

FLÁVIO FERREIRA GOMES FILHO
GUSTAVO RIBEIRO PIOVESANA

ANÁLISE DE FADIGA E CORROSÃO EM DUTOS SUBMARINOS

Guaratinguetá - SP

2016

FLÁVIO FERREIRA GOMES FILHO
GUSTAVO RIBEIRO PIOVESANA

ANÁLISE DE FADIGA E CORROSÃO EM DUTOS SUBMARINOS

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia de Materiais da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia de Materiais.

Orientador : Prof. Dr. Marcelino Pereira do Nascimento

Guaratinguetá - SP

2016

P662a

Piovesana, Gustavo Ribeiro

Análise de fadiga e corrosão em dutos submarinos / Gustavo Ribeiro
Piovesana; Flávio Ferreira Gomes Filho – Guaratinguetá, 2016.

69 f. : il.

Bibliografia: f. 67-69

Trabalho de Graduação em Engenharia de Materiais – Universidade
Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2016.

Orientador: Prof. Dr. Marcelino Pereira do Nascimento

1. Fadiga. 2. Corrosão. 3. Petróleo. I. Título

CDU 620.178.3

FLÁVIO FERREIRA GOMES FILHO
GUSTAVO RIBEIRO PIOVESANA

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO

PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE

“ENGENHARIA DE MATERIAIS”

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE GRADUAÇÃO EM NOME
DO CURSO

Prof. Dr. Miguel Angel Ramires Gil

Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. MARCELINO PEREIRA DO NASCIMENTO

Orientador/UNESP-FEG


Eng. ISABELA ATÍLIO

UNESP-FEG


Eng. MARIANA ANDRINI DE MOURA REIS

FACULDADE DE ROSEIRA

Novembro/2016

Dedicamos este trabalho aos nossos pais que nos deram força, apoio e incentivos em todos os momentos de nossas vidas; aos nossos professores e ao nosso orientador Prof. Dr. Marcelino Pereira do Nascimento por todo conhecimento que adquirimos com eles.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente a Deus, por nossa oportunidade.

Ao nosso orientador Prof. Dr. Marcelino Pereira do Nascimento, nossos professores, aos familiares, amigos e todos que nos ajudaram direta e indiretamente para que pudéssemos conseguir vencer esta etapa tão importante de nossas vidas.

“Na natureza nada se cria, nada se perde, tudo se transforma!”

Antoine Lavoisier

RESUMO

A indústria do petróleo movimenta bilhões de dólares todo ano e é responsável por grande parte da geração de energia no mundo. Sua extração e transporte são processos bastante sensíveis, pois quaisquer problemas podem causar grandes catástrofes ambientais. Este trabalho parte dessa motivação para avaliar a resistência de tubos de prospecção de petróleo aos esforços de fadiga, gerados por vibrações induzidas por vórtices (VIV's) em alto mar, associada ao desgaste superficial causado pela corrosão, fenômeno agravado neste meio. O estudo se baseou na comparação da curva Tensão x Números de Ciclos de corpos de prova com e sem corrosão, retirados de um tubo API 5CT T95 (1% Cr). Os ensaios de fadiga foram realizados em laboratório e a corrosão forçada ocorreu em câmara salina de *salt-spray*. Para complementar os resultados obtidos no ensaio de fadiga, foram ainda feitos ensaio de microdureza, rugosidade superficial, avaliação de perda de massa, microscopia eletrônica de varredura e microscopia óptica. Como esperado, os corpos de prova corroídos apresentaram um aumento de rugosidade e uma redução na vida em fadiga se comparados com os corpos de prova sem corrosão, principalmente para tensões mais altas. Os ensaios de microdureza e microscopia óptica demonstraram anisotropia entre os sentidos transversal e longitudinal do tubo.

Palavras chave: Fadiga. Corrosão. Vibrações induzidas por vórtices. Dutos. Petróleo.

ABSTRACT

Oil industry moves billions of dollars every year and is responsible for a big portion of power generation around the world. It's extraction and transport are very sensitive processes, cause any problems may cause big environmental catastrophes. This paper takes base on that to evaluate the resistance of steel tubes used for oil prospection to fatigues stresses caused by vortex-induced vibrations (VIV's) associated to superficial wear caused by corrosion. The study was elaborated by comparing the curve stress versus number of cicles of specimens with and without corrosion, obtained from an API 5CT T95 (1% Cr) pipe. The tests were hold in laboratory and the forced corrosion in salt spray chamber. To complement the results of the fatigue assay, microhardness and surface roughness tests were performed and microestructural analysis made using optical and electron microscopy. As expected, the corroded specimens had an increase on roughness levels and a reduction on fatigue life if compared to the ones without corrosion, mainly in higher tensions. Microroughness and optical microscopy analysis showed that the microstructure of the pipe is anisotropic in longitudinal and transversal ways.

Key words: Fatigue. Corrosion. Vortex-Induced Vibration. Pipes. Petroleum.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Aplicação de dutos submarinos	15
Figura 2 – Início do processo de conformação.....	19
Figura 3 – Processo de soldagem por resistência elétrica	20
Figura 4 – Jogo de Engrenagens.....	22
Figura 5 – Ciclo de Tensões Senoidal	23
Figura 6 – Ciclo de Tensões Pulsatório.....	24
Figura 7 – Ciclo de Tensões Pulsatório Ondulado	24
Figura 8 – Ensaio de Flexão Rotativa.....	25
Figura 9 – Superfície de Fratura por Fadiga.....	26
Figura 10 – Nucleação da Trinca.....	27
Figura 11 – Marcas de praia	28
Figura 12 – Estrias de Fadiga	28
Figura 13 – Exemplo Curvas de Fadiga	30
Figura 14 – Vórtices em Diferentes Regimes de Escoamento	32
Figura 15 – Camada Limite.....	32
Figura 16 – Relação entre o número de Reynolds a formação das esteiras de vórtices	33
Figura 17 – Escoamento Perpendicular a um Cilindro.....	34
Figura 18 – Formação de Vórtices Estacionários.....	35
Figura 19 – Corrosão por placas.....	38
Figura 20 – Corrosão uniforme	38
Figura 21 – Corrosão por pite.....	39
Figura 22 – Corrosão alveolar	39
Figura 23 – Tubo utilizado	43
Figura 24 – Eletroerosão - GF Machining Solutions, modelo FW 2U.....	44
Figura 25 – Corpo de Prova de Fadiga	45
Figura 26 – Câmara de Salt-Spray.....	46
Figura 27 – Máquina de ensaio de fadiga.....	47
Figura 28 – CDP's de metalografia	48
Figura 29 – Durômetro Universal Buehler.....	49

Figura 30 – Rugosímetro Mahr	50
Figura 31 – Microscópio eletrônico de varredura 1	51
Figura 32 – Corpo de prova durante a etapa de corrosão	53
Figura 33 – Corpo de prova após etapa de corrosão.....	53
Figura 34 – Corpo de prova após remoção da corrosão	54
Figura 35 – Curva de Fadiga Completa.....	56
Figura 36 – Detalhamento Curva de Fadiga.....	57
Figura 37 – Desenho esquemático do Ensaio de Microdureza.....	59
Figura 38 – Microscopia óptica, aumento de 10x – CDP Longitudinal.....	60
Figura 39 – Microscopia óptica, aumento de 10x – CDP Transversal.....	61
Figura 40 – Zona de nucleação da trinca originada na superfície da amostra com tensão de 400MPa, obtida através do microscópio eletrônico de varredura com aumento de 200X.....	62
Figura 41 – Zona de nucleação da trinca originada na superfície da amostra com tensão de 400MPa, obtida através do microscópio eletrônico de varredura com aumento de 1000X.....	62
Figura 42 – Zona de nucleação da trinca originada na superfície da amostra com tensão de 550MPa, obtida através do microscópio eletrônico de varredura com aumento de 200X.....	63
Figura 43 – Zona de nucleação da trinca originada na superfície da amostra com tensão de 550MPa, obtida através do microscópio eletrônico de varredura com aumento de 1000X....	63
Figura 44 – Região de propagação da trinca de fadiga com aumento de 40x para tensão de 400 MPa.....	64
Figura 45 – Região de propagação da trinca de fadiga com aumento de 40x para tensão de 550 MPa.....	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades mecânicas aços API 5CT	18
Tabela 2 – Composição química aços API 5CT	18
Tabela 3 – Potenciais de Oxidação	37
Tabela 4 – Salinidade média em oceanos e mares	40
Tabela 5 – Composição química do material do tubo	43
Tabela 6 – Perda de massa em função da corrosão	52
Tabela 7 – Resultados ensaio de rugosidade – CP’s não corroídos	54
Tabela 8 – Resultados ensaio de rugosidade – CP’s corroídos	55
Tabela 9 – Variação da Rugosidade por CDP	55
Tabela 10 – Resultados de fadiga	56
Tabela 11 – Resultados Ensaio de Microdureza	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

API – American Petroleum Institute

ASTM – American Society for Testing and Materials

CDP – Corpo de Prova

ERW/HF – Electric resistance welding / High Frequency

Fe – Ferro

FeO – Óxido de Ferro

HB – Dureza Brinell

HCl – Ácido Clorídrico

HV – Microdureza Vickers

ISO – International Organization for Standardization

m1 – Massa 1

m2 – Massa 2

m3 – Massa 3

m4 – Massa 4

Mev – Microscópio eletrônico de varredura

NaCl – Cloreto de Sódio

O₂ – Oxigênio

Ra – Rugosidade média

R_{máx} – Rugosidade máxima

R_t – Rugosidade total

Sb **O₃** – Trióxido de antimônio

Sn**Cl₂** – **Cloreto de estanho**

VIV's – Vibrações Induzidas por Vórtices

LISTA DE SÍMBOLOS

A – Amplitude de tensões

D – Diâmetro hidrodinâmico do tubo

g – Grama

Kg – Quilograma

Kgf/cm² – Quilograma força por centímetro quadrado

kHz, – Quilo-hertz

L – Litros

mm – Milímetros

MN/m² – Meganewton por metro quadrado

MPa – MegaPascal

R – Razão de tensões

Re – Número de Reynolds

U – Velocidade de escoamento do fluido

V – Viscosidade cinemática do fluido

kW – Quilowatt

°C – Grau Celsius

σ – Tensão variável do ciclo

σ máx – Tensão máxima variável do ciclo

σ mín: – Tensão mínima variável do ciclo

DP – Desvio Padrão

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVO	16
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1	NORMA API 5 CT	17
3.2	PROCESSO DE FABRICAÇÃO DO TUBO API 5CT T95 (1%CR) – HF ERW ..	19
3.3	FADIGA.....	21
3.3.1	Descrição dos Carregamentos Cíclicos	23
3.3.2	Tipos de Ensaio e Corpos de Prova	25
3.3.3	Características estruturais da fadiga	26
3.3.4	Resultados Obtidos nos Ensaios	29
3.3.5	Fadiga em dutos submarinos	30
3.3.5.1	Vibrações Induzidas por Vórtices (VIV's).....	31
3.4	CORROSÃO.....	35
3.4.1	Formas de Corrosão.....	37
3.4.1.1	Meio corrosivo.....	40
3.5	FADIGA ASSOCIADA À CORROSÃO	40
4	MATERIAIS E MÉTODOS	43
4.1	ENSAIO DE TRAÇÃO	44
4.2	FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA DE FADIGA.....	44
4.3	CORROSÃO FORÇADA EM CÂMARA DE <i>SALT-SPRAY</i>	46
4.4	ENSAIO DE FADIGA	47
4.5	AMOSTRAS PARA MICROSCOPIA ÓPTICA	48
4.6	ENSAIO DE MICRODUREZA	49
4.7	ANÁLISE DE RUGOSIDADE	49
4.8	MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA (MEV)	50
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	52
5.1	CORROSÃO E PERDA DE MASSA	52
5.2	AVALIAÇÃO DE RUGOSIDADE	54
5.3	ENSAIO DE VIDA EM FADIGA	56
5.4	ENSAIO DE DUREZA	58
5.5	MICROSCOPIA.....	60
5.5.1	Microscopia Eletrônica De Varredura.....	61
6	CONCLUSÃO	65
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67

1 INTRODUÇÃO

Logo após a descoberta do petróleo, nos Estados Unidos, surgiram os primeiros dutos. Empresas tentavam chegar a um acordo de como poderiam transportar petróleo, chegando-se à conclusão de que este poderia ser realizado através de tubos, da mesma forma em que é transportada a água (IPEA, 2010).

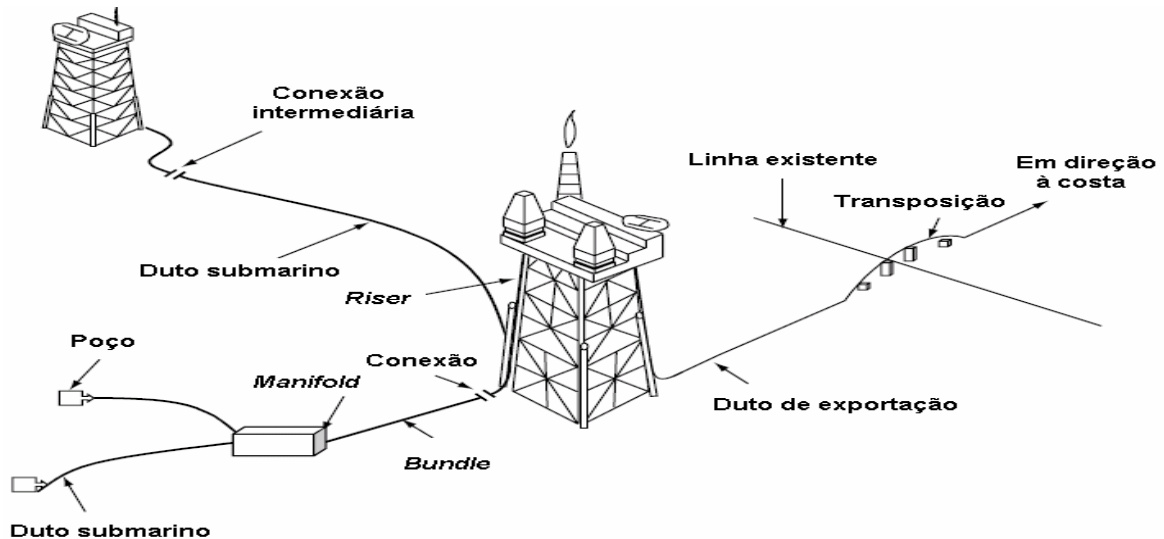
Para a realização do transporte de todo esse petróleo, são utilizados navios ou dutos, que são constituídos por um sistema de tubulações e estações de bombeamento (IPEA, 2010).

Ao longo de todos esses anos de prática nas operações, a indústria de petróleo comprovou que o uso de dutos é a maneira mais econômica para o transporte em larga escala de petróleo e seus derivados, seja em terra ou em mar. O transporte através de dutos é uma operação contínua e confiável, com a capacidade de se adaptar a grandes variedades de cenários, incluindo os mais hostis e áreas mais remotas (LIMA, 2007).

Os dutos submarinos realizam o transporte do petróleo entre o poço e a plataforma, entre plataformas, ou entre a plataforma e um local em terra. O trecho do duto que fica suspenso é chamado de *riser* e o trecho que fica em contato com o solo marinho, é chamado de duto submarino ou *pipeline* ou *flowline* (LIMA, 2007).

As primeiras plataformas *offshore* foram instaladas no Golfo do México no ano de 1947. A partir de então, as instalações vêm crescendo juntamente com a demanda de petróleo. Nas décadas de 1960 e 1970, mesmo com a crise do petróleo o crescimento não parou, pelo contrário, não só aumentaram as instalações de plataformas como também as técnicas utilizadas na extração de petróleo (LIMA, 2007). Na Figura 1, pode-se observar várias aplicações para os dutos.

Figura 1 - Aplicação de dutos submarinos



Fonte: LIMA, 2007

No Brasil, devido ao grande crescimento e desenvolvimento na área petrolífera, foi preciso pesquisas e desenvolvimento de novos materiais para que pudesse acompanhar o desenvolvimento da mesma (LIMA, 2007).

Sabe-se que a maior parte de geração de energia no mundo ainda é de petróleo e carvão e, por esse motivo, nos últimos anos as condições das indústrias de petróleo tiveram uma mudança radical, onde todas suas estruturas de apropriação foram progressivamente revisadas e a repartição da renda petrolífera também, a qual é um fator potencial de geração de riqueza, mas que se trata de um recurso esgotável (LIMA, 2007).

Além dos efeitos positivos, também tem os negativos. Podem se traduzir no esgotamento precoce das reservas e, também, em países que estão muito dependentes economicamente do setor do petróleo, acarretando perda de competitividade e/ou dos demais setores econômicos (LIMA, 2007).

Para um futuro bem próximo, as perspectivas de mudanças da matriz energética mundial são bem pequenas (IPEA, 2010). A Petrobras hoje se tornou um novo financiador e organizador de pesquisas científicas e tecnológicas na área de petróleo e energia no Brasil, focando no futuro da indústria do petróleo e, em parceria com o IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas, desenvolveu um projeto de pesquisa para entender o mecanismo de corrosão por corrente alternada, e então encontrar soluções para evitá-la (ALBERTINI, 2008).

2 OBJETIVO

Este projeto de pesquisa tem por objetivo determinar a resistência à fadiga, por meio da observação da curva tensão x número de ciclos de corpos de prova retirados de um tubo de aço grau API 5CT T95 1%Cr -destinado para a prospecção de petróleo e gás natural em poços-, antes e após corrosão por névoa salina, tendo em vista a análise da fadiga gerada pelas correntes marítimas nos dutos submarinos, associada à corrosão.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 NORMA API 5 CT

A ISO, sigla em inglês para Organização Internacional para Padronização, é uma organização não governamental com núcleos de operação em 163 países. Seu principal objetivo é criar normas internacionais para quaisquer produtos ou procedimentos que sejam relevantes para o mercado e, para isso, reúne os principais especialistas em um determinado assunto que criam essas normas de forma voluntária e consensual. A padronização criada pelas normas garante qualidade, segurança e eficiência em escala global, além de ser uma importante ferramenta no comércio internacional (ISO 11960, 2010).

A norma utilizada para direcionar o presente trabalho foi a ISO 11960, que é baseada na norma API 5 CT para tubos de aço na prospecção de petróleo e gás natural em poços. Essa norma internacional especifica as condições técnicas para tubos de aço, hastes e materiais de acoplamento e acessórios (ISO 11960, 2010).

Tubos de grau API 5CT são amplamente utilizados na extração de petróleo e gás de poços localizados abaixo do leito oceânico. Existem diferentes tipos de graus conforme a norma API 5CT, sendo que a escolha do grau varia em função da profundidade de aplicação, pois, além do tubo ter de suportar as tensões geradas pelo peso da água, deve ser capaz de suportar o peso da coluna de tubos situada acima (ISO 11960, 2010).

Na Tabela 1, pode-se observar as propriedades mecânicas, e na Tabela 2 as composições químicas em porcentagem de massa de cada grau.

Tabela 1 – Propriedades mecânicas aços API 5CT

GRUPO	GRAU	TIPO	Total Alongamento Sob Carga %	Limite de escoamento MPa		Limite de Resistência min. MPa	Dureza ^a max.		Espessura da Parede mm	Variação de Dureza Permissível HRC
				min.	max.		HRC	HBW		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	H40	—	0,5	276	552	414	—	—	—	—
	J55	—	0,5	379	552	517	—	—	—	—
	K55	—	0,5	379	552	655	—	—	—	—
	N80	1	0,5	552	758	689	—	—	—	—
	N80	Q	0,5	552	758	689	—	—	—	—
2	M65	—	0,5	448	586	586	22	235	—	—
	L80	1	0,5	552	655	655	23	241	—	—
	L80	9Cr	0,5	552	655	655	23	241	—	—
	L80	13Cr	0,5	552	655	655	23	241	—	—
	C90	1 & 2	0,5	621	724	689	25,4	255	≤ 12,70	3,0
	C90	1 & 2	0,5	621	724	689	25,4	255	12,71 to 19,04	4,0
	C90	1 & 2	0,5	621	724	689	25,4	255	19,05 to 25,39	5,0
	C90	1 & 2	0,5	621	724	689	25,4	255	≥ 25,40	6,0
	C95	—	0,5	655	758	724	—	—	—	—
	T95	1 & 2	0,5	655	758	724	25,4	255	≤ 12,70	3,0
	T95	1 & 2	0,5	655	758	724	25,4	255	12,71 to 19,04	4,0
	T95	1 & 2	0,5	655	758	724	25,4	255	19,05 to 25,39	5,0
T95	1 & 2	0,5	655	758	724	25,4	255	≥ 25,40	6,0	
3	P110	—	0,6	758	965	862	—	—	—	—
4	Q125	All	0,65	862	1034	931	b	—	≤ 12,70	3,0
	Q125	All	0,65	862	1034	931	b	—	12,71 to 19,04	4,0
	Q125	All	0,65	862	1034	931	b	—	≥ 19,05	5,0

Fonte: norma ISO 11960:2004

Tabela 2 - Composição química aços API 5CT

Group	Grade	Type	C		Mn		Mo		Cr		Ni max.	Cu max.	P max.	S max.	Si max.
			min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	H40	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,030	0,030	—
	J55	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,030	0,030	—
	K55	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,030	0,030	—
	N80	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,030	0,030	—
	N80	Q	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,030	0,030	—
2	M65	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,030	0,030	—
	L80	1	—	0,43 ^a	—	1,90	—	—	—	—	0,25	0,35	0,030	0,030	0,45
	L80	9Cr	—	0,15	0,30	0,60	0,90	1,10	8,00	10,0	0,50	0,25	0,020	0,010	1,00
	L80	13Cr	0,15	0,22	0,25	1,00	—	—	12,0	14,0	0,50	0,25	0,020	0,010	1,00
	C90	1	—	0,35	—	1,20	0,25 ^b	0,85	—	1,50	0,99	—	0,020	0,010	—
	C90	2	—	0,50	—	1,90	—	NL	—	NL	0,99	—	0,030	0,010	—
	C95	—	—	0,45 ^c	—	1,90	—	—	—	—	—	—	0,030	0,030	0,45
	T95	1	—	0,35	—	1,20	0,25 ^d	0,85	0,40	1,50	0,99	—	0,020	0,010	—
	T95	2	—	0,50	—	1,90	—	—	—	—	0,99	—	0,030	0,010	—
3	P110	e	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,030 ^e	0,030 ^e	—
4	Q125	1	—	0,35	—	1,35	—	0,85	—	1,50	0,99	—	0,020	0,010	—
	Q125	2	—	0,35	—	1,00	—	NL	—	NL	0,99	—	0,020	0,020	—
	Q125	3	—	0,50	—	1,90	—	NL	—	NL	0,99	—	0,030	0,010	—
	Q125	4	—	0,50	—	1,90	—	NL	—	NL	0,99	—	0,030	0,020	—

Fonte: norma ISO 11960:2004

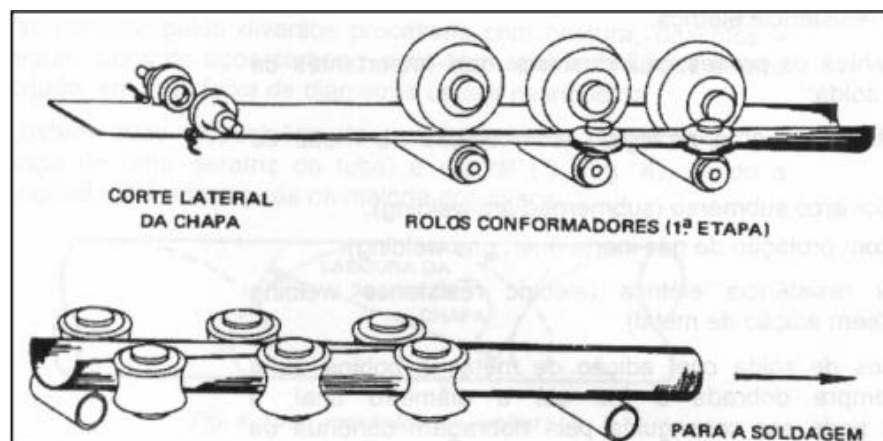
Nota-se, na Tabela 2, que a composição química de cada um dos graus é abrangente, sendo que a presença em massa de cada elemento varia em função do método de fabricação e experiência de cada empresa.

Existem ainda alguns pré-requisitos de fabricação que a norma define, como a obrigatoriedade da presença de um elemento de refino de grão, para que o resultado seja uma estrutura composta predominantemente de pequenos grãos de austenita; os tratamentos térmicos devem seguir as especificações de cada grau e devem sempre ocorrer na extensão inteira do tubo de forma homogênea; e devem ser respeitadas as tolerâncias especificadas de dimensão, de massa, químicas e de quantidade de defeitos (ISO 11960, 2010).

3.2 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DO TUBO API 5CT T95 (1%CR) – HF ERW

Os tubos sem costura não apresentam descontinuidades superficiais ou volumétricas, o que os torna mais confiáveis e, conseqüentemente, mais usados em ambientes marítimos. Apesar disso, com a modernização dos processos de soldagem, os tubos soldados por resistência elétrica vêm ganhando espaço. O processo parte basicamente de uma chapa de aço laminada, que é conformada no formato de tubo e então soldada, seguindo-se um tratamento térmico, mostrado na Figura 2 (SENAI, 2016).

Figura 2 – Início do processo de conformação

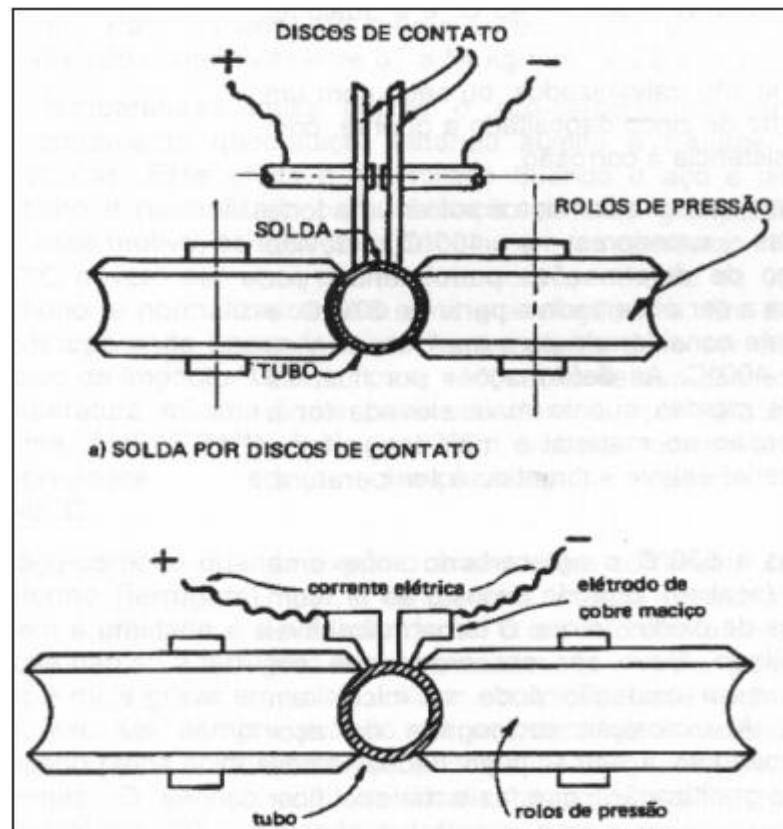


Fonte: SENAI

Na década de 1950 os processos de soldagem ERW utilizavam frequências por volta de 150 Hz que induziam uma corrente elétrica no material e aqueciam a borda a ser soldada por efeito *joule*. Em seguida as faces de solda eram pressionadas uma contra a outra resultando na junção. Nessa época, o processo era mais lento e possuía um acabamento grosseiro, devido ao comprimento de onda gerado pela baixa frequência e baixa potência (SENAI, 2016).

Hoje em dia, no processo ERW/HF, o princípio de se aplicar corrente e, em seguida, pressionar as faces, sem uso de material de adição, permanecem o mesmo, porém são empregadas frequências de até 600 kHz, com potências de 1500 kW. Essas condições são capazes de gerar comprimentos de onda na ordem de 0,001 mm, o que proporciona ótimas características no material, com pequenas descontinuidades volumétricas e em acabamento superficial de grande qualidade, mostrado na Figura 3. Além disso, o processo é automático, seguro e permite a soldagem de centenas de metros de tubo por minuto (SENAI, 2016).

Figura 3 – Processo de soldagem por resistência elétrica



Fonte: SENAI

Após a etapa de soldagem, o tubo passa por alguns processos de usinagem e conformação para correção de imperfeições, como faceamento, remoção das rebarbas de soldagem e despeno, então, alguns testes são feitos para verificar a qualidade do tubo (SENAI, 2016).

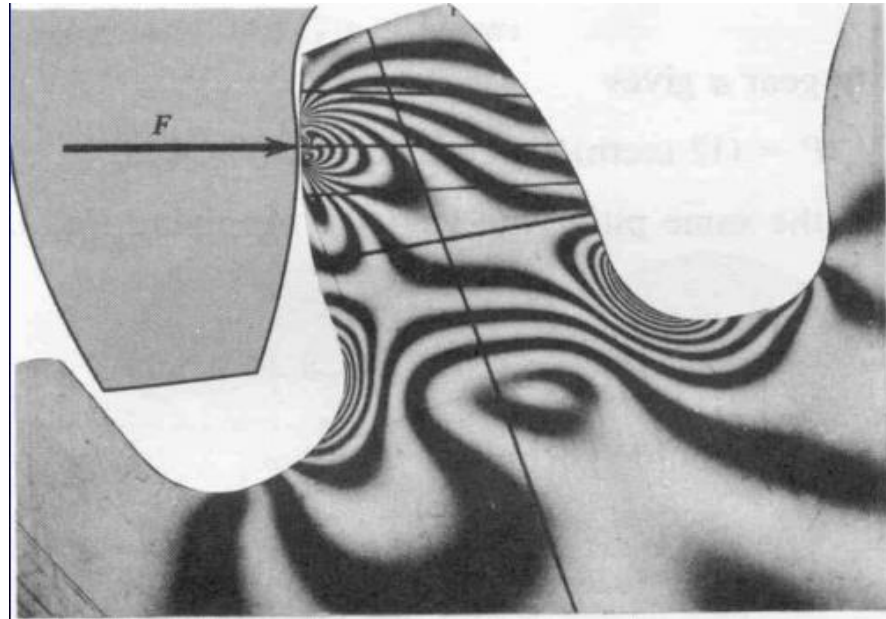
Para se atingir as propriedades mecânicas da norma API 5CT, é necessário que o material possua uma combinação favorável entre composição química e tratamento térmico. O tratamento térmico dos tubos API 5CT T95 soldados pelo processo ERW/HF deve ser de têmpera seguido de revenimento. As condições específicas do processo são próprias de cada empresa, a única determinação da norma ISO 11960:2004 é de que a temperatura mínima de têmpera seja de 649°C (SENAI, 2016).

3.3 FADIGA

Um metal submetido a uma tensão repetida romperá a uma tensão muito inferior àquela necessária para ocasionar a fratura devido à aplicação de carga estática (DIETER, 1981). As falhas causadas por tensões oscilantes são chamadas falhas por fadiga e possuem esse nome por ocorrerem gradativamente ao longo do tempo de exposição do material ao esforço cíclico. O fenômeno pode ser observado em diversos componentes mecânicos como aeronaves, rodas, pontes, elementos de máquinas etc. A fadiga é um importante campo de estudo, pois é responsável por, aproximadamente, 90% de todas as falhas mecânicas ocorridas em materiais metálicos (SANTOS JUNIOR, 2016).

Um exemplo bastante ilustrativo da ocorrência da fadiga pode ser observado num conjunto de engrenagens em serviço. Pode-se observar no esquema da Figura 4 que, conforme a engrenagem gira, a força é aplicada de forma intermitente sempre no mesmo local (SANTOS JUNIOR, 2016).

Figura 4 - Jogo de Engrenagens



Fonte: Santos Junior, A. A.

Uma falha por fadiga é particularmente insidiosa porque acontece sem que haja qualquer aviso óbvio (DIETER, 1981). A fratura costuma ter aparência frágil, ou seja, sem deformação plástica aparente, mesmo em materiais dúcteis. Uma das formas de identificar uma falha por fadiga é observando-se a superfície de fratura, onde pode-se encontrar uma região lisa, onde ocorreu a fricção entre as duas superfícies por onde a falha se propagou e uma região rugosa, onde o material se rompeu de forma dúctil. Essa ruptura final ocorre no momento em que a falha por fadiga já avançou o suficiente para que a área destinada a suportar o esforço aplicado fique insuficiente para suportar um só ciclo de carga (SANTOS JUNIOR, 2016).

O avanço da falha por fadiga, além de ocorrer em tensões bem menores que as previstas para condições de carga estática, é muito difícil de prever por ser um fenômeno susceptível a diversas variáveis como flutuação, frequência e intensidade da carga aplicada, temperatura, corrosão, estrutura cristalina do material, tensões residuais, corrosão etc. (SANTOS JUNIOR, 2016).

3.3.1 Descrição dos Carregamentos Cíclicos

Primeiramente, será listada a definição de alguns termos chave que serão utilizados no desenvolvimento deste tópico (GUIMARÃES, 2014).

σ máx e σ mín: são, respectivamente, as maiores e menores tensões algébricas encontradas num ciclo de tensões. Por convenção, temos que as tensões de tração são representadas como positivas e as tensões compressivas como negativas.

$$\sigma \text{ média: } = \frac{\sigma \text{ máx} + \sigma \text{ mín}}{2} \quad (1)$$

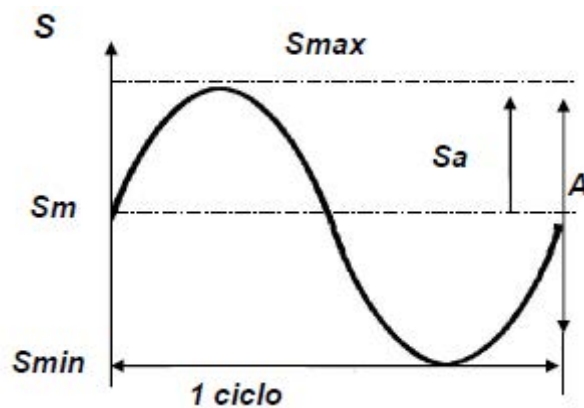
$$\text{Razão de tensões} = R = \frac{\sigma \text{ máx}}{\sigma \text{ mín}} \quad (2)$$

$$\sigma a = \text{tensão variável do ciclo} = \frac{\sigma \text{ máx} - \sigma \text{ mín}}{2} \quad (3)$$

$$A = \text{amplitude de tensões} = \sigma \text{ máx} + \sigma \text{ mín} \quad (4)$$

Na Figura 5 pode-se ver um ciclo senoidal alternado, uma situação idealizada encontrada normalmente em ensaios executados em laboratório, porém bastante ilustrativa para verificarmos o significado de cada um dos indicadores citados anteriormente.

Figura 5 – Ciclo de Tensões Senoidal

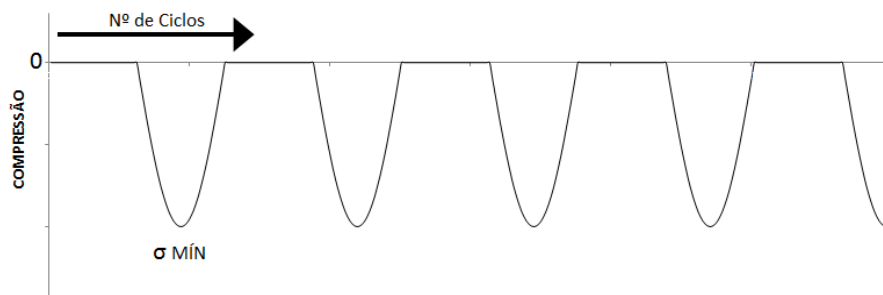


Fonte: Guimarães, 2014

A característica principal do ciclo de tensões alternado é o fato de a tensão ser hora de tração, positiva e hora de compressão, negativa. Sendo assim, a razão das tensões (R) é sempre negativa.

Outro tipo comum de solitação cíclica é a pulsatória, que pode ser positiva ou negativa. Esta é caracterizada por um ciclo de tensão aplicado de forma intermitente, ou seja, a carga é aplicada e depois removida. O exemplo do jogo de engrenagens, demonstrado anteriormente na Figura 1, representa uma carga pulsatória que é aplicada cada vez que os dentes se encontram e removida assim que eles se separam. O ciclo de tensões neste caso sempre teria uma razão de tensões igual a zero e seria similar ao da Figura 6 (GUIMARÃES, 2014).

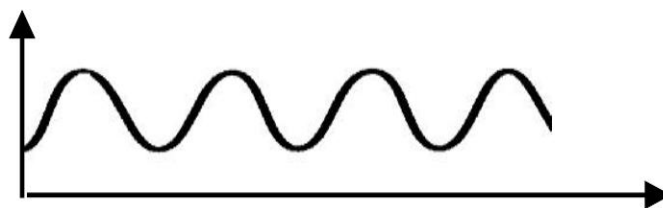
Figura 6 - Ciclo de Tensões Pulsatório



Fonte: autoria própria

Quando a solitação apresenta apenas uma variação na intensidade, sem haver interrupção ou inversão de sentido, esta é chamada de pulsatória ondulada. Neste caso, a razão de tensões é sempre positiva entre 0 e 1. Segue um exemplo na Figura 7 (GUIMARÃES, 2014).

Figura 7 - Ciclo de Tensões Pulsatório Ondulado



Fonte: Guimarães, 2014

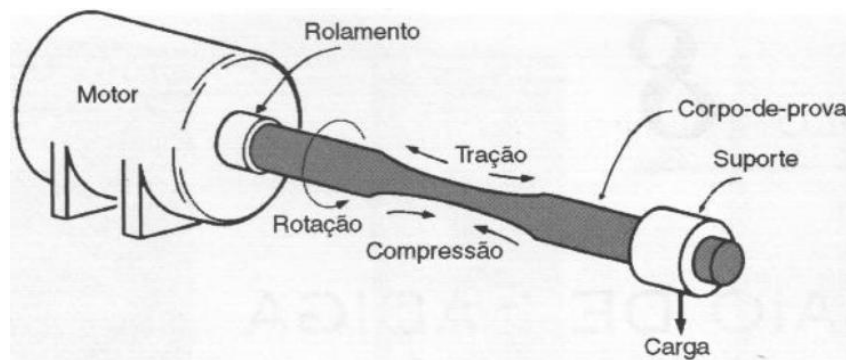
Na natureza, nem sempre os ciclos de tensões são bem definidos como nos casos citados anteriormente, muitas das vezes os carregamentos se dão de forma aleatória, sem intensidades ou direções definidas (GUIMARÃES, 2014).

3.3.2 Tipos de Ensaio e Corpos de Prova

Basicamente, o equipamento usado para realizar os ensaios de fadiga deve conter um sistema que possibilita a aplicação de diferentes cargas em diferentes sentidos e um contador de ciclos. O corpo de prova é ensaiado aplicando-se uma carga que tenha intensidade, sentido e frequência predeterminados e o ensaio é encerrado no momento em que o corpo de prova se rompe ou quando o ensaio chega num determinado número de ciclos que permite afirmar que a vida em fadiga do material é infinita naquelas condições (GUIMARÃES, 2014).

O ensaio mais comum é chamado de flexão rotativa e consiste em submeter um corpo de prova cilíndrico a uma rotação constante em torno de um eixo enquanto um dos apoios onde o corpo de prova fica situado recebe uma carga constante e unidirecional. A fadiga se dá devido à rotação do corpo de prova que faz com que a carga unidirecional se decomponha em esforços de flexão alternada. Neste caso, temos uma razão de carga igual a -1 , sendo que o esforço de flexão alternado hora age como tração na face do corpo de prova e hora age como compressão, sempre com a mesma intensidade. O equipamento possui ainda um contador de giros, que registra o número de ciclos pelos quais o corpo de prova é submetido. Na Figura 8 pode-se observar o esquema de um ensaio de fadiga por flexão rotativa (GUIMARÃES, 2014).

Figura 8 - Ensaio de Flexão Rotativa



Fonte: Guimarães, 2014

Outro ensaio bastante comum é a tração-tração, ou tração-compressão, no qual a carga é aplicada longitudinalmente ao longo do corpo de prova e o ciclo se dá conforme a máquina de ensaio varia a intensidade e/ou direção da força aplicada numa frequência predeterminada. Para esse tipo de ensaio podem ser utilizados corpos de prova cilíndricos ou planos, dependendo do encaixe oferecido pela garra da máquina de ensaio (GUIMARÃES, 2014).

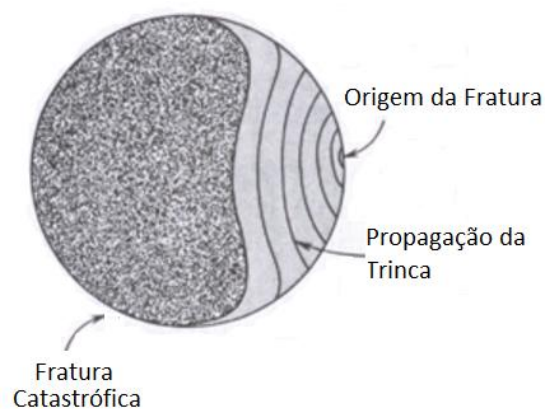
Existem ainda alguns ensaios mais específicos, usados quando se deseja simular com maior exatidão o comportamento de um componente em serviço, por exemplo, o ensaio de torção e o de flexão alternada (GUIMARÃES, 2014).

A forma e as dimensões dos corpos de prova podem variar bastante conforme o componente a ser estudado, as especificações da máquina de ensaio e as normas técnicas que estão sendo seguidas. O acabamento superficial das peças a serem ensaiadas é um ponto de atenção muito importante, pois eventuais marcas de usinagem ou corrosões, por exemplo, podem gerar concentradores de tensão e alterar os resultados de forma drástica (GUIMARÃES, 2014).

3.3.3 Características estruturais da fadiga

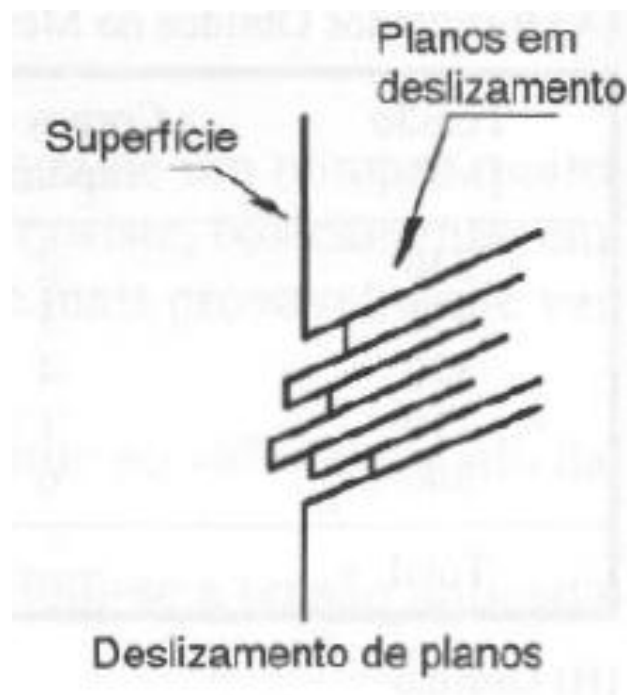
O processo de fadiga é dividido em três estágios. O primeiro deles é a nucleação da trinca, o segundo é a propagação, ou crescimento, da trinca e o terceiro é a ruptura final estática. Na Figura 9 podem-se observar essas três etapas bem definidas em uma superfície de fratura por fadiga (MARINE DIESELS, 2016).

Figura 9 - Superfície de Fratura por Fadiga



A nucleação da trinca, primeira etapa do processo, é quase sempre observada na superfície do material, pois é onde mais são encontrados concentradores de tensão como pontos de corrosão, marcas de usinagem, arranhões etc. Com a carga sendo aplicada de forma cíclica, mesmo sem a presença de concentradores de tensão, surgem sulcos e bandas de deslizamentos na microestrutura do material, dando início à trinca, como pode ser observado na Figura 10 (MARINE DIESELS, 2016).

Figura 10 - Nucleação da Trinca



Fonte: Guimarães, 2014

Uma vez que a trinca já está formada, temos um severo concentrador de tensão no ponto em que ela se encontra, resultando em uma facilidade grande para o avanço da trinca a cada ciclo de carga que é aplicado, dando assim, início à segunda etapa do processo de falha, a propagação da trinca (GUIMARÃES, 2014).

A propagação da trinca é caracterizada por gerar dois tipos distintos de marcas, muito importantes num estudo de análise de falha, por exemplo. Primeiramente temos as marcas de praia, Figura 11, que, apesar de muito comuns, não são necessariamente encontradas em todos os casos, elas são causadas por interrupções na sollicitação (por exemplo, em uma máquina que trabalha por turnos), sendo que, dessa forma, a corrosão impacta de diferentes formas no aspecto da superfície de fratura, gerando essas marcas, que podem ser observadas a olho nu (GUIMARÃES, 2014).

Figura 11 – Marcas de praia

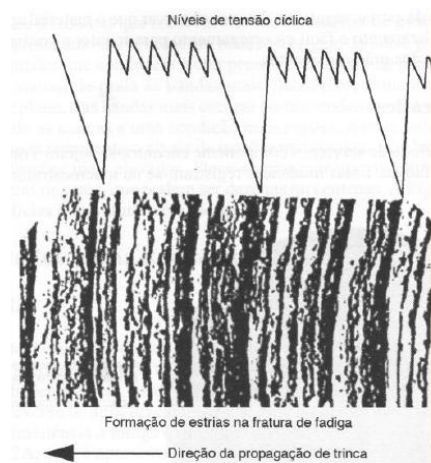


Fonte: Tork Laboratórios

As outras marcas, características da etapa de propagação da trinca, são as chamadas estrias de fadiga. Cada vez que o material sofre um ciclo de tensão e a trinca avança, é formada uma estria, que representa, basicamente, o caminho que a trinca avançou naquele determinado ciclo (GUIMARÃES, 2014).

Na Figura 12, é possível notar como as características das estrias de fadiga podem dar pistas a respeito da tensão aplicada sobre o material. Pela curvatura das estrias pode-se verificar a direção na qual a trinca está se propagando e pela intensidade (largura e/ou profundidade) da marca, pode-se interpretar a tensão relativa do ciclo em relação aos demais (TORK, 2016).

Figura 12 - Estrias de Fadiga



Fonte: Guimarães, 2014

A última etapa do processo de falha por fadiga é a ruptura final, que acontece quando a trinca já se propagou o bastante para que a área restante no material seja insuficiente para aguentar um único ciclo de carga. Em um regime de fadiga de baixas tensões aplicadas, a falha final demora a ocorrer, sendo que a maior parte da área da seção fraturada vai ser formada com a propagação da trinca. Já num regime de altas tensões, a trinca não precisa se deslocar em demasia para que a área seja insuficiente para suportar um ciclo de alta tensão, sendo assim, na superfície de ruptura, predominam as marcas da fratura final (GUIMARÃES, 2014).

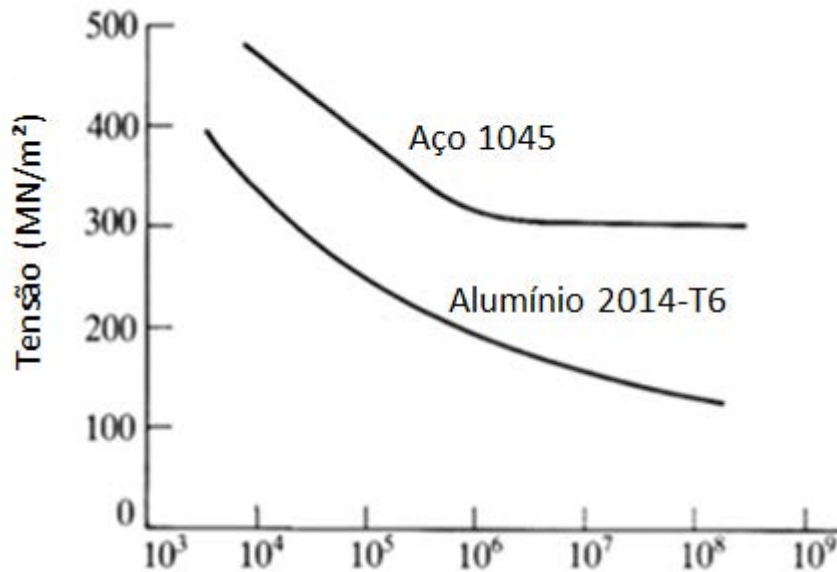
Na superfície de fratura pode-se observar uma grande distinção entre a área pela qual a trinca se propagou aos poucos, a cada ciclo, e a área onde houve a falha final, como podemos notar na Figura 10, mostrada anteriormente. Dependendo das propriedades do material, a ruptura final pode ter, inclusive, características de uma falha dúctil, diferentemente da etapa de propagação da trinca, a qual possui predominantemente características de ruptura frágil (GUIMARÃES, 2014).

3.3.4 Resultados Obtidos nos Ensaios

Como visto no tópico 3.2.2, o ensaio de fadiga consiste em, basicamente, ensaiar um corpo de prova com uma solicitação cíclica predefinida até que o mesmo apresente uma falha em um determinado número de ciclos. Diversos corpos de prova são ensaiados em diferentes tensões, mantendo-se sempre as outras características da solicitação, como frequência, amplitude, razão de cargas etc. Como a fadiga é muito sensível a fatores de difícil controle como inclusões, marcas de usinagem, corrosões e outros, é indicado que sejam ensaiados mais de um corpo de prova por tensão (GUIMARÃES, 2014).

O ensaio dos corpos de prova resulta na chamada curva S-N, que é a representação gráfica do número de ciclos necessários para que a fratura ocorra (N) em função de uma dada tensão (S). Geralmente a tensão representada no gráfico é a tensão nominal aplicada pela máquina de ensaio, não havendo correção para concentrações de tensão. Na Figura 13, estão representadas as curvas S-N do aço 1045 e da liga 2014-T6 Alumínio, que podem ser usadas para exemplificar o comportamento típico da curva em materiais metálicos (GUIMARÃES, 2014).

Figura 13 – Exemplo Curvas de Fadiga



Fonte: EFUNDA

Alguns materiais de grande importância na engenharia, como o aço e o titânio, apresentam o que chamamos de limite de resistência à fadiga, que é uma tensão limitante inferior a partir da qual, em teoria, o material não sofreria mais rupturas por fadiga. A representação do limite de resistência à fadiga no gráfico S-N é dada pelo ponto no qual a curva torna-se horizontal. Como podemos observar na Figura 9, para o aço 1045, o limite de resistência à fadiga se dá por volta de 310 MPa (MN/m²) (GUIMARÃES, 2014).

Normalmente o primeiro corpo de prova é ensaiado em uma tensão alta, próxima ao limite de resistência estático do material, esperando-se que o número de ciclos até a ruptura seja pequeno. A intensidade da tensão aplicada é diminuída gradativamente, até que o limite de fadiga seja atingido. Para os materiais que não apresentam limite de fadiga, geralmente determina-se um limite prático de ciclos onde o ensaio é interrompido, como 10⁷ ou 10⁸ (GUIMARÃES, 2014).

3.3.5 Fadiga em dutos submarinos

Os dutos usados para extração de petróleo em alto mar estão expostos aos mais diversos tipos de tensões, que podem ter comportamento estático, causadas pelo peso da coluna d'água ou pelo peso da própria estrutura de tubos e podem ter comportamento

dinâmico, causadas principalmente pelas vibrações geradas pela interação entre a água do mar e a superfície do tubo (SANTOS JUNIOR, 2016).

Como citado anteriormente, as tensões dinâmicas são a principal causa de falhas estruturais em engenharia, em função de sua difícil previsão no projeto e pelo fato de ocorrerem em tensões bem abaixo do limite de resistência estática do material. Isso vale também para estruturas *offshore*, uma vez que o ambiente em alto mar é bastante imprevisível, em função das correntes marítimas que podem variar sazonalmente e ocorrer em diversas intensidades e direções diferentes (SANTOS JUNIOR, 2016).

Essas tensões aleatórias, aliadas à complexa interação hidrodinâmica entre o fluido e uma estrutura esbelta de grande comprimento, dificultam muito a criação de um modelo matemático que simule exatamente a situação. Mesmo com o uso de modelos computacionais voltados para mecânica de fluidos, uma análise rigorosa poderia não representar tão bem a realidade, levando-se em consideração a diversidade e complexidade das variáveis envolvidas e a escassa fonte de dados empíricos. Portanto, avaliações experimentais e qualitativas nesse campo são bastante válidas (SANTOS JUNIOR, 2016).

3.3.5.1 Vibrações Induzidas por Vórtices (VIV's)

As vibrações induzidas por vórtices têm sido tema de diversos estudos de análise estrutural de componentes cilíndricos que estão sujeitos à ação da passagem de fluidos externos, como em torres que ficam ao ar livre, sob a ação do vento, e tubulações *offshore*, que sofrem com as correntes marítimas (LOPES, 2006).

Um fluido de pequena viscosidade ao passar ao redor de uma estrutura pode ocasionar vibrações induzidas pelo desprendimento de vórtices. Essas vibrações podem resultar em um regime de tensões cíclicas, que poderá, por fadiga, reduzir consideravelmente a vida útil do material. No exemplo da Figura 14, tem-se dois tipos de vórtices, um gerado por escoamento laminar e o outro por escoamento turbulento (LOPES, 2006).

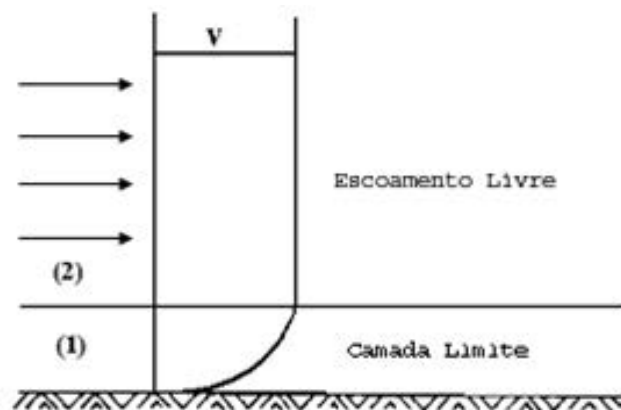
Figura 14 - Vórtices em Diferentes Regimes de Escoamento



Fonte: LOPES, 2006

Um fluido, ao atravessar um obstáculo, forma uma camada limite junto à superfície deste. A velocidade de escoamento do fluido varia rapidamente em função da distância, sendo zero junto à parede do obstáculo até um valor característico do escoamento, Figura 15. Esta variação da magnitude da velocidade transversal na direção do escoamento representa um escoamento rotacional dentro da camada limite. Para determinadas velocidades do escoamento, a camada limite se desprende do obstáculo formando uma esteira de vórtices (LOPES, 2006).

Figura 15 - Camada Limite



Fonte: LOPES, 2006

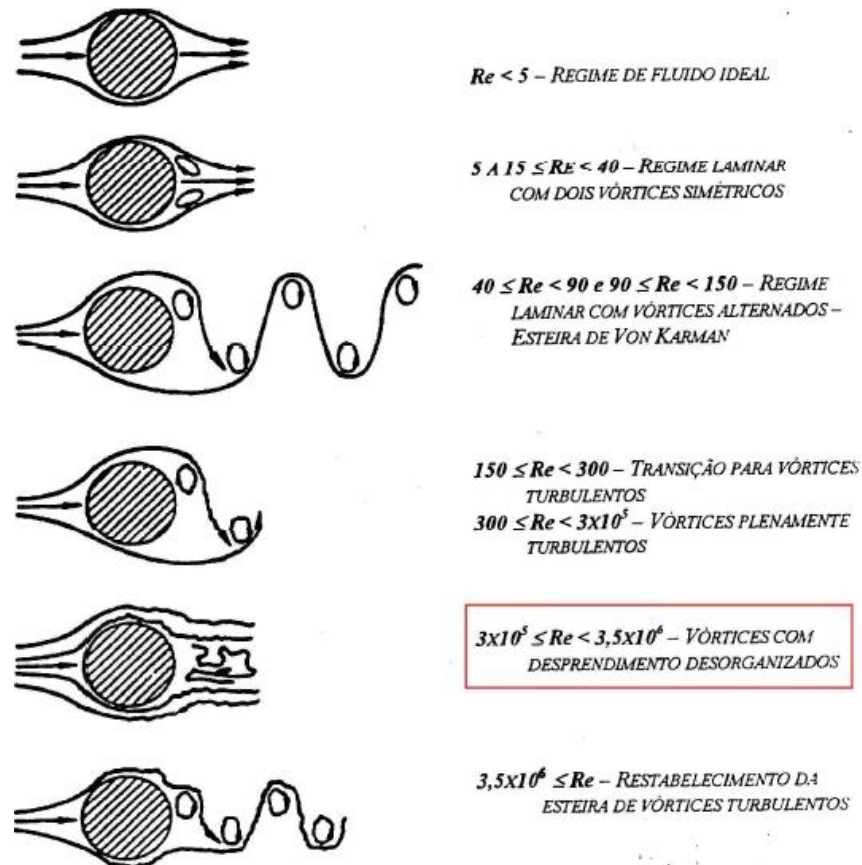
A característica do escoamento e, por consequência, a formação de vórtices está relacionada ao número de *Reynolds*. Para o caso de um tubo, que funciona como um obstáculo perpendicular ao escoamento de um fluido, o número de *Reynolds* é função da velocidade de

escoamento do fluido (U), do diâmetro hidrodinâmico do tubo (D) e da viscosidade cinemática do fluido (ν), expressados da seguinte forma (LOPES, 2006).

$$Re = \frac{U \cdot D}{\nu} \quad (5)$$

Na Figura 16, pode-se observar a relação entre o número de Reynolds e a formação das esteiras de vórtices.

Figura 16 - Relação entre o número de Reynolds e a formação das esteiras de vórtices

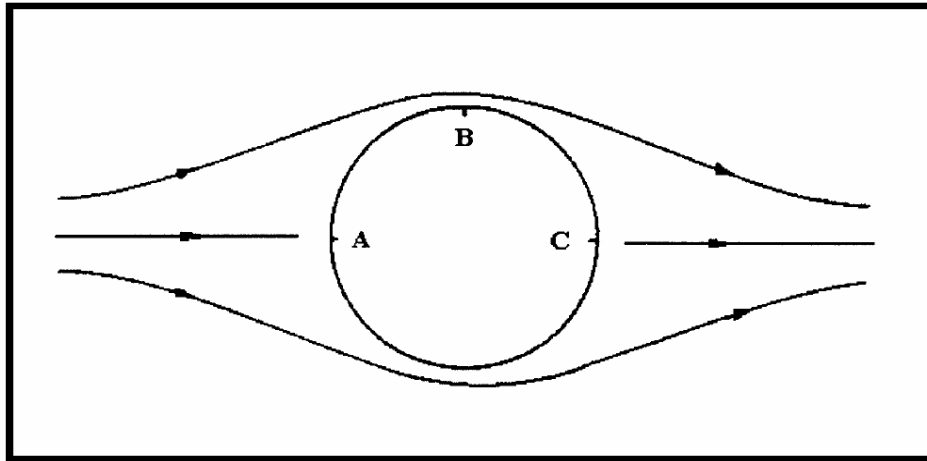


Fonte: LOPES, 2006

Para estruturas marítimas sujeitas a vibrações induzidas por vórtices, como o caso dos tubos do presente estudo, o número de *Reynolds* gira em torno de 10^5 , portanto a maior parte dos vórtices formados nesse caso terá comportamento aleatório e desorganizado, o que torna difícil a modelação matemática da situação (LOPES, 2006).

Ao se analisar o escoamento que ocorre através de um tubo perpendicular ao fluxo, nota-se que o campo de pressões ao longo da superfície do tubo não é mais constante, como se pode observar na Figura 17 (LOPES, 2006).

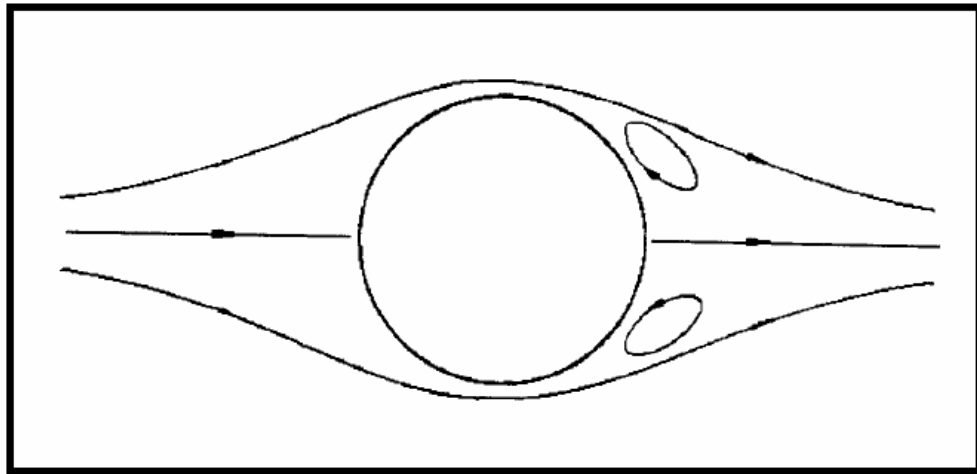
Figura 17 - Escoamento Perpendicular a um Cilindro



Fonte: LOPES, 2006

Em uma situação ideal, do ponto A até o ponto B, na Figura 16, há um aumento de velocidade e uma consequente queda de pressão e, do ponto B ao ponto C, o contrário ocorre. Porém, como é sabido, existe uma perda de energia cinética do fluido, causada pelo atrito entre este e a parede do tubo. Essa perda de energia cinética pode fazer com que o fluido não complete o contorno completo do tubo, gerando uma diferença de pressão que produz um movimento contrário à passagem do fluido, acarretando no descolamento da camada limite antes dessa atingir o ponto C e a formação de dois vórtices estacionários, como observado na Figura 18 (LOPES, 2006).

Figura 18 - Formação de Vórtices Estacionários



Fonte: LOPES, 2006

3.4 CORROSÃO

Pode-se definir corrosão como a deterioração de um material, geralmente metálico, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente associada ou não a esforços mecânicos (GENTIL, 2012). Essa deterioração causada pela corrosão pode refletir em danos que tornam o material inadequado para uso, como desgaste, mudanças químicas, entalhes que geram concentrações de tensão, mudanças estruturais etc.

Os problemas causados pela corrosão são frequentes e atingem os mais variados tipos de mercado, desde a indústria petrolífera até a medicina, por exemplo. As consequências econômicas causadas pela corrosão podem ser classificadas como diretas ou indiretas. As perdas diretas são mais fáceis de identificar, pois são custos atrelados à substituição ou manutenção de um componente danificado pela corrosão. Já as perdas indiretas, são menos perceptíveis, porém, também representam um impacto significativo, como, por exemplo, na perda de eficiência de um processo de troca de calor, no aumento do atrito de uma superfície e contaminação de produtos (GENTIL, 2012).

De um modo geral, a corrosão é um processo espontâneo e todos os metais podem ser corroídos se o meio for suficientemente agressivo. O composto resultante do fenômeno pode agir de uma forma a funcionar como uma barreira entre o metal e o meio corrosivo, diminuindo assim, a velocidade de corrosão do metal. Caso o produto da corrosão se

desprenda do metal base, a velocidade não sofrerá diminuição, isso ocorre quando o óxido é solúvel no meio, por exemplo (GENTIL, 2012).

Basicamente, a corrosão é uma reação de oxirredução, na qual um dos pares é oxidado, ou seja, ganha oxigênio, e o outro é reduzido, perdendo oxigênio de sua composição. Pensando-se nos mesmos pares, mas tomando como base a troca das cargas elétricas entre eles, a reação de oxidação é a perda de elétrons e a reação de redução é o ganho de elétrons resultante de cada um dos envolvidos. O fenômeno pode ser descrito pelas equações 6 e 7, abaixo, que demonstram a oxidação do ferro (GENTIL, 2012).



Como dito anteriormente, qualquer metal pode sofrer o processo de corrosão, dependendo apenas do meio no qual este está imerso. O que determina a facilidade, ou a espontaneidade, com a qual este metal irá passar pelo processo é o seu potencial de oxidação, ou seja, a sua tendência a perder elétrons. Quanto maior o potencial de oxidação, medido em *Volts*, de um elemento, maior a tendência deste a perder elétrons, bem como quanto maior a diferença de potencial entre a parte redutora e a parte oxidante, maior a probabilidade de a reação ocorrer espontaneamente. Na Tabela 3, seguem os potenciais de alguns dos principais elementos (GENTIL, 2012).

Tabela 3 - Potenciais de Oxidação

Potenciais de oxidação (E°_{ox}), em volt		Potenciais de redução (E°_{red}), em volt
+ 3,04	$Li^+ + 1e \rightleftharpoons Li^{\circ}$	-3,04
+ 2,87	$Ca^{2+} + 2e \rightleftharpoons Ca^{\circ}$	-2,87
+ 2,71	$Na^+ + 1e \rightleftharpoons Na^{\circ}$	-2,71
+ 2,36	$Mg^{2+} + 2e \rightleftharpoons Mg^{\circ}$	-2,36
+ 1,66	$Al^{3+} + 3e \rightleftharpoons Al^{\circ}$	-1,66
+ 0,76	$Zn^{2+} + 2e \rightleftharpoons Zn^{\circ}$	-0,76
+ 0,44	$Fe^{2+} + 2e \rightleftharpoons Fe^{\circ}$	-0,44
+ 0,28	$Co^{2+} + 2e \rightleftharpoons Co^{\circ}$	-0,28
+ 0,25	$Ni^{2+} + 2e \rightleftharpoons Ni^{\circ}$	-0,25
+ 0,14	$Sn^{2+} + 2e \rightleftharpoons Sn^{\circ}$	-0,14
+ 0,13	$Pb^{2+} + 2e \rightleftharpoons Pb^{\circ}$	-0,13
0,00	$2H^+ + 2e \rightleftharpoons H_2$	0,00
-0,34	$Cu^{2+} + 2e \rightleftharpoons Cu^{\circ}$	+0,34
-0,80	$Ag^+ + e \rightleftharpoons Ag^{\circ}$	+0,80
-0,85	$Hg^{2+} + 2e \rightleftharpoons Hg^{\circ}$	+0,85
-1,07	$Br_2 + 2e \rightleftharpoons 2Br^-$	+1,07
-1,36	$Cl_2 + 2e \rightleftharpoons 2Cl^-$	+1,36
-1,50	$Au^{3+} + 3e \rightleftharpoons Au^{\circ}$	+1,50
-2,87	$F_2 + 2e \rightleftharpoons 2F^-$	+2,87

Fonte: Gentil. V, 2012

3.4.1 Formas de Corrosão

Os processos de corrosão não costumam se dar de forma homogênea, ocorrendo na interface entre a superfície do material e o meio corrosivo. Os diferentes tipos de corrosão podem ser classificados, dentre outros agrupamentos, conforme segue: (COELHO, 2015)

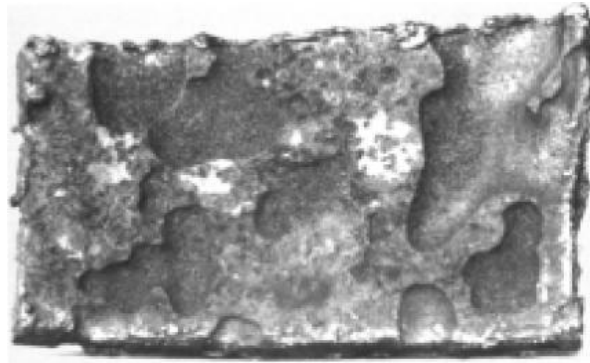
- Mecanismos: as características da causa da corrosão, como por exemplo, galvânica, por correntes de fuga, aeração etc.
- Meio corrosivo: atmosférico, pelo solo, pela água do mar, por exemplo.

- Morfologia: classificação em função do aspecto resultante da corrosão, podendo ser por placas, uniforme, alveolar, por pite (puntiforme), filiforme, entre outras.

A classificação em função da morfologia auxilia bastante na aplicação de medidas adequadas de proteção e no entendimento de como a corrosão afeta a resistência mecânica do material, ponto crucial deste estudo. Portanto, abaixo, serão descritos e ilustrados alguns dos principais tipos de morfologia de corrosão com base nas explicações do livro Corrosão, do Vicente Gentil (GENTIL, 2012).

- Corrosão por placas: localizada em regiões específicas da superfície, formando placas com escavações, Figura 19.

Figura 19 - corrosão por placas



Fonte: Gentil. V, 2012

- Corrosão Uniforme: o fenômeno ocorre ao longo de toda a extensão da superfície, ocorrendo perda uniforme de espessura, Figura 20.

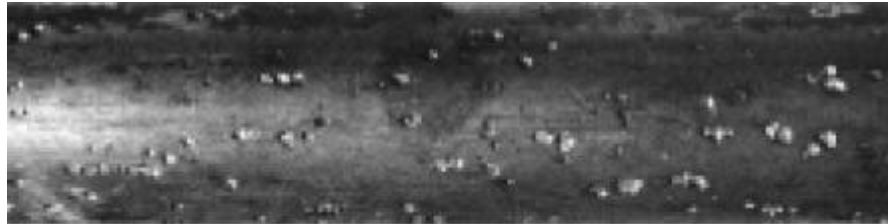
Figura 20 - corrosão uniforme



Fonte: Gentil. V, 2012

- Corrosão puntiforme: também conhecida como corrosão por pite, se processa em pontos da superfície, caracterizados por formas angulosas e profundidade maior que o diâmetro, Figura 21.

Figura 21 - corrosão por pite



Fonte: Gentil. V, 2012

- Corrosão Alveolar: escavações arredondadas de diâmetro geralmente maior que a profundidade, semelhantes a alvéolos, Figura 22.

Figura 22 - Corrosão alveolar



Fonte: Gentil. V, 2012

3.4.1.1 Meio corrosivo

Além da abordagem dos diferentes tipos morfológicos de corrosão, é de grande importância para o presente estudo o detalhamento das características de corrosões ocorridas em água do mar, meio onde se localizam os tubos aqui estudados.

A ação corrosiva da água do mar depende principalmente de sua salinidade, a qual costuma ser praticamente constante em oceanos, variando um pouco mais para mares interiores, como mostra Tabela 4 (GENTIL, 2012).

Tabela 4 - Salinidade média em oceanos e mares

	Salinidade (%)
Oceano Atlântico	3,54
Oceano Pacífico	3,49
Mar Mediterrâneo	3,7-3,9
Mar Vermelho	> 4,1
Mar Báltico (Golfo da Finlândia)	0,2-0,5
Mar Cáspio	1,0-1,5
Mar Cáspio (Golfo de Karabaguz)	16,4

Fonte: Gentil. V, 2012

Em água do mar se notam com mais frequência às formas de corrosão uniforme, por placas e por pite. As corrosões por pite são geralmente ocasionadas por sais, contaminantes, poluentes atmosféricos, fatores metalúrgicos e falhas em películas protetoras (GENTIL, 2012).

Em meio marinho, a corrosão é intensificada quando se tem dois metais diferentes em contato, pois, com a água do mar sendo um eletrólito forte, será formada uma pilha galvânica. A corrosão galvânica geralmente se apresenta nas proximidades da junção entre os dois metais e se caracteriza por causar grandes danos no material que funciona como anodo (GENTIL, 2012).

3.5 FADIGA ASSOCIADA À CORROSÃO

Caso um componente esteja sujeito a esforços cíclicos em um meio capaz de atacar química ou eletroquimicamente o material exposto, verificam-se condições para a implantação da corrosão sob fadiga (GENTIL, 2012).

Os metais que estão aptos a sofrer com esse tipo de fenômeno são os que possuem uma camada de óxido externa, também conhecida como camada passiva, que, ao recobrir inteiramente o material, serviria como uma barreira entre o metal abaixo deste e o meio corrosivo, saturando assim, a oxidação e perda do material de base. Conforme as tensões cíclicas são aplicadas e ocorrem as repetidas fraturas mecânicas associadas à propagação da trinca, há o rompimento sucessivo dessa camada de óxido, fazendo com que o metal de base fique novamente exposto ao meio corrosivo (GENTIL, 2012).

A consequência dessa repetida propagação de trinca, associada à sucessiva corrosão e perda de metal de base, é a redução significativa e até o desaparecimento do limite de fadiga do material, havendo, até para baixas tensões, um número de ciclos limitante que leva à ruptura (GENTIL, 2012).

A avaliação de resultados experimentais demonstra que há uma sinergia entre os dois fenômenos, ou seja, o dano causado pela corrosão e pela fadiga simultânea é consideravelmente maior que o dano provocado pelos dois agindo separadamente em um mesmo material (GENTIL, 2012).

O mecanismo de início da fratura está muitas vezes associado a uma concentração de tensões superficiais gerada pela corrosão. Sendo assim, o tipo de corrosão que mais acentua o fenômeno de fadiga é o de corrosão por pite, pois, este tendo uma profundidade muito maior que o diâmetro, por si só já se assemelha a uma trinca, se comportando como um alto concentrador de tensão (GENTIL, 2012).

Tratamentos térmicos praticamente não exercem influência no fenômeno de corrosão sob fadiga. Os elementos de liga melhoram apenas a resistência à corrosão, tendo pouca ou nenhuma influência na resistência ao fenômeno combinado (GENTIL, 2012).

Dentre os principais métodos para se atenuar os danos causados pela corrosão sob fadiga estão: uso de inibidores, que reduzem a corrosividade do meio, porém são inviáveis para uso em alto mar; revestimentos metálicos de sacrifício, que uma vez oxidados, funcionam como barreira para o metal base; películas não metálicas, que impedem o contato do metal base com o meio corrosivo; e o jateamento superficial do metal, também conhecido como *shot peening*, que resulta em tensões compressivas na superfície do material, aumentando sua resistência à fadiga (GENTIL, 2012).

3.6 RUGOSIDADE

A rugosidade é o conjunto de irregularidades, ou seja, pequenas saliências e reentrâncias que caracterizam uma superfície (SOUZA, 2011). A rugosidade influencia em diversas propriedades do material, como aparência, resistência à corrosão, capacidade de vedação, propriedades hidrodinâmicas, resistência ao desgaste e ao deslizamento e inclusive resistência à fadiga (FERREIRA, 2013).

Como citado anteriormente, em grande parte dos casos, o processo de fadiga tem seu início na superfície do material e é bastante influenciado pela presença de concentradores de tensão. Dessa forma, a rugosidade é uma característica que influencia diretamente a vida em fadiga do material. Além disso, a rugosidade pode influenciar essa vida em fadiga de forma indireta, se a mesma for responsável por favorecer o início de um processo de corrosão, por exemplo (FERREIRA, 2013).

A medição dessa propriedade é feita através do rugosímetro, que funciona com um traçador que toca a superfície do material e se move para cima e para baixo conforme a variação no relevo. Esse movimento é transformado em sinal elétrico e processado, podendo gerar diferentes parâmetros de medição. Abaixo estão descritos alguns dos principais parâmetros usados para caracterização de rugosidade (FERREIRA, 2013).

Rugosidade média (R_a): É a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro do percurso de medição.

Rugosidade máxima ($R_{máx}$): É definido como o maior valor de rugosidades parciais que se apresenta no percurso de medição, ou seja, informa a maior deterioração presente na superfície analisada. É complementar ao parâmetro de rugosidade média, que pode acabar diluindo os picos e vales na média global.

Rugosidade total (R_t): É empregado de forma semelhante ao $R_{máx}$, porém com maior rigidez, sendo correspondente à distancia vertical entre o maior pico e o menor vale identificados no percurso de medição.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

O material usado neste estudo foi retirado de um tubo API 5CT T95 (1%Cr), Figura 23, fornecido pela empresa Apolo Tubulars S/A.

Figura 23 - Tubo utilizado



Fonte: autoria própria

Tabela 5 – Composição química do material do tubo

Resultados da composição Química (em percentual da fração em massa por elemento)	
Tubo QU939 - API 5CT T95	
C	0,235
Mn	0,492
P	0,014
Si	0,205
Cr	0,778
Mo	0,167
Ca	0,003
S	0,003
Al	0,037
Ceq	0,508
Pcm	0,319

Fonte: Tenaris Confab S.A.

Para a realização do presente trabalho, foram considerados necessários os seguintes passos: elaboração dos corpos de prova de fadiga a partir do tubo, ensaio de microdureza, oxidação forçada por nevoa salina do material em uma câmara de corrosão; ensaios de fadiga no material de base corroído e sem corrosão; e microscopia óptica e eletrônica.

4.1 ENSAIO DE TRAÇÃO

De acordo com a norma API 5CT (2011), os valores do limite de escoamento devem estar entre 655 e 758 MPa e o limite de resistência mínimo deve ser de 724MPa, para o grau T95. Conforme, constatado no trabalho realizado por Rainha (2013), todos os resultados ensaiados estão dentro dos valores estipulados pela norma, validando os ensaios de tração.

LE – Média $729 \pm 4,80$ MPa;

LR – Média $782,25 \pm 5,44$ MPa.

Cabe ressaltar que o limite de escoamento médio está 20 MPa próximo do limite máximo, porém este fator é descartado visto que o limite de resistência médio supera o mínimo estipulado pela API 5CT em quase 60 MPa (RAINHA, 2013).

4.2 FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA DE FADIGA

A partir do material fornecido foram elaborados 16 corpos de prova de fadiga, com base na norma ASTM E466. A usinagem foi feita utilizando-se equipamento de corte por eletroerosão a fio de 0,18 mm, mostrado na Figura 24, do Laboratório de Usinagem da FEG-UNESP. As dimensões e desenho dos corpos de prova seguem anexados ao final do trabalho.

Figura 24 - Eletroerosão - GF Machining Solutions, modelo FW 2U



Fonte: autoria própria

Após a confecção dos corpos de prova, Figura 25, os mesmos tiveram suas extremidades (regiões das garras) pintadas com *spray* impermeável, para que a única parte que sofresse corrosão de fato fosse à seção útil (pescoço), de forma que a pega entre a garra da máquina de ensaio de fadiga e o corpo de prova não fosse prejudicado.

Figura 25 - Corpo de Prova de Fadiga



Fonte: autoria própria

4.3 CORROSÃO FORÇADA EM CÂMARA DE *SALT-SPRAY*

A corrosão dos corpos de prova foi realizada na câmara de *salt-spray*, Figura 26, fabricada pela empresa Equilam e localizada no Laboratório de Corrosão do Departamento de Materiais e Tecnologia/DMT da FEG-UNESP. Essa etapa consistiu em expor o material a condições forçadas de corrosão, sob uma atmosfera de NaCl, até que toda a superfície do material estivesse inteiramente oxidada, o que levou, aproximadamente, 92 horas. As condições utilizadas durante o ensaio foram baseadas na norma ASTM B117-11 e são:

- Pressão na câmara = 4kgf/cm²
- Pressão do saturador = 1kgf/cm²
- Temperatura na câmara = 35°C
- Temperatura no saturador = 47°C
- Solução usada na proporção de 1kg de NaCl puro para 19L de água destilada.

Figura 26 - Câmara de Salt-Spray



Fonte: autoria própria

Assim que foi finalizada a corrosão dos corpos de prova, com o objetivo de facilitar a identificação do tipo de corrosão ocorrido, foi feita a remoção da camada oxidada. Para isso, foi usada uma solução com base na norma ASTM, G1 – 03, para preparação, limpeza e validação de corpos de prova para ensaios de corrosão, Figura 26, com os seguintes componentes e proporção:

- 1000 mL de ácido clorídrico (HCl)
- 20 g de trióxido de antimônio (SbO₃)
- 50g de cloreto de estanho (SnCl₂)

4.4 ENSAIO DE FADIGA

Os ensaios de fadiga foram todos realizados na máquina universal de ensaios da marca Instron, modelo 8801, Figura 27, no Laboratório de Ensaios Mecânicos do Departamento de Materiais e Tecnologia da FEG-UNESP. Os ensaios decorreram em temperatura ambiente, com razão de carga constante de amplitude senoidal $R=0,1$ e frequência de 20Hz.

Figura 27 - Máquina de ensaio de fadiga



Fonte: autoria própria

4.5 AMOSTRAS PARA MICROSCOPIA ÓPTICA

As avaliações de anisotropia e das fases presentes na microestrutura foram feitas por meio de microscopia óptica de dois corpos de prova, um transversal e o outro longitudinal ao eixo do tubo, Figura 28.

O preparo foi feito lixando-se os corpos de prova desde a lixa de granularidade 400 até 1500, seguido de polimento com tecido próprio e solução de alumina, até que as marcas fossem completamente removidas da superfície do corpo de prova. Para melhorar a visualização das fases no microscópio, foi feito ainda um ataque químico por 10 segundos, utilizando-se uma solução de Nital 2%, diluído em etanol.

Figura 28 – CDP's de metalografia



Fonte: autoria própria

4.6 ENSAIO DE MICRODUREZA

Para se verificar o enquadramento das propriedades do material na norma e avaliar possíveis variações microestruturais ou concentração de tensões microscópicas localizadas, foi feito o ensaio de Microdureza *Vickers* (HV), aplicando-se uma carga de 300g e utilizando-se o durômetro universal da marca Buehler do laboratório de ensaios mecânicas na FEG-UNESP, Figura 29. Os ensaios foram feitos nas amostras da Figura 28.

Figura 29 – Durômetro Universal Buehler



Fonte: autoria própria

4.7 ANÁLISE DE RUGOSIDADE

Para avaliar as mudanças nas características da superfície do material foi levantada a rugosidade dos corpos de prova antes e depois da corrosão. Para isso, foi utilizado um rugosímetro da marca Mahr, ilustrado na Figura 30, por meio do qual foram levantados os

dados, considerando-se o campo de amostragem de 0,8mm (*cutoff*) e percurso de amostragem de 4mm.

Figura 30 – Rugosímetro Mahr



Fonte: autoria própria

4.8 MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA (MEV)

O microscópio eletrônico de varredura (MEV) é um tipo de microscópio eletrônico capaz de produzir imagens de alta resolução da superfície de uma amostra. Devido a maneira com que as imagens são criadas, imagens de MEV tem uma aparência tridimensional característica e são úteis para avaliar a estrutura superficial de uma dada amostra. O equipamento utilizado nesse estudo foi um microscópio eletrônico de varredura da Zeiss Evo LS-15, mostrado na Figura 31, disponível no LAIMAT, Departamento de Materiais e Tecnologia/DMT da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, UNESP.

Figura 31 – Microscópio eletrônico de varredura 1



Fonte: autoria própria

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 CORROSÃO E PERDA DE MASSA

Na Tabela 6 estão ilustradas as pesagens dos corpos de prova em todas as etapas, sendo que m1 representa a massa inicial do corpo de prova, m2 a massa do corpo de prova após a pintura com *spray*, m3 representa a massa após a corrosão e m4 a massa do corpo de prova após a remoção da corrosão, de modo que a porcentagem de perda de massa é calculada em função de m4 e m2.

Tabela 6 - Perda de massa em função da corrosão

Corpo de prova	m1 (g) Massa Inicial Após Usinagem	m2 (g) Massa Após Pintura	m3 (g) Massa Após Corrosão	m4 (g) Massa Final Após Limpeza	Perda de Massa entre m2 e m4 (%)
1	32,781	32,888	32,998	32,678	0,639%
2	34,06	34,163	34,236	33,966	0,577%
3	34,09	34,19	34,293	33,982	0,608%
4	32,036	32,121	32,193	31,9	0,688%
5	33,36	33,455	33,572	33,265	0,568%
6	33,27	33,353	33,456	33,106	0,741%
7	34,054	34,158	34,234	33,928	0,673%
8	34,356	34,475	34,542	34,29	0,537%
9	33,044	34,248	34,343	34,078	0,496%
10	33,041	33,176	33,266	32,927	0,751%
11	35,034	35,141	35,212	34,933	0,592%
12	33,983	34,081	34,144	33,864	0,637%
13	32,84	32,98	33,094	32,767	0,646%
14	34,019	34,161	34,242	33,941	0,644%
Média	33,57	33,76	33,84	33,54	0,628%
Desvio Padrão	± 0,76	± 0,76	± 0,75	± 0,77	±0,070%

Fonte: autoria própria

Figura 32 - Corpos de prova durante etapa de corrosão



Fonte: autoria própria

Figura 33 - Corpos de prova após etapa de corrosão



Fonte: autoria própria

Pode-se observar, na Figura 32, os CDPs durante a etapa de corrosão. Na Figura 33 estão ilustrados os corpos de prova após a corrosão e pode-se notar que a corrosão se deu em toda a superfície, sendo que algumas regiões foram um pouco mais corroídas do que outras, de forma que não foi observado nenhum entalhe ou concentrador de tensão superficial significativo nos corpos de prova, mostrado na Figura 34, maiores detalhes à cerca da forma de corrosão serão abordados na análise por microscopia eletrônica de varredura.

Figura 34 – Corpo de prova após remoção da corrosão



Fonte: autoria própria

5.2 AVALIAÇÃO DE RUGOSIDADE

Nas Tabelas 7 e 8, encontram-se os resultados de cada medição de rugosidade, das médias e do desvio padrão das medidas de cada CDP, do ensaio de rugosidade feitos nos corpos de prova antes da corrosão e depois da corrosão, respectivamente. Na Tabela 8, está representada a comparação da mudança no Ra e no R_{máx} médios de cada corpo de prova e a comparação da média global antes e após corrosão.

Tabela 7 – Resultados ensaio de rugosidade – CDPs não corroídos

CDP PRÉ CORROSÃO	Medidas de Ra		Medidas de R _{máx}	
	Ra 1	Ra 2	R _{máx} 1	R _{máx} 2
1	1,514	1,862	9,86	11,35
2	1,687	1,752	10,49	11,87
3	1,862	2,083	11,23	13,36
4	1,26	1,267	8,10	9,63
5	1,299	1,161	9,12	7,49
6	1,89	1,7	12,60	11,86
7	1,909	1,661	12,80	11,24
8	1,112	1,605	6,68	7,16
9	1,34	1,34	8,50	8,26
Média	1,57		10,09	
Desvio Padrão	± 0,29		± 2,01	

Fonte: autoria própria

Tabela 8 – Resultados ensaio de rugosidade – CDPs corroídos

CDP PÓS CORROSÃO	Medidas de Ra				Medidas de Rmáx			
	Ra 1	Ra 2	Ra 3	Ra 4	Rmáx 1	Rmáx 2	Rmáx 3	Rmáx 4
1	2,79	1,46	4,18	4,94	16,34	8,97	21,64	27,96
2	4,74	2,79	4,57	5,75	25,40	20,15	28,51	29,68
3	3,77	2,13	3,07	5,36	20,14	12,78	20,64	30,84
4	7,15	5,32	6,28	2,76	43,61	33,78	33,04	19,62
5	6,92	4,93	5,57	4,97	37,05	28,23	29,39	26,69
6	4,44	4,90	4,82	6,15	24,24	31,68	27,66	31,54
7	4,09	3,40	1,78	2,40	21,03	20,25	14,64	18,52
8	4,18	2,00	3,21	2,53	24,04	12,50	18,10	13,96
9	4,70	3,81	5,25	6,87	25,82	27,38	32,41	36,38
Média	4,28				24,85			
Desvio Padrão	± 1,49				± 7,69			

Fonte: autoria própria

Tabela 9 – Variação da Rugosidade por CDP

COMPARAÇÃO POR CDP	Pré Corrosão		Pós Corrosão		Comparação	
	Ra (média)	Rmáx (média)	Ra (Médio)	Rmáx (Médio)	Ra (Médio)	Rmáx (Médio)
1	1,7	10,6	3,3	18,7	98,0%	76,6%
2	1,7	11,2	4,5	25,9	159,6%	132,0%
3	2,0	12,3	3,6	21,1	81,5%	71,6%
4	1,3	8,9	5,4	32,5	325,4%	266,8%
5	1,2	8,3	5,6	30,3	355,0%	265,3%
6	1,8	12,2	5,1	28,8	182,8%	135,3%
7	1,8	12,0	2,9	18,6	63,4%	54,8%
8	1,4	6,9	3,0	17,2	119,2%	147,8%
9	1,3	8,4	5,2	30,5	284,9%	263,9%
Média Final	1,57	10,09	4,28	24,85	172,0%	146,3%
Desvio Padrão	± 0,29	± 2,01	± 1,49	± 7,69	-	-

Fonte: autoria própria

Como se pode observar na Tabela 9, em todos os corpos de prova, a corrosão causou um aumento significativo na rugosidade, sendo que o Ra aumentou 172% e o Rmáx aumentou 146%, na média global.

5.3 ENSAIO DE VIDA EM FADIGA

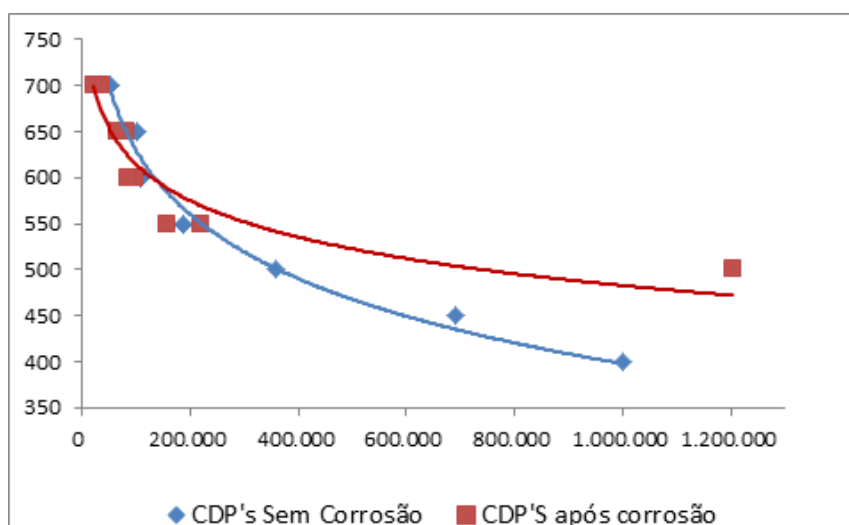
Foram realizados os ensaios de fadiga a partir de 700 MPa até 400 MPa em intervalos de 50 MPa. Os resultados dos corpos de prova com e sem corrosão estão ilustrados no gráfico da Figura 35, e na Tabela 10.

Tabela 10 – Resultados de Fadiga

Tensão	Número de Ciclos	
	CDP sem corrosao	CDP corroído
700	54.385	38.192
700	54.385	23.297
650	103.992	83.950
650	103.992	66.777
600	107.830	98.515
600	107.830	87.326
550	186.664	159.355
550	186.664	221.051
500	359.989	-
490	-	1.202.999
450	692.235	-
400	1.000.000	-

Fonte: autoria própria

Figura 35 – Curva de Fadiga Completa

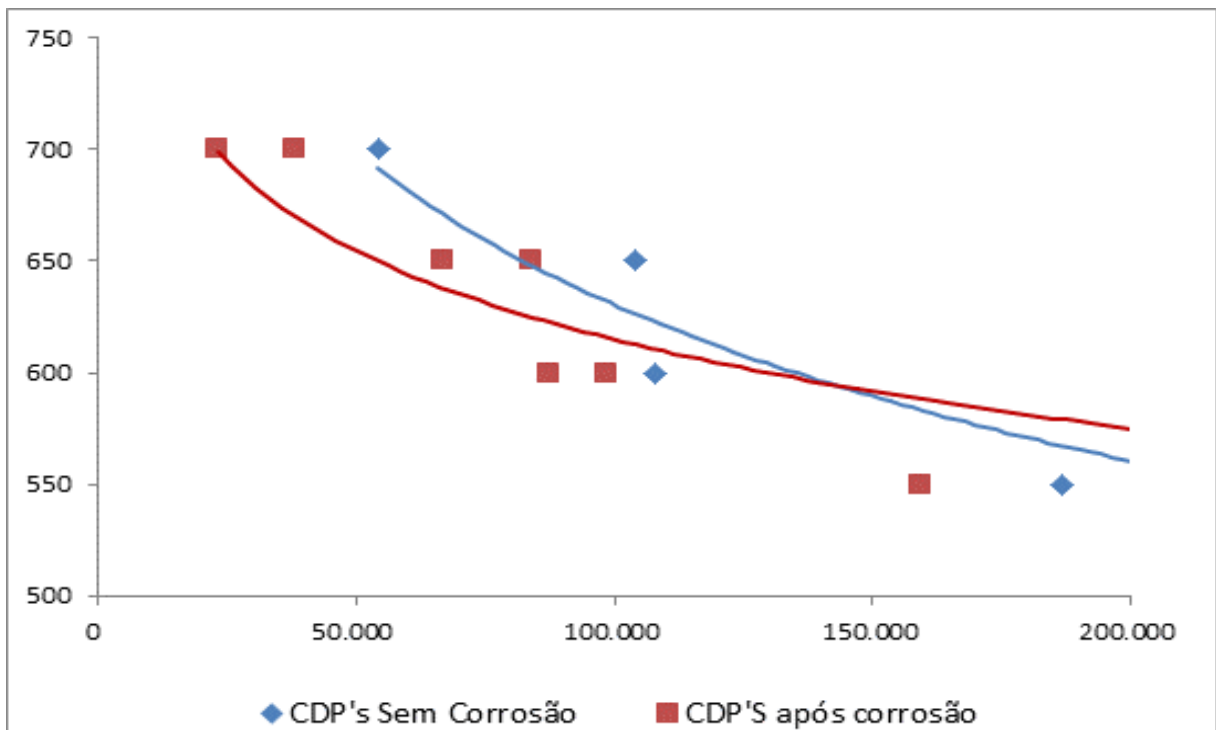


Fonte: autoria própria

Ao se comparar a curva da vida em fadiga do material com e sem a presença de corrosão, pode-se notar que houve uma significativa redução no número de ciclos suportados nos corpos de prova corroídos, principalmente para tensões mais altas, como se pode observar no detalhamento do gráfico, na Figura 36. Esse comportamento era esperado, pois, conforme demonstraram as análises de variação de massa e o ensaio de rugosidade, citados anteriormente, houve uma redução na seção útil do material e um aumento na rugosidade superficial do mesmo, fatores que tendem a contribuir com uma menor vida em fadiga.

Houve ainda dois casos com comportamento esperado, onde o CDP 8, corroído e ensaiado a 550 MPa, apresentou uma vida em fadiga um pouco maior que o CDP sem corrosão, ensaiado na mesma tensão. E o CDP 9, corroído e ensaiado a 490 MPa, não se rompeu, de forma que o ensaio foi interrompido aos $1,2 \times 10^6$ ciclos. Considerando o número de corpos de prova analisados, esses resultados, principalmente o do CDP 9, influenciaram bastante na curva da vida em fadiga do material corroído. Ambos os casos foram investigados através de microscopia eletrônica de varredura.

Figura 36 – Detalhamento Curva de Fadiga



Fonte: autoria própria

5.4 ENSAIO DE DUREZA

Na Tabela 11, encontram-se os resultados do ensaio de microdureza, e a Figura 37 mostra o desenho esquemático dos resultados. A medição primária foi feita em escala de dureza *Vickers* (HV), porém, para efeito de comparação com a norma, listada na Tabela 1, foi feita a conversão para escala *Brinell*, conforme a norma ASTM E140-07, para aços não austeníticos.

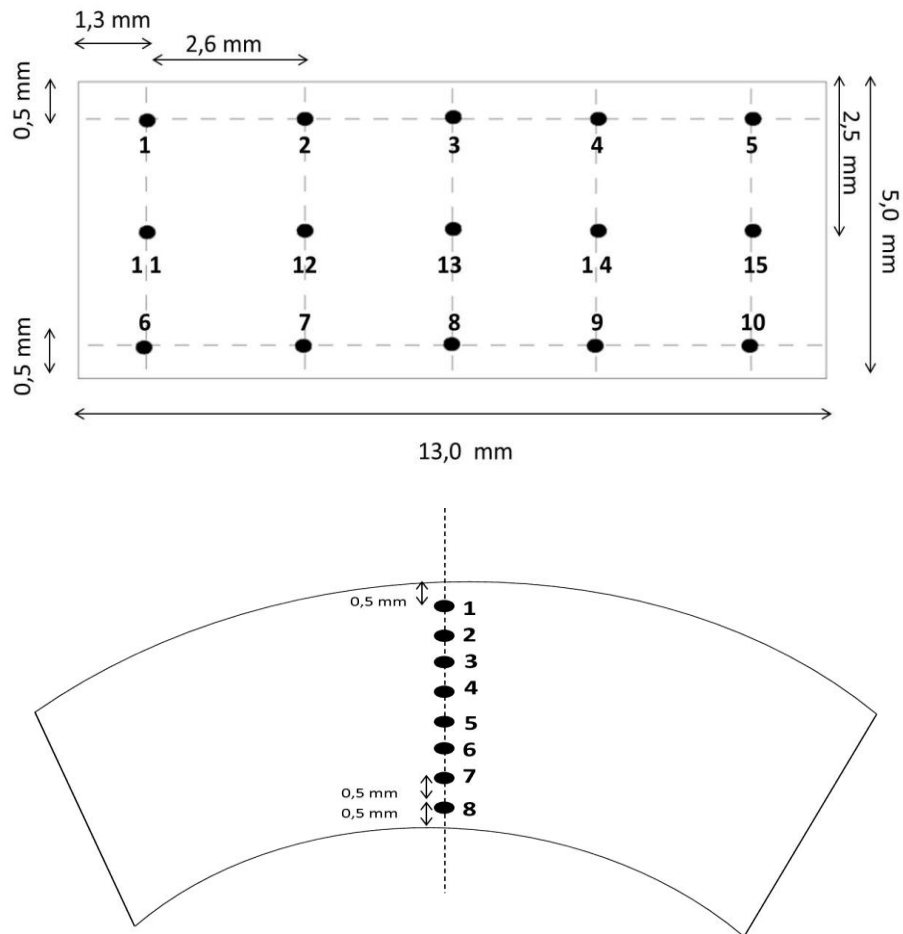
Tabela 11 – Resultados Ensaio de Microdureza

CDP Longitudinal	Dureza (HV)	Dureza (HB)
1	157	156
2	153,2	154
3	155,5	155
4	152,3	154
5	154,9	155
6	154	155
7	148,1	148
8	153,3	154
9	156	155
10	160,8	160
11	135,7	133
12	139,6	137
13	150,8	151
14	139,2	137
15	143,3	140
Média	150,2	149,6
Desvio Padrão	± 7,2	± 8,2

CDP Transversal	Dureza (HV)	Dureza (HB)
1	172,9	167
2	174,3	169
3	174,1	169
4	191,9	191
5	169,4	167
6	161,1	162
7	167,2	166
8	169,7	167
Média	172,6	169,8
Desvio Padrão	± 8,3	± 8,3

Fonte: autoria própria

Figura 37 – Desenho esquemático do Ensaio de Microdureza.



Fonte: autoria própria

Conforme orientam as normas de ensaios de fadiga, é sempre recomendado que seja feita uma avaliação de dureza no material, garantindo a qualidade das mesmas, frente as suas especificações. A norma ISO para aços API 5CT, apresentada na Tabela 1, apenas especifica um valor máximo de dureza, visando garantir um limite mínimo de tenacidade, de forma que não haja pontos demasiadamente fragilizados.

O limite máximo de dureza determinado pela norma é de 255 HB, o que está bastante acima dos valores medidos nas amostras, uma vez que a maior medida foi de 191,9 HB, o que enquadra o material nas especificações.

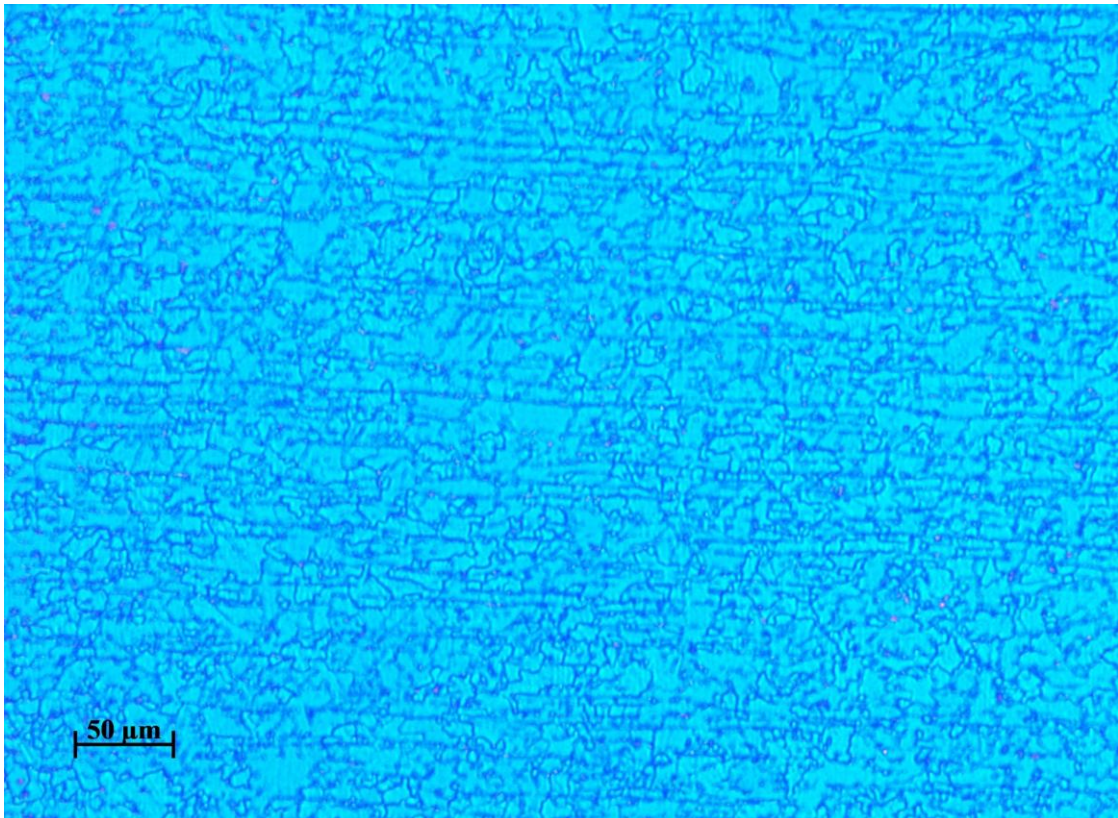
Outro ponto que o ensaio de dureza destacou foi a anisotropia presente entre o sentido transversal e o sentido longitudinal do tubo, sendo que todos os valores de dureza medidos no

corpo de prova transversal foram maiores que os valores medidos no corpo de prova longitudinal. Isso ocorre devido às tensões a que o material foi submetido desde o processo de laminação da chapa até a conformação do tubo.

5.5 MICROSCOPIA

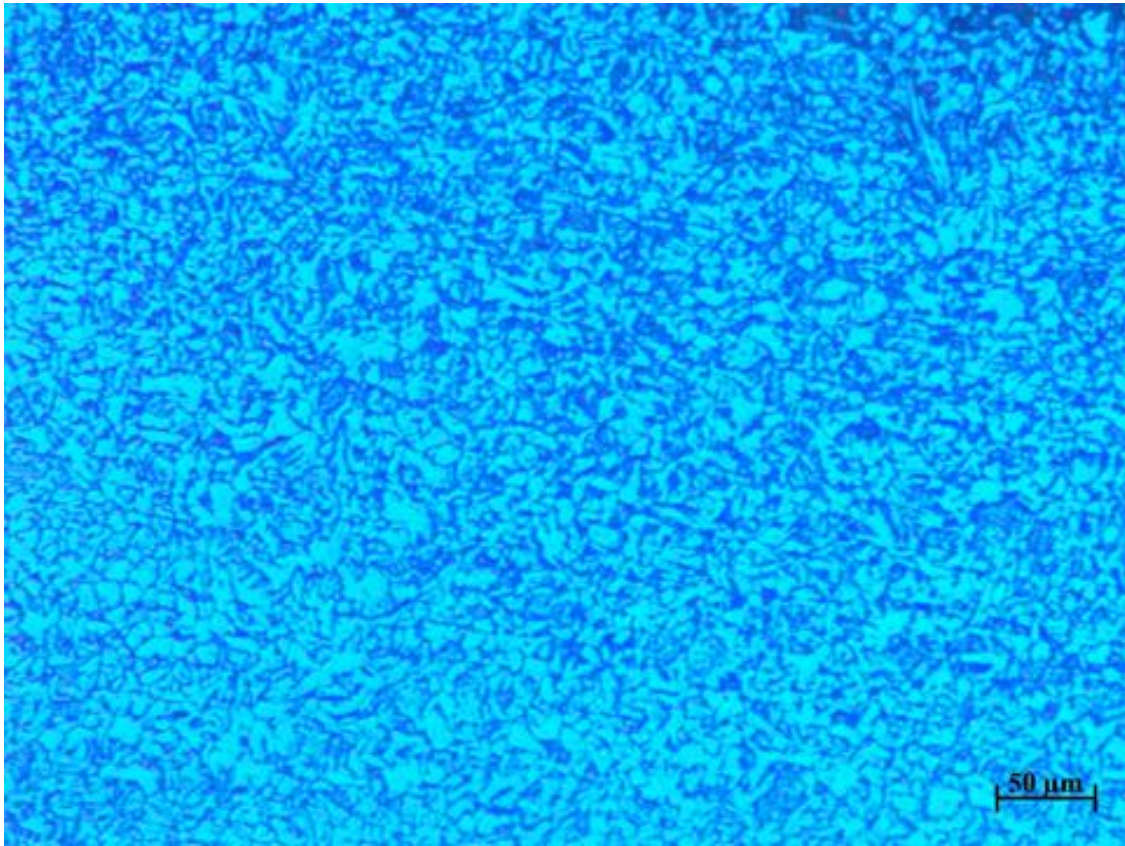
Nas Figuras 38 e 39 foram obtidas através de microscopia óptica, sob uma lente com um aumento de 10x. A imagem, que foi manipulada e possui uma cor artificial para melhorar a visualização, mostra que a estrutura do material é composta por uma matriz ferrítica e colônias de martensita.

Figura 38 – Microscopia óptica, aumento de 10x – CDP Longitudinal



Fonte: autoria própria

Figura 39 – Microscopia óptica, aumento de 10x – CDP Transversal



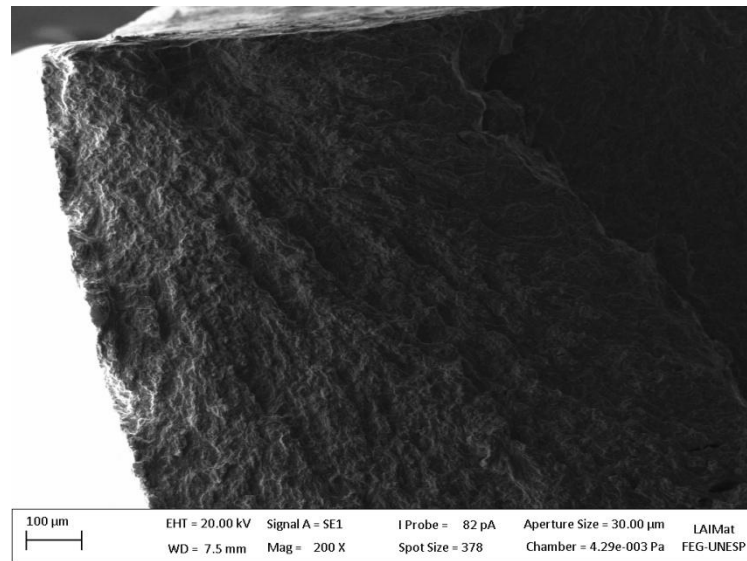
Fonte: autoria própria

A comparação entre as duas micrografias reforça a anisotropia observada no ensaio de dureza. No corpo de prova transversal ao eixo do tubo, podemos perceber que há certo alinhamento nas colônias de martensita (textura bandada), enquanto no corpo de prova longitudinal, não há qualquer organização ou direcionamento.

5.5.1 Microscopia Eletrônica De Varredura

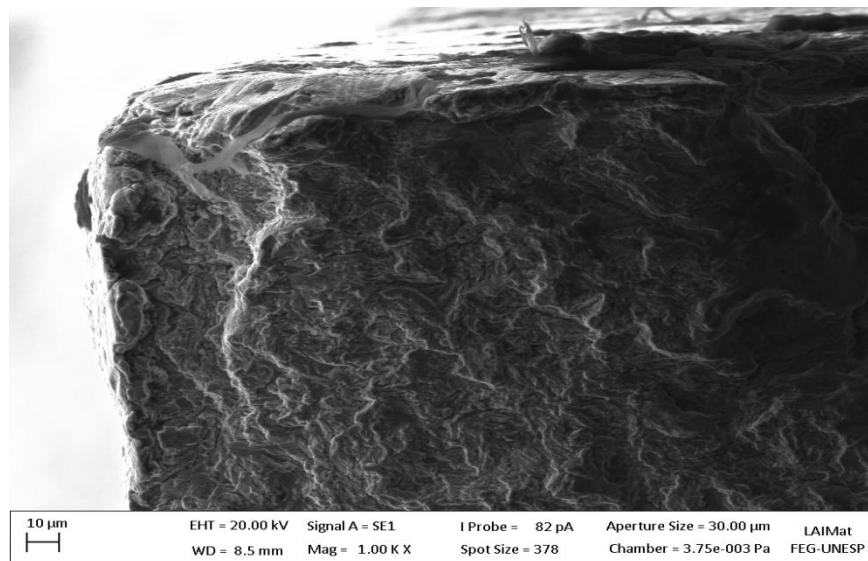
Com o auxílio do microscópio eletrônico de varredura é possível observar na Figura 40 e Figura 41 com tensão de 400 MPa, na Figuras 42 e Figura 43 com tensão de 550MPa, onde a trinca foi nucleada e originou-se no rompimento da amostra.

Figura 40 – Zona de nucleação da trinca originada na superfície da amostra com tensão de 400MPa, obtida através do microscópio eletrônico de varredura com aumento de 200X.



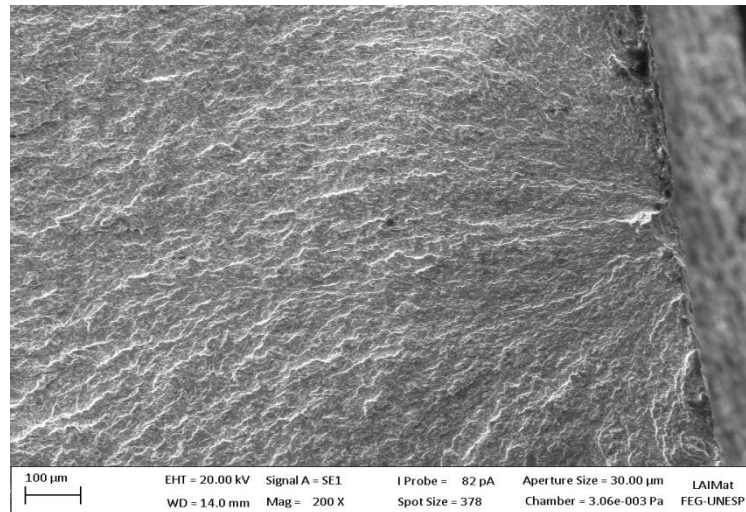
Fonte: autoria própria

Figura 41 – Zona de nucleação da trinca originada na superfície da amostra com tensão de 400MPa, obtida através do microscópio eletrônico de varredura com aumento de 1000X.



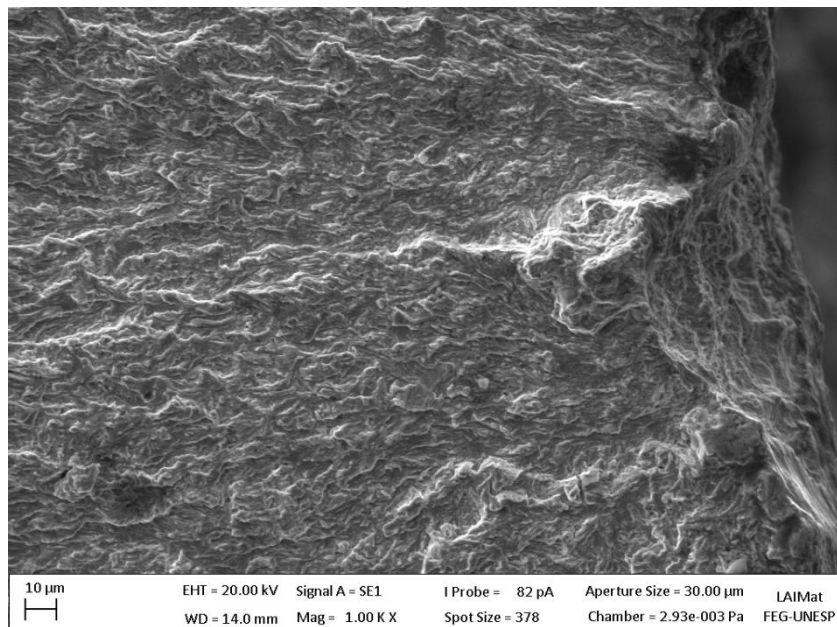
Fonte: autoria própria

Figura 42 – Zona de nucleação da trinca originada na superfície da amostra com tensão de 550MPa, obtida através do microscópio eletrônico de varredura com aumento de 200X.



Fonte: autoria própria

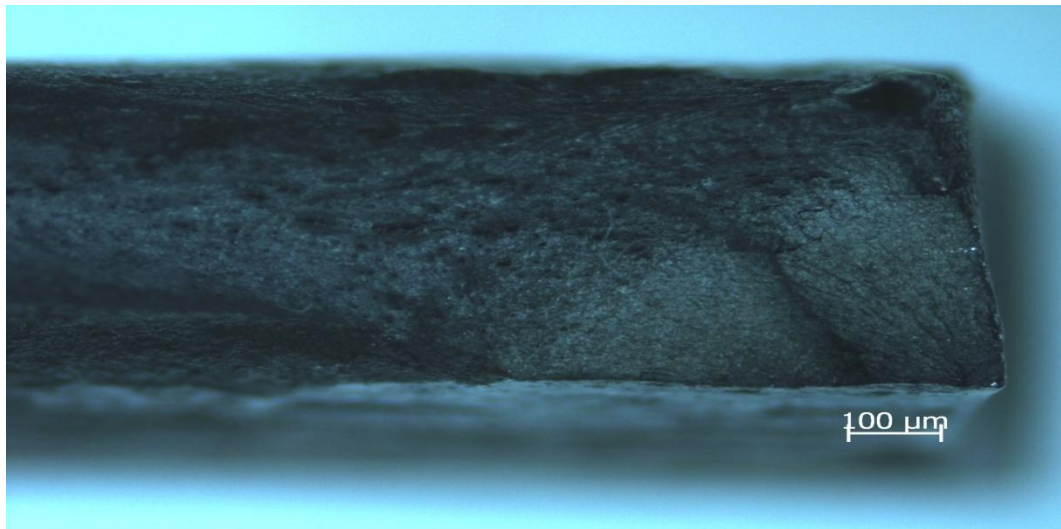
Figura 43 – Zona de nucleação da trinca originada na superfície da amostra com tensão de 550MPa, obtida através do microscópio eletrônico de varredura com aumento de 1000X.



Fonte: autoria própria

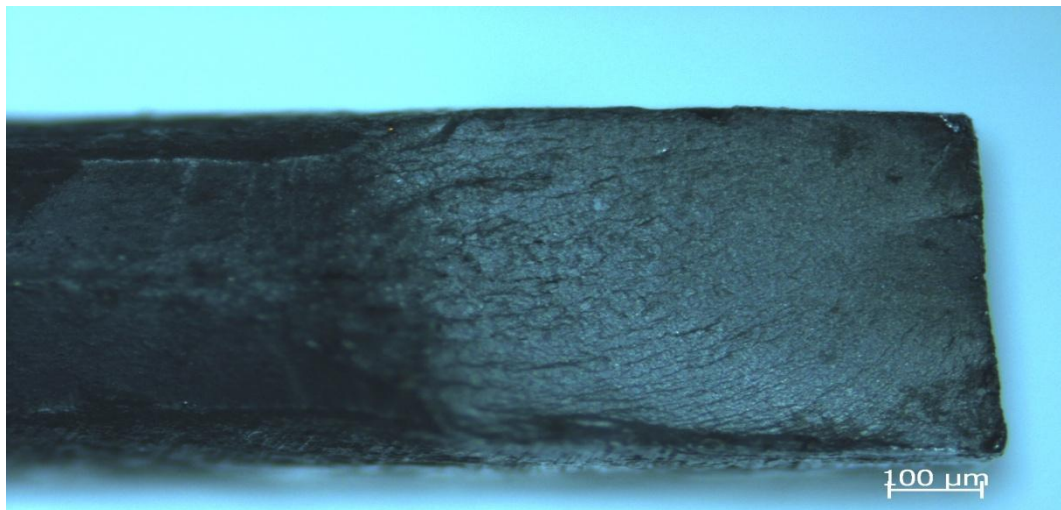
Através da Figura 44 e da Figura 45, com o auxílio do microscópio Stemi 2000 com um aumento de 40x as regiões da trinca de fadiga na superfície de cada cdp submetido a tensões de 400 MPa e 550 MPa respectivamente.

Figura 44 – Região de propagação da trinca de fadiga com aumento de 40x para tensão de 400 MPa



Fonte: autoria própria

Figura 45 - Região de propagação da trinca de fadiga com aumento de 40x para tensão de 550 MPa



Fonte: autoria própria

6 CONCLUSÃO

A fadiga é o maior causador de falhas em estruturas de engenharia e isso ocorre por conta de sua baixa previsibilidade e pelo fato do fenômeno poder ocorrer em tensões menores que as de resistência estática do material. Os tubos utilizados na prospecção de petróleo também estão expostos à fadiga que, no caso, é fruto das tensões cíclicas decorrentes das vibrações causadas por vórtices (VIV's) liberados conforme a água do mar se movimenta ao redor dos tubos. Um fator agravante é a salinidade da água do mar que torna o ambiente marinho um meio bastante corrosivo, podendo causar oxidação nos tubos, alterando suas características superficiais e reduzindo sua vida em fadiga.

Os ensaios de fadiga revelaram, como esperado, uma redução no número de ciclos suportados pelos corpos de prova corroídos, principalmente em tensões mais altas, fato que pode ser justificado pelo aumento nos parâmetros de rugosidade do material, o que acelera o processo de nucleação da trinca e reduz sua vida em fadiga.

A partir dos ensaios realizados com os corpos de prova com e sem corrosão, foi verificado que a menor tensão na qual será observada falha por fadiga no material será por volta de 350 MPa, tensão bastante superior àquelas provocadas pelas VIV's, que não passam dos 250 MPa. Com isso, dadas as condições utilizadas em laboratório, o tubo em questão está apto para aplicações *offshore*.

O material do tubo foi totalmente corroído na câmara de *salt-spray* e, apesar de ter mostrado um aumento em sua rugosidade superficial, não apresentou nenhum concentrador de tensão significativo em sua superfície, uma vez que a corrosão em todos os corpos de prova se deu de forma homogênea. A camada de óxido formada se mostrou aderente ao metal de base e não solúvel em água, tendo sido removida apenas com a aplicação de solução própria para esse fim. Além desses dois indícios, o fato do material possuir o cromo como principal elemento de liga, mostra que o tubo tem boa resistência à corrosão.

Com as imagens obtidas através do microscópio eletrônico de varredura (MEV) e pelo microscópio Stemi 2000, pode-se concluir que o tipo de corrosão presente nos corpos de prova foi do tipo alveolar, o que não induz alta concentração de tensão comparada à corrosão por pite com conseqüente menor dano à resistência à fadiga do material, como constatado.

O ensaio de microdureza atestou que o material se enquadra nas especificações da norma API e ainda mostrou que a estrutura do material é anisotrópica nos sentidos longitudinal e

transversal do tubo, o que foi confirmado pela microscopia óptica ao se observar a diferença no formato e organização dos grãos nesses dois sentidos. Essa anisotropia é consequência das tensões internas do material geradas na etapa de laminação da chapa e na conformação da chapa laminada em tubo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 11960**: Petroleum and natural gas industries: steel pipes for use as casing or tubing for wells. Rio de Janeiro, 2014.

ALVERTINI, J.A. **Estudo da influência da corrente alternada na corrosão em dutos metálicos enterrados**, 2008. Disponível em: <<http://maua.br/files/dissertacoes/estudo-da-influencia-da-corrente-alternada.pdf>>. Acesso em: 30 ago. 2016.

API - SPECIFICATION 5CT, Eighth edition, 2005, **ISO 11960:2004**, Petroleum and Natural Gas Industries – Steel Pipes for use as casing or tubing for wells. Washington, DC, 2005.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. G1-03 - **Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens**. In: Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, 1997.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **B117-11 - Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus**. Philadelphia, 1997.

COELHO, P. **Diferentes tipos de formas de corrosão**, 2015. Disponível em: <<http://www.engquimicasantosp.com.br/2015/06/diferentes-tipos-e-formas-de-corrosao.html>>. Acesso em: 30 ago. 2016.

DIETER, G. E. **Metalurgia mecânica**, 2. ed. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois, 1981. 348 p.

EFUNDA. **High-Cycle fatigue**. Disponível em: <http://www.efunda.com/formulae/solid_mechanics/fatigue/fatigue_highcycle.cfm>. Acesso em: 04 jul. 2016.

FERREIRA, J. C. E. **Parâmetros de rugosidade**. 2013. 79 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2013.

GENTIL, V. **Corrosão**. 6. ed. Rio de Janeiro: Editora GEN, 2012.

GUIMARÃES, V. A. **Ensaio de fadiga**. 2014. 90 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia de Materiais) – Faculdade de Engenharia do campus de Guaratinguetá Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014.

IPEA. **Perspectiva de desenvolvimento do setor de petróleo no Brasil**, 2010. Disponível em: <http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/3820/1/Comunicados_n55_Perspectivas.pdf>. Acesso em: 30 ago. 2016.

Laboratório Tork. **Tork – controle tecnológico de materiais ltda**. Disponível em: <<http://www.laboratorios-tork.com.br/fotosme.asp>>. Acesso em: 04 jul. 2016.

LIMA, A. J. **Análise de dutos submarinos sujeitos a vibrações induzidas por vórtices**. 2007. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

LOPES, R. D. K. **Análise de estruturas sujeitas a vibrações induzidas por vórtices**. 2006. 10 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

MARINE DIESELS. **Informações operacionais sobre fadiga**. Disponível em: <http://www.marinediesels.info/2_stroke_engine_parts/Other_info/fatigue.htm>. Acesso em: 04 jul. 2016.

MELO, L. C. R. **Desenvolvimento de tubo ARBL contendo 1Cr 0,2Mo fabricado pelo processo ERW/HF destinado à indústria de petróleo e gás**. 2013. 135f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2013.

MOREIRA, L. F. **Otimização da manutenção em plataformas *offshore* de exploração e produção de petróleo,** 2013. Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10008649.pdf>> Acesso em: 30 ago. 2016.

PORTO, G. **Potenciais de oxi-redução.** Disponível em: <<http://www.agracadaquimica.com.br/index.php?&ds=1&acao=quimica/ms2&i=6&id=181>> . Acesso em: 30 ago. 2016.

RAINHA, D.A.R. **Estudo do comportamento em fadiga de um tubo de aço API 5CT soldado por resistência elétrica** 2013. 57 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia de Materiais) – Faculdade de Engenharia do campus de Guaratinguetá Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2013.

SANTOS JUNIOR, A. A. **Fadiga em materiais metálicos.** ELEMAQ1, 2000. Disponível em: <<http://www.fem.unicamp.br/~lafer/em618/pdf/FADIGA%20Continuacao.pdf>>. Acesso em: 29 jun. 2016.

SENAI. **Programa de certificação operacional CST: tubulação industrial e estrutura metálica,** 2010. Disponível em: <<http://www.engbrasil.eng.br/pp/em/aula11.pdf>> . Acesso em: 29 jun. 2016.

SOUZA, A. J. **Processos de fabricação por usinagem,** 2011. Porto Alegre: Escola de Engenharia Mecânica da UFRGS, 2011, p 80-81. (Apostila didática).

TENARIS. **Tubos para o mercado industrial:** catálogo industrial. São Paulo: Empresa Tenaris S.A, 2010.