GONÇALVES, 2018; NOGUEIRA, 2008; SALGADO e AZEVEDO, 2016; SANTOS, 2011).

A armadura de tração, fabricadas em aços carbono com limite de resistência que varia de 1100 MPa à 1500 MPa , tem a função de resistir aos carregamentos trativos que os dutos são submetidos. Fica localizada no espaço anular, local entre a barreira de pressão e a capa externa, em conjunto com as camadas poliméricas de anti desgaste e de alta resistência (COELHO, 2013).

A armadura de tração é disposta sempre em pares, em geral, de 2 a 4 camadas metálicas de arames de perfil retangular chato. Para formar a armadura de tração vários arames são conformados helicoidalmente em torno do eixo longitudinal do duto sob uma superfície de apoio, sempre em sentidos contrários e com um ângulo de assentamento pré determinado, numa máquina chamada matriz. Os perfis retangulares são assentados em sentidos contrários para equilibrar as torções geradas em seu tracionamento. (ANDRADE, 2018; BENDIA, 2019).

Apesar de toda tecnologia no projeto e na fabricação dos dutos flexíveis, algumas falhas vem ocorrendo. No ano de 2017, por exemplo, um riser de injeção de gás, conectado ao *Floating Production Storage and Offloading (FPSO)* – Angra dos Reis, se rompeu por conta de falhas na armadura de tração por corrosão sob tensão (CST), fazendo com que parte da operação fosse interrompida. Os dutos flexíveis foram desenvolvidos para ter uma vida em serviço de vinte a trinta anos, e este se rompeu com apenas dois anos em operação. Em janeiro de 2020 outro riser de injeção de gás



Tudo é Ciência: do Big Bang ao Metaverso

1º Congresso Brasileiro de Ciência
e Saberes Multidisciplinares

ligado ao FPSO – Angra dos Reis se rompeu, pelo mesmo motivo, novamente no campo de Lula (PETRONOTÍCIAS, 2020; GONÇALVES, 2018).

Os aspectos da falha por CST dos dutos flexíveis ainda não são perfeitamente entendidos, o que é fundamental para determinação da causa raiz, possibilitando tratativas que diminuam ou eliminem as ocorrências de falha, e esta foi a motivação do presente trabalho.

Neste sentido, o objetivo do presente trabalho foi realizar uma pesquisa exploratória do tipo levantamento bibliográfico sobre falhas por corrosão sob tensão na estrutura metálica de dutos flexíveis. Acredita-se que a pesquisa exploratória realizada no presente trabalho possa contribuir para um melhor entendimento do assunto, dando subsídios para estudos experimentais futuros sobre o tema. Este tipo de estudo é útil para que se tenha o domínio sobre os fenômenos, e se busque soluções para novas linhas flexíveis e medidas preventivas e corretivas para as linhas já em operação.

MÉTODOS

Foi realizada uma pesquisa exploratória do tipo levantamento bibliográfico buscando trabalhos que apresentassem uma investigação sobre as causas e fatores que levam à falha por corrosão sob tensão de dutos flexíveis utilizados na indústria de petróleo e gás, bem como trabalhos que apresentassem soluções tecnicamente e economicamente viáveis para a eliminação estas ocorrências de falhas. A pesquisa foi realizada em plataformas digitais utilizando as palavras-chave: “corrosão sob tensão em dutos flexíveis”; “corrosão sob tensão da armadura de tração”; “stress corrosion cracking on flexible pipes” e “SCC on tensile armor wires”. Dos trabalhos que foram encontrados selecionou-se os que apresentaram o assunto estudado de forma mais completa.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

De uma forma geral os trabalhos publicados, estudados no presente artigo, mostram que a CST acomete as armaduras de tração dos dutos flexíveis quando há três fatores concomitantes: tensões mecânicas, meio corrosivo e material suscetível.

Tudo é Ciência: do Big Bang ao Metaverso

1º Congresso Brasileiro de Ciência
e Saberes Multidisciplinares



Os carregamentos que resultam em tensões mecânicas associadas à CST podem ser dinâmicos ou estáticos. Os carregamentos dinâmicos estão ligados aos efeitos das ondas e marés sobre os dutos flexíveis, que podem promover tração, flexão e torção do mesmo. Contudo, estes carregamentos atuam de forma cíclica e, por isso, são comumente atrelados a corrosão-fadiga, e não estão dentro do escopo do presente trabalho. A literatura aponta que os carregamentos estáticos, mais especificamente as tensões elásticas residuais, geradas no processo de conformação mecânica sofrido pelos arames metálicos durante a fabricação das armaduras de tração do duto, processo realizado pela matriz, é um dos fatores causadores da CST (SALAU, 2019; SILVA, 2019).

De acordo com estudo das tensões residuais pelo método experimental de rede de Bragg, feito por VARGAS (2014), as tensões residuais nos arames da armadura de tração são dispostas após o relaxamento na superfície externa, apresentando tensões residuais de compressão na parte superior e de tração na parte inferior. Também foi descoberto no estudo que é na superfície interna que estão as tensões residuais máximas de tração.

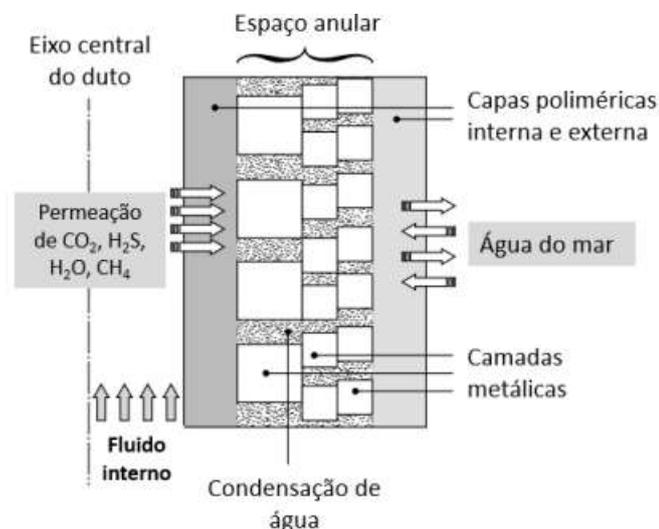
Em relação ao meio corrosivo, para que ocorram as reações eletroquímicas na superfície do metal, que caracteriza a corrosão sob tensão, é necessário um ambiente aquoso, que ocorre quando há o alagamento do espaço anular. O alagamento pode acontecer de duas maneiras: pela falha da capa externa ou através da permeação de gases pela barreira de pressão. A figura 2 mostra um modelo esquemático dos dois modos de alagamento do anular (BENDIA, 2019).

No caso de falha da capa externa o fluido que ocupará o anular será a água do mar. As falhas da capa externa podem ocorrer na fabricação por falha no processo de extrusão, no manuseio pela abrasão do duto com extremidades pontiagudas, ou durante a operação pelo impacto do duto com outras superfícies (BENDIA, 2019).

A permeação interna de gases, por sua vez, ocorre devido as características do produto transportado, ou seja, do petróleo. Em geral o petróleo cru extraído do poço tem uma composição bifásica sendo uma fase líquida e outra gasosa. Na fase gasosa estão presentes gases como dióxido de carbono (CO_2), sulfeto de hidrogênio (H_2S) e

vapor d'água (H_2O), que são capazes de permear a camada polimérica, que apesar de estanque permite a passagem de pequenas moléculas. Essa permeação depende de alguns parâmetros sendo eles a constante de permeabilidade do polímero utilizado, espessura, temperatura, pressões parciais dos gases, entre outros. As moléculas de vapor d'água após permear a barreira polimérica se condensam devido a diferença de temperatura formando camadas de umidade e, conseqüentemente, tornando o ambiente aquoso. Dessa forma esses gases conseguem chegar à estrutura metálica e podem ocasionar a CST (COELHO, 2013).

Figura 2 - Modelo esquemático do alagamento do anular de um duto flexível.



Fonte: (GONÇALVES, 2018).

Em relação à susceptibilidade do material, estudos mostram que as principais características que influenciam na ocorrência de CST é a composição química e a microestrutura. No entanto, a presença de precipitados, como também o tamanho de grão, são variáveis que devem ser consideradas na análise de susceptibilidade a CST (COELHO, 2013).

Alguns elementos de liga, quando adicionados ao aço, influenciam diretamente na sua resistência a CST. Dentre os elementos benéficos se destacam o cromo (Cr), o molibdênio (Mo), o silício (Si) e o níquel (Ni). Já a adição de carbono (C) não é favorável nesse cenário, uma vez que ela reduz a tenacidade e a resistência a corrosão de forma geral (SILVA, 2019).

Tudo é Ciência: do Big Bang ao Metaverso

1º Congresso Brasileiro de Ciência
e Saberes Multidisciplinares

Quanto à microestrutura, um estudo realizado por TAGLIARI (2019) submetendo corpos de prova com mesma composição química, sendo um com microestrutura martensítica e outro perlítica-ferrítica, ao mesmo ensaio de baixa taxa de deformação, comprovaram que a microestrutura tem influência no processo corrosivo. Nesse estudo o aço com microestrutura perlítica-ferrítica apresentou uma maior resistência a CST em comparação a microestrutura martensítica, que se mostrou sensível. Em contrapartida, testes de resistência a CST em auto clave de corpos de prova com microestrutura martensítica e ferrítica, realizados por LIU (2018), resultaram numa maior resistência à CST da microestrutura martensítica, ao passo que o corpo de prova de microestrutura ferrítica apresentou alta susceptibilidade a CST. Estes resultados contraditórios deixam em aberto a discussão a respeito da influência da microestrutura na susceptibilidade do material a CST.

Em relação ao tamanho de grão médio do material, grãos mais finos, com maior densidade de contornos de grão, tendem a deixar o metal com uma maior resistência a formação de trincas, tendo em vista que as tensões aplicadas tendem a se acumular nos contornos de grão. Dessa forma o tamanho de grão médio é capaz de influenciar na susceptibilidade do aço a CST (SILVA, 2019).

Por último, a presença de alguns precipitados tem ação benéfica no combate a CST. Dependendo da composição química o precipitado pode atuar como uma armadilha para o hidrogênio, o capturando e impedindo que este permeie para dentro do aço. Um exemplo é quando há adição de Cr na liga, este promove a formação de carbeto de cromo que é dispersado sobre a matriz e atua inibindo a permeação do hidrogênio (SILVA, 2019).

De uma forma geral, tratamentos térmicos podem ser usados para alívio de tensões após conformação dos arames, o meio corrosivo pode ser evitado com o desenvolvimento de materiais poliméricos mais resistentes e impermeáveis, e a susceptibilidade do material pode ser elevada com o desenvolvimento de aços mais resistentes à CST, mas ainda precisam ser desenvolvidos.

Tudo é Ciência: do Big Bang ao Metaverso

1º Congresso Brasileiro de Ciência
e Saberes Multidisciplinares

CONCLUSÕES

A pesquisa apontou três fatores que precisam coexistir para que ocorra a CST nas armaduras de tração dos dutos flexíveis, tensões mecânicas, meio corrosivo e material suscetível. Neste caso, para evitar a CST é preciso eliminar pelo menos um destes fatores. Porém, não foram encontrados na literatura estudos que apresentassem formas de evitar um dos fatores de maneira definitiva, o que oportuniza e motiva a realização de estudos experimentais futuros neste assunto.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, D. C. Corrosão-Fadiga nas Armaduras de Tração de um Riser Flexível do Tipo Unboned. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Mecânica) - UNIS/MG. Varginha. 2018.

BENDIA, N. B. Avaliação de Danos em Linhas Flexíveis uma Visão Prática. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Naval e Oceânica) - UFRJ. Rio de Janeiro. 2019.

COELHO, P. P. D. S. Estudo da Susceptibilidade à Corrosão Sob Tensão em Atmosfera de H₂S das Armaduras de Tração de Dutos Flexíveis. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais) - CEFET/RJ. Rio de Janeiro. 2013.

GONÇALVES, R. Metodologia de Análise de Vida em Fadiga da Armadura de Tração de Dutos Flexíveis Submetidos a Meios Agressivos, Um Estudo Comparativo. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais) - UFRGS. Porto Alegre. 2018.

LIU, Z. Hydrogen assisted cracking and CO₂ corrosion behaviors of low-alloy steel with high strength used for armor layer of flexible pipe. ELSEVIER - Applied Surface Science, 25 Janeiro 2018.

NEGREIROS, L. A. S. D. Avaliação da Resistência à Fadiga e Corrosão-Fadiga da Armadura de Tração de um Riser Flexível Retirado de Operação. Dissertação de

Tudo é Ciência: do Big Bang ao Metaverso

1º Congresso Brasileiro de Ciência
e Saberes Multidisciplinares

Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) - UFRGS. Porto Alegre. 2016.

NOGUEIRA, V. P. P. Análises Numéricas de Dutos Flexíveis Íntegros e Danificados Sob Pressão Externa. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica) - UFRJ. Rio de Janeiro. 2008.

PETRONOTÍCIAS. Petrobras Sofre Novo Rompimento de Riser Flexível no FPSO Angra dos Reis, 2020. Disponível em: <<https://petronoticias.com.br/petrobras-sofre-novo-rompimento-de-riser-flexivel-no-fpso-angra-dos-reis/>>. Acesso em: 20 Agosto 2021.

SALAU, E. L. Análise da integridade em armaduras de tração de dutos flexíveis com o efeito de corrosão sob tensão em água do mar. Dissertação de Graduação - Departamento de Engenharia Mecânica - UFRGS. Porto Alegre. 2019.

SALGADO, A. L. D. P.; AZEVEDO, D. A. G. Corrosão nas estruturas metálicas de tubos flexíveis utilizados para exploração de petróleo offshore. Projeto Final Curso de Graduação - Depto. de Engenharia Química e de Petróleo - UFF. Niterói. 2016.

SANTOS, F. P. D. Avaliação dos Efeitos da Pressão Parcial de CO₂ no Processo de Corrosão-Fadiga em Armaduras de Tração de Dutos Flexíveis. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, e Tecnologia de Materiais) - CEFET/RJ. Rio de Janeiro. 2011.

SILVA, P. V. G. D. Avaliação de HIC e SSC em aços de alta resistência mecânica usados em armadura de tração de dutos flexíveis em meios com baixa concentração de H₂S. Dissertação de Graduação - Curso de Engenharia Metalúrgica - UFRJ. Rio de Janeiro. 2019.

TAGLIARI, M. D. R. Tensile Armor Wires Submitted to Slow Strain Rate Tests in a Corrosive Environment and Cathodic Protection: a Comparison Between Two Different Microstructures. Scielo Brasil, 10 Abril 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2018-0465>>. Acesso em: 27 Janeiro 2022.



Organização | UniFOA

Tudo é Ciência: do Big Bang ao Metaverso

1º Congresso Brasileiro de Ciência
e Saberes Multidisciplinares

VARGAS, F. A. Avaliação das tensões residuais em armaduras de tração de dutos flexíveis pelo método experimental da rede de Bragg. Dissertação de Mestrado - Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais - CEFET. Rio de Janeiro. 2014.