

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ANÁLISE DA INTEGRIDADE EM ARMADURAS DE TRAÇÃO DE DUTOS
FLEXÍVEIS COM O EFEITO DE CORROSÃO SOB TENSÃO EM ÁGUA DO MAR

por

Eduardo Latorre Salau

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, dezembro de 2019.

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

Salau, Eduardo Latorre
ANÁLISE DA INTEGRIDADE EM ARMADURAS DE TRAÇÃO DE
DUTOS FLEXÍVEIS COM O EFEITO DE CORROSÃO SOB TENSÃO EM
ÁGUA DO MAR / Eduardo Latorre Salau. -- 2019.
30 f.
Orientador: Ignacio Iturrioz.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2019.

1. corrosão sob tensão. 2. dutos flexíveis. 3.
armadura de tração. 4. pites. I. Iturrioz, Ignacio,
orient. II. Título.

Eduardo Latorre Salau

ANÁLISE DA INTEGRIDADE EM ARMADURAS DE TRAÇÃO DE DUTOS
FLEXÍVEIS COM O EFEITO DE CORROSÃO SOB TENSÃO EM ÁGUA DO MAR

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Mário Roland Sobczyk Sobrinho
Coordenador(a) do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos

Orientador: Prof. Dr. Ignacio Iturrioz

Comissão de Avaliação:

Prof. Felipe Tempel Stumpf

Prof. Ignacio Iturrioz

Prof. Jakson Manfredini Vassoler

Porto Alegre, dezembro de 2019.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço aos familiares e amigos que prestaram apoio e contribuíram para minha formação cidadã, acadêmica e profissional. Obrigado a todos os colegas que estiveram ao meu lado durante toda a graduação, pois sem seus apoios essa jornada seria muito mais complicada.

Agradeço a todo o grupo GMAp pela estrutura fornecida durante a minha bolsa e graduação, em especial ao amigo e prof^o Ignacio Iturrioz, que durante anos contribuiu para minha formação acadêmica, se tornando um exemplo para mim de uma pessoa bem-humorada, dedicada e muito esforçada. Certamente você é tido como um espelho para as pessoas em sua vida, que admiram o seu grande talento em ensinar e ajudar ao próximo.

Por fim, agradeço a Universidade Federal do Rio Grande do Sul por fornecer um ensino público gratuito e de qualidade.

SALAU, E. L. ANÁLISE DA INTEGRIDADE EM ARMADURAS DE TRAÇÃO DE DUTOS FLEXÍVEIS COM O EFEITO DE CORROSÃO SOB TENSÃO EM ÁGUA DO MAR. 2019. 30 páginas. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

RESUMO

Dutos flexíveis são utilizados para extração de petróleo, gás ou água em ambiente marinho, onde a profundidade pode ultrapassar 1000 metros. Devido a problemas na instalação ou as condições severas de serviço, pode ocorrer ruptura na camada polimérica externa desses dutos, ocorrendo alagamento do espaço anular devido a entrada da água do mar e, conseqüentemente, provocando corrosão nas armaduras de tração, que são responsáveis pela rigidez axial da estrutura. Essa corrosão provoca o surgimento de pites, que são concentradores de tensão e possíveis pontos de iniciação e propagação de fissuras. Portanto, este trabalho tem como objetivo principal estudar a integridade das armaduras de tração com o efeito de corrosão sob tensão em água do mar, para armaduras de mesmo tipo de aço (AISI 4340) tratados termicamente de formas distintas, utilizando a norma BS 7910. Utilizando informações das dimensões dos pites em dutos flexíveis retirados de operação, é possível estimar o fator de concentração de tensões que, associado a tensão residual no material, permite calcular o fator de intensidade de tensões. Utilizando três aços AISI 4340 com tensão de escoamento e tenacidade diferentes, foi possível estimar com quais valores de profundidade de fissura e tensão primária a fissura começava a se propagar de forma estável e/ou instável. No caso de propagação da fissura de forma instável, se percebe que os limites da tensão primária e profundidade da fissura são muito próximos para os três aços. Os resultados contribuem com informações importantes sobre a seleção de materiais para construção de armaduras de tração, pois mostram resultados comparativos entre os limites permitidos das tensões primárias e profundidades das fissuras em que ocorre propagação estável e instável das fissuras.

PALAVRAS-CHAVE: corrosão sob tensão, dutos flexíveis, armadura de tração, pites.

SALAU, E. L. INTEGRITY ANALYSIS IN FLEXIBLE DUCTS TRACTION ARMOR WITH THE EFFECT OF STRESS CORROSION IN SEAWATER. 2019. 30 pages. Mechanical Engineering End of Course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

ABSTRACT

Flexible risers are used for extraction of oil, gas, or water in the marine environment, where the depth can exceed 1000 meters. Due to installation problems or severe service conditions, rupture in the external polymeric layer of these ducts may occur. It causes flooding due to seawater entry and, consequently, corrosion of the tensile armor, which is responsible for the riser stiffness. This kind of corrosion causes the creation of pits, which are stress concentrators and possible points of initiation and propagation of cracks. Therefore, the main objective of this work is to study the integrity of tensile armor submitted to stress corrosion in seawater. Different types of heat treated armors of the same type of steel (AISI 4340) are investigated using the BS 7910 standard. The information obtained in terms of pits dimensions in risers taken out of operation were used to estimate the stress concentration factor. Also, the residual stress in the tensile armor are considered. With both values, it was possible to compute the stress intensity factor. Using three AISI 4340 steels with different yield strength and tenacity, it was possible to estimate with which values of crack depth and primary stress the crack began to propagate stably and or unstably. In the case of unstable crack propagation, it can be seen that the limits of the primary stress and crack depth are very close for the three steels. The results provide important information on the selection of materials for the construction of tensile armor since they show comparative results between the allowed limits of primary stresses and crack depths in which stable and unstable crack propagation occur.

KEYWORDS: Stress corrosion, Flexible pipelines, tensile armor, pits.

NOMENCLATURA

b	Profundidade do pite	[m]
$2c$	Largura do pite	[m]
K_t	Fator de concentração de tensões teórico	[adimensional]
K	Fator de intensidade de tensões	[MPa m ^{1/2}]
Y	Fator geométrico	[adimensional]
σ	Tensão remota aplicada	[MPa]
a	Profundidade da fissura	[m]
K_{ICST}	Limiar do fator de intensidade de tensões	[MPa m ^{1/2}]
K_C	Tenacidade do material	[MPa m ^{1/2}]
σ_{esc}	Tensão de escoamento	[MPa]
$\sigma_{esc}(a)$	Tensão de escoamento corrigida	[MPa]
L_r	Risco de escoamento do material	[adimensional]
t	Espessura da armadura de tração	[m]
K_r	Risco de colapso plástico	[adimensional]
K^P	Fator de intensidade de tensões devido cargas primárias	[MPa m ^{1/2}]
K^S	Fator de intensidade de tensões devido cargas secundárias	[MPa m ^{1/2}]
ρ	Efeito das iterações da plasticidade	[adimensional]

SUMÁRIO

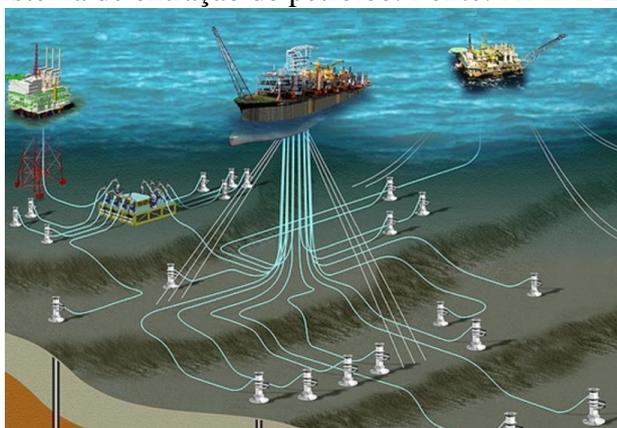
	Pág.
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivos do trabalho.....	1
1.2 Organização do trabalho.....	2
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.	2
2.1 Dutos flexíveis.....	2
2.2 Falhas em dutos flexíveis.....	3
2.3 Corrosão em armaduras de tração.....	4
2.4 Fator de concentração de tensões teórico K_t	4
2.5 Tensões residuais em armaduras de tração.....	5
2.6 Corrosão sob tensão.....	5
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
4. METODOLOGIA.....	7
4.1 Descrição dos dutos flexíveis e região de falha.....	7
4.2 Dimensões dos pites e estimativa do Fator de Concentração de Tensões Teórico K_t ...8	8
4.3 Tensões residuais em montagem da armadura de tração.....	8
4.4 Propriedades mecânicas do material estudado.....	9
4.5 Determinação do fator geométrico Y	10
4.6 Análise da integridade de estruturas contendo defeitos, utilizando norma BS 7910...10	10
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	11
5.1 Risco de propagação da fissura de forma estável e instável.....	11
5.2 Tempo de propagação de fissura até a ruptura e contribuição da tensão residual.....	13
5.3 Comparação entre propagação de fissura com geometria semicircular e semielíptica.14	14
6. CONCLUSÃO.....	15
6.1 Sugestões para trabalhos futuros.....	15
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	15
ANEXOS.....	18
APÊNDICES.....	21

1. INTRODUÇÃO

O petróleo é atualmente uma das principais fontes de energia utilizada no mundo, pois seus subprodutos são amplamente utilizados pela sociedade. Para atender essa demanda, foi necessário aumentar a produção em leito marinho. A partir da década de 70, quando foi descoberta a Bacia dos Campos, houve um aumento significativo de extração de petróleo em águas profundas, atingindo atualmente mais de 90% da produção atual no país, como informa a Agência Nacional de Petróleo (ANP).

A extração de petróleo em leito marinho é feita por Unidades Estacionárias de Produção (UEPs), também conhecidas por plataformas de petróleo, como mostra a Figura 1. Essas UEPs são conectadas ao fundo do mar por dutos flexíveis, caracterizados por possuírem multicamadas que resistem a ambientes corrosivos e a diferentes tipos de solicitações.

Figura 1 – Sistema de extração de petróleo. Fonte: AMBIPETRO (2013).



A utilização de dutos flexíveis na extração de petróleo tem enfrentado alguns problemas relacionados a corrosão sob tensão e fadiga nas armaduras de tração devido o meio agressivo. O meio agressivo é produzido através da mistura de compostos como H_2S e CO_2 , provenientes do tipo de fluido extraído pelo riser e a água do mar. Esta combinação se produz pelos rompimentos das camadas poliméricas interna e externa do duto.

Este ambiente agressivo, combinado com tensões variáveis difíceis de determinar, criam um cenário culpado de produzir colapsos antes dos risers atingirem a vida útil programada, se tornando um problema de grande importância estratégica a ser resolvido pela Petrobras. Como exemplos documentados desses problemas, se podem citar os colapsos acontecidos em Campos de Lula e Sapinhoá (PetroNotícias, 2017).

Devido à importância econômica e ambiental do fluido extraído nesses dutos flexíveis, é necessário seguir procedimentos padronizados para sua construção. Neste caso, a Norma BS 7910 se destaca como referência em resoluções de problemas em estruturas contendo fissuras.

1.1. Objetivos do trabalho

O objetivo geral do presente trabalho consiste em explorar os fatores que influenciam no rompimento das armaduras de tração em dutos flexíveis, submetidos a um ambiente agressivo e a cenários de solicitações determinados.

Como objetivos específicos se apresentam:

- Estudar a integridade das armaduras de tração expostas ao ambiente agressivo contendo água do mar, para armaduras de mesmo tipo de aço (AISI 4340) tratados termicamente de formas distintas.

- Determinar os parâmetros que permitem caracterizar os defeitos que surgem neste tipo de estrutura (concentradores de tensões nos pites e fator de intensidade de tensões nas fissuras), assim como a determinação do estado tensional que atua na região do defeito.
- Aplicar a metodologia proposta pela norma BS7910 para avaliar os defeitos nas estruturas, realizando um estudo paramétrico dos mesmos.

1.2. Organização do trabalho

Será apresentada na seção 2 a Fundamentação Teórica, descrevendo as camadas dos dutos flexíveis e citando os motivos que causam as falhas em armaduras de tração. A seção 3 descreve a Revisão Bibliográfica, abordando dissertações onde foram analisadas as influências da água do mar e do gás H₂S na corrosão de armaduras de tração, assim como as tensões residuais presentes no material por causa de sua montagem nos dutos flexíveis. A seção 4 descreve a Metodologia seguida para análise de integridade das armaduras de tração, seguindo a norma BS 7910. A seção 5 mostra os Resultados e Discussões para a análise da integridade de armaduras de tração, utilizando diferentes valores de tensão primária e profundidade da fissura. Por fim, a seção 6 aborda as Conclusões definidas através da seção 5 e propõe sugestões para trabalhos futuros.

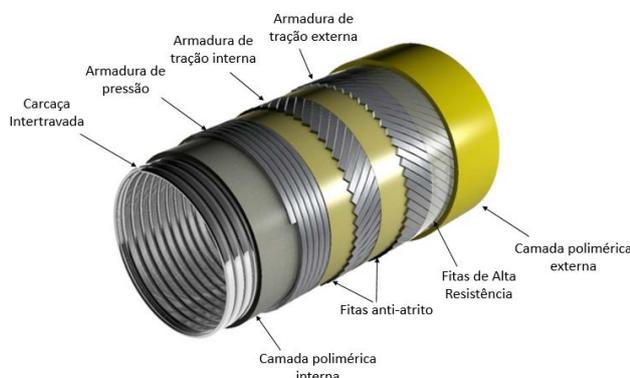
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Dutos flexíveis

Os dutos flexíveis, também chamados de *risers* flexíveis, possuem a finalidade de transportar fluidos como petróleo, gás ou água através da interligação de plataformas de petróleo com poços petrolíferos. Esses tubos são compostos de multicamadas metálicas e poliméricas, os quais suportam as condições severas a que são submetidos, como altas pressões interna e externa, esforços axiais, grandes profundidades de operação e ambientes corrosivos contendo CO₂, H₂S e água do mar.

Devido à sua estrutura multicamadas, os dutos flexíveis toleram altas curvaturas, possuindo baixa rigidez à flexão e alta rigidez axial. As camadas metálicas são dispostas helicoidalmente, enquanto as camadas poliméricas são extrudadas e não aderem umas às outras, como mostra a Figura 2.

Figura 2 - Multicamadas de tubos flexíveis. Fonte: Adaptado de Santos (2011).



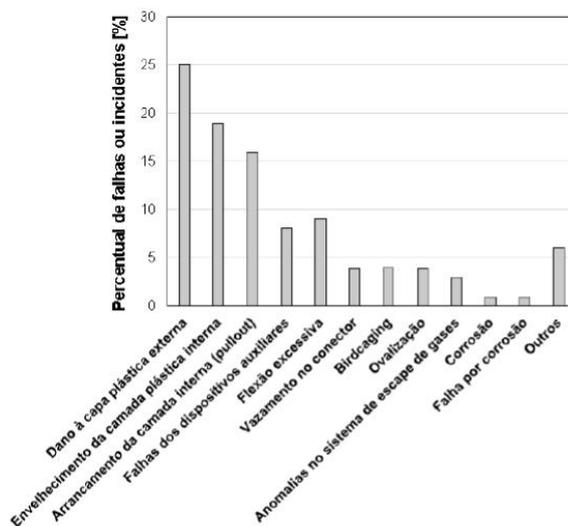
As contribuições das camadas para a estabilidade dos dutos flexíveis são definidas da seguinte forma:

- A Carcaça Intertravada tem a função de prevenir o colapso da estrutura ocasionado por pressão externa e compressão mecânica radial.
- As camadas poliméricas interna e externa fazem a estanqueidade do tubo flexível, não permitindo que os fluidos interno e externo entrem em contato.
- A armadura de pressão tem a principal finalidade de resistir à pressão interna, mas também contribui com a resistência a outros esforços radiais. Sua construção em forma helicoidal com ângulo próximo de 90° em relação ao eixo do tubo faz com que essa estrutura tenha elevada rigidez radial.
- As fitas anti-atrito são materiais poliméricos que evitam o atrito entre duas camadas metálicas. Geralmente são utilizadas quando há carregamentos dinâmicos.
- As armaduras de tração são responsáveis por suportar todo carregamento axial originado da flexão, tração e pressão interna. Cada duto flexível possui 2 ou 4 armaduras de tração, necessariamente em pares, onde cada par possui armaduras de tração dispostas helicoidalmente com hélice posicionadas em sentidos opostos, assim o tubo não sofre torção quanto o mesmo é tracionado. A quantidade de arames em cada armadura de tração pode variar entre 30 e 80, e o ângulo entre a helicoide e o eixo do tubo fica entre 20° e 60° (API RP 17B, 2014). Esse ângulo da helicoide varia de acordo com a rigidez axial e rigidez radial que se quer obter, ou seja, ângulos maiores são necessários em casos onde se deseja maior rigidez radial, como é o caso de dutos flexíveis sem armadura de pressão. Em contrapartida, pequenos ângulos da helicoide em relação ao eixo do tubo são necessários em casos onde se deseja alta rigidez axial, principalmente em tubos que possuam armadura de pressão, onde esse ângulo varia entre 20° e 35° .
- As fitas de alta resistência são necessárias para evitar um deslocamento excessivo das armaduras de tração na direção radial, chamadas de gaiola de passarinho, que são originadas por flexão, compressão ou pressão interna nos tubos.

2.2. Falhas em dutos flexíveis

Devido ao fato dos dutos flexíveis serem construídos em multicamadas e ocorrerem diversas interações entre elas, podem ocorrer diferentes formas de falhas, como mostra a Figura 3. O modo de falha geralmente está relacionado com o aumento de um defeito ou degradação, ocasionando a perda da integridade da estrutura. Portanto, um defeito ou degradação não geram a perda da integridade da estrutura, mas são precursores de uma falha.

Figura 3 - Percentual de falhas e incidentes em tubos flexíveis. Fonte: OBRIEN et al. (2011).



A Figura 3 mostra que o principal defeito que ocorre em dutos flexíveis retirados na Noruega e Reino Unido é o dano a camada polimérica externa. Esse tipo de defeito não caracteriza um modo de falha nos dutos flexíveis, pois o acesso da água do mar no espaço anular não inviabiliza o funcionamento do duto flexível em um curto prazo de tempo. Porém, esse tipo de defeito é precursor em falhas por corrosão sob tensão, que é o escopo desse trabalho.

2.3. Corrosão em armaduras de tração

A corrosão nos arames pode gerar diminuição na espessura do arame ou o surgimento de imperfeições na superfície, chamados de pites. Esses pites criam zonas concentradoras de tensões que favorecem a iniciação de trincas, mesmo em situações onde as cargas externas sejam menores que a tensão de escoamento do material.

Existem dois motivos para ocorrer corrosão nas armaduras de tração: motivados pela redução no nível de pH no meio ou a ação do oxigênio dissolvido. Em ambiente marinho, a diminuição do pH não é determinante para o aumento da corrosão, pois o nível do pH inicial é elevado. A quantidade de oxigênio presente na água do mar é determinante na taxa de corrosão do aço, porém, a concentração de oxigênio fica em torno de 8 ppm em peso nessas condições, o que é um valor baixo se for levado em consideração que a água do mar está em contato com o espaço anular, que é um ambiente confinado (FERGESTAD; LØTVEIT, 2014). A região da armadura de tração que fica em contato com a abertura do dano na camada polimérica externa sofre mais corrosão que as partes que ficam distantes do dano, pois ocorre renovação do oxigênio nas regiões próximas ao dano, o que não acontece em regiões mais afastadas.

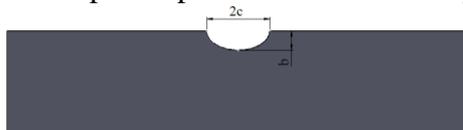
Como mencionado anteriormente, são utilizadas fitas anti-atrito para evitar o atrito entre duas camadas metálicas, como mostra a Figura G1. Essas fitas são enroladas helicoidalmente entre as armaduras de tração, gerando um espaçamento na helicoide, chamado de *gaps*. Esses *gaps* são pontos onde se concentram mais pontos de corrosão, possivelmente por ter mais contato com o oxigênio em comparação com as regiões coberta pelas fitas, gerando uma corrosão por aeração diferencial (Negreiros, 2016).

2.4. Fator de concentração de tensões teórico K_t

Imperfeições na superfície das armaduras de tração, originadas pela corrosão do material em contato com a água do mar, geram um aumento local na tensão que ocorre nos dutos flexíveis. O fator multiplicativo aplicado na tensão nominal do material é associado à geometria da imperfeição e ao modo de aplicação da carga (tração, flexão ou torção), levando em consideração um material perfeitamente homogêneo, isotrópico e elástico.

No caso de formação de pites de corrosão, o fator de concentração de tensões depende fundamentalmente da profundidade (b) e largura ($2c$) como mostra a Figura 4.

Figura 4 - Exemplo de pite e suas dimensões principais.



Ahin et al. (1992) analisaram o fator de concentração de tensões provocados por pites, em ambiente contendo água salgada. Constataram que, para aços de alta resistência e baixa liga, K_t depende somente dos parâmetros de largura e profundidade do pite.

$$K_t = 1 + 1,25 \sqrt{\frac{2}{1 + \left(\frac{2c}{b}\right)^2}} \quad (1)$$

De forma análoga a Ahin et al. (1992), Cerit et al. (2009) analisaram os pites utilizando método de elementos finitos tridimensional e concluíram que K_t depende principalmente dos parâmetros $2c$ e b , como mostra a Equação 2. Os autores identificaram que as tensões nas bordas dos pites podem ser maiores ou menores em comparação ao fundo do pite, dependendo da relação $b/2c$.

$$K_t = \frac{(1 + 6,6 \left(\frac{b}{2c}\right))}{(1 + 2 \left(\frac{b}{2c}\right))} \quad (2)$$

2.5. Tensões residuais em armaduras de tração

Tensões residuais são definidas como tensões elásticas presente no material, geralmente produzidas por deformações plásticas geradas por algum processo de fabricação e, portanto, não são caracterizados por tensões externas ou gradientes de temperatura.

No caso das armaduras de tração, as tensões residuais são originadas em um processo de conformação mecânica por flexão, pois as mesmas são dispostas no tubo de forma helicoidal através de uma máquina denominada armatriz, como mostra a Figura H1. Essa armatriz possui bobinas que enrolam o arame no tubo, enquanto o mesmo é deslocado axialmente.

Para que as armaduras de tração fiquem dispostas helicoidalmente nos dutos flexíveis é necessário que seja aplicado altos níveis de deformação, realizando uma curvatura acentuada no material. Essa deformação provoca tensões de tração na superfície externa da armadura de tração e tensões de compressão na superfície interna. Porém, quando ocorre o relaxamento elástico da estrutura, a superfície externa fica com tensão residual de compressão, enquanto a superfície interna fica com tensão residual de tração, como mostram as Figuras 9 e 10 da seção 4.3, indicando que a superfície interna é a região crítica da armadura de tração, pois tensões de compressão desfavorecem o surgimento de trincas.

2.6. Corrosão sob tensão

A corrosão sob tensão ocorre em um meio corrosivo, onde atuam somente esforços estáticos de tração, pois esforços de compressão não causam corrosão sob tensão. Além disso, tensões residuais podem causar iniciação da fissura mesmo sem a presença de solicitações externas (Janssen et al., 2002).

O ambiente corrosivo favorece a iniciação da fissura através da nucleação, geralmente em formas esféricas ou curvas, de pequenos pites na superfície do material, originadas da dissolução do material em contato com o meio corrosivo. A fissura propaga-se nesses pites, pois ali há uma concentração de tensões que favorece seu crescimento (Branco et al., 1999).

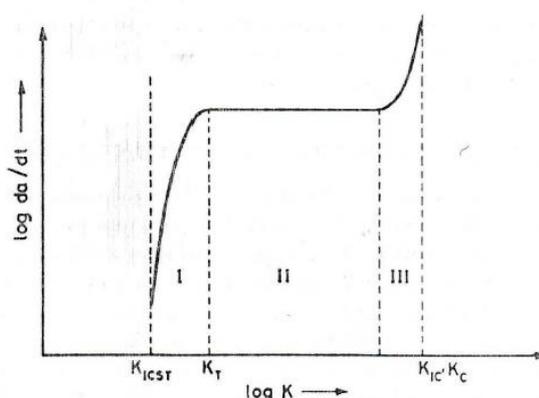
Em muitas circunstâncias são necessários estudos sobre o comportamento da propagação de um defeito existente. Para isso, deve ser conhecido o estado mecânico na vizinhança da extremidade da fissura, determinada pelo fator de intensidade de tensão K ($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$), que é representado por (Branco et al., 1999):

$$K = Y\sigma\sqrt{\pi a} \quad (3)$$

É necessário um valor limiar do fator de intensidade de tensão K_{ICST} para que ocorra corrosão sob tensão, onde valores que ficam acima disso favorecem o crescimento de uma fissura existente. Esse limiar é menor em aços de alta resistência em comparação com aços macios, fazendo com que os aços de alta resistência sejam menos tolerantes a defeitos de acabamentos superficiais. Além disso, o limiar do fator de intensidade de tensão pode ser maior se houver formação de zona plástica de compressão no entorno da fissura (Anderson, 1995).

A propagação da fissura na corrosão sob tensão é expressa em relação ao tempo da/dt vs K . A Figura 5 mostra as fases de propagação da fissura em um caso típico de corrosão sob tensão em aços.

Figura 5 - Diagrama típico $da/dt, K$ logarítmico em caso de corrosão sob tensão.
Fonte: Branco et al. (1999).



Na fase I, o fator de intensidade de tensão deve alcançar K_{ICST} para que a fissura comece a se propagar. A transição da fase I para a fase II acontece quando a fissura principal começa a se ramificar em fissuras menores, situação em que a aceleração do crescimento da fissura é nula. A fase II representa o crescimento da fissura com velocidade constante. Na fase III, acontece uma aceleração acentuada no crescimento da fissura, pois o valor de K aproxima-se do valor crítico K_C , que representa a tenacidade do material.

Na fase III a ação do meio corrosivo não difere a velocidade de propagação da fissura em relação ao meio inerte, pois o agente corrosivo não consegue alcançar a ponta da fissura e fragilizar o material, em decorrência da alta velocidade de abertura da fissura.

A velocidade de propagação da fissura é influenciada pelos seguintes parâmetros: material, tratamento térmico, meio ambiente, espessura, histórico de cargas, deformação plástica e tenacidade (Branco et al., 1999). O principal parâmetro, o qual foi abordado nesse trabalho, é o meio ambiente. Valores de velocidade de propagação da fissura de forma estável, para diferentes aços e meio corrosivo, são mostrados no Anexo C.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O trabalho de Negreiros (2016) apresentou um estudo sobre a influência dos pites de corrosão em falhas de dutos flexíveis retirados de operação. Esses pites de corrosão em armaduras de tração foram gerados devido ao rompimento da camada polimérica externa, resultando em alargamento do espaço anular e diminuição do tempo de vida do duto flexível para 20% da estimativa de projeto. Negreiros (2016) retirou amostras das armaduras de tração em regiões próximas ao dano na camada polimérica externa e regiões afastadas a 5 metros do

mesmo, verificando que a corrosão na região afastada foi por volta de 30% menor que a região do dano. Após isso, foram feitos testes de fadiga e corrosão-fadiga ao ar em corpos de prova íntegros e contendo pites de corrosão. Como conclusão, se verificou que as amostras retiradas na região do dano e afastadas possuem o mesmo comportamento à fadiga ao ar, e isso se deve porque as dimensões dos pites eram similares nessas duas regiões, gerando um fator de concentração de tensões parecido. Além disso, as amostras contendo pites de corrosão sofreram uma considerável diminuição na resistência à fadiga em comparação com as amostras não corroídas, evidenciando a contribuição dos pites no aumento do fator de concentração de tensões K_t .

A dissertação de Vargas (2014) apresentou um estudo sobre as tensões residuais em armaduras de tração, decorrentes da deformação sofrida pelo material na sua colocação em dutos flexíveis, feita por uma máquina chamada matriz. Vargas (2014) fez ensaios de dobramento em arames utilizados na armadura de tração, obtendo as deformações nas faces interna e externa do arame através dos sensores de rede Bragg e comparando com as deformações em *strain gauge*. Através das deformações obtidas nos ensaios e seus respectivos relaxamentos elásticos, foi possível determinar as tensões residuais nas armaduras de tração. Como conclusão, percebeu-se que para curvaturas não muito acentuadas, a tensão residual chegou a valores de aproximadamente 490 MPa, e para curvaturas acentuadas, a tensão residual chegou a 540 MPa.

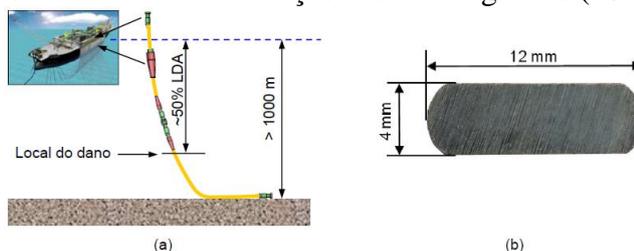
Coelho (2013) avaliou em sua dissertação a susceptibilidade das armaduras de tração em ambiente corrosivo contendo H_2S , que pode entrar em contato com o espaço anular através de rompimento na camada polimérica interna ou até mesmo pela passagem desse gás por suas paredes. Foram realizados ensaios de corrosão sob tensão em três corpos de prova, em atmosferas sem a presença de H_2S , com pequena quantidade de H_2S e com grande quantidade de H_2S . Como resultado, foi verificado que o H_2S causa fragilização por hidrogênio no aço das armaduras de tração, reduzindo a deformação máxima do material e sua tenacidade, indicando o fenômeno de corrosão sob tensão, pois esse fenômeno depende fundamentalmente da tenacidade do material.

4. METODOLOGIA

4.1. Descrição dos dutos flexíveis e região de falha

Para a descrição das falhas ocorridas em dutos flexíveis, foram utilizadas informações obtidas de dutos flexíveis retirados de operações, descritas na dissertação feita por Negreiros (2016). Nessa dissertação, os dutos flexíveis foram retirados de operação em catenária livre há quatro anos, onde os mesmos atuavam em uma profundidade maior que 1000 metros, como mostra a Figura 6(a). Em uma inspeção periódica no duto flexível, foi verificado um rompimento na camada polimérica externa em meia água, o que gerou alagamento no espaço anular e, conseqüentemente, corrosão nas armaduras de tração. A fita de alta resistência não sofreu rompimento, fazendo com que as armaduras de tração não sofressem contato direto com a água do mar. Ensaios de tração constataram que a tensão de escoamento e tensão de ruptura média das armaduras de tração foram de 1285 MPa e 1528 MPa, respectivamente. As seções transversais das armaduras de tração possuem geometria retangular, com dimensões de 12 x 4 mm, como mostra a Figura 6(b). O motivo do rompimento da camada polimérica externa e o tempo de exposição do espaço anular à água do mar não foram informados.

Figura 6 – (a) Esquema do duto flexível e a região de dano e (b) dimensões da seção transversal da armadura de tração. Fonte: Negreiros (2016).

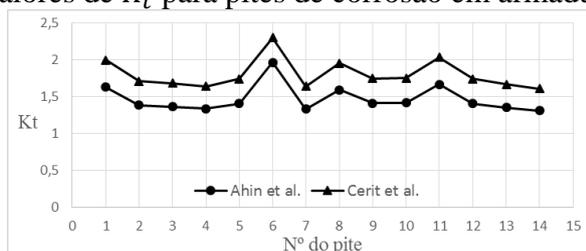


4.2. Dimensões dos pites e estimativa do Fator de Concentração de Tensões Teórico K_t

A partir de análises realizadas em corpos de provas retirados próximo da região de rompimento da camada polimérica externa, Negreiros (2016) conseguiu medir as dimensões de profundidade (b) e comprimento ($2c$) dos pites causados pela corrosão do material em contato com a água do mar, obtendo como resultado a razão $b/2c$, parâmetro fundamental para análise do Fator de Concentração de Tensões Teórico (K_t). O Anexo A mostra as dimensões de cada pite da amostra, assim como a média desses valores.

Utilizando as dimensões da Tabela A1, foi possível estimar o Fator de Concentração de Tensões utilizando as Equações 1 e 2, como mostra a Figura 7.

Figura 7 - Valores de K_t para pites de corrosão em armaduras de tração.



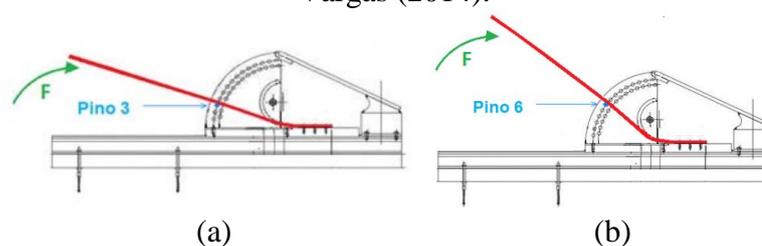
Foi possível verificar na Figura 7 que a curva K_t tem o mesmo comportamento para os dois métodos avaliados. Como uma medida de segurança para os cálculos que foram abordados nos itens seguintes, foi selecionado o pite que possui o maior valor de K_t : 2,3.

4.3. Tensões residuais em montagem da armadura de tração

Com o propósito de estimar as tensões residuais presentes em armaduras de tração após o processo de conformação mecânica no material em torno do duto flexível, Vargas (2014) realizou ensaios com arames em aço carbono de seção retangular com dimensões 12 x 6 mm, tensão de escoamento de 1100 MPa e raio de curvatura elástico de 559 mm. Para isso, foi necessário deformar o arame através de flexão pura utilizando o instrumento da Figura 8, medindo as deformações em vários pontos ao longo do arame e também em suas faces interna e externa, utilizando a metodologia de extensometria elétrica por *strain gauge* e comparando com o método experimental óptico da rede Bragg.

Dos resultados que foram obtidos por Vargas (2014), os que mais se aproximam do escopo desse trabalho foram as flexões dos arames até os pinos 3 e 6, onde os arames formaram ângulos de 30° e 45° com a horizontal, como mostram a Figura 8(a) e Figura 8(b), respectivamente. Nesses dois casos a curvatura do arame é pequena, o que se aproxima da curvatura feita em dutos flexíveis contendo armadura de pressão, onde o ângulo de helicoide da armadura de tração é pequeno em relação ao eixo do tubo.

Figura 8 – (a) Flexão do arame até o pino 3 e (b) flexão do arame até o pino 6. Fonte: Vargas (2014).



Os arames são flexionados até as posições citadas na Figura 8, sofrendo deformação plástica através das tensões mostradas nas Figuras 9(a) e 10(a). Após isso, os arames são retirados dos pinos e sofrem relaxamento elástico, como mostra as Figuras 9(b) e 10(b), resultando em tensões residuais de compressão na face externa e tensões residuais de tração na face interna do arame. As tensões residuais geradas nos ensaios de flexão até os pinos 3 e 6 são mostradas na Figura 9(c) e Figura 10(c), respectivamente.

Figura 9 - (a) Tensões geradas por deformação até o pino 3, (b) relaxamento elástico e (c) tensões residuais. Fonte: Adaptado de Vargas (2014).

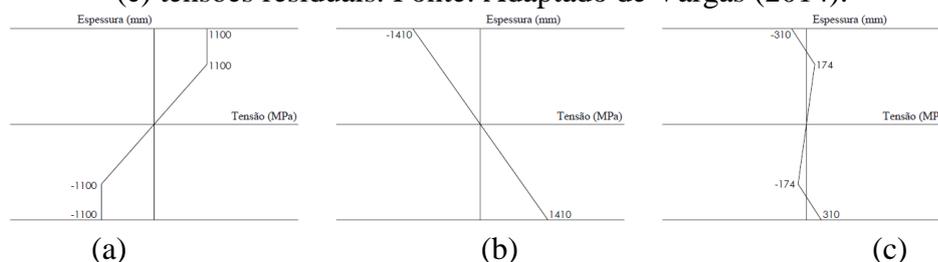
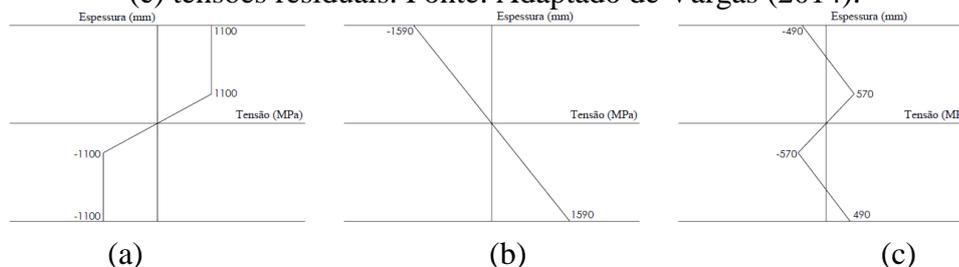


Figura 10 - (a) Tensões geradas por deformação até o pino 6, (b) relaxamento elástico e (c) tensões residuais. Fonte: Adaptado de Vargas (2014).



Analisando a Figura 9 foi possível observar que a tensão residual máxima de tração foi de 310 MPa na face interna do arame. No caso da Figura 10, a tensão máxima de tração ocorreu em uma região interna do arame, ou seja, em uma região onde não ocorre corrosão, pois os pites gerados pela corrosão estão localizados nas faces externas do arame e, portanto, a tensão tratativa que foi utilizada nos cálculos é a que ocorre na face interna do arame, que possui o valor de 490 MPa.

4.4. Propriedades mecânicas do material estudado

Tendo como referência o material da armadura de tração retirado de operação na dissertação de Negreiros (2016), foi possível selecionar o aço carbono AISI 4340 para o estudo desse trabalho, pois possui propriedades mecânicas semelhantes ao aço utilizado nesses dutos flexíveis.

Com o intuito de descobrir a relevância da corrosão do aço AISI 4340 na água do mar em situações de iniciação de trincas, Speidel e Hyatt (1972) estimaram através de ensaios, valores de limiar do fator de intensidade de tensões K_{ICST} em que uma trinca existente começa a se propagar de forma estável. Além disso, foram utilizadas as especificações de materiais através do programa NASGRO 3.0 para a obtenção de valores de tenacidade K_C do aço AISI 4340. A Tabela 1 indica as propriedades mecânicas e os valores de K_{ICST} e K_C para diferentes tipos de tratamento térmico de revenimento do aço AISI 4340.

Tabela 1 – Propriedades mecânicas, K_{ICST} , e K_C em água do mar para aço AISI 4340.

Material	Tensão de esc., σ_{esc} (MPa)	K_{ICST} (MPa \sqrt{m})	K_C (MPa \sqrt{m})
AISI 4340	1550	6	71
AISI 4340	1380	11	88
AISI 4340	1205	30	120

A Tabela 1 mostra que os valores de K_{ICST} e K_C são inversamente proporcionais à tensão de escoamento do material, o que indica que materiais de alta resistência mecânica são mais suscetíveis à propagação de trincas. Portanto, nesse trabalho foi estudado a integridade das armaduras de tração para os valores descritos na Tabela 1.

4.5. Determinação do fator geométrico Y

A seção 2.6 mostrou que o fator de intensidade de tensões K depende fundamentalmente do parâmetro adimensional Y , que varia de acordo com a geometria da fissura e o tipo de carregamento aplicado no material. Hertzberg et al. (1937) estimaram o valor de Y para o caso de uma fissura em forma semicircular, obtendo a expressão:

$$Y = 1,12 K_t \frac{2}{\pi} \quad (4)$$

Segundo Hertzberg et al. (1937), o valor 1,12 na Equação 4 representa uma fissura passante localizada na superfície do material, o qual foi deslocado do centro. O valor $2/\pi$ indica que a fissura possui geometria semicircular e, além disso, faz com que a mesma deixe de ser passante no material. O termo K_t é o fator de concentração de tensões causado pelos pites de corrosão.

No caso de uma fissura de forma semi-elíptica, o fator geométrico é determinado a partir da figura mostrada no Anexo B.

4.6. Análise da integridade de estruturas contendo defeitos, utilizando norma BS 7910

A norma BS 7910 estabelece um método para análise da segurança de estruturas contendo defeitos, apropriada principalmente para materiais dúcteis. Essa análise é feita através de um diagrama, representado na seção 5, que depende dos parâmetros K_r e L_r .

O termo L_r representa o risco de escoamento do material, definido por:

$$L_r = \frac{\sigma}{\sigma_{esc}(a)} \quad (5)$$

A tensão de escoamento corrigida no material $\sigma_{esc}(a)$, em MPa, para geometria estudada, é definida por:

$$\sigma_{esc}(a) = \sigma_{esc} \left(1 - \frac{a+b}{t}\right) \quad (6)$$

Para o cálculo de $\sigma_{esc}(a)$ em outras geometrias, deve ser utilizado o Anexo P da Norma BS 7910.

O termo K_r indica o risco de colapso através da Mecânica da Fratura Linear Elástica, descrito por:

$$K_r = \frac{K^P + K^S}{K_C} + \rho \quad (7)$$

K_r calculado com o denominador K_{ICST} mede a tendência da fissura se propagar de forma estável devido aos efeitos de corrosão sob tensão, como se apresenta em:

$$K_r = \frac{K^P + K^S}{K_{ICST}} + \rho \quad (8)$$

Os efeitos das iterações da plasticidade são definidos por:

$$\rho = 0,1 \left[K^S \left(\frac{L_r}{K^P} \right) \right]^{0,714} - 0,007 \left[K^S \left(\frac{L_r}{K^P} \right) \right]^2 + 0,00003 \left[K^S \left(\frac{L_r}{K^P} \right) \right]^5 \quad (9)$$

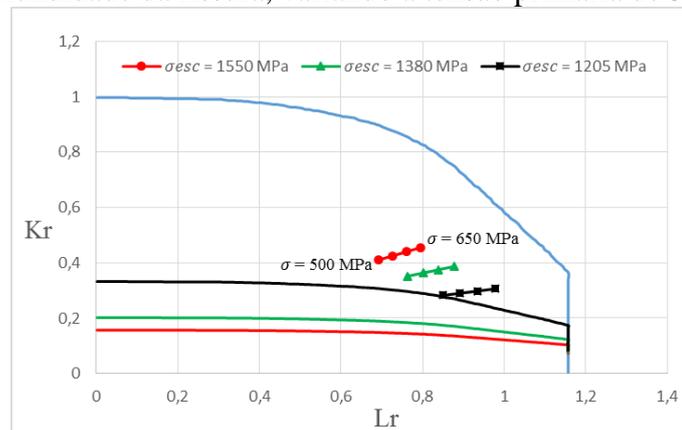
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Risco de propagação da fissura de forma estável e instável

As Figuras 11, 12 e 13 mostram as curvas de integridade para três tipos de aço AISI 4340, descritos na Tabela 1 da seção 4.4. O valor do fator de concentração de tensões utilizado foi de 2,3, como mostra a seção 4.2. Como foi comentado na seção 4.3, a tensão secundária utilizada foi de 490 MPa, proveniente da tensão residual na armadura de tração. A curva superior azul representa, para todos os aços, o limite em que a fissura começa a se propagar de forma instável. As curvas preta, verde e vermelha representam o limite em que a fissura começa a se propagar de forma estável, com cada cor representando um aço diferente.

A Figura 11 mostra a situação onde a profundidade da fissura foi fixada em 70 μm e a tensão primária foi o parâmetro que sofreu alterações, tendo como valor inicial 500 MPa, com acréscimos de 50 MPa até chegar o valor final de 650 MPa.

Figura 11 – Curva de integridade para o risco de propagação estável e instável de uma fissura, com 70 μm de profundidade da fissura, variando a tensão primaria de 500 MPa a 650 MPa.

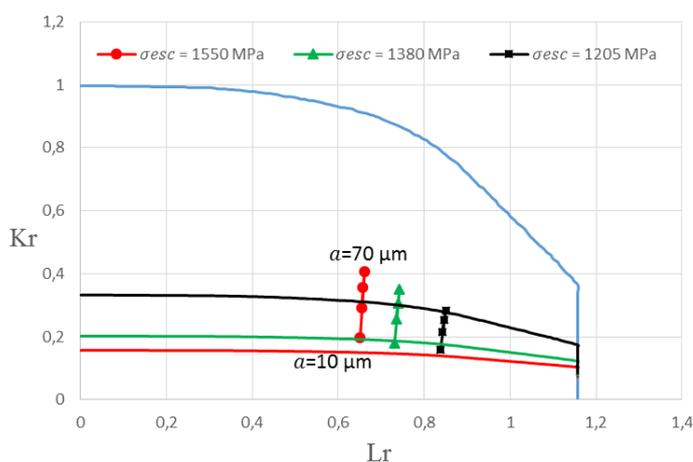


A Figura 11 mostra o risco de uma fissura de forma semicircular, com profundidade de 70 μm , começar a se propagar de forma estável e instável. Se verificou que a fissura se propaga de forma estável para qualquer valor de tensão primária citado anteriormente, pois as curvas se encontram fora do limite estabelecido pela norma. Foi possível observar que o aço com tensão de escoamento igual a 1550 MPa possui um risco maior de propagar a fissura em comparação ao aço com tensão de escoamento de 1205 MPa, isso acontece porque a tensão de escoamento é inversamente proporcional a tenacidade do material, tornando o aço com tensão de escoamento de 1205 MPa menos suscetível a propagar a fissura, mas com maior chance de atingir o escoamento em relação aos demais. Utilizando as equações descritas na seção 4 foi possível observar que, para o aço com tensão de escoamento de 1205 MPa, a tensão primária máxima admissível para que a trinca preexistente não se propague é de 300 MPa. Nos aços com tensão de escoamento de 1550 MPa e 1380 MPa, a trinca preexistente se propaga mesmo se a tensão primária for nula, ou seja, se propaga somente com a tensão residual aplicada.

Se verificou que não há possibilidade de propagação da fissura de forma instável para os três aços estudados, sendo necessário uma tensão primária ou profundidade da trinca mais elevada para que ocorra esse fato. Utilizando as equações da seção 4, foi possível determinar que a tensão primária em que a fissura começa a se propagar de forma instável foi de aproximadamente 980 MPa para o aço com tensão de escoamento de 1550 MPa, e de 930 MPa para o aço com tensão de escoamento de 1380 MPa. O aço com tensão de escoamento de 1205 MPa não se propaga de forma instável para nenhum valor de tensão primária, pois o material atingiria primeiro a sua tensão de colapso.

A Figura 12 mostra a situação onde a tensão primária foi fixada em 500 MPa e a profundidade da fissura foi o único parâmetro que sofreu alterações, tendo como valor inicial uma fissura com profundidade de 10 μm , com acréscimos de 20 μm , até chegar no valor de 70 μm .

Figura 12 - Curva de integridade para o risco de propagação estável e instável da fissura, com tensão primária fixada em 500 MPa, variando profundidade da fissura de 10 μm a 70 μm .

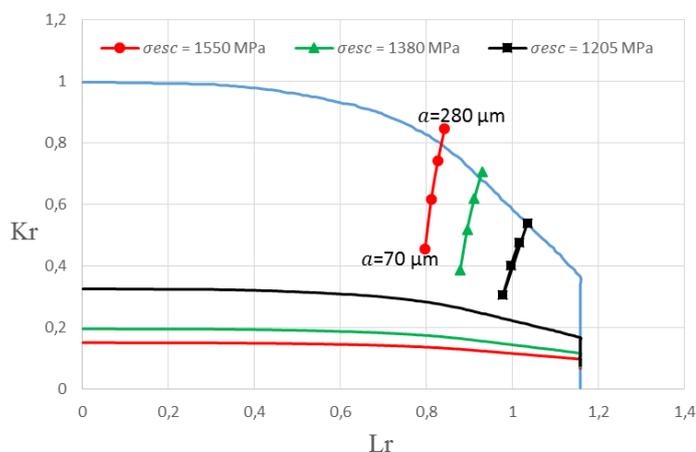


A Figura 12 mostra o risco de uma fissura de forma semicircular, com tensão primária fixada em 500 MPa, começar a se propagar de forma estável e instável. No aço com tensão de escoamento de 1550 MPa, a fissura preexistente se propaga de forma estável para qualquer valor de profundidade testado, sendo o menor valor igual a 10 μm . Utilizando as equações da seção 4, foi possível determinar que o maior valor admissível de profundidade da fissura para que a mesma não se propague foi de 3 μm . No caso do aço com tensão de escoamento de 1380 MPa, se percebeu através do gráfico que uma fissura não se propaga para valores de

profundidade abaixo de 10 μm , pois valores abaixo desse se encontram dentro da curva de integridade permitido pela norma. Também foi possível notar que, para o aço com tensão de escoamento no valor de 1205 MPa, o valor limite para que a fissura não se propague foi de 50 μm .

A Figura 13 mostra a situação onde a tensão primária foi fixada em 650 MPa e a profundidade da fissura foi o único parâmetro que sofreu alterações, tendo como valor inicial uma fissura com profundidade de 70 μm , com acréscimos de 70 μm , até chegar no valor de 280 μm .

Figura 13 - Curva de integridade para o risco de propagação estável e instável da fissura, com tensão primária fixada em 650 MPa, variando profundidade da fissura de 70 μm a 280 μm .



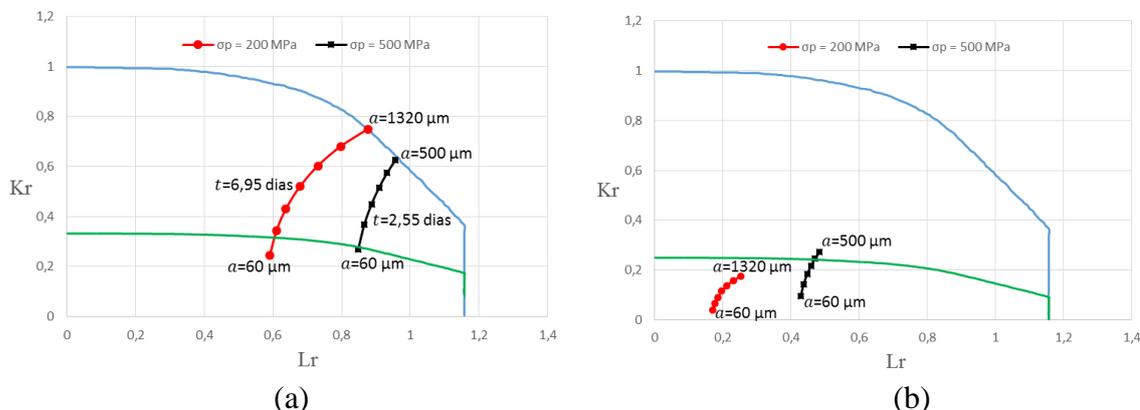
A Figura 13 mostra o risco de uma fissura de forma semicircular, com tensão primária fixada em 650 MPa, começar a se propagar de forma estável e instável. Foi possível notar que há uma profundidade de fissura em que a mesma passa de uma propagação estável para propagação instável, possuindo os valores aproximados de 250 μm , 260 μm e 280 μm para as tensões de escoamento de 1550 MPa, 1380 MPa e 1205 MPa, respectivamente. Esses valores demonstram que o tamanho da fissura em que a mesma passa a ter propagação instável é muito próximo para os três aços, apesar do aço com tensão de escoamento de 1205 MPa ser mais tenaz que os demais.

O Apêndice A mostra um exemplo de cálculo de K_r e L_r para o aço AISI 4340 com tensão de escoamento de 1550 MPa, no caso de uma fissura semicircular com profundidade igual a 70 μm e tensão primária de 650 MPa.

5.2. Tempo de propagação de fissura até a ruptura e contribuição da tensão residual

A Figura 14 mostra o risco de propagação estável e instável de uma fissura semicircular, para o aço com tensão de escoamento de 1205 MPa. O valor do fator de concentração de tensões utilizado foi de 2,3, como mostra a seção 4.2. Como foi comentado na seção 4.3, a tensão secundária utilizada foi de 490 MPa, proveniente da tensão residual na armadura de tração. A curva vermelha representa o aço com tensão primária de 200 MPa, enquanto que a curva preta representa o aço com tensão primária de 500 MPa. A Figura 14(a) mostra o tempo em que as fissuras se propagam desde o início da propagação estável até a ruptura. A Figura 14(b) mostra a integridade da armadura de tração no caso de as tensões residuais serem nulas.

Figura 14 – (a) Tempo de propagação estável da fissura até ruptura e (b) análise da integridade com tensão secundária nula.

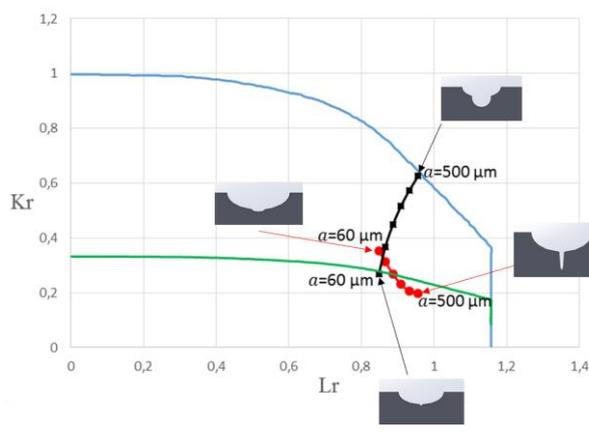


A velocidade de propagação estável da fissura foi de 2×10^{-6} mm/s, obtida através da Figura C1. Foi possível notar, através da Figura 14(a), que o tempo de rompimento da armadura de tração é maior para o aço com menor tensão primária, mas ambos os tempos são baixos em comparação com a vida útil dos dutos flexíveis, que é de 30 anos. O Apêndice B mostra um exemplo de cálculo do tempo de ruptura da armadura de tração. Resultados de ensaios experimentais de corrosão sob tensão em ambiente contendo NaCl são apresentados no Anexo D. A Figura 14(b) evidencia a contribuição da tensão residual no surgimento e propagação das fissuras, mostrando que a fissura praticamente não se propaga para dois casos estudados.

5.3. Comparação entre propagação de fissura com geometria semicircular e semielíptica

A Figura 15 mostra a comparação da propagação de fissuras com geometria semicircular e semielíptica, para o aço com tensão de escoamento de 1205 MPa. O valor do fator de concentração de tensões utilizado foi de 2,3, como mostra a seção 4.2. Como foi comentado na seção 4.3, a tensão secundária utilizada foi de 490 MPa, proveniente da tensão residual na armadura de tração. A tensão primária foi fixada em 500 MPa e, para o caso da fissura semielíptica, a contribuição do fator de concentração de tensões K_t é alterada ao longo da profundidade da fissura. Um exemplo do fator de concentração de tensões no entorno do pite é mostrado na Figura E1.

Figura 15 – Propagação da fissura para os casos de fissura semicircular e semielíptica, com tensão primária fixada em 500 MPa.



A Figura 15 mostra que as fissuras de forma semicircular e semielíptica possuem comportamentos distintos. Foi possível notar que a fissura semielíptica deixa de se propagar para um determinado valor de profundidade, pois seu fator de intensidade de tensões diminui. Essa diminuição no fator de intensidade de tensões se deve pela redução nos valores do fator geométrico e do fator de concentração de tensões.

6. CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos na seção 5, obteve-se as seguintes conclusões:

- O aço mais tenaz possui vantagens sobre os demais no caso de propagação estável da fissura, pois é necessário uma maior tensão primária e/ou maior profundidade de fissura para que a mesma comece a se propagar.
- Os três aços AISI 4340 estudados se equivalem no caso de propagação instável da fissura, pois a profundidade da fissura para que isso ocorra é muito próxima para ambos.
- Tensões residuais contribuem significativamente para a iniciação e propagação da fissura.
- Em alguns casos onde a fissura é semi-elíptica, a mesma deixa de se propagar para um certo valor de profundidade, devido a queda do fator de intensidade de tensões.
- A fissura não pode começar a se propagar de forma estável, pois o material atinge o colapso muito rapidamente quando isso ocorre.
- Alívio de tensões residuais, redução da tensão primária, aumento no número de armaduras de tração e troca de material são formas de prevenir propagação da fissura em armaduras de tração.
- Mudança na configuração dos dutos flexíveis e adição de boias de sustentação são formas de reduzir a tensão primária, como mostra a Figura F1.

6.1. Sugestões para trabalhos futuros

De acordo com o assunto abordado nesse trabalho, sugere-se os seguintes temas para serem abordados em trabalhos futuros:

- Fazer análises da integridade de armaduras de tração, em situações onde ocorram corrosão-fatiga em água do mar, utilizando a norma BS 7910;
- Verificar quais as formas dos pites e seus fatores de concentração de tensões, para armaduras de tração operando em ambientes contendo H_2S e CO_2 , assim como mudanças nas propriedades mecânicas do material nesses ambientes.
- Fazer análises da integridade de armaduras de tração, em situações onde ocorram corrosão sob tensão em ambientes contendo H_2S e CO_2 , utilizando a norma BS 7910;
- Incorporar análise de confiabilidade levando em conta as incertezas das informações avaliadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

4SUBSEA. **Un-bonded Flexible Risers: Recent Field Experience and Actions for Increased Robustness.** Nesbru: 4Subsea AS, 2013. 78 p. Disponível em: <http://www.ptil.no/getfile.php/PDF/Rapporter/4Subsea_%20PSA-Norway_Flexibles-rev5.pdf>. Acesso em: 16 novembro 2019.

AHIN, S.-H.; LAWRENCE, F. V.; METZGER, M. M. **Corrosion fatigue of an HSLA Steel. Fatigue & Fracture of Engineering Materials and Structures**, jul. 1992. v. 15, n. 7, p. 625–642.

AMBIPETRO Levantamentos e Inovação. **Governo do RJ discute polo de subsea**. Disponível em: <<http://ambipetro.com.br/governo-do-rj-discute-polo-de-subsea/>>. Acesso em: 16 novembro 2019.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE (API). **API Recommended Practice 17B: Recommended Practice for Flexible Pipe**. Washington, 2014b.

ANDERSON, T. L. **Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications**. 2nd ed., Texas, Estados Unidos, 1995.

BRANCO, C. M.; FERNANDEZ, A. A.; CASTRO, P. M. S. T. **Fadiga de estruturas soldadas**. 2nd ed., Lisboa, Portugal, 1999.

CERIT, M.; GENEL, K.; EKSI, S. Numerical investigation on stress concentration of corrosion pit. **Engineering failure analysis**, v. 16, n. 7, p. 2467–2472, out. 2009.

COELHO, P. P. S. **Estudo da susceptibilidade à corrosão sob tensão em atmosfera de H₂S das armaduras de tração de dutos flexíveis**. 2013. 81 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Diretoria de pesquisa e pós-graduação CEFET/RJ, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Rio de Janeiro, 2013.

DIKDOGMUS, H. **Riser concepts for deep waters.**, 2012. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Department of Marine Technology, Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Trondheim, 2012.

FERGESTAD, D.; LØTVEIT, S. A. **Handbook on Design and Operation of Flexible Pipes**. 3rd ed. Trondheim: Marintek, NTNU, 4Subsea, 2014.

HERTZBERG, R. W.; VINCI, R. P.; HERTZBERG, J. L. **Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials**. Fifth Edition, Estados Unidos, 1937.

JANSSEN, M.; ZUIDEMA, J.; WANHILL, R. J. H. **Fracture Mechanics**. 2nd ed., Leeghwaterstraat, Holanda, 2002.

McEvily, A. J. Jr. **Atlas of Stress-Corrosion and Corrosion Fatigue Curves**. ASM INTERNATIONAL, Estados Unidos, 1990.

NEGREIROS, L. A. S. **Avaliação da resistência à fadiga e corrosão-fadiga da armadura de tração de um riser flexível retirado de operação**. 2016. 197 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre, 2016.

OBRIEN, P.; MELDRUM, E.; OVERTON, C.; PICKSLEY, J.; ANDERSON, K.; MACLEOD, I. Outcomes from the SureFlex Joint Industry Project - An International Initiative on Flexible Pipe Integrity Assurance. In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE (OTC), 2011, Houston. **Proceedings...** Houston: OTC, 2011. OTC 21524-MS.

Petrobras. **Conheça curiosidades sobre equipamentos de nossos sistemas submarinos.** Disponível em: < <http://www.petrobras.com.br/fatos-e-dados/conheca-curiosidades-sobre-equipamentos-de-nossos-sistemas-submarinos.htm>> Acesso em: 16 novembro 2019.

PetroNotícias. **Decisão equivocada sobre o uso de risers com tubos flexíveis coloca em risco a produção de pré-sal.** Disponível em: <<https://petronoticias.com.br/archives/99510>>. Acesso em: 14 setembro 2019.

SANTOS, F. P. **Avaliação dos efeitos da pressão parcial de CO₂ no processo de corrosão - fadiga em armaduras e tração de dutos flexíveis.** 2011. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Diretoria de pesquisa e pós-graduação CEFET/RJ, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Rio de Janeiro, 2011.

SPEIDEL, M. D.; HYATT, M. W. **Advances in Corrosion Science and Technology.** Ed. Plenum Press, EUA, 1981.

The British Standards Institution (BSI). **Norm BS 7910:2013+A1:2015:** Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures. Reino Unido, 2013.

VARGAS, F. A. **Avaliação das tensões residuais em armaduras de tração de dutos flexíveis pelo método experimental da rede de Bragg.** 2014. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Diretoria de pesquisa e pós-graduação CEFET/RJ, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Rio de Janeiro, 2014.

ANEXOS

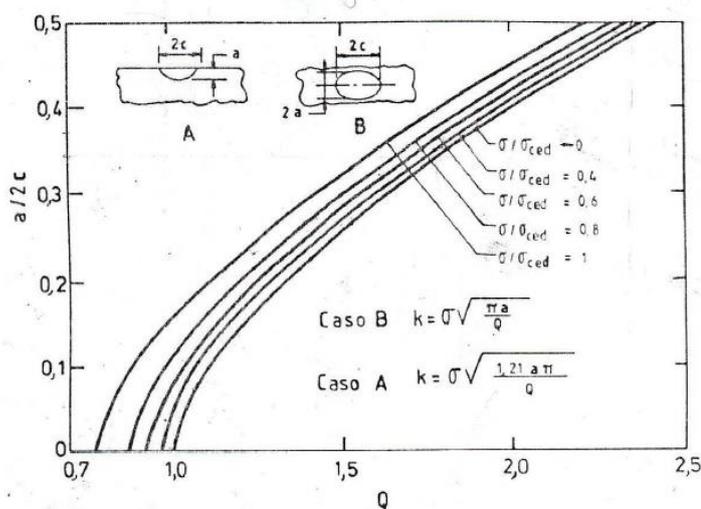
ANEXO A – DIMENSÕES DE PITES DE CORROSÃO EM AMOSTRAS RETIRADAS DE ARMADURAS DE TRAÇÃO DE DUTOS FLEXÍVEIS

Tabela A1 – Dimensões dos pites em amostra retirada de duto flexível. Fonte: Adaptado Negreiros (2016).

Pite	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	Média
Largura 2c (µm)	213,5	471,4	337,9	593,1	308,0	99,7	592,0	200,0	400,0	272,7	162,0	206,6	318,0	174,6	310,7
Profund. b (µm)	82,3	105,5	71,8	115,4	73,6	65,2	115,0	71,3	96,7	66,5	66,5	49,4	65,5	31,7	76,9
Razão b/2c	0,39	0,22	0,21	0,19	0,24	0,65	0,19	0,36	0,24	0,24	0,41	0,24	0,21	0,18	0,28

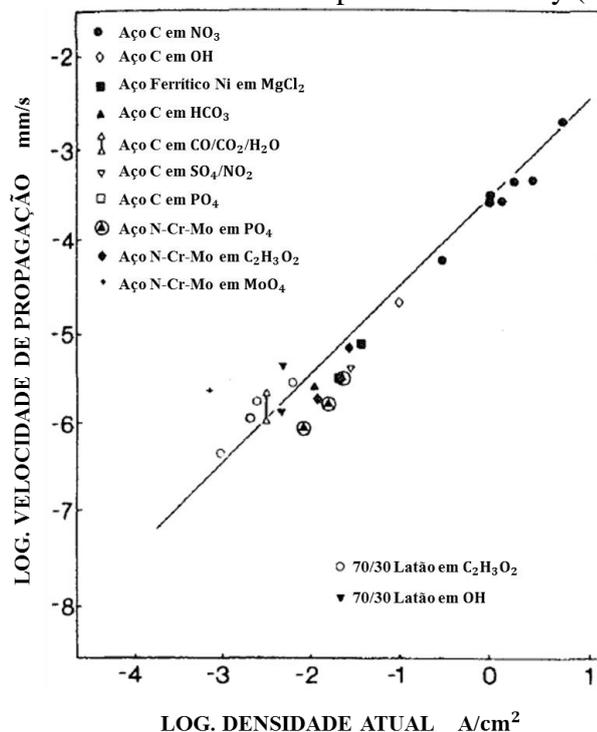
ANEXO B – FATOR DE INTENSIDADE DE TENSÕES PARA FISSURAS ELÍPTICAS E SEMIELÍPTICAS

Figura B1 – Fator de intensidade de tensões para o caso de fissuras elípticas e semielípticas. Fonte: Branco et al. (1999).



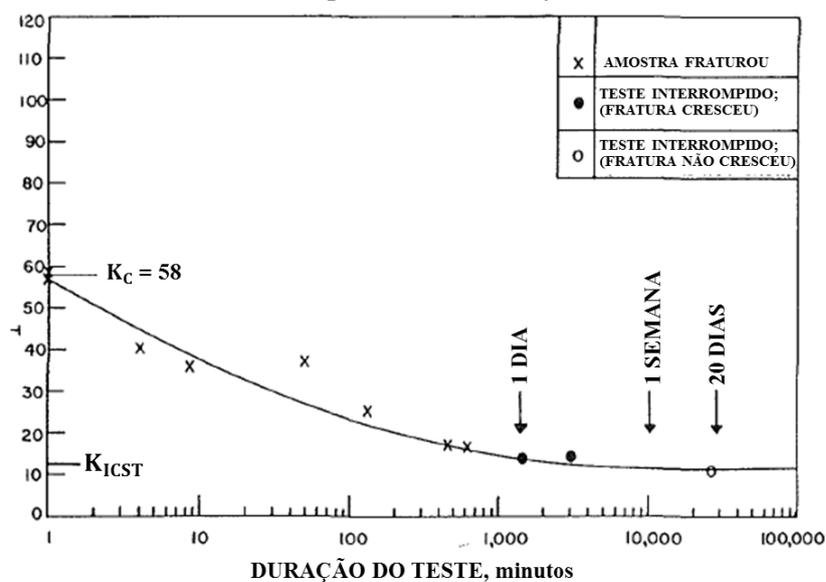
ANEXO C – VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO ESTÁVEL DA FISSURA

Figura C1 – Velocidade de propagação da fissura de forma estável para diferentes aços e meios corrosivos. Fonte: Adaptado de McEvily (1990).



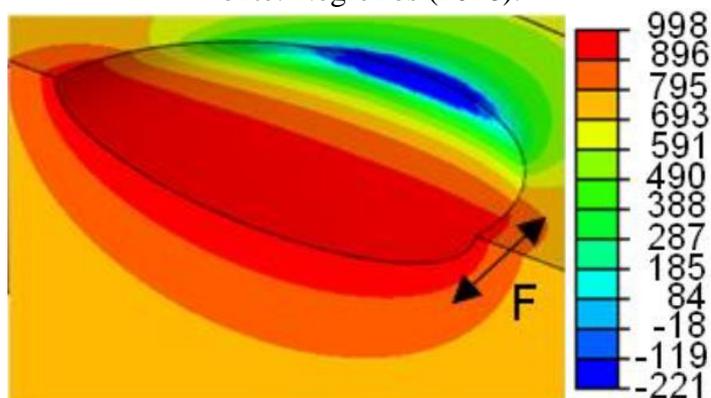
ANEXO D – TESTE DE CORROSÃO SOB TENSÃO NO AÇO AISI 4340 EM AMBIENTE CONTENDO CLORETO DE SÓDIO

Figura D1 – Ensaio de corrosão sob tensão no aço AISI 4340 em água contendo 3,5% NaCl. Fonte: Adaptado de McEvily (1990).



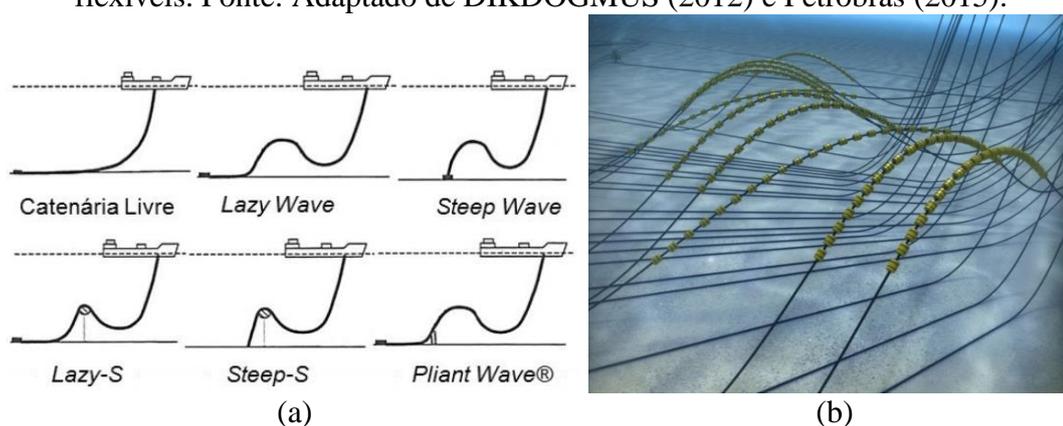
ANEXO E – ALTERAÇÃO DA TENSÃO LOCAL NO ENTORNO DO PITE

Figura E1 – Exemplo de alteração na tensão local em uma região próxima do pite de corrosão.
Fonte: Negreiros (2016).



ANEXO F – CONFIGURAÇÃO DOS DUTOS FLEXÍVEIS E BOIAS DE SUSTENTAÇÃO

Figura F1 – (a) Configurações dos dutos flexíveis e (b) boias de sustentação dos dutos flexíveis. Fonte: Adaptado de DIKDOGMUS (2012) e Petrobras (2015).



ANEXO G – POSICIONAMENTO DE FITAS ANTI-ATRITO

Figura G1 – Fitas anti-atrio sobre armadura de tração. Fonte: Negreiros (2016).



ANEXO H – MONTAGEM DA ARMADURA DE TRAÇÃO EM DUTOS FLEXÍVEIS

Figura H1 – Montagem de armadura de tração por armatriz. Fonte: 4SUBSEA (2013).



APÊNDICES

APÊNDICE A – EXEMPLO DE CÁLCULO DE K_r E L_r

Valores de entrada:

$$K_C = 71 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}; \sigma_{esc} = 1550 \text{ MPa}; b = 65,2 \text{ }\mu\text{m}; 2c = 99,7 \text{ }\mu\text{m}; b/2c = 0,65;$$

$$a = 70 \text{ }\mu\text{m}; t = 4 \text{ mm}; \sigma^P = 650 \text{ MPa}; \sigma^S = 490 \text{ MPa}; K_t = 2,3;$$

Cálculo do fator de concentração de tensões primário K^P (Equações 3 e 4):

$$K^P = 1,12 K_t \frac{2}{\pi} \sigma^P \sqrt{\pi a} = 1,12 \times 2,3 \times \frac{2}{\pi} \times 650 \text{ MPa} \sqrt{\pi \times 70 \times 10^{-6} \text{ m}}$$

$$K^P = 15,81 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}};$$

Cálculo do fator de concentração de tensões secundário K^S (Equações 3 e 4):

$$K^S = 1,12 K_t \frac{2}{\pi} \sigma^S \sqrt{\pi a} = 1,12 \times 2,3 \times \frac{2}{\pi} \times 490 \text{ MPa} \sqrt{\pi \times 70 \times 10^{-6} \text{ m}}$$

$$K^S = 11,92 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}};$$

Cálculo da tensão de escoamento corrigida (Equação 6):

$$\sigma_{esc}(a) = \sigma_{esc} \left(1 - \frac{a+b}{t} \right) = 1550 \text{ MPa} \left(1 - \frac{70 \text{ }\mu\text{m} + 65,2 \text{ }\mu\text{m}}{4000 \text{ }\mu\text{m}} \right)$$

$$\sigma_{esc}(a) = 1497 \text{ MPa};$$

Cálculo de L_r (Equação 5):

$$L_r = \frac{\sigma^P + \sigma^S}{\sigma_{esc}(a)} = \frac{650 \text{ MPa} + 490 \text{ MPa}}{1497 \text{ MPa}}$$

$$L_r = 0,77;$$

Cálculo do fator de correção dos efeitos de plasticidade ρ (Equação 9):

$$\rho = 0,1 \left[K^S \left(\frac{L_r}{K^P} \right) \right]^{0,714} - 0,007 \left[K^S \left(\frac{L_r}{K^P} \right) \right]^2 + 0,00003 \left[K^S \left(\frac{L_r}{K^P} \right) \right]^5$$

$$\rho = 0,1 \left[11,92 \text{ MPa} \left(\frac{0,77}{15,81 \text{ MPa}} \right) \right]^{0,714} - 0,007 \left[11,92 \text{ MPa} \left(\frac{0,77}{15,81 \text{ MPa}} \right) \right]^2 + 0,00003 \left[11,92 \text{ MPa} \left(\frac{0,77}{15,81 \text{ MPa}} \right) \right]^5$$

$$\rho = 0,065;$$

Cálculo de K_r (Equação 7):

$$K_r = \frac{K^P + K^S}{K_C} + \rho = \frac{15,81 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} + 11,92 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}}{71 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}} + 0,065$$

$$K_r = 0,46;$$

APÊNDICE B – EXEMPLO DE CÁLCULO DO TEMPO DE RUPTURA DA ARMADURA DE TRAÇÃO

Valores de entrada:

$$\frac{da}{dt} = 2 \times 10^{-6} \text{ mm/s}; a_1 = 60 \times 10^{-3} \text{ mm}; a_2 = 500 \times 10^{-3} \text{ mm};$$

Cálculo do tempo de ruptura:

$$\frac{da}{dt} = 2 \times 10^{-6} \text{ mm/s}$$

$$\int_{60 \times 10^{-3}}^{500 \times 10^{-3}} da = \int_0^t 2 \times 10^{-6} dt$$

$$500 \times 10^{-3} \text{ mm} - 60 \times 10^{-3} \text{ mm} = 2 \times 10^{-6} \text{ mm/s} \times t$$

$$t = 220.000 \text{ s} = 2,55 \text{ dias};$$