

CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS

ENGENHARIA MECÂNICA

DAYANE CARVALHO ANDRADE

**CORROSÃO-FADIGA NAS ARMADURAS DE TRAÇÃO DE UM RISER FLEXÍVEL
DO TIPO UNBONDED**

**Varginha
2018**

DAYANE CARVALHO ANDRADE

**CORROSÃO-FADIGA NAS ARMADURAS DE TRAÇÃO DE UM RISER FLEXÍVEL
DO TIPO UNBONDED**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário do Sul de Minas como pré-requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, sob orientação do Prof. Esp. Matheus Henrique Pereira e coorientador Engenheiro Mecânico Carlos Ronaldo Andrade dos Reis.

**Varginha
2018**

DAYANE CARVALHO ANDRADE

**CORROSÃO-FADIGA NAS ARMADURAS DE TRAÇÃO DE UM RISER FLEXÍVEL
DO TIPO UNBONDED**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário do Sul de Minas, como pré-requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovado em / /

Profº. Esp. Matheus Henrique Pereira

Profº. Ms.

Profº. Ms.

OBS.:

Dedico este trabalho a minha família, pais e irmãs, que estiveram sempre presentes me apoiando, dando força e incentivando em cada passo para que eu pudesse concluir este trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a DEUS por ter me dado capacitação de concluir este trabalho e aos meus orientadores que foram fundamentais desde a motivação até a conclusão de cada etapa.

“A fé é o fundamento da esperança, é uma certeza a respeito do que não se vê.”

Hebreus, 11-1 - Bíblia Católica Online

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo apresentar o *riser* flexível do tipo *unbonded* amplamente utilizado na produção de petróleo e gás, descrevendo assim, sua estrutura, os materiais utilizados e a função de cada uma de suas camadas, principalmente as armaduras de tração. Tal abordagem se justifica através da percepção da necessidade humana dos derivados de petróleo e gás. Atualmente a produção de petróleo e gás passou por grandes avanços tecnológicos o que permitiu a superação de desafios, como produzir nas grandes profundidades em alto mar. Os *risers* flexíveis do tipo *unbonded* é um dos principais meios de produção de petróleo e gás. Essas estruturas sofrem degradações excessivas devido ao material e ambiente ao qual são expostas. Tal exposição acelera o processo de desgaste do mesmo, provocando assim, diversas falhas dentre as quais este trabalho se concentrará nas causas da falha por corrosão-fadiga nas armaduras de tração. O presente trabalho apresenta o modelo de produção submarina, assim como seus arranjos e principais equipamentos através de pesquisas bibliográficas. Logo após será apresentado uma visão geral sobre dutos flexíveis, os tipos de dutos flexíveis existentes no mercado, assim como parte da sua história. Depois o *riser* flexível do tipo *unbonded* será apresentado com mais detalhes, descrevendo as suas camadas e a função de cada uma delas.

Palavras-chave: Armaduras de tração. Fadiga-corrosão. Flexíveis. Risers.

ABSTRACT

This work aims to present the flexible riser of the unbonded type widely used in the production of oil and gas, thus describing its structure, the materials used and the function of each of its layers, especially the traction armors. Such an approach is justified through the perception of the human need for oil and gas derivatives. Currently, oil and gas production has undergone great technological advances, which has allowed us to overcome challenges, such as producing at great depths on the high seas. Flexible risers of the unbonded type are one of the main means of producing oil and gas. These structures suffer from excessive degradation due to the material and environment to which they are exposed. Such exposure accelerates the wear process of the same, causing several failures among which this work will focus on the causes of failure by corrosion-fatigue in the traction armatures. The present work presents the model of submarine production, as well as its arrangements and main equipment through bibliographical researches. Soon after, an overview will be presented on flexible ducts, the types of flexible ducts in the market, as well as part of its history. Then the flexible riser of unbonded type will be presented in more detail, describing its layers and the function of each one of them.

Keywords: *Traction armatures. Fatigue-corrosion. Flexible. Risers.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 01- Exemplo de sistema de produção no mar	15
Figura 02- Evolução da Produção Diária de Petróleo no Brasil	16
Figura 03- Participação Brasileira da Produção de Petróleo no Mar e em Terra	16
Figura 04- Visão geral de um esquema de arranjo submarino de produção.....	18
Figura 05- Plataforma de produção	19
Figura 06- Árvore de Natal Molhada (ANM)	20
Figura 07- <i>Manifold</i>	20
Figura 08- Linhas de escoamento	21
Figura 09- Esquema de um duto flexível composto por três tramos	22
Figura 10- Configurações de <i>Risers</i> Submarinos de Produção	22
Figura 11- Exemplo de uma interligação entre poço e plataforma	23
Figura 12- Classificação de um tubo flexível	24
Figura 13- Camadas presentes no <i>riser</i> flexível <i>unbounded</i>	27
Figura 14- Exemplo de formato da carcaça intertravada	28
Figura 15- PERFIL Z	29
Figura 16- PERFIL C	29
Figura 17- PERFIL t COM CLIPE	29
Figura 18- PERFIL t	30
Figura 19- Montagem da Armadura de Tração na Fábrica	32
Figura 20- Exemplo de seção de arame usado em dutos flexíveis	33
Figura 21- Estágios do processo de trinca por fadiga	35
Figura 22- Fase inicial do trincamento por fadiga	36
Figura 23- Nucleação de trinca por fadiga nas bandas de escorregamento.....	37
Figura 24- Intrusão, extrusão na superfície de Ni puro	37
Figura 25- Demonstrativo de estrias vistas em um MEV	38
Figura 26- Demonstrativo de marcas de praia e de rio	39
Figura 27- Exemplo curva s-n	41
Figura 28- Relação entre limite de fadiga e resistência à tração	42
Figura 29- Influência da tensão média na vida em fadiga	43
Figura 30- Efeito da geometria no comportamento em fadiga de uma liga de alumínio	44
Figura 31- Efeito do ambiente corrosivo na vida em fadiga	45

Figura 32- Comparação do comportamento em fadiga do metal de solda, Inconel 625, realizados ao ar e em meio corrosivo	48
Figura 33- Exemplos de pites de corrosão em corte e suas dimensões	49

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	PRODUÇÃO OFFSHORE.....	15
3	ARRANJOS SUBMARINOS.....	18
4	VISÃO GERAL DE DUTOS FLEXÍVEIS.....	22
4.1	Histórico dos dutos flexíveis	23
4.2	Classificação dos dutos	24
4.2.1	Carregamento	24
4.2.2	Aplicação.....	25
4.2.3	Fluido interno	25
4.2.4	Camadas mais internas	25
4.2.5	Camadas	25
5	RISERS DO TIPO UNBONDED.....	27
5.1	Carcaça intertravada	27
5.2	Revestimento interno	28
5.3	Armadura de Pressão	28
5.4	Armaduras de tração	30
5.5	Fita antidesgaste de alta resistência	30
5.6	Revestimento externo.....	30
6	CARACTERÍSTICAS DAS ARMADURAS DE TRAÇÃO	32
7	FALHAS EM DUTOS FLEXÍVEIS.....	34
8	FADIGA.....	35
8.1	Etapas do processo de fadiga	35
8.1.1	Nucleação da trinca	36
8.1.2	Propagação de trinca por fadiga.....	37

8.1.3 Falha catastrófica	39
8.2 Fadiga em risers flexíveis	39
8.3 Avaliação da vida em fadiga.....	40
8.3.1 Método S – N	40
8.4 Fatores que influenciam a vida em fadiga	41
8.4.1 Limite de Resistência à Tração	42
8.4.2 Tensão média	43
8.4.3 Geometria.....	43
8.4.4 Acabamento superficial.....	44
8.4.5 Ambiente corrosivo.....	45
8.4.6 Frequência de testes	46
9 CORROSÃO.....	47
10 CORROSÃO-FADIGA	48
10.1 Pites de Corrosão.....	49
11 CONCLUSÃO	50
REFERÊNCIAS	51

1 INTRODUÇÃO

Desde sua descoberta, o petróleo é uma das maiores fontes de energia do mundo. Com o passar dos anos e a evolução tecnológica, fez-se possível a utilização de seus derivados em diversos setores da indústria, movimentando a economia e a política dos países produtores e/ou importadores. A crescente demanda de seus derivados acelera os projetos de pesquisa em inovação, melhoria de equipamentos e processos envolvidos. Dentre eles, pode-se destacar o desenvolvimento dos *risers* flexíveis.

Os *Risers* flexíveis do tipo *unbonded* usados na produção de petróleo e gás são estruturas tubulares cilíndricas concêntricas, divididas por camadas que variam entre metais e polímeros, as quais possuem liberdade de se deslocar uma em relação à outra.

Mesmo com toda tecnologia de projeto e fabricação, que visa oferecer maior segurança na aplicação e utilização dos flexíveis, estes não estão imunes as falhas, que podem ocorrer ainda na fase de projeto, durante a escolha do material, na fabricação, na montagem, na instalação e durante a operação.

Tais estruturas, por operarem em ambiente *offshore* são submetidas constantemente a ação química da água do mar e a componentes químicos que acompanham o petróleo durante sua produção. Além disso, o ambiente hostil onde é inserido faz com que estes devam suportar a esforços que vão desde as cargas estáticas que podem ser do peso próprio do tubo, ou a pressão da coluna de água o qual será inserido, até cargas dinâmicas resultantes das correntes marítimas e do movimento das unidades flutuantes na qual são conectados. Isso tudo tende a ocasionar trincas nas armaduras de tração decorrentes da falha por fadiga-corrosão, gerando assim, desfalques significativos para as empresas produtoras e seus afins, além de danos ao meio ambiente.

O presente trabalho apresentou o modelo de produção submarina, assim como seus arranjos e principais equipamentos através de pesquisas bibliográficas. Logo após será apresentada uma visão geral sobre dutos flexíveis, os tipos de dutos flexíveis existentes no mercado, assim como parte da sua história. Depois o *riser* flexível do tipo *unbonded* será apresentado com mais detalhes, descrevendo as suas camadas e a função de cada uma delas.

Como o objetivo é apresentar um tipo de falha que ocorre nas armaduras de tração deste tubo, esta será descrita no primeiro capítulo com mais detalhes de fabricação. No próximo item, serão apresentados os tipos de falhas em dutos dessa natureza. Para atingir o objetivo principal, a falha por corrosão-fadiga nas armaduras de tração do *riser* flexível do tipo *unbonded*. O próximo capítulo descreverá a fadiga, os métodos de avaliação de fadiga e

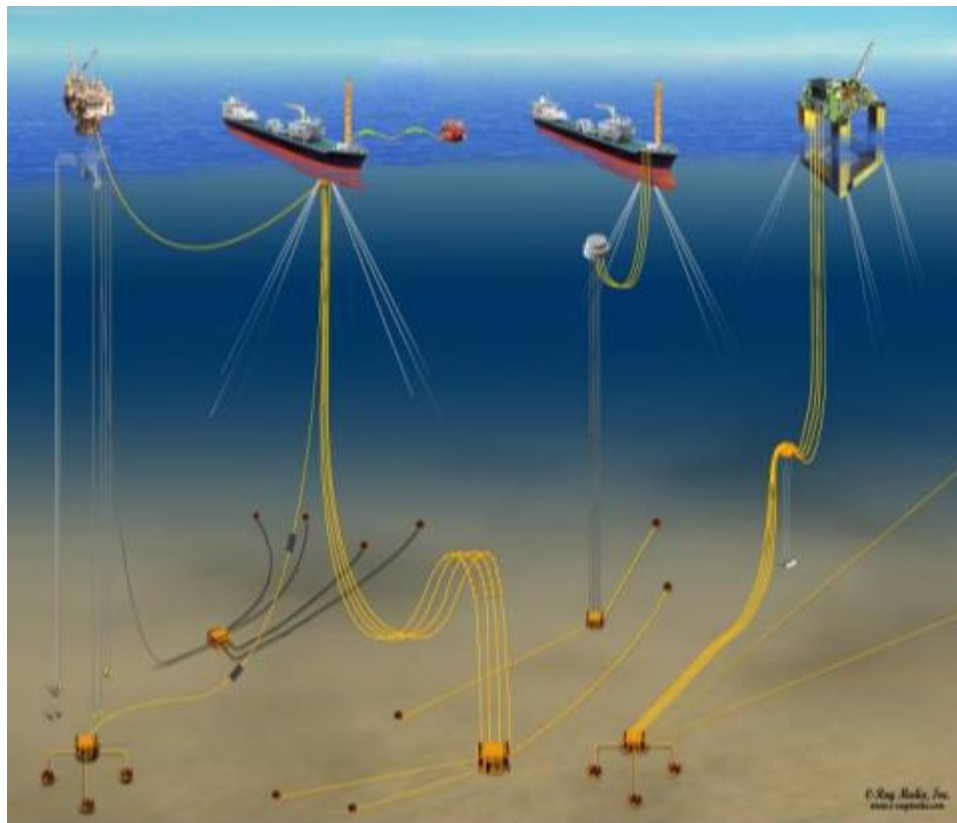
com mais detalhes o método S – N de avaliação de fadiga, em seguida os fatores que influenciam a vida em fadiga. Por fim, uma descrição breve sobre corrosão e corrosão – fadiga. Todo o trabalho será elaborado através de uma revisão bibliográfica.

2 PRODUÇÃO OFFSHORE

Os campos de petróleo a serem desenvolvidos em bacias sedimentares marinhas demandam, quase sempre o uso de UEPs (Unidades Estacionárias de Produção), também chamadas de plataformas de produção (PADILHA, 2009). Para que seja possível a conexão dessas plataformas com o poço localizado no leito marinho, é necessário o uso de dutos e equipamentos *subsea*.

Quando na produção de petróleo *offshore* a cabeça do poço fica no solo do mar, completação molhada, cabos eletro-hidráulicos, dutos e equipamentos *subsea* ligados à plataforma e estabelecidos no fundo do mar, fazem parte da estrutura do arranjo marinho (NEGREIROS, 2016), como mostra a figura a seguir:

Figura 1 – Exemplo de sistema de produção no mar



Fonte: Matucci et al. (2017).

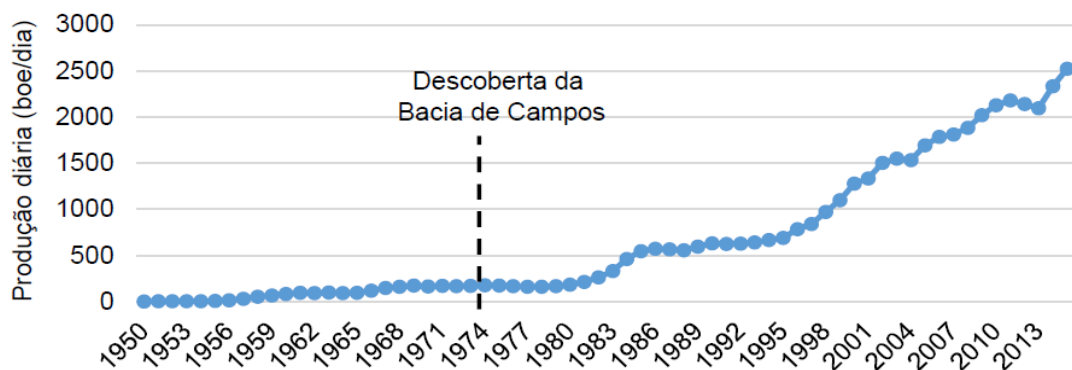
Desta forma para que haja a comunicação entre a UEP e os vários poços, são necessários os dutos e os cabos elétro-hidráulicos. Assim, caracteriza-se o ambiente onde são introduzidos os *risers* flexíveis. Que vem sendo amplamente utilizados na produção de petróleo do Brasil (NEGREIROS, 2016).

As descobertas de tamanha magnitude na costa do Brasil que aconteceram durante as últimas décadas, movimentaram a produção *offshore* no país, o que personalizou sua produção extensivamente.

A partir de 1950, quando a produção era principalmente em terra, houve o aumento gradual da produção diária de barris de petróleo (BOE). Quando os primeiros arranjos permanentes foram estabelecidos na Bacia de Campos, nos anos 80, ocorreu um aumento progressivo da produção *offshore*, intensificando ainda mais após o ano de 1996 (MORAIS, 2013).

Como mostra a figura a seguir.

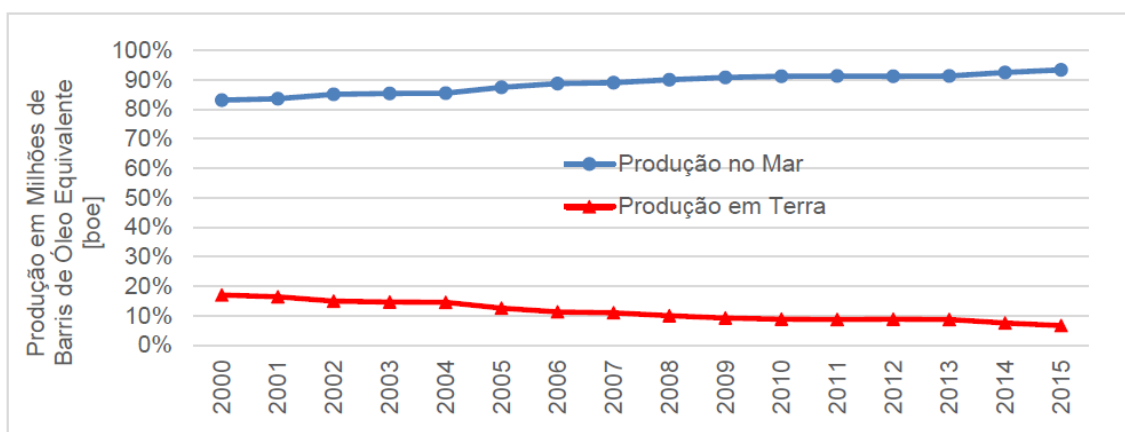
Figura 2 – Evolução da Produção Diária de Petróleo no Brasil



Fonte: Negreiros (2016).

A progressão da prática de produção no mar, efetivamente, ocasionou ao Brasil atingir a taxa dos 90% da produção advindas de poços *offshore*. Segundo dados proporcionados pela ANP (Agência Nacional do Petróleo), que podem ser observados através da próxima figura.

Figura 3 – Participação Brasileira da Produção de Petróleo no Mar e em Terra



Fonte: Negreiros (2016).

Através destas circunstâncias, a prática da produção de petróleo no mar impulsiona notável avanço evolutivo com relação aos próximos arranjos a serem implantados. Tendo em vista à possibilidade de projetos anteriormente apontados como não atraentes, à redução de despesas e, não menos considerável, à preservação e prolongação da vida útil dos arranjos (NEGREIROS, 2016).

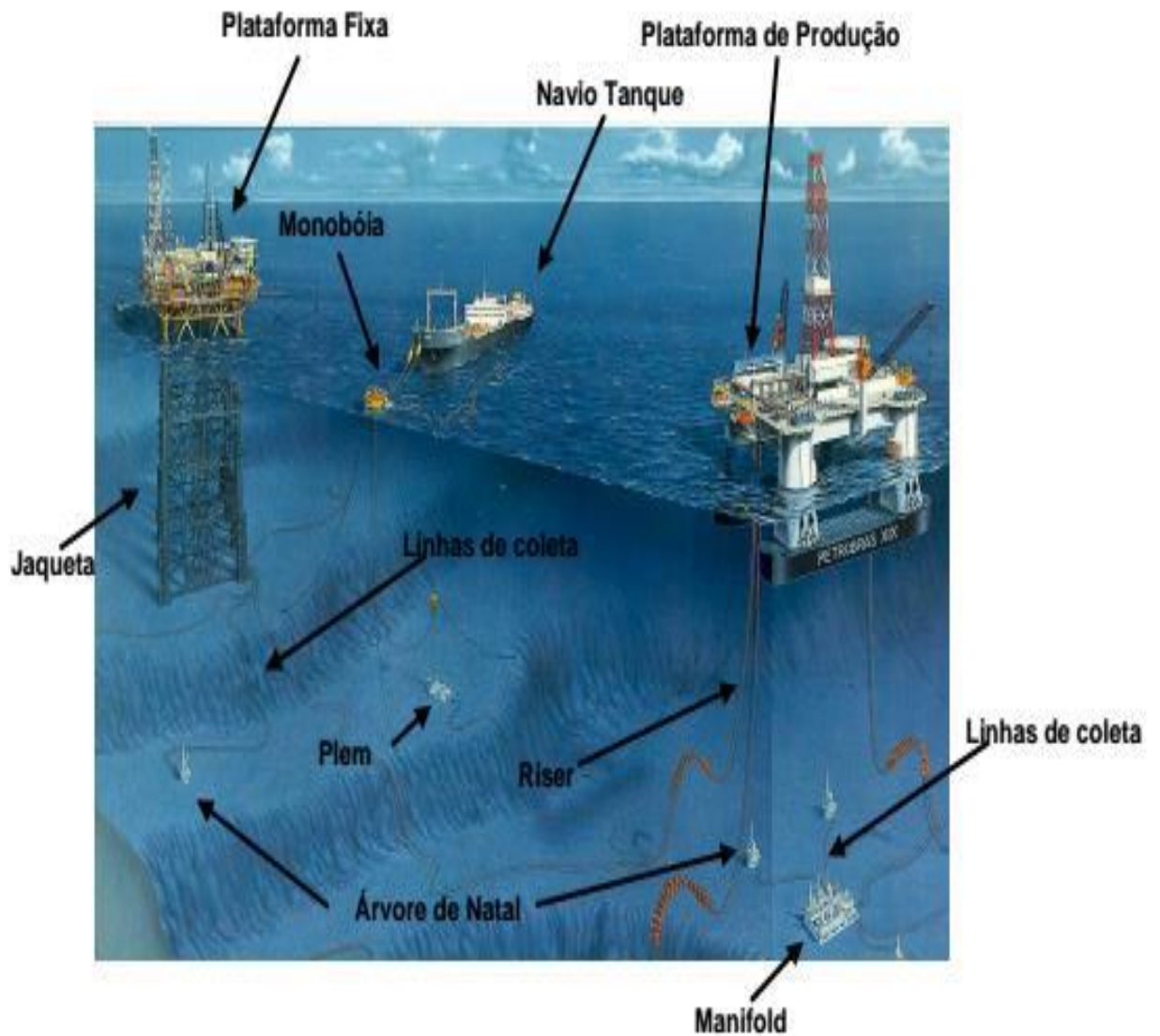
Pode ser entendido com um arranjo *subsea* de produção de petróleo um agrupamento de mecanismos como os dutos, equipamentos, poços, sistemas de controle, *jumpers* e sistemas de controle e cabos elétricos de potência, inseridos através do leito marinho e o nível do mar, empregados para atuar e desenvolver campos *offshore* (SANTOS, 2011; NEGREIROS 2016).

Precisamente, estes sistemas podem estar cravados no solo do mar ou em partes elevados. Diferentes conciliações entre as diversas categorias de objetos submarinos e plataformas podem constituir a produção *offshore*. A depender de cada ocorrência, levando em conta questões como tentativas anteriores, perspectivas técnicas e ponto de vista financeiro. (NEGREIROS, 2016).

3 ARRANJOS SUBMARINOS

Os arranjos submarinos se fragmentam em duas partes, a primeira será o conjunto de equipamentos e dutos de coleta encarregados de reunir e transcorrer o óleo a partir do poço que está no solo marinho até a UEP (Unidade Estacionária de Produção); e a segunda em um conjunto de equipamentos, dutos, navios e monobóias usados para exportar o óleo da UEP até uma sede de recepção. Os dois conjuntos dispõem de atributos próprios e consistem de diversas condições para sua esquematização (SANTOS, 2011).

Figura 4 - Visão geral de um esquema de arranjo submarino de produção



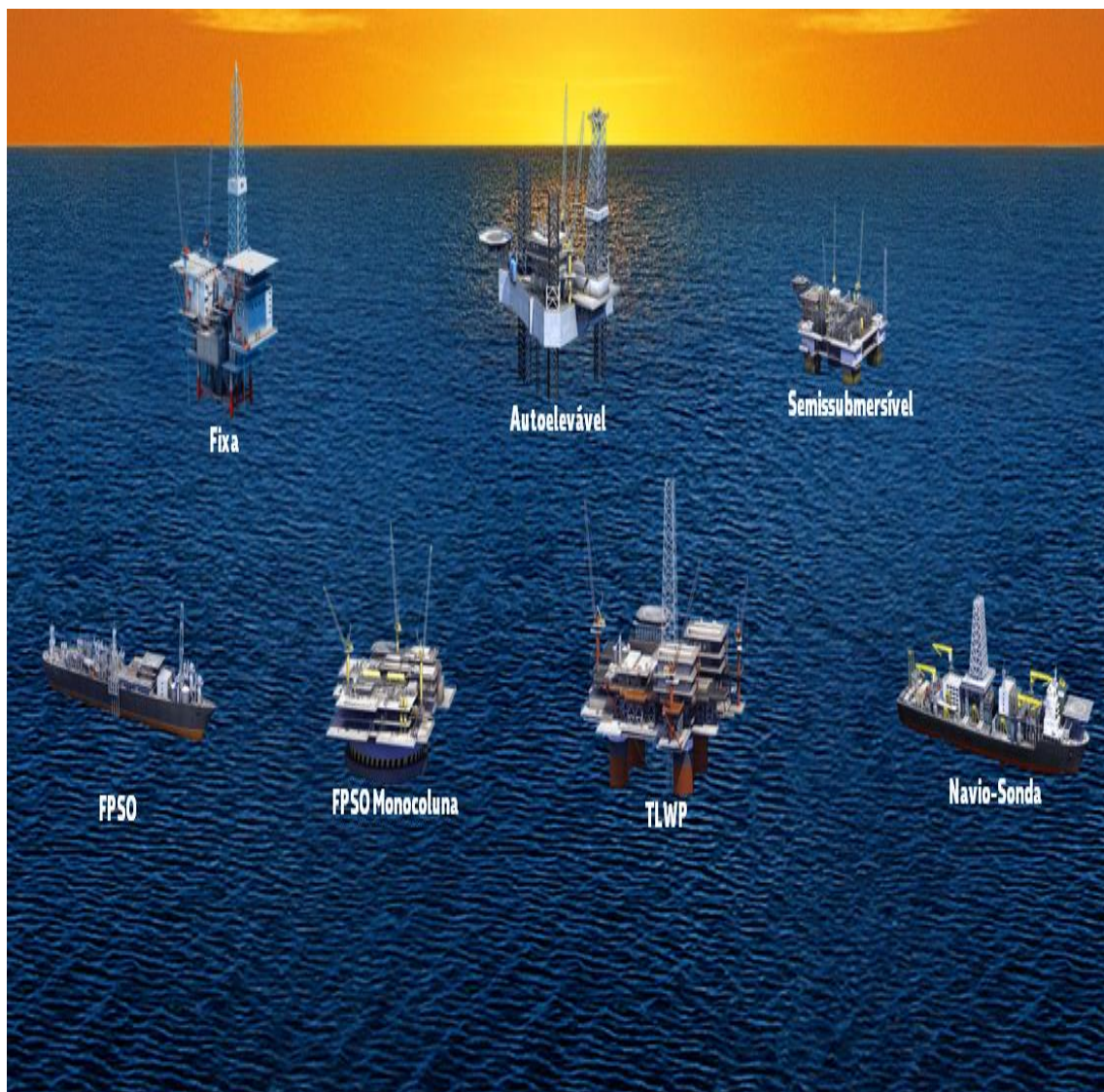
Fonte: Herdeiro (1997).

Os dutos submarinos são capazes de seguir de modo direto até um *manifold* ou a uma plataforma a partir da árvore de natal molhada (ANM), como mostra em detalhes a figura anterior, a ANM localiza-se em seguida da cabeça de poço no solo marinho (PADILHA, 2009).

Na fase de produção os poços submarinos são interligados a plataformas flutuantes ou fixas através de dutos, estes poços podem ser capazes de injetar e produzir fluídos. As plataformas responsáveis pela perfuração dos poços são as flutuantes ou auto-eleváveis (HERDEIRO,1997).

Os equipamentos fundamentais que compõem o arranjo submarino são compostos pelos seguintes equipamentos (PADILHA, 2009).

Figura 5- Plataforma de produção



Fonte: Petrobras (2018).

Figura 6 - Árvore de Natal Molhada (ANM)



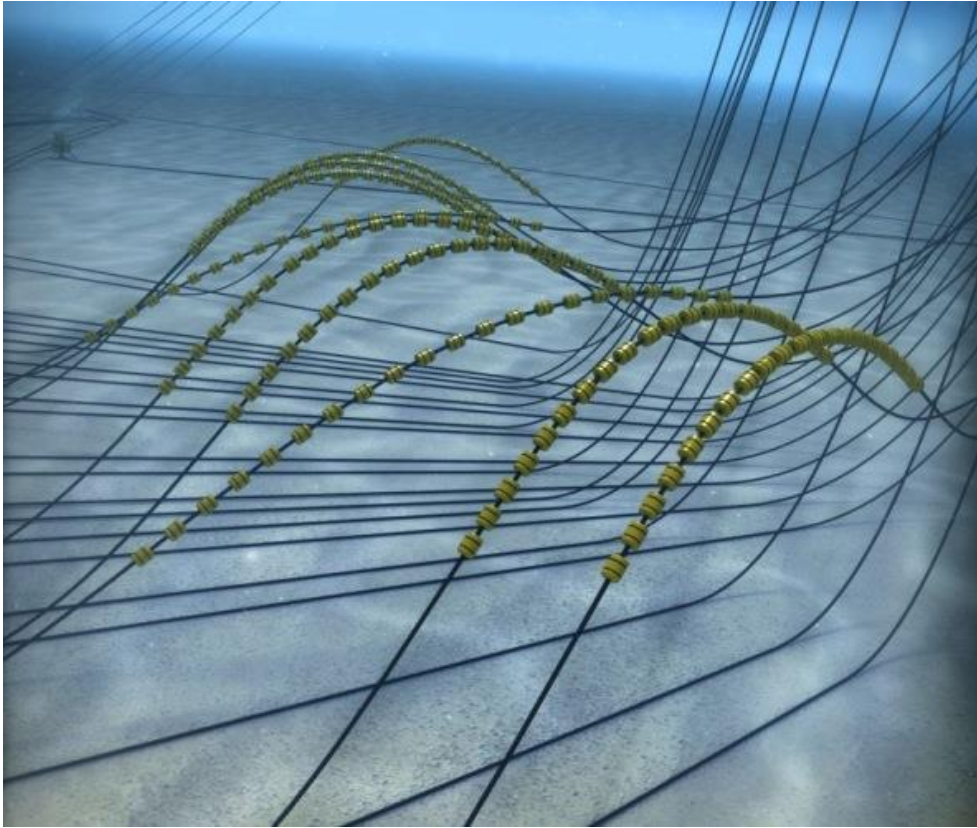
Fonte: Petrobras (2018).

Figura 7 - “Manifold”



Fonte: Petrobras (2018).

Figura 8- Linhas de escoamento (“*Risers*” ou “*Flowlines*”)



Fonte: Petrobras (2018).

As linhas flexíveis são separadas e especificadas de formas variadas, usualmente estão relacionadas com as circunstâncias operantes, ao tipo de fluido conduzido ou não, obstante a algum tipo de atribuição ou gênero peculiar (LEMOS, 2005). No entanto, o conteúdo deste trabalho está relacionado em especial aos *risers* flexíveis do tipo *unbonded*.

4 VISÃO GERAL DE DUTOS FLEXÍVEIS

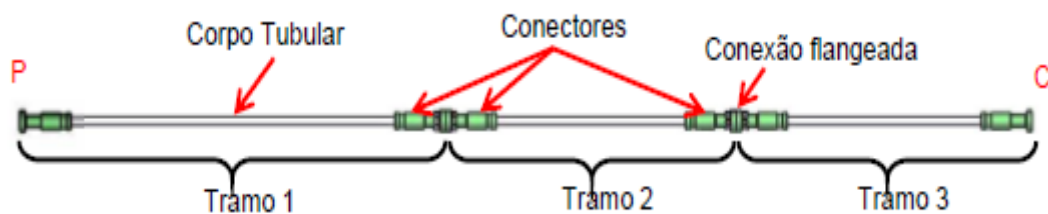
As definições de “linha flexível” e “duto flexível” podem ser relacionados como o mesmo desenvolvido por uma união de tramos, que articulam duas posições de conveniência para o fluxo de algum fluido (óleo, gás e/ou água). Os dutos podem ser distribuídos em conjuntos conforme a atribuição no deslocamento do fluido: coleta ou produção, exportação, serviço e injeção (HERDEIRO, 1997).

Segundo Negreiros (2016, p. 29), discorre sobre o que se confere a confecção dos tramos:

Os tramos flexíveis são pré-fabricados com comprimentos variáveis e são compostos basicamente pelo corpo tubular (tubo flexível) e por um conector em cada extremidade. Em termos de estruturas, um duto flexível submarino pode ser utilizado na interligação de equipamentos, dutos e plataformas como, por exemplo, os três casos seguintes:

- Um equipamento a uma UEP ou outro equipamento;
- Uma UEP a outra UEP;
- Um duto rígido a uma UEP, outro duto ou equipamento.

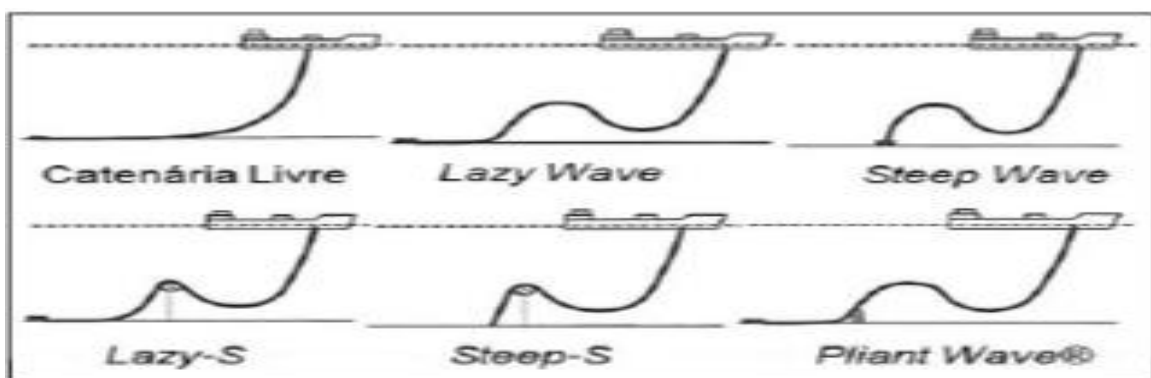
Figura 9 – Esquema de um duto flexível composto por três tramos



Fonte: Negreiros (2016).

A figura a seguir demonstra as diferentes configurações geométricas em relação a maneira com que os tramos flexíveis são instalados para produção.

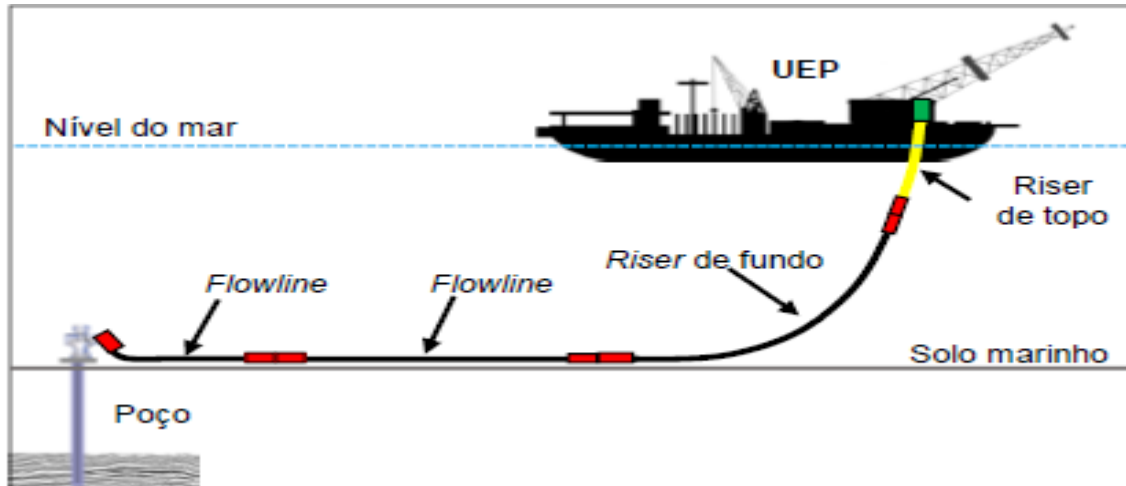
Figura 10 – Configurações de Risers Submarinos de Produção



Fonte: Negreiros (2016).

Como os dutos de exportação e coleta são categorizados segundo sua utilização, na figura a seguir é possível verificar e classificar os tramos conforme sua aplicação. *Risers* quando sua aplicação é dinâmica e *flowline* quando estático.

Figura 11 – Exemplo de uma interligação entre poço e plataforma



Fonte: Negreiros (2016).

4.1 Histórico dos dutos flexíveis

O IFP (Instituto Francês de Petróleo), nos anos 60 foi o desenvolvedor dos Tubos flexíveis de múltiplas camadas, com o propósito inicial de utilizá-los como mecanismos flexíveis em operações de perfuração. Após a fundação da empresa francesa Conflexip no ano de 1971, esta técnica foi melhorada meticulosamente para que os tubos flexíveis pudessem ser utilizados também como dutos e, ao longo dos anos, várias plantas e fundações foram executadas (NEGREIROS, 2016).

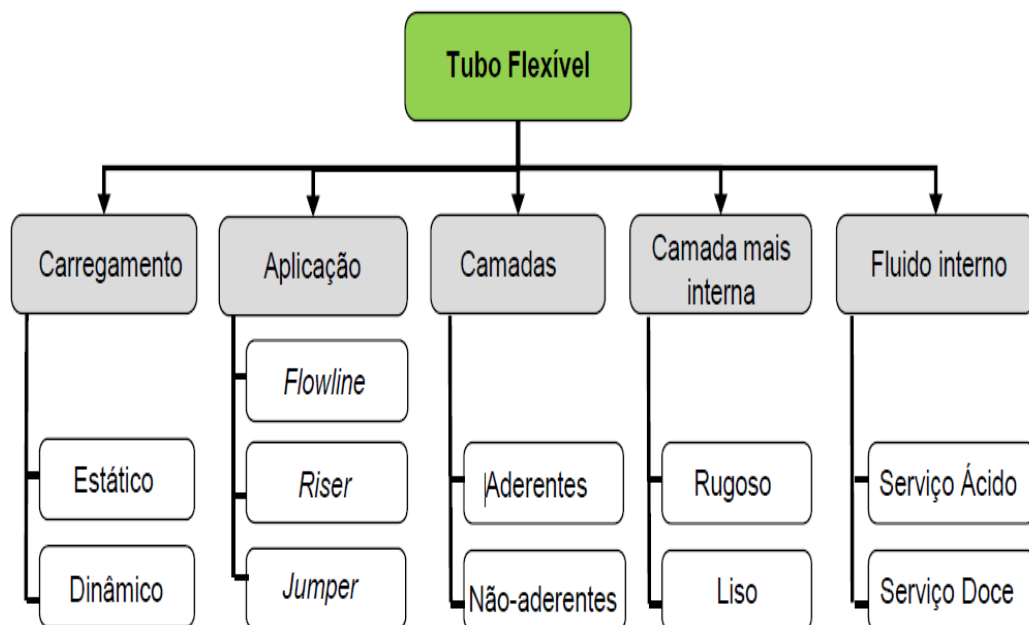
Na década de 70, no Brasil iniciaram-se as aplicações dos dutos flexíveis, através de sistemas antecipados de produção, localizados nos campos de Enchova e Garoupa. Sendo que ao fim desta década o sistema de Enchova, era composto também por *risers* e *flowlines* (LEMOS, 2005).

O triunfo das tecnologias dos *risers* flexíveis acoplados às plataformas flutuantes, acompanhado das subsequentes descobertas de campos marítimos ao fim da década de 70 e durante os anos 80 e 90, foi acentuado a utilização deste tipo de duto. A partir de então o mercado brasileiro tem incentivado avanço desta tecnologia e seu aperfeiçoamento, introduzindo propostas cada vez mais inovadoras de projetos (MORAIS, 2013).

4.2 Classificação dos dutos

Um tubo flexível combina baixa rigidez à flexão com alta rigidez à tração axial, o que é alcançado por uma construção de parede de tubo composto (API, 17B, 2014). Geralmente, um tubo flexível é projetado especificamente para cada aplicação, os tubos podem ser agrupados de acordo com projetos específicos e, portanto, aplicações. Isso permite que cada tubo seja otimizado para cada aplicação (NEGREIROS, 2016; API RP 17B, 2014; LEMOS, 2005).

Figura 12 – Classificação de um tubo flexível



Fonte: Negreiros (2016).

4.2.1 Carregamento

Estático: Linhas para aplicação estática durante a vida em serviço incluem principalmente o serviço dos *flowlines*, que trabalham apoiados ao leito marinho (NEGREIROS, 2016; API RP 17B, 2014; LEMOS, 2005)

Dinâmico: Aplicações dinâmicas envolvem instalações de produção flutuantes offshore ou terminais conectados a outra instalação flutuante, estrutura fixa ou base fixa e

estão sujeitos a cargas cíclicas provenientes de movimentos relativos. Como os *risers* (NEGREIROS, 2016; API RP 17B, 2014; LEMOS, 2005).

4.2.2 Aplicação

FLOWLINE: Aplicados em serviços estáticos, a principal característica deste tipo de tubo é que após sua instalação, ficam apoiados no solo do mar (API RP 17B, 2014).

RISER: Aplicação dinâmica, utilizados para conectar as *flowlines* às unidades flutuantes e/ou fixas (API RP 17B, 2014).

JUMPER: utilizado em ligações de pequenas distâncias entre boias de subsuperfície e plataformas ou entre equipamentos submarinos (API RP 17B, 2014).

4.2.3 Fluido interno

Serviço ácido (*Sour Service*): Tubos construídos com matérias metálicas especificamente qualificados para serviço de transporte de fluidos contaminados com H₂S (Sulfeto de Hidrogênio), (API, RP 17B, 2014).

Serviço doce (*Sweet Service*): Tubos construídos com matérias metálicas não especificamente qualificados para serviço de transporte de fluidos contaminados com H₂S (Sulfeto de Hidrogênio), (API, RP 17B, 2014)

4.2.4 Camadas mais internas

RUGOSO (Rough Bore): Geralmente são dutos utilizados em poços produtores de óleo, injetores de gás, oleodutos e gasodutos, sua camada mais interna é a carcaça intertravada, que funciona como uma barreira de pressão (NEGREIROS, 2016; API RP 17B, 2014; LEMOS, 2005; XAVIER, 2009).

LISO (Smooth Bore): Tubos utilizados em poços injetores de água e aqueodutos, ou seja, fluidos sem a presença de gás, a camada mais interna é confeccionada com material polimérico (NEGREIROS, 2016; API RP 17B, 2014; LEMOS, 2005; XAVIER, 2009).

4.2.5 Camadas

BONDED (Aderentes): Um tubo flexível *bonded* típico consiste em diversas camadas do elastômero envolvido ou extrudado individualmente e depois coladas através do uso de

adesivos ou pela aplicação de calor e / ou pressão (vulcanização), para fundir as camadas em uma única construção (NEGREIROS, 2016; API RP 17B, 2014; LEMOS, 2005).

UNBONDED (Não aderentes): Este tipo de tubo é composto por camadas metálicas e poliméricas separadas entre si, o que permite movimentos relativos entre as camadas. construídas (NEGREIROS, 2016; API RP 17B, 2014; LEMOS, 2005).

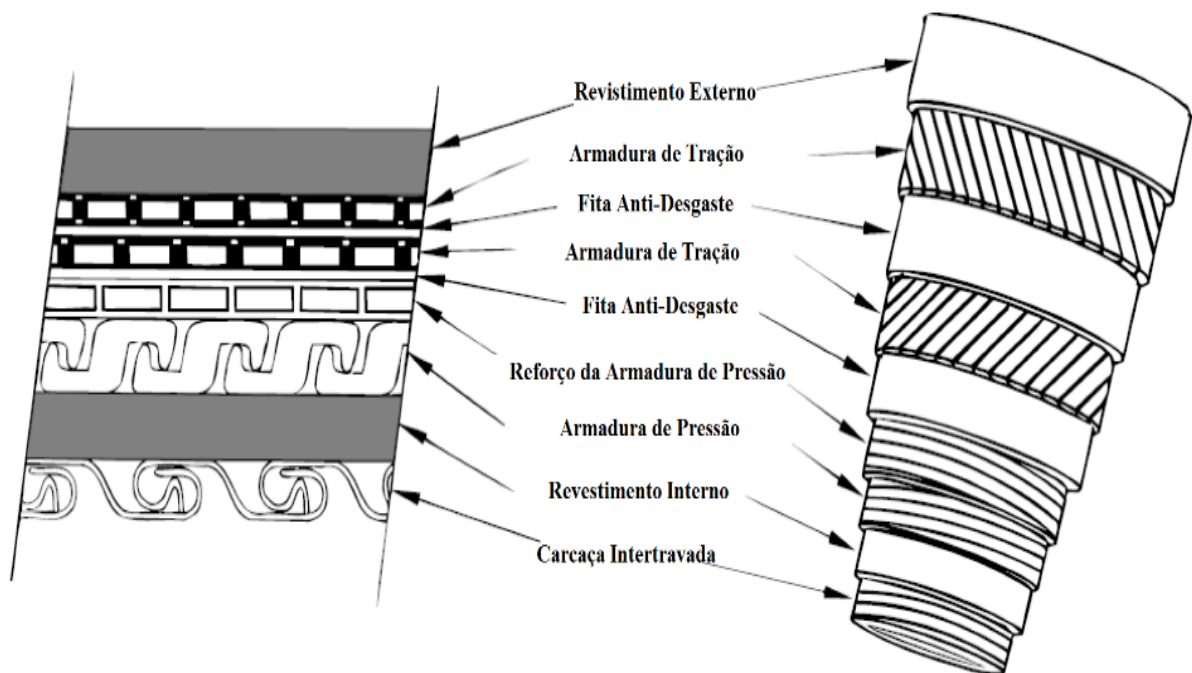
Como o objetivo do trabalho é apresentar um tipo de falha presente nos tubos do tipo *unbonded*, o próximo capítulo descreverá este tipo de tubo.

5 RISERS DO TIPO UNBONDED

A figura a seguir mostra a configuração típica de um *riser* flexível de camadas não aderentes.

A concepção destes tubos é feita separadamente e de dentro pra fora, ou seja, a primeira camada a ser conformada é a carcaça (NEGREIROS, 2016).

Figura 13 - Camadas presentes no riser flexível *unbonded*



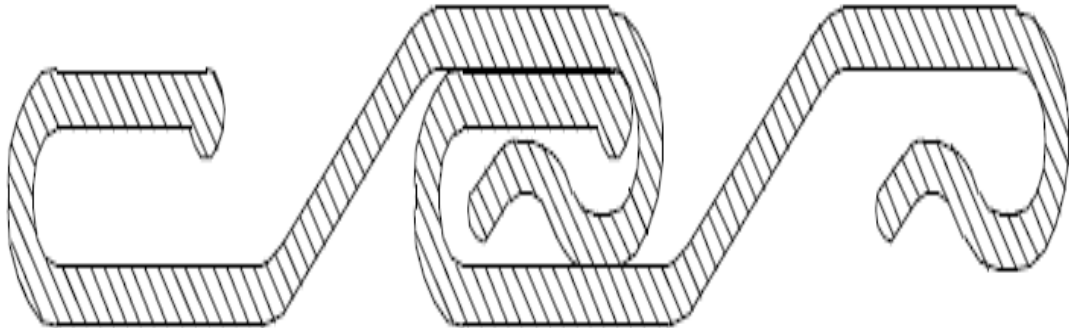
Fonte: Herrera (2015).

Nos próximos itens serão detalhados de acordo com as normas API 17B e API 17J, a função de cada camada e os materiais com que são fabricadas.

5.1 Carcaça intertravada

Tem como função fornecer resistência ao rompimento, caso alguma das outras camadas falhem e, também é responsável por estabelecer resistência a cargas radiais. Por manter um contato direto com o fluido são fabricadas a partir de uma fina tira metálica tipicamente de aço inoxidável, para evitar a corrosão. Estão presentes em tubos flexíveis da família *Rough Bore*. (API 17B, 2014; API 17J, 2014).

Figura 14 - Exemplo de formato da carcaça intertravada



Fonte: API 17B (2014).

5.2 Revestimento interno

O revestimento interno segue toda a extensão do tubo, sendo formado por um termoplástico extrudado acima da carcaça intertravada, e tem como função garantir a estanqueidade do tubo flexível, evitando que o fluido transportado entre em contato com as camadas mais externas e com o meio ambiente. Isto é, este é o responsável pela vedação do fluxo no duto, por isso é uma barreira para as pressões internas e externas. Sendo assim, conduz tais pressões até as camadas metálicas seguintes que possuem alta resistência ao colapso (carcaça), ou à explosão (armaduras de pressão).

Consequentemente é de suma importância que esta camada tenha a vedação devida no conector de extremidade. Normalmente os polímeros que constituem a base para fabricação desta camada são os PVDF e os que tem como base poliamidas (API 17B, 2014; API 17J, 2014).

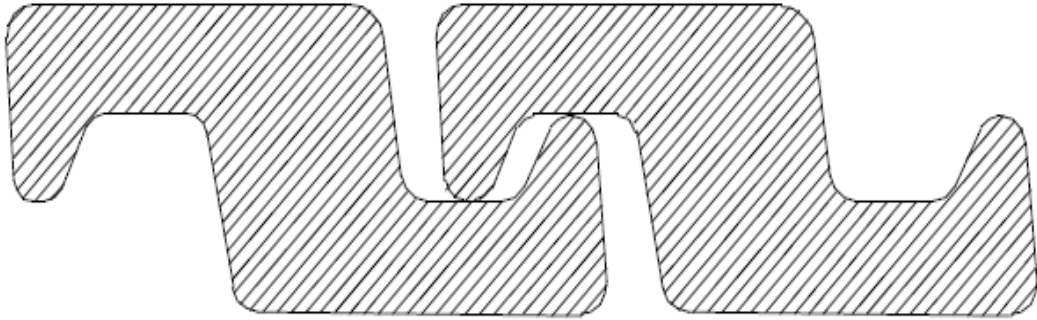
5.3 Armadura de Pressão

Com assentamento helicoidal de ângulo próximo a 90° em comparação ao eixo do tubo, o que a torna uma camada com alta rigidez na direção radial. Essas camadas são construídas em aço carbono.

A consolidação desta camada logo acima da barreira de pressão é feita através de um perfil brevemente conformado, no qual é desenvolvido por um mandril por cima do polímero. Sua principal função é resistir a pressão interna (explosão) (API 17B, 2014; API 17J, 2014).

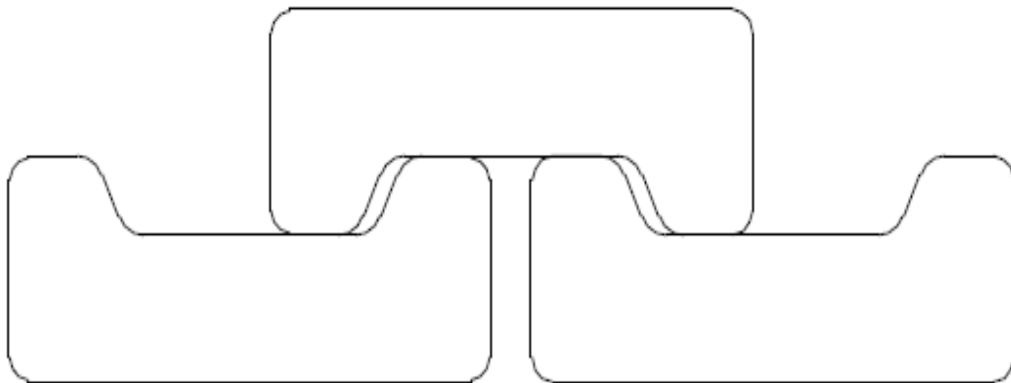
As principais configurações dos perfis desta camada serão demonstradas a seguir nas figuras retiradas da norma API, RP, 2014.

Figura 15 - 1 PERFIL Z



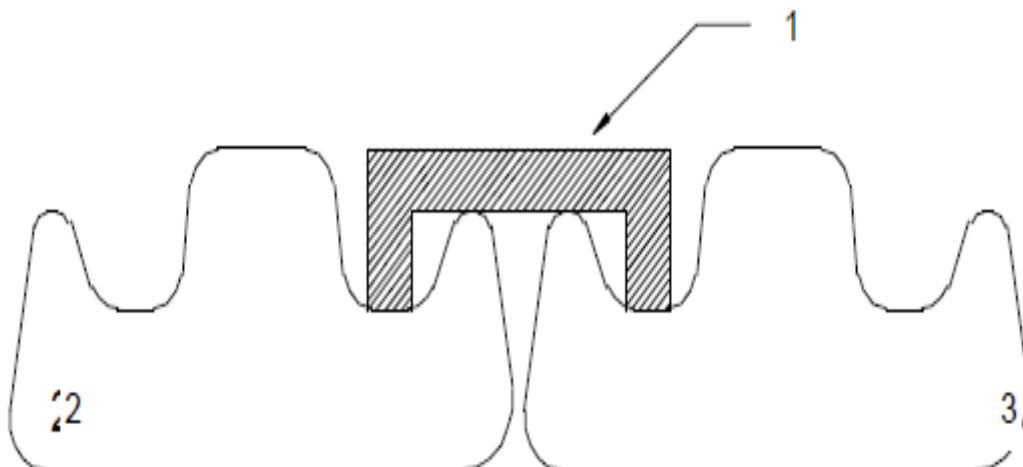
Fonte: API RP, 17B (2014).

Figura 16 - 2 PERFIL C



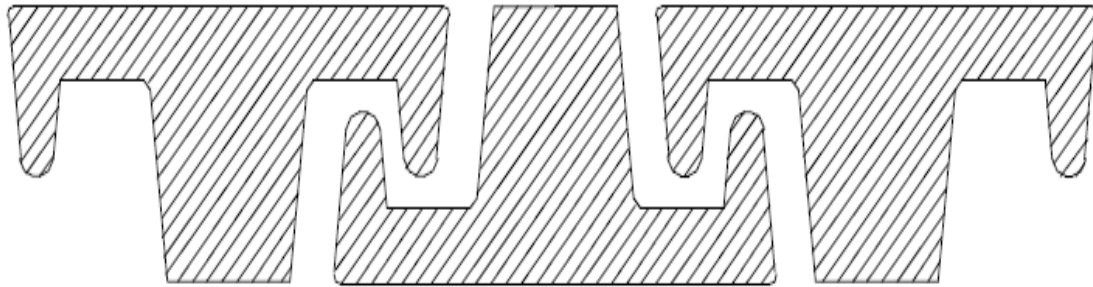
Fonte: API RP, 17B (2014).

Figura 17 - 3 PERFIL t COM CLIPE



Fonte: API 17B RP (2014).

Figura 18 - 4- PERFIL t



Fonte: API 17B RP (2014).

5.4 Armaduras de tração

As armaduras de tração são partes fundamentais para a estrutura dos tubos flexíveis, afinal são as responsáveis por resistir aos esforços axiais oriundos da tração, flexão, pressão interna e ocasionalmente torção, assim como a esforços externos. Seus arames são sempre montados em pares, no formato helicoidal e perfil retangular, plano ou circular, porém possuem um ângulo de hélice (pequeno ângulo com o eixo do tubo), que são montadas em sentidos opostos em cada par. Para a fabricação destes arames, devem ser considerados materiais metálicos, sendo aços de médio e alto carbono, variando de acordo com a demanda do projeto (API 17B, 2014; API 17J, 2014).

5.5 Fita antidesgaste de alta resistência

Essa camada é composta por material plástico que é envolvido no corpo tubular logo depois da última camada da armadura de tração e seu objetivo é resistir a possíveis deslocamentos em excesso dos arames das armaduras na direção radial (gaiola de passarinho), que podem ser ocasionados por compressão, flexão ou pressão do duto. São construídas de material de alta resistência à tração, não metálico, como a aramida (API 17B, 2014; API 17J, 2014).

5.6 Revestimento externo

Encarregado de fornecer proteção para a parte interna do tubo, sustentando a posição das camadas internas e mantendo a vedação do tubo contra fluidos externos, além de manter

as fitas e as armaduras livres de impactos mecânicos durante transporte e manuseio. Confeccionada a partir de material termoplástico, é disposta acima das fitas de alta resistência ou armaduras através do método de extrusão. Além disso, contribui para manter a organização dos arames das armaduras. Para sua fabricação são utilizados materiais termoplásticos como poliamidas e polietilenos com elevada densidade.

Em conjunto com a camada polimérica interna, este revestimento demarca o limite do espaço anular dos tubos flexíveis (API 17B, 2014; API 17J, 2014).

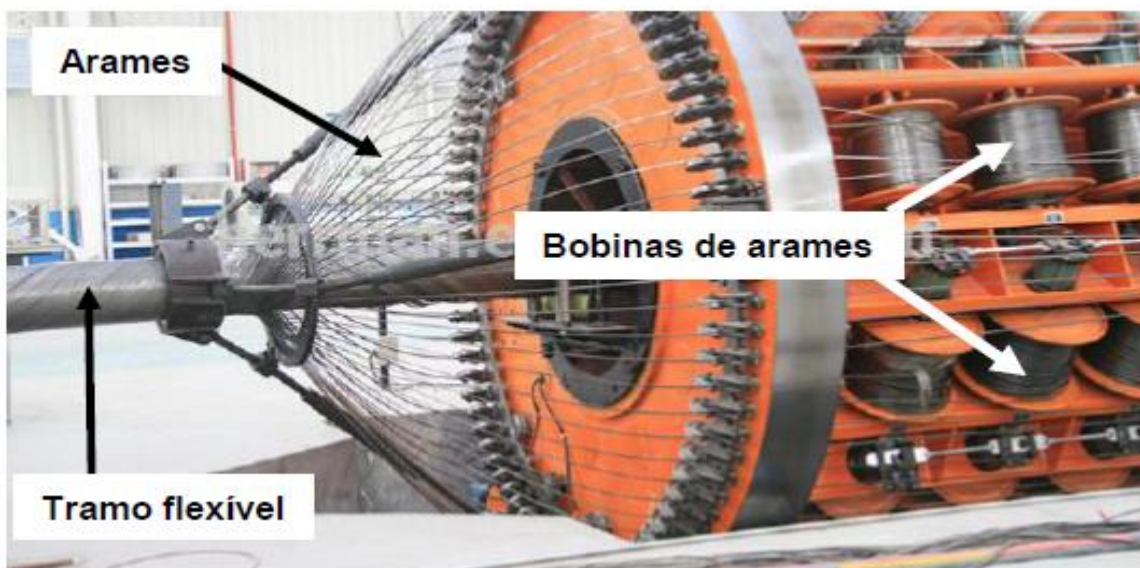
No próximo capítulo será mais detalhada as armaduras de tração, devido o trabalho ser sobre uma falha que ocorre na mesma.

6 CARACTERÍSTICAS DAS ARMADURAS DE TRAÇÃO

São estruturas fabricadas com fios metálicos através de aço carbono, que passam por tratamentos térmicos e processos de fabricação para que possam alcançar os limites de escoamento e de resistência exigidos (NEGREIROS, 2016). Para evitar problemas o fabricante deve conhecer as tolerâncias de projeto a fim de classificar o teor de carbono do aço utilizado na fabricação das armaduras de tração.

O estabelecimento destas armaduras é feito através do tramo flexível e consolidado por uma máquina (armatriz), que gira os carretéis de arames em torno do corpo do tubo no mesmo momento em que este é conduzido axialmente. (NEGREIROS, 2016; API RP 17B, 2014; SOUSA, 2005).

Figura 19– Montagem da Armadura de Tração na Fábrica



Fonte: Negreiros (2016).

Os fios metálicos (arames) ficam envoltos nas bobinas, assim são tracionados e ordenados em todo o perímetro de um modelo da armatriz, no corpo tubular.

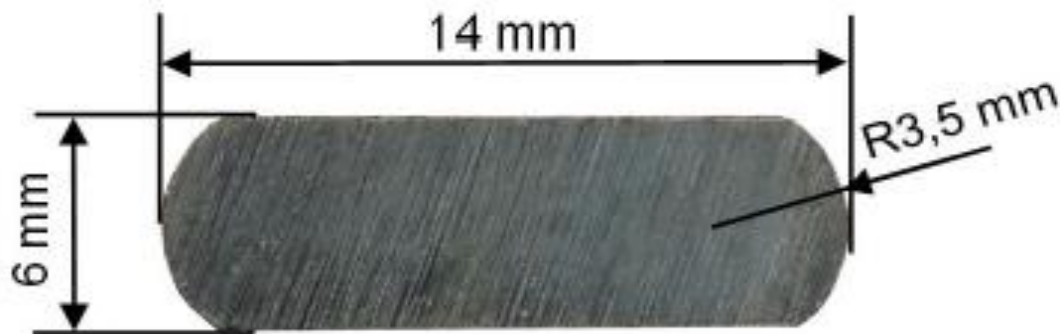
Desta forma, os fios metálicos são configurados e sistematizados de tal maneira que ficam dispostos lado a lado. Por serem fabricadas aos pares, faz-se necessário a existência de duas armatizes, colocadas em série e fazendo giros em sentidos contrários, assim é consolidada primeiramente a armadura interna e depois a armadura externa. (NEGREIROS, 2016; API RP 17B, 2014; SOUSA, 2005)

Os fios metálicos destas armaduras, frequentemente são constituídos a partir de uma geometria de seção por pouco retangular, laterais abauladas e face plana. Cada armadura possui um número de arames que variam de 30 a 80, e os ângulos de consolidação em relação ao eixo do tubo (helicoide) podem variar de 20° a 60° ; a depender do balanço entre a rigidez axial e radial pretendido (API RP 17J, 2014)

Em tubos livres da armadura de pressão o ângulo helicoide fica na ordem de 55° . Visto que a absorção de tração dos fios varia de acordo com a variação deste ângulo, sendo que quanto menor o ângulo, maior será a absorção de tração, logo os mesmos tornam-se menos resistentes às pressões internas (NEGREIROS, 2016, SIMONSEN, 2014; SOUSA, 2005)

Em estruturas empregadas para serviço em altas pressões internas e com a presença das armaduras de pressão, o que ocorre comumente, tal ângulo normalmente varia entre 20° e 35° , porém cada esquema pode ser modificado conforme as exigências colocadas e os atributos das demais camadas (NEGREIROS, 2016; SOUSA, 2005).

Figura 20 – Exemplo de seção de arame usado em dutos flexíveis



Fonte: Negreiros (2016).

Deste modo, o ângulo de consolidação, o número de armaduras, o número de arames por armaduras e a área da seção transversal, além das características mecânicas do aço do arame, são indispensáveis na modulação dos tubos flexíveis (NEGREIROS, 2016, BRACK et al., 2008).

7 FALHAS EM DUTOS FLEXÍVEIS

A norma API RP 17B (2014) aponta os principais mecanismos de falha e os defeitos de cada camada dos dutos flexíveis, sejam em serviço estático ou dinâmico, além de sugerir suas prováveis fontes.

A seguir serão citados os modos de falhas, apresentados pela mesma norma, que são próprios destas estruturas:

- Colapso;
- Explosão;
- Falha em Tração;
- Falha em Compressão;
- Curvatura Excessiva;
- Falha por Torção;
- Falha por Fadiga;
- Erosão;
- Corrosão.

Visto que este trabalho irá analisar a corrosão-fadiga nas armaduras de tração, os itens a seguir serão relacionados a este modo em especial de falha.

8 FADIGA

A fadiga é um tipo de falha mecânica que causa danos indesejáveis em estruturas, sejam essas sujeitadas a movimentos cíclicos (carregamento dinâmico) ou não (carregamento estático) (DOWLING et al., 2013).

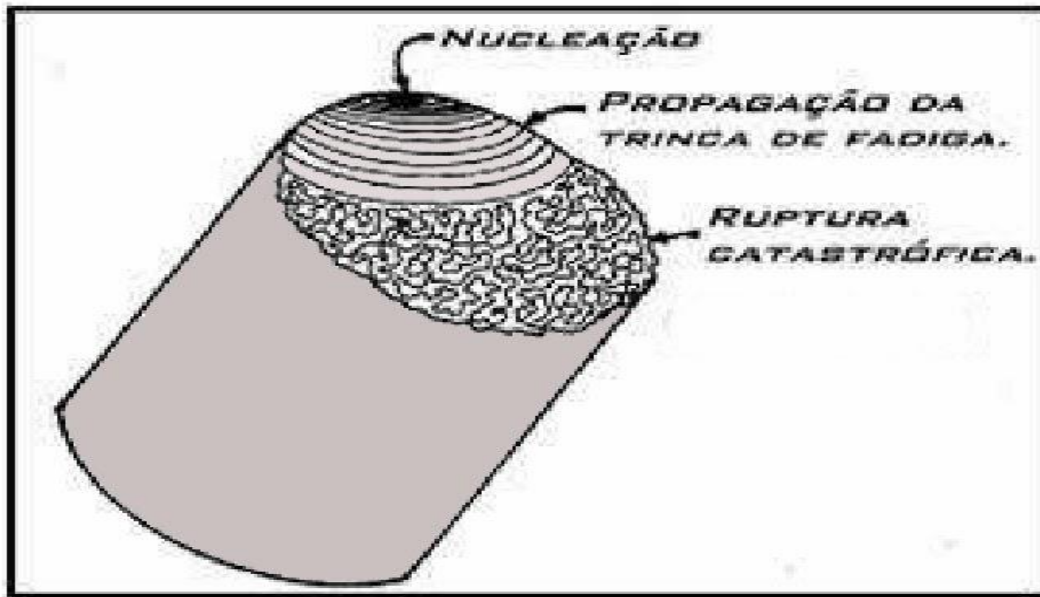
Quando submetidas a carregamentos dinâmicos, tanto em tensões elásticas como plásticas, peças e estruturas de aço podem sofrer danos microscópicos e desenvolver micro - trincas capazes de crescer, propagar e levar à falha (NEGREIROS, 2016).

8.1 Etapas do processo de fadiga

As trincas proporcionadas através do processo de fadiga se diferem por desenvolverem três estágios conhecidos. Onde o primeiro estágio será o que engloba o momento de nucleação da falha, quando o início se dá em consequência de a máxima tensão principal de cisalhamento estar à 45° com a tensão de tração aplicada. O desenvolvimento de uma trinca na direção ortogonal à tensão de tração caracteriza o segundo estágio.

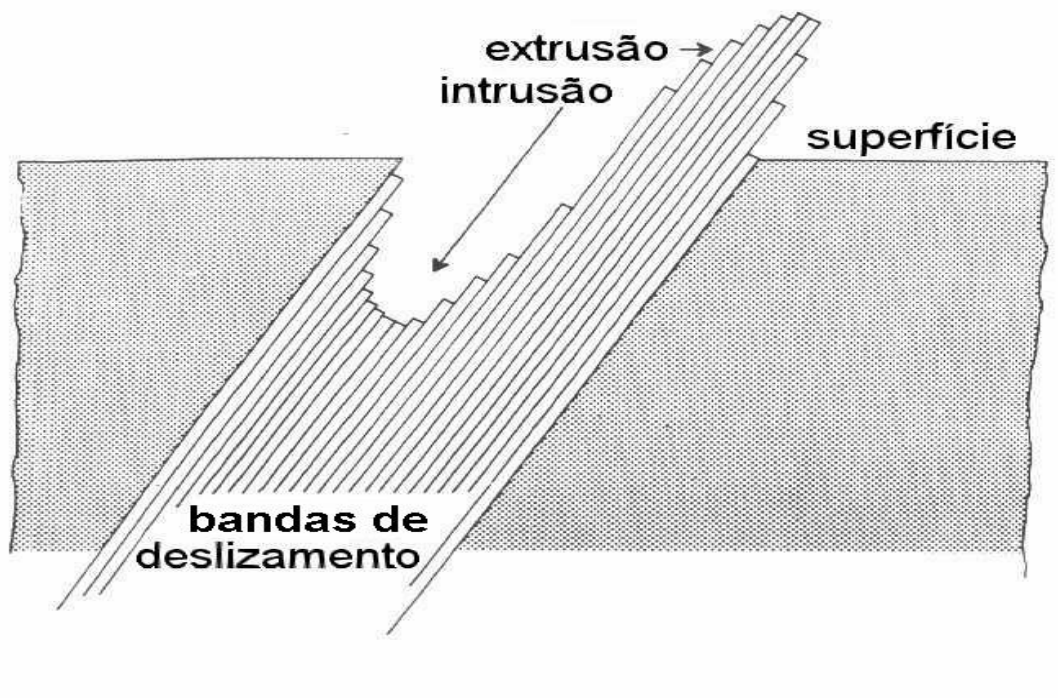
Por fim, a ruptura catastrófica acontece, no instante em que a seção resistente é minimizada o suficiente para que não suporte mais um ciclo de carga e fragmente por sobrecarga (OLIVEIRA,2014).

Figura 21 - Estágios do processo de trinca por fadiga



Fonte: Oliveira, (2014)

Figura 22- Fase inicial do trincamento por fadiga



Fonte: Lemos (2008).

8.1.1 Nucleação da trinca

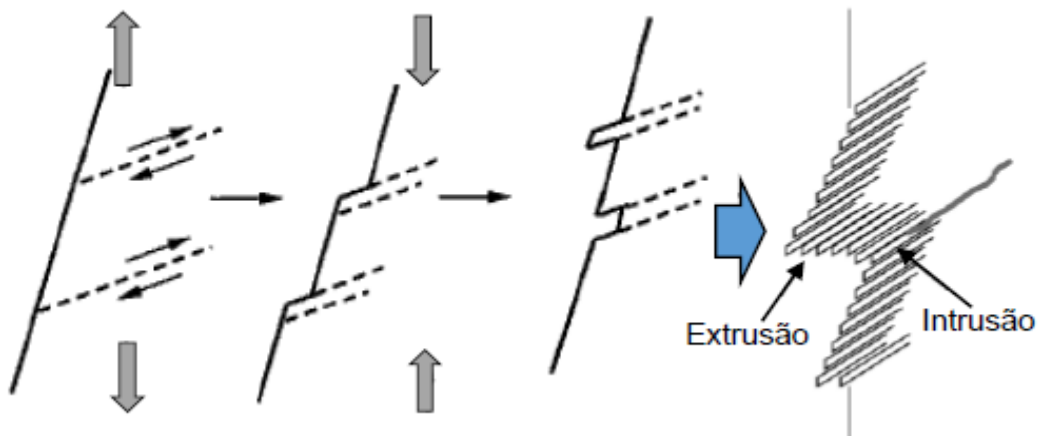
Em fadiga as trincas se nucleiam em singularidades ou descontinuidades, em grande parte dos materiais. Sendo que as descontinuidades podem aparecer no interior ou na face do material, e as singularidades podem ocorrer de forma estrutural ou geométrica. Uma vez que na superfície os degraus de escorregamento estão presentes e a deformação plástica é mais

fácil, além do que a máxima tensão também sempre estará posicionada em algum ponto na superfície, pode se dizer que por esta razão a nucleação preferencial de trincas ocorre na superfície. No entanto, podem iniciar no interior do corpo de prova, por defeitos internos ou em descontinuidade, trincas por fadiga (OLIVEIRA, 2014).

A nucleação de trincas pode ser de responsabilidade apenas dos degraus de escorregamento, ou ainda os mesmos podem interagir com defeitos estruturais ou geométricos para formar as trincas (OLIVEIRA, 2014).

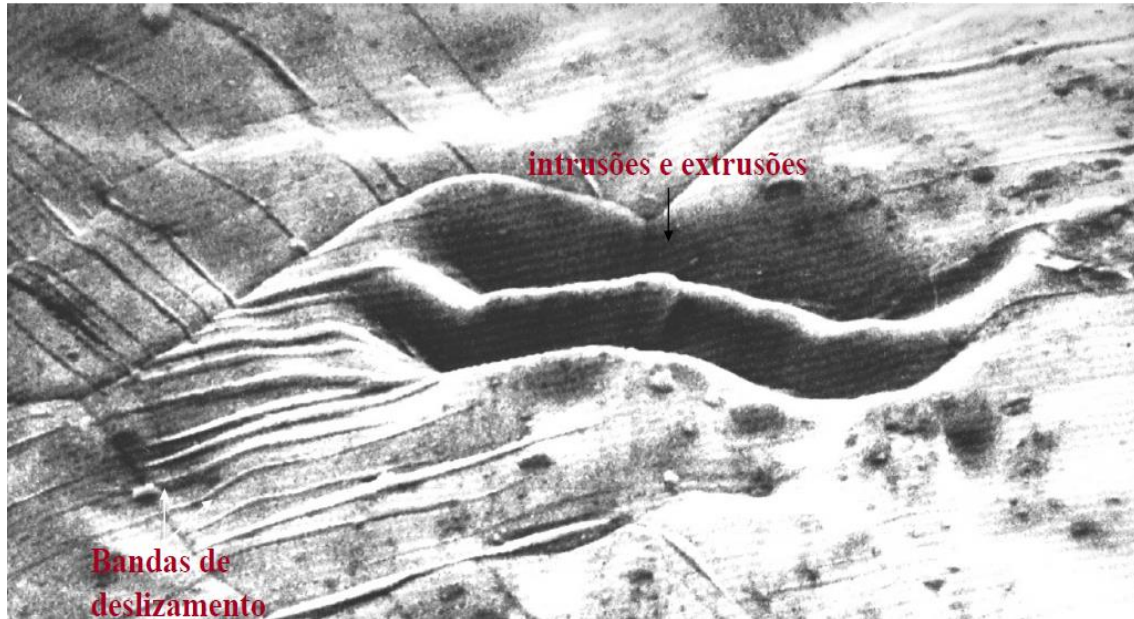
As singularidades superficiais podem ser desenvolvidas durante a deformação cíclica, como por exemplo, a formação de intrusões e extrusões, que são chamadas de bandas de escorregamento e são persistentes em metais, ou essas singularidades podem estar presentes desde o começo. Tais extrusões e intrusões são os locais preferenciais de nucleação de trincas por fadiga (OLIVEIRA, 2014).

Figura 23 - Nucleação de trinca por fadiga nas bandas de escorregamento



Fonte: Adaptado de Negreiros (2016).

Figura 24 - Intrusão, extrusão na superfície de Ni puro



Fonte: Lemos (2008).

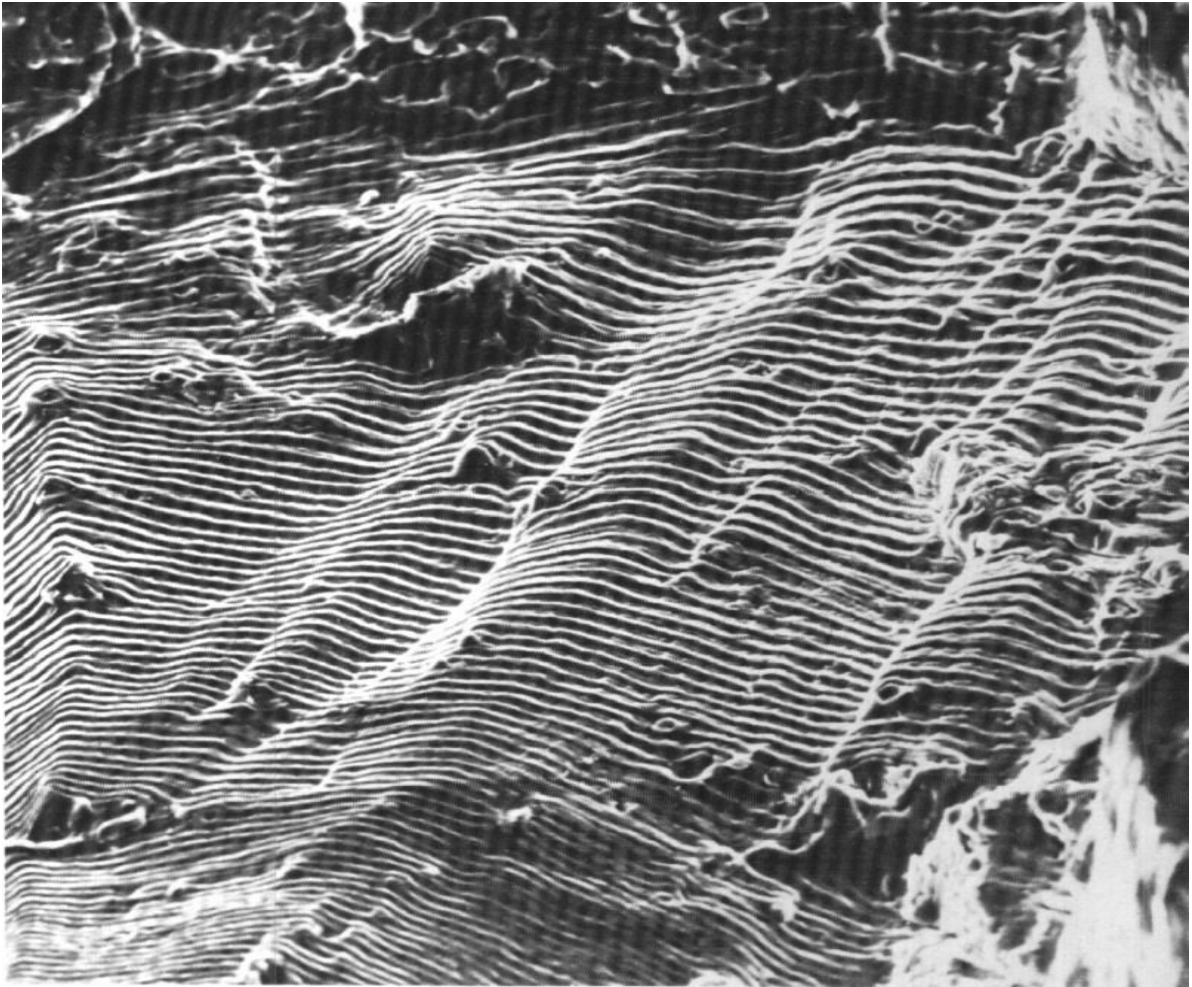
8.1.2 Propagação de trinca por fadiga

Os pontos onde estão localizadas as maiores solicitações mecânicas, são justamente os locais convenientes para a nucleação e propagação de novas trincas. Tensões de compressão não ocasionam propagação das trincas, em contrapartida as tensões de tração causam este fenômeno. No estágio de propagação de trincas, aparecem mais dois estágios até que se chegue ao estágio de ruptura catastrófica. São eles, o desenvolvimento de estrias e em seguida as marcas de praia (ondulações concêntricas) e marcas de rio (ondulações radiais).

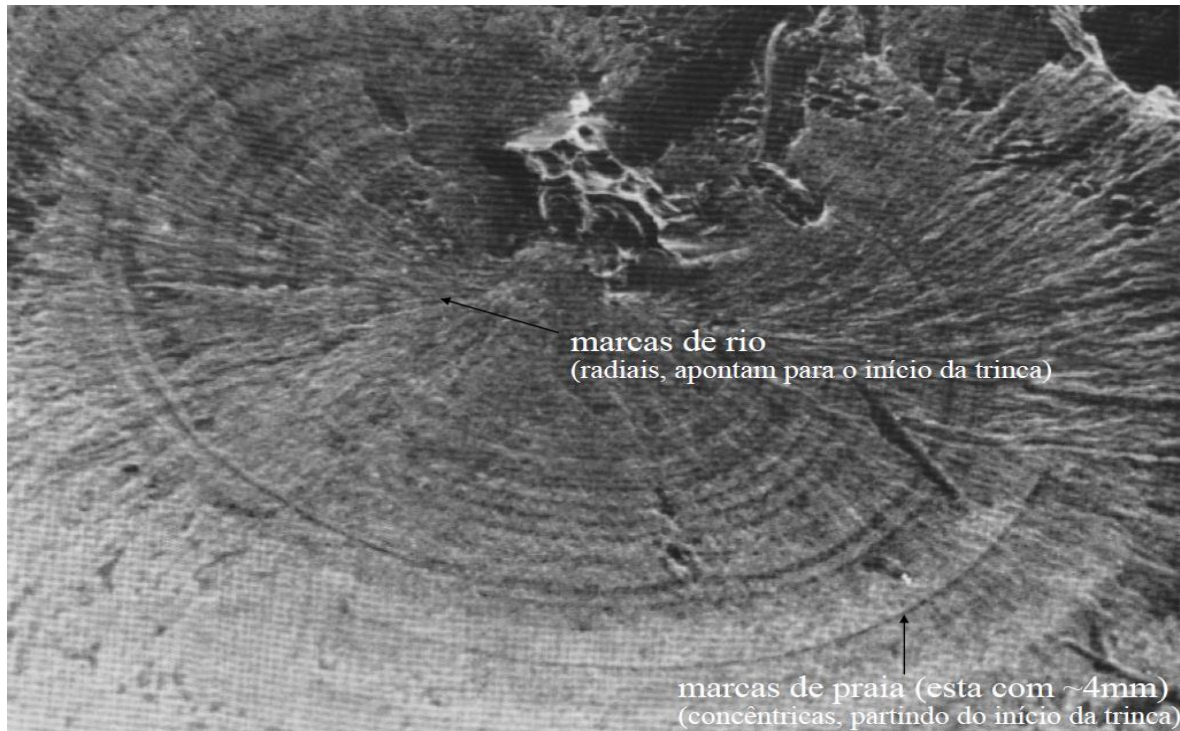
A partir do momento em que as estrias começam a se formar na superfície, a primeira etapa da propagação de trincas é iniciada. Isso ocorre quando depois de nucleadas na superfície as trincas se estendem em planos orientados próximos de 45° do eixo de tensão. A partir disto a trinca se propaga nos planos cristalográficos correspondentes até localizar os contornos do grão, neste momento a trinca frequentemente demonstra estrias características, que representam o número de ciclos do carregamento.

Durante a propagação da trinca, a ponta desta, ocasiona altas concentrações de tensão, que causam deformações plásticas locais, logo a frente da trinca. A zona de deformação plástica evolui de forma a quase se igualar à espessura do material, e pode ser observada a olho nu. Encerrando, assim, o segundo estágio e formando, as marcas de praia e/ou marcas de rio, que dá início a ruptura (OLIVEIRA, 2014).

Figura 25 - Demonstrativo de estrias vistas em um MEV



Fonte Lemos (2008).
Figura 26 - Demonstrativo de marcas de praia e de rio



Fonte Lemos (2008).

8.1.3 Falha catastrófica

Determina a fratura final súbita, que acontece ao final do ciclo de tensões no momento em que a trinca ocasionada gradativamente alcança proporções críticas para propagação instável (OLIVEIRA, 2014).

8.2 Fadiga em *risers* flexíveis

Lemos (2008, p.9), diz que nos *risers* flexíveis a falha por fadiga pode ocorrer nas determinadas situações e camadas:

- Fadiga associada ao desgaste nas armaduras de tração
- Fadiga pura nas armaduras de tração
- Fadiga associada ao desgaste na camada de pressão
- Fadiga associada à corrosão (em serviço ácido ou não)
- Fadiga das camadas poliméricas
- Fadiga nas terminações.

Como este trabalho está relacionado a falha de fadiga associada à corrosão, métodos para avaliação da vida em fadiga serão citados a seguir.

8.3 Avaliação da vida em fadiga

As avaliações em fadiga podem ser dividida em 3 métodos conceituados (NEGREIROS, 2016):

- Método S – N

Deve ser aplicado quando as tensões máximas atuantes no ponto crítico da peça forem menores que a resistência ao escoamento cíclico do material, pois a análise de tensões utilizada neste método é linear elástica. É apropriado para as previsões de iniciação de trinca por fadiga (LEMOS, 2008 apud NEGREIROS, 2016).

- Método ϵ -N

Considera as deformações plásticas cíclicas para iniciação da trinca (NEGREIROS, 2016).

- Método da/dN

Avalia a propagação da trinca por fadiga através de conceitos da mecânica da fratura linear elástica (NEGREIROS, 2016).

O presente trabalho está associado às condições de carregamento dinâmico com tensões no regime elástico e, por isso, o método S-N será abordado a seguir.

8.3.1 Método S – N

Ao relacionar a tensão cíclica no regime linear elástico com o número de ciclos, tal método tem como objetivo definir previamente o desenvolvimento de trincas formadas por fadiga em números de ciclos elevados (NEGREIROS, 2016).

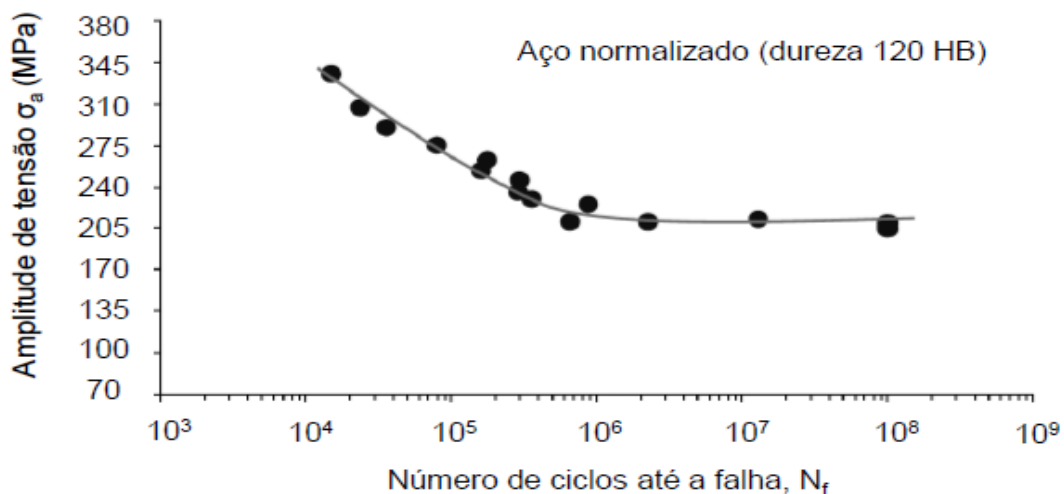
Segundo Lemos (2008, p. 27-28):

- como regra geral, o método SN só deve ser aplicado quando as máximas tensões atuantes nos pontos críticos da peça forem menores que a resistência ao escoamento cíclico do material, já que a análise de tensões usada neste método é linear elástica!
- ao contrário do ϵ N, o SN não considera de forma explícita os efeitos plásticos cíclicos eventualmente presentes nas raízes dos entalhes e, como aquele, não reconhece a presença de trincas;
- logo, o método SN só é apropriado às previsões das *vidas longas (de iniciação de trincas de fadiga)*;
- entretanto, o método S-N é simples e possui uma série de *vantagens*, que o tornam confiável na maioria dos casos práticos de dimensionamento mecânico à fadiga: conta com um vastíssimo banco de dados; há uma grande experiência acumulada com seu uso; preserva o princípio da superposição; é computacionalmente muito mais simples e rápido que o ϵ -N; pode ser sintetizado numa *única* equação de projeto, que engloba todas as informações necessárias.

As propriedades do material e as particularidades do ponto crítico da estrutura caracterizam a resistência à fadiga (NEGREIROS 2016; LEMOS, 2005).

“Para avaliação do desempenho à fadiga, os resultados dos testes em diferentes níveis de carregamento são inseridos em um gráfico, gerando a curva S-N do material. A tensão no gráfico pode ser representada pela tensão máxima, pela amplitude de tensão ou por sua variação” (NEGREIROS, 2016 p.70).

Figura 27 – Exemplo curva s-n



Fonte: Negreiros (2016).

Segundo Negreiros (2016 p.70):

“A região da curva com inclinação negativa é caracterizada pela vida finita e, após a alteração da inclinação (ponto de inflexão), passando a ser uma linha horizontal, é conhecida como região de vida infinita. Este ponto é demarcado pelo limite de resistência à fadiga do material, σ_f , abaixo do qual a falha por fadiga não ocorre.”

A seguir serão descritos os principais fatores que influenciam a vida em fadiga.

8.4 Fatores que influenciam a vida em fadiga

São diversos os motivos que interferem no desempenho à fadiga, sendo em alguns casos associados a propriedades ligadas ao material/peça e em outros não. O ambiente externo, a tensão média, frequência, tipo de carregamento, aquecimento do material, são elementos externos ao material ou a peça que influenciam na vida em fadiga. Os fatores relacionados diretamente a peça ou ao material são os seguintes: limite de resistência à tração,

Geometria e acabamento superficial, tratamento superficial, microestrutura, tensões residuais. (NEGREIROS, 2016).

Neste tópico seguinte será abordado os fatores pertinentes que relacionam o material ou a peça

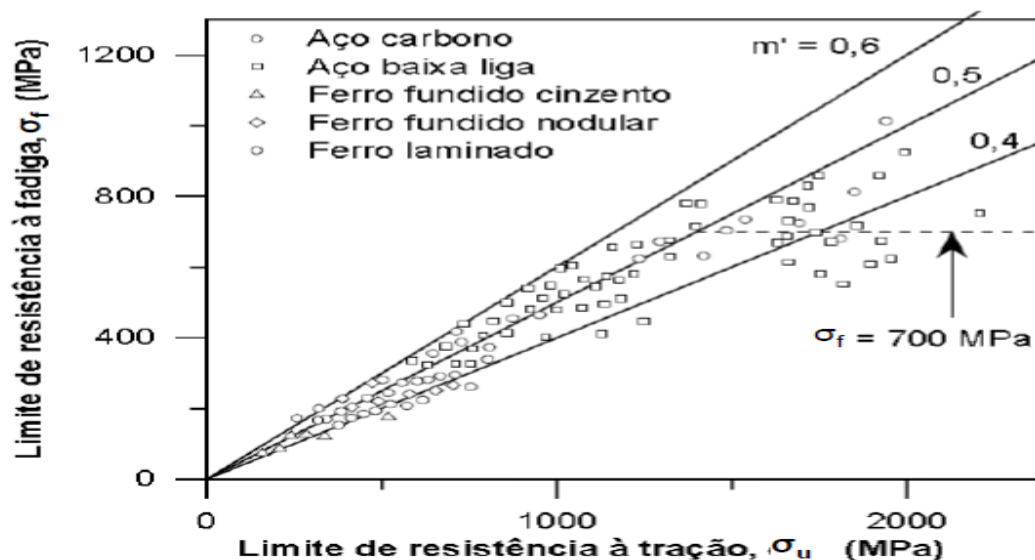
8.4.1 Limite de Resistência à Tração

Os limites de fadiga e de resistência à tração do aço possuem relações próximas, por este motivo muitos engenheiros estão abordando propriedades macroscópicas para a avaliação do limite de fadiga (LEE et al., 2005).

Considerando testes com o carregamento completamente reverso com ponto de inflexão da curva s- n em 10^6 ciclos, para vários tipos de aço, a tensão alternada do limite de fadiga pode ser estipulada como sendo metade do seu limite de resistência, caso o mesmo seja menor que 1400 Mpa. Para os casos de limites de resistência mais elevados, o limite de fadiga torna-se constante em aproximadamente 700 Mpa, como mostra o gráfico da figura a seguir.

No entanto, estes valores podem variar, uma vez que outras características do material como a porosidade, rugosidade, tamanho de grão, inclusões, e outros podem influenciar na nucleação e propagação de trincas. O processamento, a fabricação, os tratamentos térmicos, podem ocasionar o aparecimento de micro - trincas, que são fatores que influenciam no limite de fadiga (DOWLING et al., 2013; LEE et al., 2005).

Figura 28 - Relação entre limite de fadiga e resistência à tração



Fonte: Negreiros (2016).

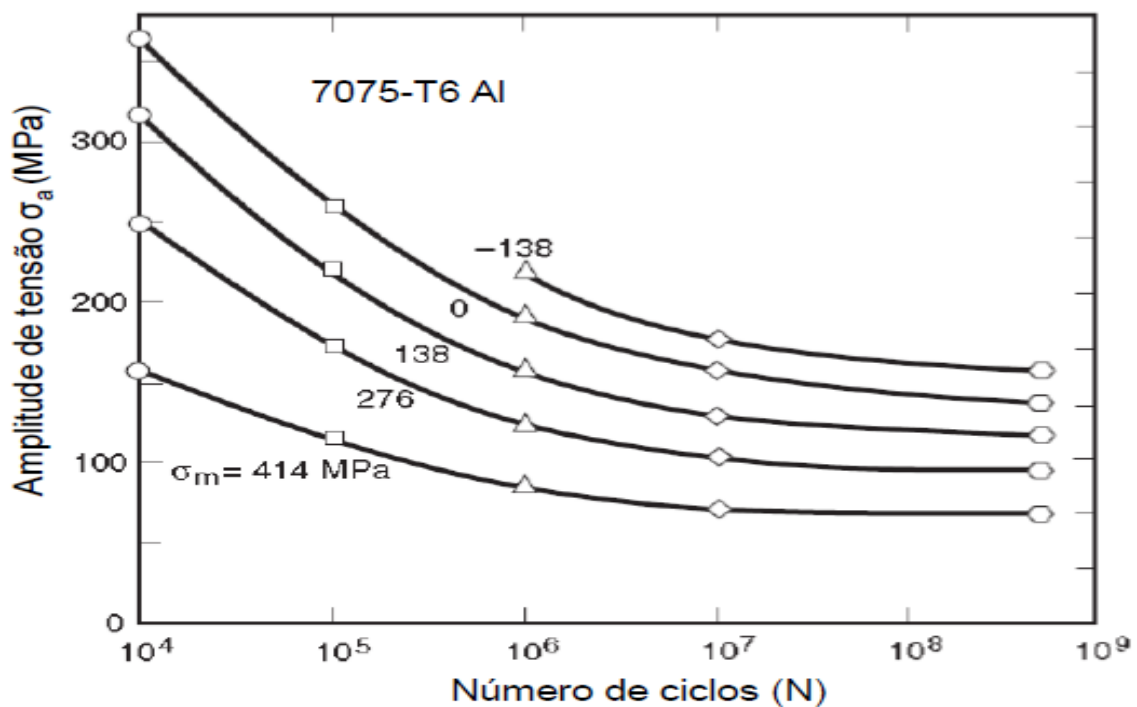
8.4.2 Tensão média

Além da variação da tensão aplicada, a tensão média também influencia a vida em fadiga do material, já que ela afeta a abertura e fechamento na ponta da trinca, principalmente para fadiga de alto ciclo e baixas tensões (NEGREIROS, 2016).

Assim, as tensões médias de tração são inconvenientes, pois estimula o desenvolvimento progressivo da trinca, já as tensões médias de compressão, são consideradas favoráveis, pois estas retardam o desenvolvimento de trincas (LEE et al., 2005; STEPHENS; FUCHS, 2001).

A figura a seguir demonstra este desempenho em relação ao aumento da tensão média em liga de alumínio.

Figura 29 - Influência da tensão média na vida em fadiga

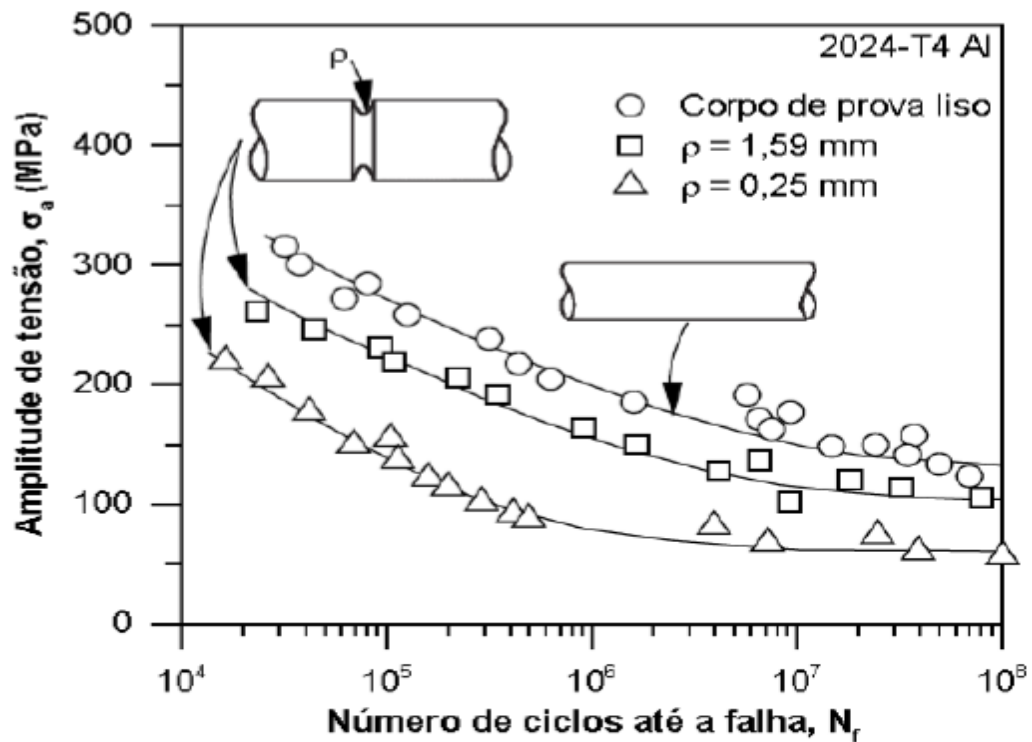


Fonte: Negreiros (2016).

8.4.3 Geometria

As modificações na geometria de uma peça podem provocar mudanças no campo de tensão da mesma, tais mudanças, por várias vezes, podem se concentrar e provocar falhas precipitadas do elemento, a queda da resistência a fadiga é um exemplo (DOWLING et al., 2013), como mostra a figura a seguir.

Figura 30 – Efeito da geometria no comportamento em fadiga de uma liga de alumínio



Fonte: Negreiros (2016).

Segundo Negreiros (2016, p.76):

Estas variações geométricas podem se dar intencionalmente, por exemplo, quando há furos, rasgos, filetes e variações de seção transversal previstos em projeto ou de forma imprevista, quando de um impacto na superfície ou um processo corrosivo. Com isso, pode-se obter um fator de concentração de tensões (K_t), o qual representa a razão entre a tensão local na ausência do entalhe e a tensão local nas proximidades do entalhe. Este fator é função da geometria do concentrador de tensões e independe do material. Porém, é importante destacar que materiais de alta resistência e baixa ductilidade são mais sensíveis ao efeito do K_t do que materiais dúcteis.

8.4.4 Acabamento superficial

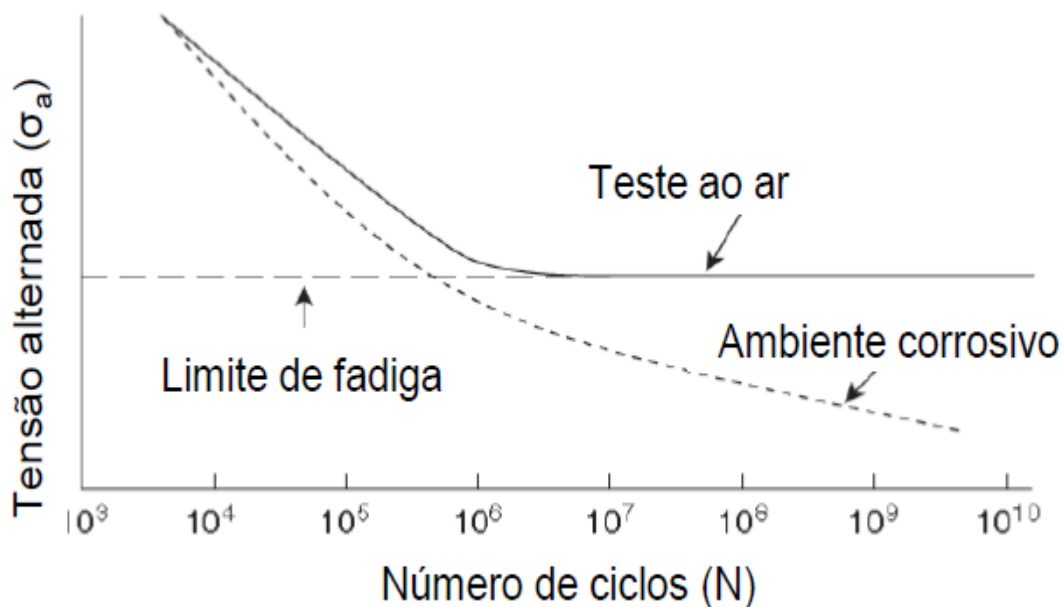
É considerado também como um elemento geométrico, contudo pode ser visto ao longo da superfície de toda a peça e sua dimensão é mínima quando relacionada às deformações geométricas e aos entalhes de fabricação. Apesar das discontinuidades na superfície serem comumente menores, ainda assim podem atuar de maneira desenvolver diversas pequenas concentrações de tensões e assim diminuir de forma drástica a resistência à fadiga da peça.

Por isso, como de fato as trincas de fadiga aparecem principalmente na superfície, o acabamento superficial é de grande importância e merece ser analisado com cautela (DOWLING et al., 2013; LEE et al., 2005).

8.4.5 Ambiente corrosivo

A atividade conjunta de tensões cíclicas e ação corrosiva é denominada como corrosão – fadiga ou fadiga por corrosão. Sendo assim, a vida em fadiga de uma peça em meio corrosivo pode ser deveras limitada (GENTIL, 2011). Isso pode ser visto na próxima figura.

Figura 31 – Efeito do ambiente corrosivo na vida em fadiga



Fonte: Negreiros (2016).

É possível perceber através do gráfico da figura anterior, que o limite de fadiga em meio corrosivo é abortado, deixando de existir a região de vida infinita. Desta forma, uma vez exposta a meio corrosivo, uma peça que está sujeita a tensões cíclicas irá desenvolver micro pites que desenvolvem pequenas concentrações de tensão, o que favorece a nucleação de trincas. Com isso, acontece o desenvolvimento dinâmico e hermético entre a corrosão e a trinca (STEPHENS; FUCHS, 2001).

8.4.6 Frequência de testes

Em testes de fadiga no ar utiliza-se valores de 1 Hz a 200 Hz, por não serem influenciados pela frequência de atuação da carga. Porém como o teste de corrosão – fadiga

inclui um ambiente corrosivo e consequentes alterações na temperatura, isso faz com haja alterações consideráveis entre a relação do regime corrosivo e do mecânico (STEPHENS; FUCHS, 2001).

Segundo Negreiros (2016, p.80):

Efetivamente, quanto menor a frequência, maior o tempo para alcançar determinado número de ciclos e, conseqüentemente, mais pronunciada poderá ser a ação do meio agressivo no processo de nucleação e propagação de trincas de fadiga. As curvas S-N de corrosão-fadiga utilizadas em análises de projetos são geradas em testes que duram algumas semanas ou poucos meses, não havendo tempo suficiente para a alteração significativa de superfície, como ocorre no caso real. Caso contrário, pites de corrosão mais pronunciados poderiam se formar e atuar como concentradores de tensão, reduzindo ainda mais a vida à fadiga. De fato, irregularidades ou pites com profundidades menores que 0,1 mm já causam redução de vida.

Para maior entendimento sobre o fenômeno da corrosão-fadiga, a seguir será apresentado o fenômeno da corrosão.

9 CORROSÃO

Para que o ambiente corrosivo não cause danos na peça submetida ao mesmo, é preciso que a peça seja protegida. Em geral, a ocorrência da corrosão pode ser descrita como uma degradação do material, através das reações químicas e/ou eletroquímicas com o meio em que é submetido.

Apesar de serem diversos os meios de corrosão, nota-se que seu surgimento em meio aquoso é predominante. A condensação da umidade em uma superfície causando corrosão aquosa, por exemplo, tem a água como solvente. Especificamente o fenômeno da corrosão é representado por um acontecimento em que duas ou mais reações eletroquímicas diferentes ocorrem em conjunto de forma natural, em que ao menos uma dessas reações de natureza anódica e outra catódica (OSÓRIO, 2004).

Segundo Santos (2011, p.41):

A reação anódica de dissolução do metal fornece elétrons à reação catódica de redução, gerando carga elétrica transferida por unidade de tempo. Para que a reação de dissolução do metal tenha prosseguimento é necessário que os elétrons produzidos sejam removidos, caso contrário ocorre equilíbrio eletroquímico. A reação de redução de hidrogênio que ocorre simultaneamente só tem prosseguimento se receber elétrons. Assim, os elétrons produzidos pela reação de dissolução do metal são utilizados pela reação de redução do hidrogênio e simultaneamente as reações têm prosseguimento. Em geral, para se prevenir e controlar o fenômeno da corrosão, as seguintes medidas são tomadas: Adição de elementos de liga que formem uma película passivadora e aderente na superfície, impedindo assim a oxidação do resto do material. Ex: aços inoxidáveis; Revestir com um material que irá reagir com oxigênio e, enquanto estiver sendo consumido, proteger o material. Ex: galvanização; Utilização de substâncias que atuam como inibidores de corrosão.”

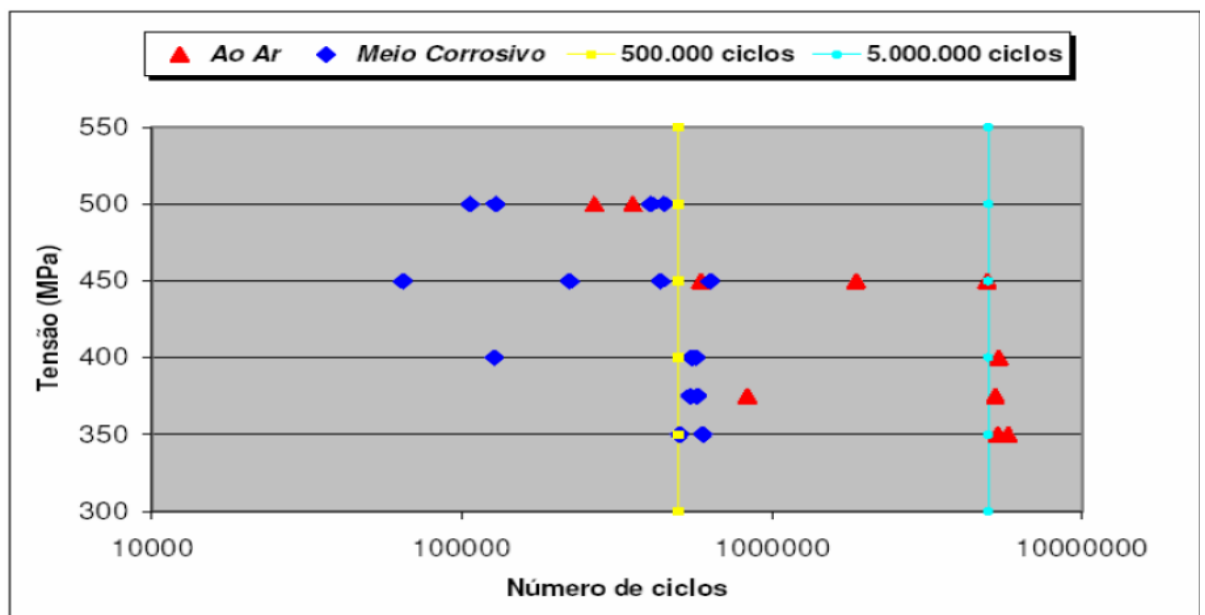
No próximo capítulo será descrito com mais detalhes o fenômeno da corrosão-fadiga.

10 CORROSÃO-FADIGA

Uma vez que uma peça esta submetida a esforços cíclicos em um meio que pode atacar quimicamente ou eletroquimicamente o elemento exposto, essa situação propicia condições para o surgimento da corrosão-fadiga (GENTIL, 2011).

Os elementos que indicam um limite de fadiga definido ao serem testados no ar em temperatura ambiente, não indicam limite de fadiga no momento em que o teste é feito em ambiente corrosivo. Visto que o fenômeno de ação corrosiva depende do tempo, quanto menor o tempo de teste, menor será a danificação causada por corrosão. Levando em conta que o ataque da corrosão é um acontecimento que depende dos detalhes mecânicos, eletroquímicos e metalúrgicos de um conjunto em especial. De forma geral, as danificações causadas por fadiga em um elemento sujeito ao ambiente corrosivo irão surgir de maneira mais rápida do que a esperada em ambiente não corrosivo, ao ar (SANTOS, 2011). Tal afirmação pode ser observada no gráfico da figura a seguir.

Figura 32- Comparação do comportamento em fadiga do metal de solda, Inconel 625, realizados ao ar e em meio corrosivo



Fonte: Pfingstag; Schroeder; Muller (2006).

Santos (2011, p.41) diz:

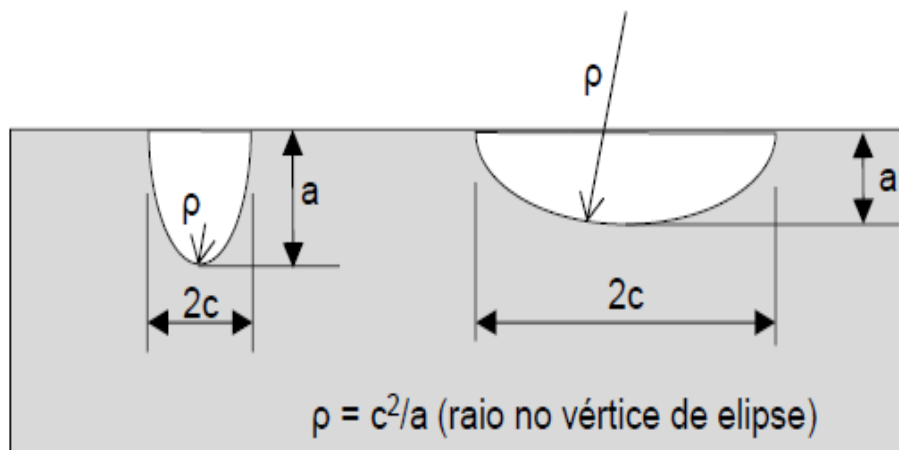
A água do mar bem como outros elementos que acompanham o petróleo são eletrólitos sabidamente bastante agressivos, com diversos sais e gases dissolvidos. O processo de corrosão-fadiga pode causar fissuração envolvendo um mecanismo de dissolução anódica, ou envolvendo fragilização pelo hidrogênio a partir de uma corrosão localizada como pites ou frestas (que funcionariam como nucleantes do processo) ou ainda a partir de corrosão generalizada.

10.1 Pites de Corrosão

A existência de pites de corrosão provoca descontinuidades na superfície e desordem no plano de tensões elásticas, formando assim entalhes (DOWLING et al., 2013). Sendo assim, o pite agirá como um ponto de preferência para nucleação de trincas (JAKUBOWSKI, 2015).

Os pites de corrosão podem desenvolver-se com diferentes formatos e além das variadas dimensões de profundidade, largura e raio como mostra próxima figura. Assim sendo, as características dimensionais e geométricas dos pites determinarão as concentrações de tensões, independente do material de fabricação. Por isso, grande parte dos modelos analíticos disponíveis, usam estas características (CERIT et al., 2009).

Figura 33 – Exemplos de pites de corrosão em corte e suas dimensões



Fonte: Negreiros (2016).

11 CONCLUSÃO

Concluiu-se que se trata de um equipamento muito específico e complexo. As empresas que confeccionam este tipo de equipamento preferem manter sigilo sobre os testes e pesquisas para eventuais correções em projetos futuros. Por isso o material para pesquisa é muito restrito.

Após análise bibliográfica, restrita, é possível perceber que a corrosão fadiga nas armaduras de tração de um *riser* flexível do tipo *unbonded*, acontece devido a uma grande malha de acontecimentos, como o serviço em situação dinâmica e ambiente corrosivo, além das características de fabricação desses arames. Por se tratar de uma estrutura formada por diversas camadas, nas quais cada uma representam características específicas, tendo que suportar cargas diferenciadas e trabalhando em conjunto. O acontecimento deste tipo de falha é inevitável e sua identificação ainda é muito obscura.

Existem três principais métodos de avaliação da vida em fadiga, o mais utilizado neste caso, é o método S – N, pois é o mais confiável, rápido e simples. Visto que este método prevê a iniciação da trinca por fadiga a depender de um número de ciclos.

As normas analisadas preveem falhas e sugerem os tratamentos adequados, mesmo assim as falhas continuam a ocorrer, ainda mais no ambiente de serviço ácido como o pré-sal. Sendo assim, é natural e preciso que invistam em pesquisas e testes com mais detalhes para que enfim a vida em fadiga dos arames destes *risers* seja longa e assim, traga benefícios tanto as empresas como a toda a rede dependente dos derivados de O&G.

REFERÊNCIAS

- ANP - Agência Nacional do Petróleo. **Produção nacional de petróleo e lgn** (barris equivalentes de petróleo). Disponível em: <http://www.anp.gov.br/>. Acesso em: 8 set. 2018.
- AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE (API). API Specification 17J: Specification for Unbonded Flexible Pipe. Washington, 2014a.
- AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE (API). API Recommended Practice 17B: Recommended Practice for Flexible Pipe. Washington, 2014b.
- BRACK, M.; BUENO, L. M.; LEMOS, C. A. D.; JÓIA, C. J. B.M.; MOURELLE, M. M.; ALMEIDA, M. C.; TEIXEIRA, S. C. S.; **Dutos flexíveis - especificação técnica e análise de projeto**. Apostila do curso de formação em engenharia submarina, 2008. PETROBRAS.
- BUENO, A. F. B. **Avaliação das armaduras de tração de riser flexível durante ensaios axiais de tração e fadiga**. 2010. 155 f. Tese (Doutorado em Engenharia) –Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGEM), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.
- CASTRO, J. T. P.; MEGGIOLARO, M. A. **Fadiga: técnicas e práticas de dimensionamento estrutural sob cargas reais de serviço**. 1ed, Lexington, KY: v.1, 2009.
- CASTRO, C.A.C. **Estudo do comportamento à fadiga de metais dentro e fora da água na presença de pressão hidrostática**. 2007. Disponível em: http://bdtd.ibict.br/vufind/Record/UFGM_839426de9aa5b3321c872ad4c2782e2d/Details. Acesso em: 03 out. 2018.
- 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.
- COSER, T. B. **Avaliação de revestimento protetor de alumínio aplicado a arames da armadura de tração de dutos flexíveis**. 2016. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) –Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGEM), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.
- JAKUBOWSKI, M. Influence of pitting corrosion on fatigue and corrosion fatigue of ship and offshore structures, part 2: Load-pit-crack interaction. **Polish maritime research**, Gdańsk, Volume 22, Issue 3, Pages 57–66, ISSN (Online) 2083-7429, DOI: 10.1515/pomr-2015-0057, October 2015.

GENTIL, V. **Corrosão**. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2011.

HERDEIRO, Marco Antônio Nogueira. **Instalação de Sistemas Submarinos de Produção em Águas Remotas**. 1997. Tese de Doutorado. Tese de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

HERMAN. **Reinforced thermoplastic pipe machine** - rigid type steel wire armoring machine. Disponível em: <http://www.herrman.com/product/1968077770-219893759/Reinforced_Thermoplastic_Pipe_Machine_Rigid_Type_Steel_Wire_Armoring_Machine.html>. Acesso em: 9 jun. 2018.

HERRERA, Paulo. **Estudo da resistência ao desgaste da camada Zeta de pressão de risers flexíveis submetidas a tratamento criogênico e nitretação a plasma**. 2015. Disponível em: http://repositorio.unb.br/bitstream/10482/22022/1/2015_PauloHerrera.pdf. Acesso em: 19 set. 2018.

LEE, Y.-L.; PAN, J.; HATHAWAY R. B.; BARKEY, M. E. **Fatigue testing and analysis: theory and practice**. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005. 402 p. OCLC: ocm56338563.

LEMOS, C. A. D. **Análise de fadiga em risers flexíveis**. 2005. 242 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de engenharia naval e oceânica, Instituto de pós-graduação e pesquisa em engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

LEMOS, C. A. D. **Projeto de Risers Flex Projeto de Risers Flexíveis Fadiga**. 2008. Disponível em: <http://www.lem.ep.usp.br/pef418/petrobras.pdf>. Acesso em: 02 out. 2018.

MORAIS, J. M. **Petróleo em águas profundas: uma história tecnológica da PETROBRAS na exploração e produção offshore**. 1. ed. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), 2013.

MUTACCI, Alberto et al. **GE Flexible Pipeline Solutions New Technologies to create New Opportunities**. 2017. Disponível em: <https://docplayer.net/54240112-Ge-flexible-pipeline-solutions-new-technologies-to-create-new-opportunities.html>. Acesso em: 29 set. 2018.

NEGREIROS, Luiz Antônio Sulino de. **Avaliação da resistência à fadiga e corrosão fadiga da armadura de tração de um riser flexível retirado de operação**. 2016. 196 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, BR-RS, 2016.

OLIVEIRA, Maurício. **Ensaio Mecânicos da Equipe de Formação de Inspetores – EFI / SINDIPETRO-LP**. 2014. Disponível em: <http://inspecaoequipto.blogspot.com/2014/02/falha-por-fadiga.html>. Acesso em: 28 set. 2018.

OSÓRIO, Wislei Riuper Ramos. **Análise da influência de Parâmetros Estruturais da solidificação de Metais e Ligas na Resistência à Corrosão**. Tese de Doutorado, UEC, 2004. Disponível em:

http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/264694/1/Osorio_WisleiRiuperRamos_D.pdf. Acesso em: 25 set. 2018.

PADILHA, J.A.P. **Análise Estrutural de Riser Flexível com Armaduras de Tração em Titânio**. Dissertação de M.SC., UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2009.

PETROBRAS. **Infográficos Tipos de Plataforma**. 2018. Disponível em <<http://www.petrobras.com.br/infograficos/tipos-de-plataformas/desktop/index.html>> Acesso em: 20 set. 2018.

PETROBRAS. **Fatos e Dados. Conheça curiosidades sobre equipamentos de nossos sistemas submarinos**. 2018. Disponível em < <http://www.petrobras.com.br/fatos-e-dados/conheca-curiosidades-sobre-equipamentos-de-nossos-sistemas-submarinos.htm>> Acesso em: 20 set. 2018.

PFINGSTAG, M.E.; SCHROEDER, R.M.; MULLER, I.L. **Avaliação do comportamento à fadiga e corrosão-fadiga de juntas soldadas da liga inconel 625 testada para uso em plataformas off-shore**. 17º CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Foz do Iguaçu, PR, 15 a 19 de novembro de 2006.

SANTOS, Fábio Pinheiro dos. **Avaliação dos efeitos da pressão parcial de CO2 no processo de corrosão -fadiga em armaduras e tração de dutos flexíveis**. 2011. xv, 95f.: il.col.; enc. Dissertação (Mestrado) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2011.

SIMONSEN, A. **Inspection and monitoring techniques for un-bonded flexible risers and pipelines**. 2014. 76 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Offshore) – Faculty of Science and Technology, University of Stavanger, Stavanger, 2014.

SOUSA, J. R. M. De. **Análise local de linhas flexíveis pelo método dos elementos finitos**. 2005. 809 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de engenharia civil, Instituto de pós-graduação e pesquisa em engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

STEPHENS, R. I.; FUCHS, H. O. **Metal fatigue in engineering**. 2nd ed. New York: Wiley, 2001.

