

UNESP  
Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá

Guaratinguetá  
2013

Universidade Estadual Paulista  
Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá  
Departamento de Materiais e Tecnologia

DANIEL AUGUSTO RAINHA ROLANDO

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO EM FADIGA DE UM  
TUBO DE AÇO API 5CT SOLDADO POR RESISTÊNCIA  
ELÉTRICA**

Guaratinguetá  
2013

Universidade Estadual Paulista  
Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá  
Departamento de Materiais e Tecnologia

DANIEL AUGUSTO RAINHA ROLANDO

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO EM FADIGA DE UM  
TUBO DE AÇO API 5CT SOLDADO POR RESISTÊNCIA  
ELÉTRICA**

Trabalho de graduação apresentado ao  
Conselho de Curso de Graduação em  
Engenharia Mecânica da Universidade  
Estadual Paulista como parte dos  
requisitos para obtenção do diploma de  
Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Marcelino Pereira do Nascimento

Guaratinguetá  
2013

|       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| R744e | <p>Rolando, Daniel Augusto Rainha</p> <p>Estudo do comportamento em fadiga de um tubo de aço API 5CT soldado por resistência elétrica / Daniel Augusto Rainha Rolando – Guaratinguetá : [s.n], 2013.</p> <p>57 f : il.</p> <p>Bibliografia: f. 53-55</p> <p>Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2013.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Marcelino Pereira Nascimento</p> <p>1. Aço – Fadiga 2. Petróleo – Transporte 3. I. Título</p> <p>CDU 620.178.3</p> |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO EM FADIGA DE UM TUBO DE AÇO API  
5CT SOLDADO POR RESISTÊNCIA ELÉTRICA**

**DANIEL AUGUSTO RAINHA ROLANDO**

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE  
DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE "GRADUADO EM  
ENGENHARIA MECÂNICA"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. ANTÔNIO WAGNER FORTI  
Coordenador

**BANCA EXAMINADORA:**

  
Prof. Dr. MARCELINO PEREIRA DO NASCIMENTO  
Orientador/UNESP-FEG

  
Eng. MSc. RENATO BARROS  
UNESP-FEG

  
Eng. RODOLFO ALVES DE OLIVEIRA  
Apolo Tubulars S.A.

Dezembro de 2013

Dedico este trabalho ao meu avô Orlando Rolando, que com sua simplicidade e bom humor me ensinou todos os valores que um homem de bem deve ter, assim como a importância da educação em nossa vida.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Sérgio e Marta, pela oportunidade da vida e pelas cobranças de boas notas e educação, meus pilares de sustentação;

à minha grande companheira, Raiane, pela paciência, amor, dedicação e companheirismo, sempre confiando em meu potencial;

a todos os meus avós (incluindo a Cida e o Zé Bento), meus primos e aos tios Ricardo, Pedro, Eliane, Alexandre, Adriana, Marco, Júlio, pela educação, carinho, afeto e amor, ajudando meus pais na minha criação sempre que puderam;

aos meus grandes amigos, em especial ao Jonas, Simone, André, Carla, Pedro, Luciana, Leonardo, Diego, Augusto e Gabriel, sempre ao meu lado, cuidando de meus momentos de descontração;

aos meus irmãos Danilo e Fernanda, que me ensinaram a amar as pessoas, passando por cima das diferenças, mesmo que sejam grandes;

às crianças que coloreem meus dias: meu sobrinho Henrique, meu priminho Vinícius e minha irmã Ana Clara;

ao meu Orientador Prof. Dr. Marcelino P. Nascimento, por sempre me atender de portas abertas em sua sala, me ajudando no que fosse preciso;

à empresa Apolo Tubulars S/A, por gentilmente ceder os materiais utilizados neste trabalho e pelo tempo de aprendizado durante meu período de seis anos como técnico;

aos colegas Walker e Gustavo, pelo apoio na elaboração das amostras;

aos técnicos do DMT, em especial ao Odir Vieira e ao Manoel Francisco, pela usinagem das amostras e posterior execução dos ensaios;

ao Prof. Dr. Rogério Hein, pelo apoio nas imagens do microscópio óptico e pelas imagens fornecidas do MEV e ao colega Renato Barros, por aceitar o convite e participar de minha banca avaliadora;

ao meu amigo Rodolfo, que me ensinou muito, inclusive a gostar da área de Petróleo e Gás, além do apoio que sempre me deu;

ao meu companheiro de faculdade e de vida Roberto Davi (BG), que com o churrasco e o bom humor dele me ajudou a suportar a barra de trabalhar e estudar;

à minha madrastra Shirley, que dedicou anos de sua vida em prol da educação minha e de meus irmãos;

à Nice e à Rita, por sempre me acolherem como um filho e ao meu padasto Orlando, pelo exemplo de homem batalhador;

ao meu grande amigo Bruno, que infelizmente não viu a conclusão deste trabalho e minha graduação, mas que sempre me apoiou enquanto em vida;

à minha madrinha coruja, Márcia, e à minha tia Dayse, que nunca me negaram socorro, sempre prontas para ajudar com qualquer problema;

em especial à minha avó Alayde, que é avó, mãe, amiga, dona de um coração tão grande que somos incapazes de medir;

e por fim agradeço a Deus, por dar força para continuar e paciência para nunca desistir.

"Eu posso não ter ido para onde eu pretendia ir, mas acho que acabei terminando onde eu pretendia estar".

Douglas Adams



Rolando, D. A. R. **Estudo do comportamento em fadiga de um tubo de aço API 5CT soldado por resistência elétrica.** Guaratinguetá, 2013. 57 p. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista.

## **RESUMO**

A extração de petróleo em águas profundas despertou novas áreas de conhecimento, a criação de cursos de engenharia dedicados apenas a estes processos e um vasto campo de análise, para evitar os mais variados impactos em caso de falhas, principalmente os econômicos e os ambientais. Este trabalho tem por finalidade analisar a susceptibilidade de falhas por fadiga em tubos de aço utilizados para transporte de petróleo e gás, principalmente aquelas causadas pelas vibrações induzidas por vórtices, ou VIV. Para a realização deste estudo, foram verificadas as tensões através da curva de Tensão x Número de Ciclos, através dos ensaios em laboratório, e assim o resultado obtido foi, que para tensões menores ou iguais a 350 MPa, a vida útil (vida em fadiga) do tubo API 5CT T95 (1%Cr) é estimada infinita. Pôde-se concluir com estes resultados que o material analisado possui boa resistência à fadiga para utilização *offshore*, levando-se em conta apenas a influência das VIV's, desde que não existam concentradores de tensão.

**Palavras-chave:** Vibrações Induzidas por Vórtices, transporte de petróleo e gás, falha por fadiga.

Rolando, D. A. R. **Estudo do comportamento em fadiga de um tubo de aço API 5CT soldado por resistência elétrica.** Guaratinguetá, 2013. 57 p. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista.

## **ABSTRACT**

The oil extraction in deep waters sparked new areas of knowledge, the creation of engineering courses dedicated just to these processes and a wide field of analysis avoiding multiple impacts in case of faults, mainly the economic and environmental. This paper aims to show on the effects and causes of fatigue failure in steel tubes used for oil and gas transportation (linepipe), mainly caused by vortex induced vibrations, or VIV. To make this, through laboratory tests, it found trough the curve Stress versus Number of Cycles, and thus estimating that with a stress value of 350 MPa or less, the fatigue life cycle of the API 5CT T95 (1% Cr) pipe is estimated infinite. It could conclude that the analyzed material has good fatigue failure resistance for offshore use, taking into account only the influence of VIV's, since there are no stress concentrators.

**Keywords:** Vortex Induced Vibrations, oil and gas linepipe, fatigue failure

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Formação de tubos através de rolos conformadores .....                        | 18 |
| Figura 2 – Tipos de solda por resistência elétrica .....                                 | 19 |
| Figura 3 – Junção de bordas da tira, solda do tubo (sem metal de adição) .....           | 19 |
| Figura 4 – Esquema de união por indução de alta frequência .....                         | 20 |
| Figura 5 – Esquema de solda por indução de alta frequência .....                         | 21 |
| Figura 6 - Biela e manivela.....                                                         | 22 |
| Figura 7 - Eixo de um vagão .....                                                        | 22 |
| Figura 8 - Tensões atuantes no ponto A do eixo do vagão.....                             | 24 |
| Figura 9 - Tensão alternada .....                                                        | 24 |
| Figura 10 - Tensão flutuante.....                                                        | 25 |
| Figura 11 - Esquema de máquina de ensaio de fadiga de flexão rotativa .....              | 26 |
| Figura 12 - Curva $\sigma$ -N para metais ferrosos e ligas de titânio .....              | 27 |
| Figura 13 - Estágios da nucleação .....                                                  | 28 |
| Figura 14 - Processo de avanço de trinca por fadiga.....                                 | 29 |
| Figura 15 - Macroestruturas do aspecto da fratura de fadiga .....                        | 30 |
| Figura 16 - Esteira de vórtices sobre um cilindro circular .....                         | 31 |
| Figura 17 - Camada limite .....                                                          | 32 |
| Figura 18 - Relação entre o número de Reynolds e a formação da esteira de vórtices ..... | 33 |
| Figura 19 - Escoamento ao longo de um cilindro.....                                      | 34 |
| Figura 20 - Par de vórtices estacionários.....                                           | 34 |
| Figura 21 - Tubo API 5CT T95 - Rastreabilidade QU939 - Apolo Tubulars S/A .....          | 37 |
| Figura 22 - Diâmetro do tubo Ø2 7/8" x 5,50mm de espessura .....                         | 37 |
| Figura 23 - Corpo de prova para análise de vida em fadiga conforme norma ASTM E466 ..... | 38 |
| Figura 24 - Corpo de prova para análise de vida em fadiga conforme norma ASTM E466 ..... | 39 |
| Figura 25 - Máquina Universal de Ensaio Instron 8801 .....                               | 40 |
| Figura 26 - Extensômetro da máquina Instron 8801 .....                                   | 40 |
| Figura 27 - Resultados de Tração - LE e LR.....                                          | 42 |
| Figura 28 - Resultados do ensaio de fadiga.....                                          | 43 |
| Figura 29 - Imagem retirada do MEV a 500 vezes .....                                     | 45 |
| Figura 30 - Imagem retirada do MEV a 50 vezes .....                                      | 46 |
| Figura 31 - Imagem retirada do MEV a 10000 vezes.....                                    | 47 |
| Figura 32 - Imagem retirada do MEV a 5000 vezes .....                                    | 48 |
| Figura 33 - Imagem retirada do MEV a 2000 vezes .....                                    | 49 |
| Figura 34 - Micrografia com aumento de 75 vezes, sem ataque químico .....                | 50 |
| Figura 35 - Micrografia com amplitude de 50 vezes, Aço API 5CT T95 .....                 | 51 |
| Figura 36 - Micrografia com aumento de 100 vezes, Aço API 5CT T95 .....                  | 51 |

## **LISTA DE TABELAS**

|                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 - Composição química do tubo .....                                      | 38 |
| Tabela 2 - Resultados do ensaio de fadiga .....                                  | 43 |
| Tabela 3 - Vida útil dos tubos (dados estimados utilizados pela Petrobras) ..... | 44 |

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

|      |                                                |
|------|------------------------------------------------|
| API  | American Petroleum Institute                   |
| ASTM | American Society for Testing and Materials     |
| CEPA | Centro de Estudos e Pesquisa Avançada - USP    |
| DNV  | Det Norske Veritas                             |
| EU   | External upset end (com ponta recalçada)       |
| ERW  | Electric Resistance Welding                    |
| HFIW | High Frequency Induction Welding               |
| HSS  | High Strength Steel                            |
| NU   | Non upset (sem ponta recalçada)                |
| ISO  | International Organization for Standardization |
| LE   | Limite de Escoamento                           |
| LR   | Limite de Resistência                          |
| MME  | Ministério de Minas e Energia                  |
| VIV  | Vibração Induzida por Vórtices                 |

## SUMÁRIO

|                                                                                 |           |
|---------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO.....</b>                                                        | <b>15</b> |
| 1.1 Considerações gerais .....                                                  | 15        |
| 1.2 Processo de fabricação de tubos ERW/HFIW .....                              | 16        |
| 1.3 Objetivos.....                                                              | 17        |
| <b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>                                            | <b>18</b> |
| 2.1 Tubos soldados por indução .....                                            | 18        |
| 2.2 Fadiga .....                                                                | 21        |
| 2.2.1 Tipos de tensões cíclicas .....                                           | 24        |
| 2.2.2 Resultados do ensaio de fadiga: Curva $\sigma$ -N .....                   | 26        |
| 2.2.3 Mecanismo da falha por fadiga .....                                       | 27        |
| 2.2.3.1 Nucleação da trinca .....                                               | 28        |
| 2.2.3.2 Propagação da trinca.....                                               | 28        |
| 2.2.3.3 Falha catastrófica .....                                                | 29        |
| 2.3 Vibrações Induzidas por Vórtices – VIV .....                                | 31        |
| 2.3.1 Introdução.....                                                           | 31        |
| 2.3.2 Formação dos vórtices .....                                               | 33        |
| 2.3.3 Principais problemas acarretados pelo fenômeno de VIV .....               | 34        |
| 2.4 Fadiga em dutos submarinos e estruturas offshore.....                       | 35        |
| 2.4.1 Avaliação da influência da temperatura .....                              | 35        |
| <b>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>                                              | <b>37</b> |
| 3.1 Materiais .....                                                             | 38        |
| 3.1.1 Corpos de prova para Vida em Fadiga .....                                 | 38        |
| 3.1.2 Composição química .....                                                  | 38        |
| 3.1.3 Corpo de prova de Tração .....                                            | 39        |
| 3.1.4 Amostras para metalografia.....                                           | 39        |
| 3.2 Métodos .....                                                               | 39        |
| 3.2.1 Ensaio de fadiga.....                                                     | 39        |
| 3.2.2 Ensaio de tração.....                                                     | 40        |
| 3.2.3 Análise Metalográfica .....                                               | 41        |
| 3.2.4 Análise de Superfícies de Fratura.....                                    | 41        |
| <b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>                                           | <b>42</b> |
| 4.4 Ensaio de tração.....                                                       | 42        |
| 4.1 Resultados do ensaio de vida em fadiga .....                                | 43        |
| 4.2 Resultados do MEV .....                                                     | 45        |
| 4.3 Resultados metalográficos .....                                             | 50        |
| 4.3.1 Verificação de inclusões a base de óxido globular.....                    | 50        |
| 4.3.2 Verificação do contorno de grão e composição estrutural do material ..... | 50        |
| <b>5 CONCLUSÕES.....</b>                                                        | <b>52</b> |
| <b>6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>                                       | <b>53</b> |
| <b>ANEXO 1 – Corpo de prova para ensaio de Tração ASTM E8.....</b>              | <b>56</b> |
| <b>ANEXO 2 – Corpo de prova para ensaio de Vida em Fadiga ASTM E466.....</b>    | <b>57</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 Considerações gerais

O petróleo é conhecido desde a antiguidade, utilizado principalmente no Oriente Médio. No início da era cristã, os árabes já utilizavam o petróleo com fins bélicos e para iluminação. O petróleo de Baku, no Azerbaijão, já era produzido em escala comercial, para os padrões da época, quando Marco Polo viajou pelo norte da Pérsia, em 1271 (CEPA, 2000).

O início da extração em massa, data de meados do Século XIX. Em 1850, na Escócia, James Young descobriu que o petróleo podia ser extraído do carvão e xisto betuminoso, e criou os processos de refinação. Em agosto de 1859 o americano Edwin Laurentine Drake, perfurou o primeiro poço para a procura do petróleo, na Pensilvânia (YERGIN, 2010). Esta data passou a ser considerada como um marco, sendo o nascimento da indústria petrolífera moderna.

A partir de então, houve um aumento considerável na produção de petróleo, principalmente nos Estados Unidos: de dois mil barris em 1859, aumentou para aproximadamente três milhões em 1863, e para dez milhões de barris em 1874. Com a atuação do empresário John D. Rockefeller, os Estados Unidos dominavam a extração e o comércio do petróleo no final do Século XIX, início do Século XX.

Nos dias atuais, é difícil tentar imaginar o mundo sem o petróleo, mesmo sendo uma fonte de energia não renovável em um curto período de tempo, afinal a grande maioria dos meios de transporte dependem de derivados do petróleo para funcionamento, sem considerar ainda as aplicações nas inúmeras áreas industriais (geração de energia elétrica, combustível para máquinas operatrizes etc.) e também de seus subprodutos, como a parafina e o piche por exemplo.

Cerca de 90% do petróleo é utilizado com fins energéticos, seja nas centrais termelétricas, seja como combustível para os meios de transporte ou fornos industriais (MME, 2006). Dos 10% restantes, são extraídos os produtos que abastecerão as indústrias – 60% das matérias-primas utilizadas na indústria mundial vêm do petróleo e todo este petróleo é transportado via tubos, geralmente de aço.

É difícil até de estimar quantos quilômetros de tubos são utilizados hoje ao longo do planeta, com a finalidade de transporte, extração e prospecção de petróleo, e muito tem se estudado com relação aos riscos ambientais e de segurança das populações que margeiam os dutos de transporte ou até mesmo as extrações *onshore*, levando em conta também os riscos ambientais de possíveis vazamentos *offshore*.

Uma pequena fissura em um tubo ao longo de um oleoduto (ou gasoduto) pode ter consequências drásticas, não só de riscos ambientais como também levando risco à vida das pessoas que trabalham ou moram próximas a esta malha de transporte.

Vale como exemplo um problema ocorrido em uma favela de Nairóbi, capital do Quênia, onde houve a explosão de um oleoduto ocorrida na manhã de 12 de Setembro de 2011, deixou pelo menos 75 mortos e dezenas de feridos (BBC, 2011). O acidente ocorreu depois do rompimento do oleoduto. No momento da explosão, centenas de moradores aproveitavam o vazamento para coletar combustível e, de acordo com testemunhas, a explosão foi provocada por uma brasa de cigarro.

Portanto, muitos problemas pequenos, mas difíceis de serem detectados, podem causar danos gravíssimos ao ecossistema, ou até mesmo levar risco à população.

Vários estudos vêm sendo realizados ao longo das últimas três décadas, com o intuito de melhorar a qualidade dos materiais utilizados nas confecções dos tubos, e também melhorar os processos de fabricação e acabamento.

## **1.2 Processo de fabricação de tubos ERW/HFIW**

Um dos processos de fabricação de tubos mais utilizados na atualidade é o de solda por indução, o qual produz-se tubos de aço carbono adequados para transmissão (*linepipe*) e exploração (*casing* e *tubing*) de gás e petróleo.

O processo envolve tiras de aço laminadas a quente e posteriormente conformadas a frio em rolos tracionados, gerando na saída do último rolo de conformação chapas conformadas no formato circular, porém, ainda não estão unidas, conforme a progressão da conformação as extremidades se aproximam, e através de dois efeitos elétricos, característicos do processo de soldagem por alta resistência, que são denominados; efeito pele e efeito proximidade, ou seja, quanto mais próximas à extremidade maior será a concentração de calor e quanto mais alta a resistência elétrica empregada preferencialmente



este calor se concentrará nas extremidades das bordas da chapa), que posteriormente são por uma combinação de aquecimento localizado pela resistência elétrica de alta frequência e a compressão dos rolos responsáveis pela união das extremidades à solda é concluída, basicamente por conformação, compressão e calor (sem uso de metal de adição). É um processo relativamente barato e confiável, sendo muito disseminado nos últimos anos, por precisar de plantas relativamente menores que as convencionais e pela facilidade de transformar tubos emendados em tubos muito semelhantes aos sem-costura, obviamente após tratamento térmico para atingir as propriedades necessárias. Este processo de soldagem atende aos requisitos da norma API 5CT, a qual normatiza os tubos de aço para uso como revestimento ou tubulação para poços, na área de petróleo e gás.

Estes tubos tem uma zona termicamente afetada na região da solda, e esta região concentra a maior parte dos problemas, porém a mesma é posteriormente temperada e revenida, e este efeito negativo praticamente se estingue.

### 1.3 Objetivos

Avaliar o comportamento dos tubos de aço API 5CT T95, ligados com cromo (1%Cr), soldados por resistência elétrica de alta frequência, utilizados na extração e transporte de petróleo e gás, quando submetidos a cargas cíclicas causadoras de falha por fadiga, simulando um ensaio de fadiga em laboratório.

Avaliar o efeito dos vórtices formados pelas marés que causam as cargas cíclicas geradoras da falha por fadiga, terão suas propriedades de tenacidade comprometidas, o que pode ser agravado no surgimento de fissuras e, conseqüentemente, causando rompimento.

Esta análise também abrange os tubos *onshore*, visto que existe também carga cíclica formada pelos vórtices dos fluidos internamente, pela vibração oriunda do solo e durante a instalação e transporte (por terra, ar e mar) dos tubos.

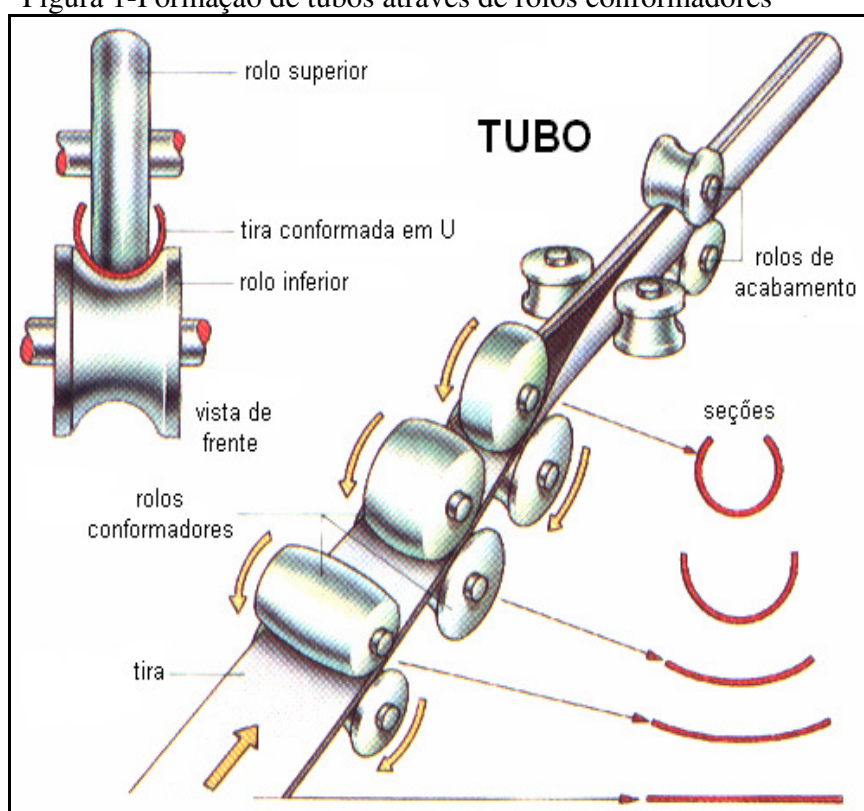
Depois de validados os ensaios, se positivos, propor utilização deste material (fabricado exclusivamente para extração) em tubos para transporte de óleo e gás (*linepipe*) em ambiente submarino, pois estes tubos sofrem contato externo direto às vibrações induzidas por vórtices, ao contrário dos tubos API 5CT, que geralmente são protegidos.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Tubos soldados por indução

O processo de solda de tubos por indução elétrica em alta frequência é iniciado através do processo de formação dos tubos, processo o qual a tira de aço é conformada a frio na forma de tubo através da ação dos rolos conformadores, Figura 1.

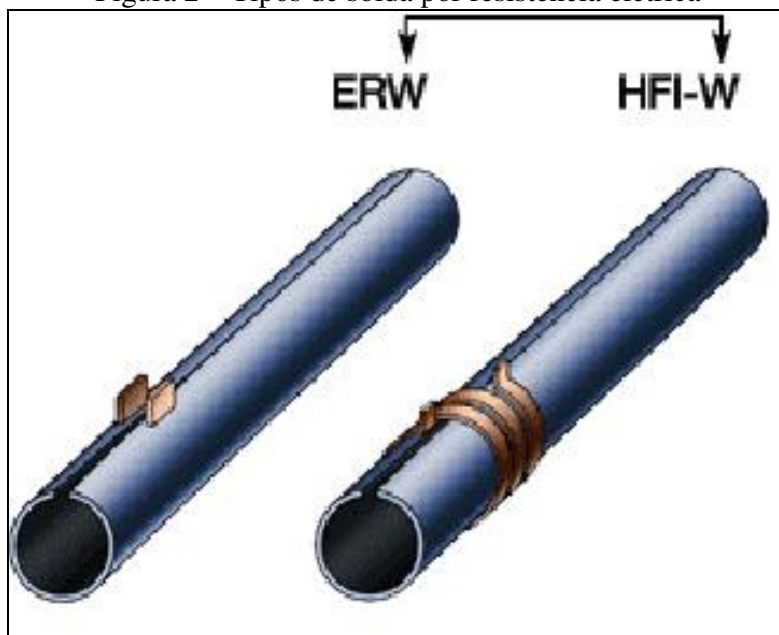
Figura 1-Formação de tubos através de rolos conformadores



Fonte: (APOLO, 2006)

Após a formação dos tubos de aço, os quais serão soldados através do processo ERW. Este processo de soldagem pode ser dividido em duas formas: por contato (ERW “puro”) ou por alta frequência, sem contato (HFIW), Figura 2.

Figura 2 – Tipos de solda por resistência elétrica

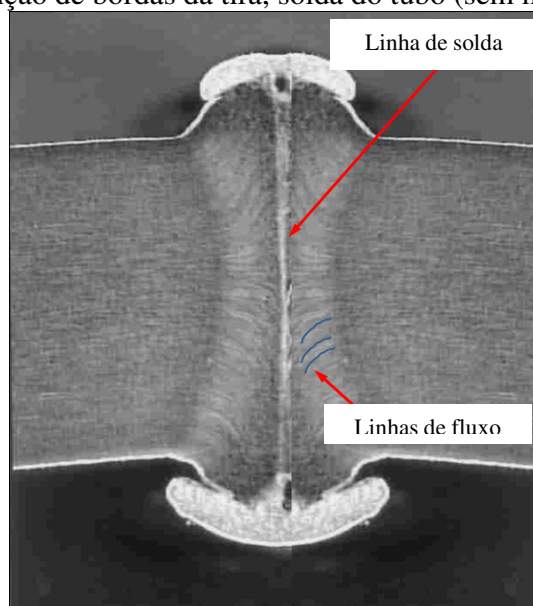


Fonte: (APOLO, 2006)

A solda ou caldeado, é realizada através da ação simultânea dos rolos de pressão e do calor gerado com a resistência a passagem da corrente elétrica de alta frequência pelas bordas do esboço tubular, não havendo, neste caso, a adição de outro metal.

A solda realizada após este processo é mostrada na Figura 3, com ampliação de seis vezes.

Figura 3 – Junção de bordas da tira, solda do tubo (sem metal de adição)

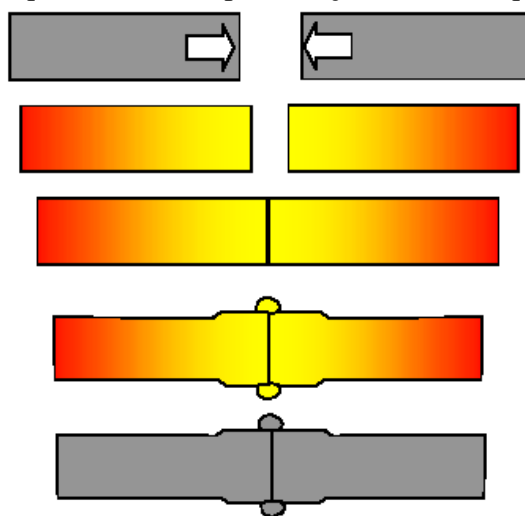


Fonte: (APOLO, 2006)

O processo de soldagem por resistência elétrica apresenta como principal característica a formação de uma ampulheta na região da solda. Esta característica deve-se a temperatura e a pressão aplicada para a soldagem do tubo. Esta ampulheta recebe o nome de zona termicamente afetada pelo calor.

Como pode ser observado, o processo de soldagem leva apenas alguns segundos para que ocorra, e está esquematizado na Figura 4.

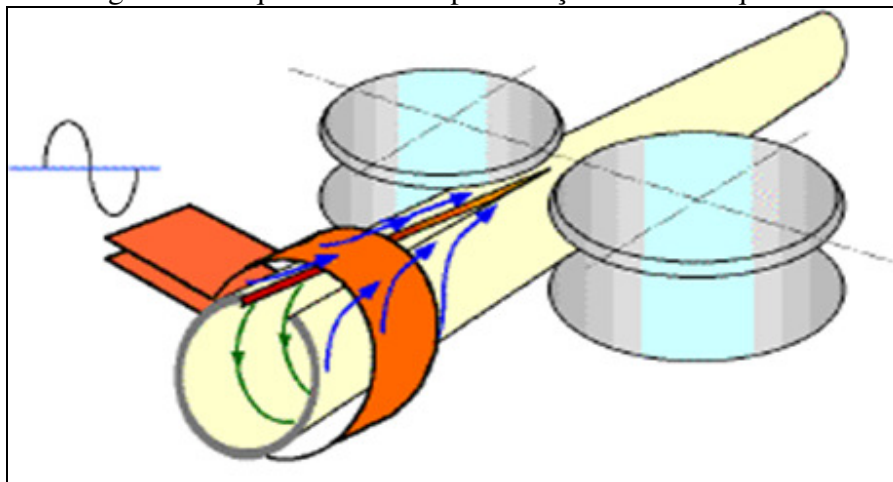
Figura 4 – Esquema de união por indução de alta frequência



Fonte: (APOLO, 2006)

Devido ao ciclo térmico de aquecimento e resfriamento (por causa da solução que é utilizada para o resfriamento da bobina indutora), poderá ocorrer têmpera do material na solda. Na Figura 5, pode-se verificar a bobina que induz o fluxo de calor através da alta frequência, o tubo sendo formado e os rolos de conformação de eixo vertical, convencionalmente chamados de copos de solda, que comprimem o metal aquecido na borda para a união entre as mesmas.

Figura 5 – Esquema de solda por indução de alta frequência



Fonte: (APOLO, 2006)

## 2.2 Fadiga

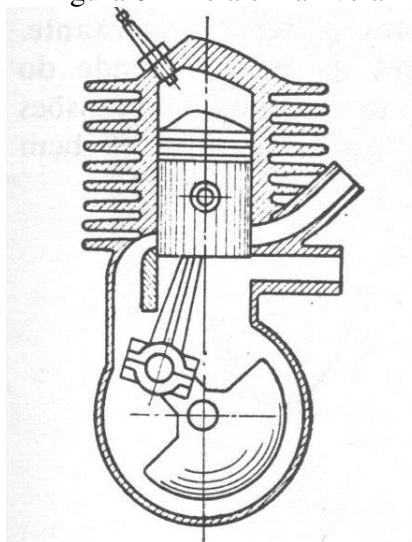
A fadiga é uma forma de falha que ocorre em estruturas que estão sujeitas a tensões dinâmicas e oscilantes (CALLISTER, 2008). Alguns exemplos de estruturas sujeitas à falha por fadiga: pontes, aeronaves, tubulações e componentes de máquinas. A maioria das falhas acontece devido a cargas que variam no tempo, e não a esforços estáticos. Essas falhas ocorrem, tipicamente, em níveis de tensão significativamente inferiores ao limite de escoamento dos materiais e é correlacionado ao termo fadiga quando, após um longo período de tensão cíclica na estrutura, causa na estrutura trincas, rompimentos etc. A fadiga é a maior causa individual de falhas em metais, sendo estimado que ela compreenda aproximadamente 90% de todas as falhas metálicas (CALLISTER, 2008).

Como existe geralmente muito pouca (ou nenhuma) deformação plástica em associação à falha, pode-se considerar a falha por fadiga como de natureza frágil, mesmo em metais dúcteis. O processo ocorre com a propagação de trincas, micro fissuras, e também é característica à falha por fadiga a superfície de fratura ser perpendicular à direção de uma tensão de tração aplicada. Esta trinca geralmente inicia-se em pontos onde há uma imperfeição estrutural ou de composição e / ou um ponto concentrador de tensões (ocorrendo geralmente na superfície).

Muitas peças de máquinas, durante o trabalho, sofrem tensões que variam ciclicamente em função do tempo. Por exemplo, as peças de biela e manivela de um motor

de combustão interna, conforme Figura 6, sofrem a ação de forças que variam periodicamente.

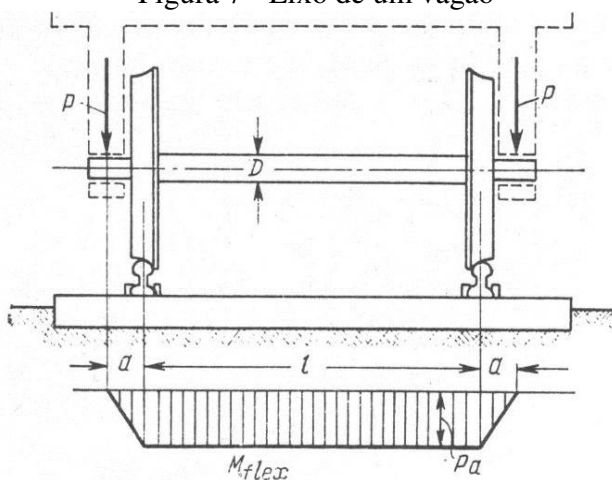
Figura 6 - Biela e manivela



Fonte: (KIYAN, 2010)

O eixo de um vagão, que gira juntamente com as rodas, Figura 7, também sofre tensões que variam ciclicamente, embora as forças externas permaneçam invariáveis. Isto ocorre porque as partículas do eixo que gira ficam alternadamente na região de tração ou na região de compressão.

Figura 7 - Eixo de um vagão



Fonte: (KIYAN, 2010)

Na Figura 7 é mostrado o diagrama de momento fletor que atua no eixo do vagão. No ponto A da seção transversal, tem-se:

$$\sigma = \frac{M_f \cdot y}{I_z} \quad (1)$$

$$M_f = P \cdot a \quad (2)$$

A distância  $y$  do ponto A ao eixo neutro varia em função do tempo da seguinte maneira:

$$y = \frac{D}{2} \cdot \sin \varphi \quad (3)$$

$$y = \frac{D}{2} \cdot \sin \omega t \quad (4)$$

sendo  $\omega$  a velocidade angular de rotação da roda, logo:

$$\sigma = \frac{P \cdot a \cdot D}{2 I_z} \sin \omega t \quad (5)$$

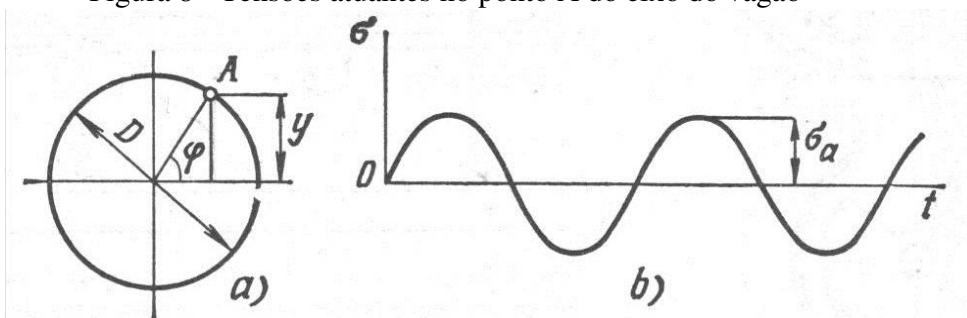
Portanto, a tensão normal nas seções do eixo varia como a senóide de amplitude  $\sigma_a$ , mostrado na Figura 8:

$$\sigma_a = \frac{P \cdot a \cdot D}{2 I} \quad (6)$$

Após inúmeros ensaios e estudos referentes ao assunto, tem-se por resultado que no caso de tensão variável aplicada, a peça pode destruir-se depois de um número determinado de ciclos, porém esta mesma peça não se destrói quando sofre uma tensão constante.

O número de ciclos que precede a ruptura da peça depende de  $\sigma_a$  e varia dentro de limites bastante amplos. Quando as tensões são grandes, bastam 5 a 10 ciclos. Isto se vê no exemplo do pedaço de arame, submetido à flexão múltipla, como mostra a Figura 9. No caso de tensões menores, a peça resiste a milhões e inclusive bilhões de ciclos, e quando as tensões são ainda menores é capaz de trabalhar por um limite indeterminado.

Figura 8 - Tensões atuantes no ponto A do eixo do vagão

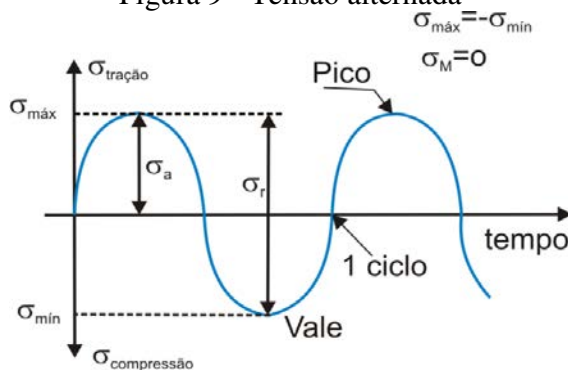


Fonte: (KIYAN, 2010)

### 2.2.1 Tipos de tensões cíclicas

As tensões cíclicas que podem ocasionar falha por fadiga podem ser: axiais (tração e compressão), de flexão (dobramento) ou de torção (carga rotativa). De modo geral, dois tipos diferentes de tensão cíclica ou variável com o tempo são possíveis, conforme mostrado nas Figuras 9 e 10.

Figura 9 - Tensão alternada

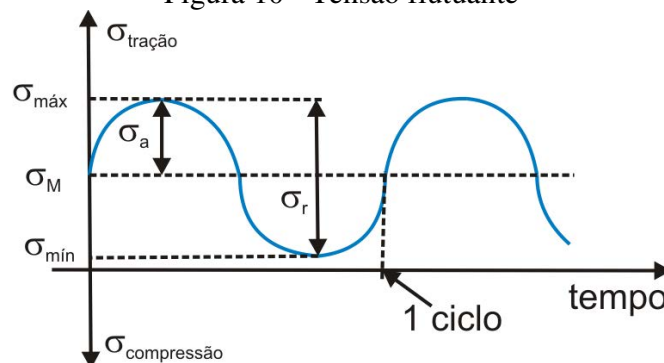


Fonte: (KIYAN, 2010)

A Figura 9 apresenta um ciclo alternado de aplicação na forma senoidal. Essa é uma situação idealizada próxima às condições de serviço de um eixo rotativo, girando a uma velocidade constante. Nesse tipo de ciclo as tensões máximas e mínimas são iguais em magnitude; as tensões de tração são consideradas positivas e as de compressão, negativas.



Figura 10 - Tensão flutuante



FONTE: (KIYAN, 2010)

Na Figura 10 é mostrado um caso geral de tensão que se repete em torno de uma tensão média ( $\sigma_M$ ), no qual os valores de tensão máxima ( $\sigma_{máx}$ ) e da tensão mínima ( $\sigma_{mín}$ ) não são iguais. Esse tipo de ciclo é deslocado na direção do eixo das ordenadas, situando-se totalmente no campo da tração ou da compressão, ou em situações onde tensões máximas e mínimas tenham sinais opostos, porém com amplitudes diferentes de tração e compressão.

Através das Figuras 4 e 5 pode-se observar que a tensão média é dada por:

$$\sigma_M = \frac{\sigma_{máx} + \sigma_{mín}}{2} \quad (7)$$

Onde:

$\sigma_M$  = Tensão média (Pa)

$\sigma_{máx}$  = Tensão máxima (Pa)

$\sigma_{mín}$  = Tensão mínima (Pa)

A faixa de variação das tensões, ou intervalo de tensões ( $\sigma_r$ ) é diferença entre as tensões máxima e mínima.

A amplitude de oscilação ( $\sigma_a$ ) é a metade da faixa de variação das tensões, equação 8.

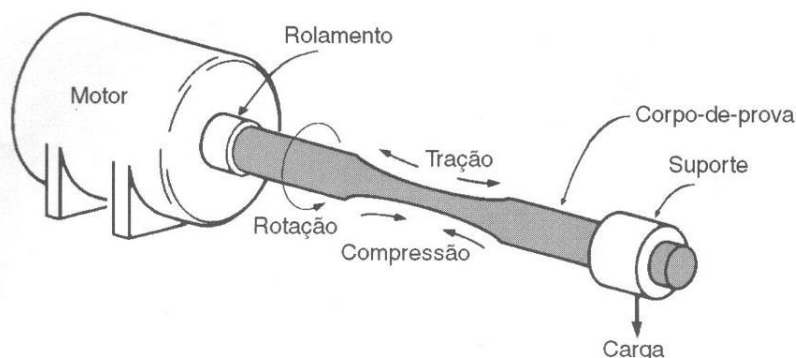
$$\sigma_a = \sigma_{máx} - \sigma_M \quad (8)$$

Por fim, a razão de carregamento, R, é definida pela equação 9.

$$R = \frac{\sigma_{mín}}{\sigma_{máx}} \quad (9)$$

### 2.2.2 Resultados do ensaio de fadiga: Curva $\sigma$ -N

Figura 11 - Esquema de máquina de ensaio de fadiga de flexão rotativa



Fonte: (CALLISTER, 2008)

As propriedades de resistência à fadiga dos metais podem ser obtidas em laboratório usando uma máquina de ensaio de flexão rotativa cujo esquema é mostrado na Figura 11.

A forma usual de apresentação dos resultados do ensaio de fadiga é pela curva  $\sigma$ -N, em que se obtém o gráfico tensão ( $\sigma$ ) versus o número de ciclos (N) necessários para que ocorra a fratura. Normalmente, para o número de ciclos emprega-se uma escala logarítmica, e a tensão pode ser  $\sigma_a$ ,  $\sigma_{máx}$  ou  $\sigma_{mín}$ .

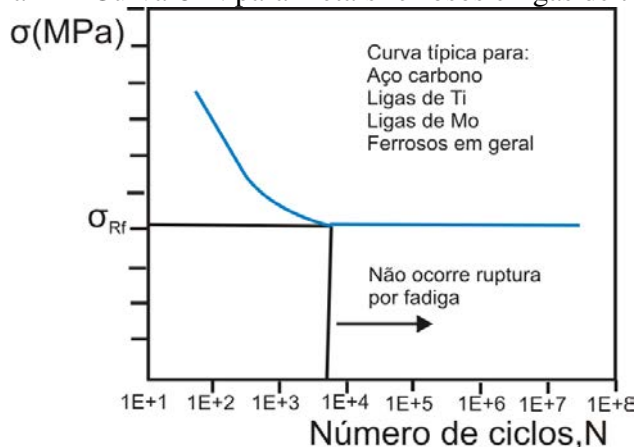
Para a obtenção das propriedades de resistência à fadiga em cargas cíclicas são ensaiados vários corpos de prova do mesmo material, com as mesmas dimensões, com idênticas condições de tratamento térmico e acabamento superficial, para diferentes cargas até a ruptura, registrando-se o número de ciclos até a ruptura.

Como procedimento inicial, submete-se o corpo de prova a um ciclo de tensões com a tensão máxima elevada (da ordem de 2/3 do limite de resistência à tração). Repete-se esse procedimento com outros corpos de prova, diminuindo-se gradativamente a tensão máxima aplicada. Dois comportamentos distintos podem ser observados nas curvas  $\sigma$ -N de diferentes materiais.

Em geral a curva  $\sigma$ -N de materiais ferrosos e ligas de titânio apresenta tensão limite tal que para valores de tensão abaixo desse limite, o corpo de prova nunca sofrerá ruptura

por fadiga. Essa tensão limite é conhecida como limite de resistência à fadiga ( $\sigma_{Rf}$ ), e a curva ( $\sigma$ -N) toma a forma de um patamar conforme mostrado na Figura 12.

Figura 12 - Curva  $\sigma$ -N para metais ferrosos e ligas de titânio



Fonte: (KIYAN, 2010)

Para os aços, o limite de resistência à fadiga está compreendido entre 35% a 65% do limite de resistência à tração. Na prática, admite-se que o limite de resistência à fadiga de um aço seja aproximadamente  $0,5 \sigma_t$  (limite de resistência à tração).

Outro parâmetro importante na caracterização do comportamento em relação à fadiga de um material é a vida à fadiga ( $N_f$ ), que consiste no número de ciclos que causará a fratura para um determinado nível de tensão. Na prática, considera-se que a tensão necessária para o material romper entre  $10^7$  e  $10^8$  ciclos é considerado o limite de resistência à fadiga (vida à fadiga estimada infinita).

### 2.2.3 Mecanismo da falha por fadiga

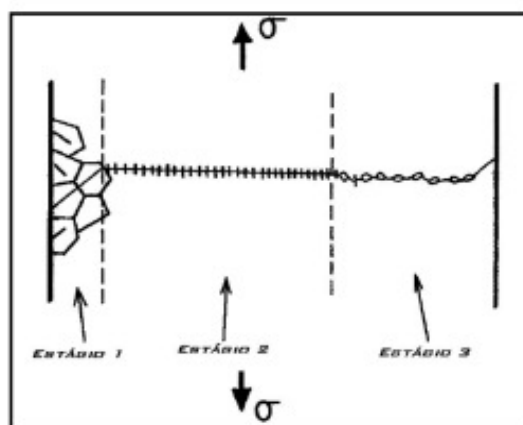
Os materiais, em particular os metálicos, falham ou sofrem ruptura quando submetidos a cargas cíclicas. A ruptura definitiva do componente em serviço ocorre em três etapas distintas:

1. Nucleação da trinca;
2. Propagação da trinca (fenômeno lento);
3. Falha catastrófica (fenômeno rápido).

### 2.2.3.1 Nucleação da trinca

As trincas têm início em regiões de alta concentração de tensões ou em regiões de baixa resistência do material. Defeitos de superfície, como ranhuras, mau acabamento superficial e, principalmente cantos em ângulos retos ou entalhes correspondem aos principais fatores para a nucleação de trincas na manufatura de componentes. Inclusões, contornos de grão, acentuada porosidade e pontos de corrosão também representam elementos potenciais para a nucleação de trincas de fadiga.

Figura 13 - Estágios da nucleação



FONTE: (KYIAN, 2010)

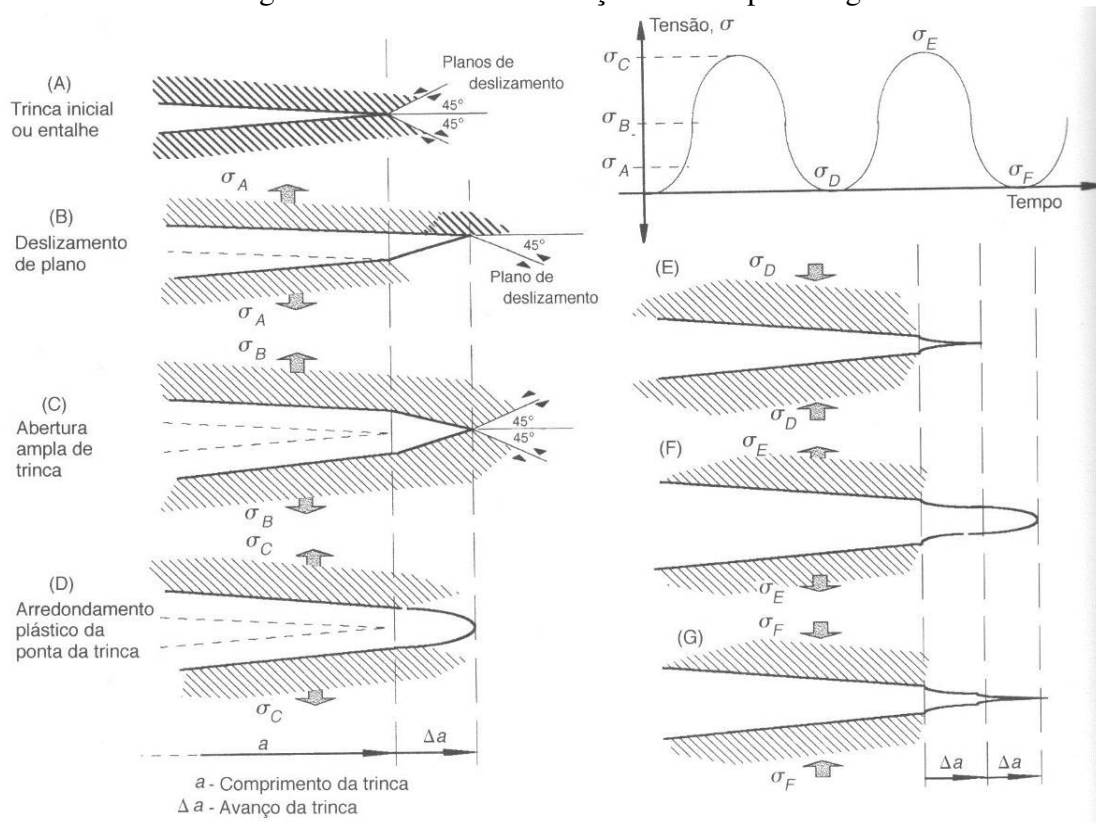
### 2.2.3.2 Propagação da trinca

Devido à concentração de tensão causada pelas imperfeições internas do componente, ocorre uma deformação plástica cíclica causada pela ação de uma tensão cíclica mesmo com uma tensão nominal abaixo do limite elástico. Como consequência direta desse fenômeno deve ocorrer uma deformação localizada, favorecendo o crescimento de uma pequena trinca.

Com relação ao avanço de trinca por fadiga, observa-se, na Figura 14, que a concentração de tensão de tração na ponta da trinca favorece o deslizamento de planos localizados a 45° com o plano da trinca. Em resposta à deformação plástica localizada a ponta da trinca torna-se curva com a aplicação de tensões de tração. Na recuperação da tensão (ou tensão de compressão), a ponta é comprimida, formando novamente uma ponta

aguda. Desse modo, o processo volta a se repetir em cada ciclo de tensão, com um avanço relativo do comprimento da trinca de  $\Delta a$  a cada novo ciclo.

Figura 14 - Processo de avanço de trinca por fadiga

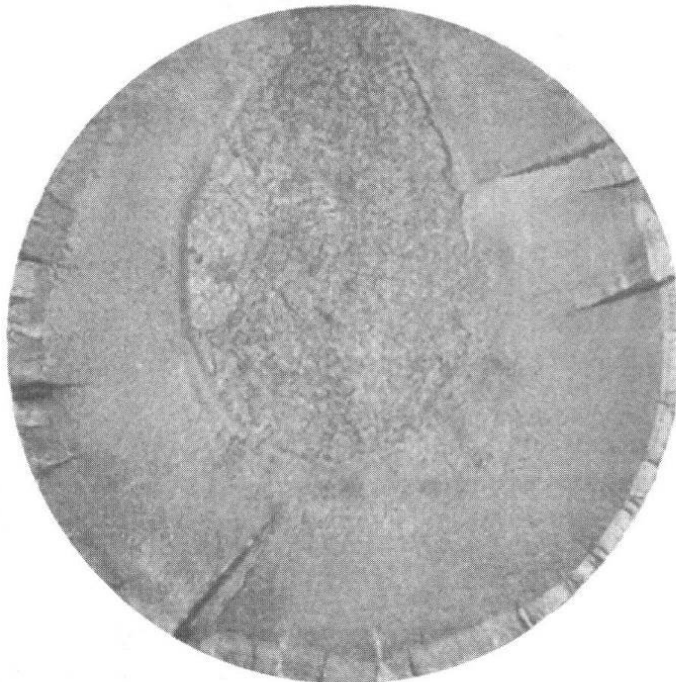


Fonte: (CALLISTER, 2008)

### 2.2.3.3 Falha catastrófica

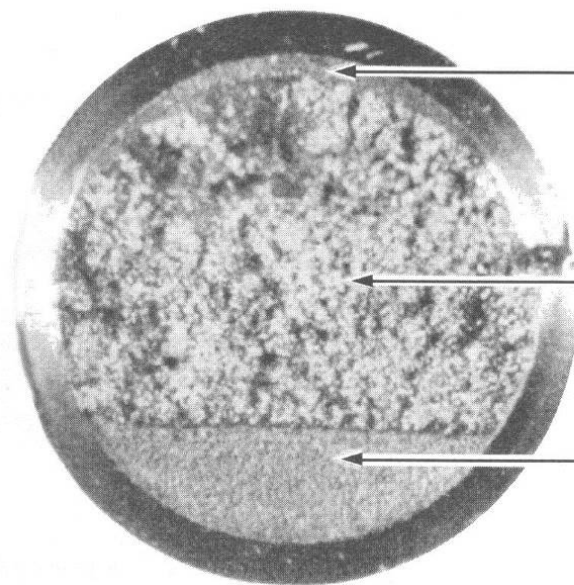
Durante o período de serviço, o componente encontra-se sujeito às mudanças abruptas de carga de fadiga. Essas mudanças são registradas através de marcas que recebem o nome de marcas de praia. Essas marcas apresentam-se curvadas em relação à origem da falha, permitindo, dessa forma, investigações que conduzem à compreensão do início do processo de fratura.

Figura 15 - Macroestruturas do aspecto da fratura de fadiga



Superfície de fratura por fadiga de um eixo de locomotiva.

[Adaptado de Colpaert, 1969.]



Trinca de fadiga  
(crescimento lento)

Barra de aço, tamanho natural mostrando as fases da fratura de fadiga.

[Adaptado de Ashby, 1988.]

Fratura catastrófica  
(propagação rápida)

Trinca de fadiga  
(crescimento lento)

Fonte: (CALLISTER, 2008).

## 2.3 Vibrações Induzidas por Vórtices – VIV

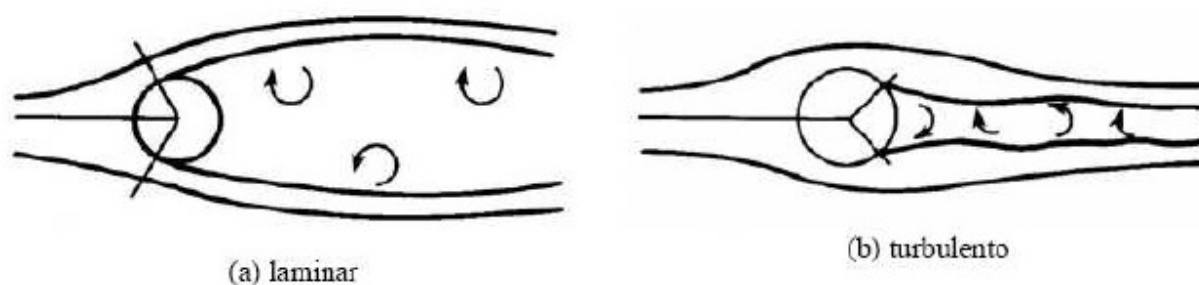
### 2.3.1 Introdução

As vibrações induzidas por desprendimento de vórtices (VIV) tem sido alvo de vários estudos na indústria *offshore*. As VIV's podem reduzir drasticamente a vida útil à fadiga de um duto submarino.

A passagem de um fluido ao redor de uma estrutura pode causar vibrações transversais ao fluxo, geradas pelo desprendimento de vórtices. Essas vibrações podem causar na estrutura falhas geradas por fadiga ou pelo aumento dos esforços das correntes marinhas e/ou ondas, devido ao aumento do coeficiente de arrasto.

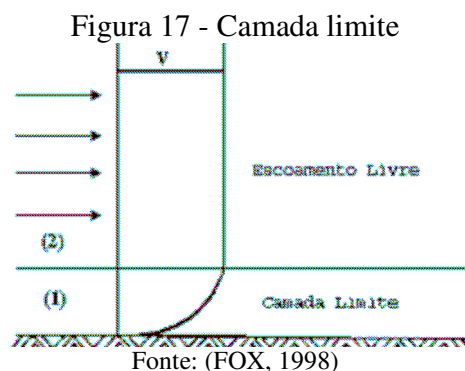
Desde os tempos antigos sabe-se que os ventos provocam vibrações induzidas por desprendimento de vórtices em cordas esticadas de uma harpa - harpa eólica (LIMA, 2007). A Figura 16 mostra dois tipos de vórtices: um laminar e outro turbulento, característicos de um cilindro submetido a um vento com velocidade constante.

Figura 16 - Esteira de vórtices sobre um cilindro circular



Fonte: (LIMA, 2007)

A representação deste fenômeno foi alterada através dos tempos. Um fluido de pequena viscosidade ao passar por um obstáculo forma uma camada limite, junto ao obstáculo (LIMA, 2007). Da Mecânica dos Fluidos, podemos observar, conforme a Figura 17, uma representação característica de escoamento de um fluido, com a variação de velocidade em destaque: desde um valor nulo, junto ao obstáculo até uma velocidade máxima constante na zona de escoamento livre. A partir desta variação da velocidade transversal na direção do escoamento, dentro da camada limite é gerado um escoamento rotacional, formando-se assim uma esteira de vórtices dependendo da velocidade do escoamento.



Na Figura 18 temos uma relação da formação da esteira de vórtices com o número de Reynolds, levando-se em conta que o obstáculo seja um cilindro cujo fluxo passe perpendicularmente por ele.

Também da Mecânica dos Fluidos retiramos a definição do número de Reynolds ( $Re$ ), que representa a relação entre as forças de inércia e as forças viscosas. Para o caso do obstáculo ser um cilindro cujo eixo é perpendicular ao fluxo, o número de Reynolds é expresso por:

$$Re = \frac{U \cdot D}{\nu} \quad (8)$$

Onde:

$U$  – velocidade do fluido;

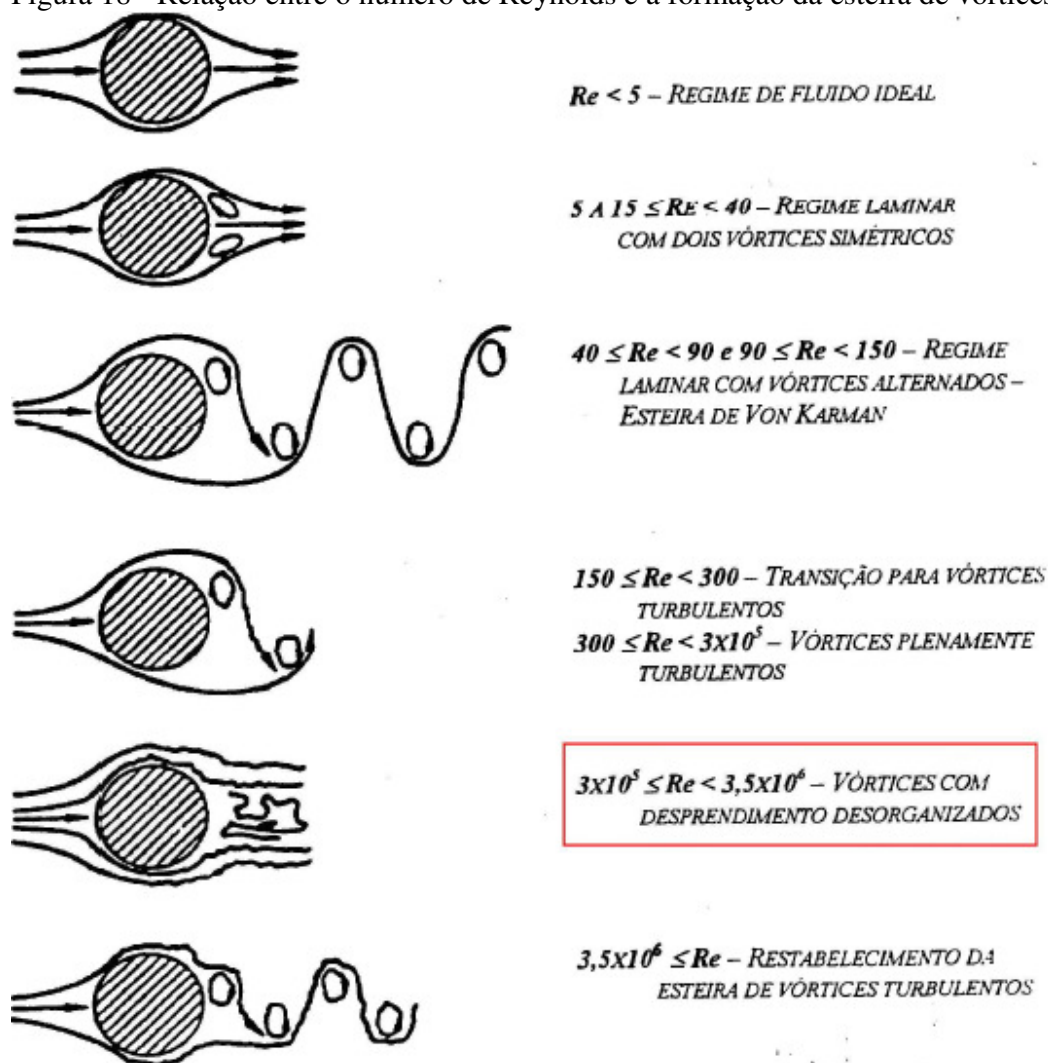
$D$  – diâmetro hidrodinâmico do cilindro;

$\nu$  - viscosidade cinemática do fluido.

No caso das estruturas offshore sujeitas a VIV, considerando os tubos nosso objeto de estudo (corpos esbeltos, ou seja, com o comprimento maior que a largura) o número de Reynolds é de aproximadamente  $10^5$ . Portanto, observando novamente a Figura 19, nota-se que a formação de vórtices nesse tipo de estrutura ocorrerá em grande parte dos casos estudados de forma desordenada, gerando uma complexidade para reproduzir o fenômeno e elaborar um modelo matemático que reproduza com maior precisão as VIV's.



Figura 18 - Relação entre o número de Reynolds e a formação da esteira de vórtices



Fonte: (LIMA, 2007)

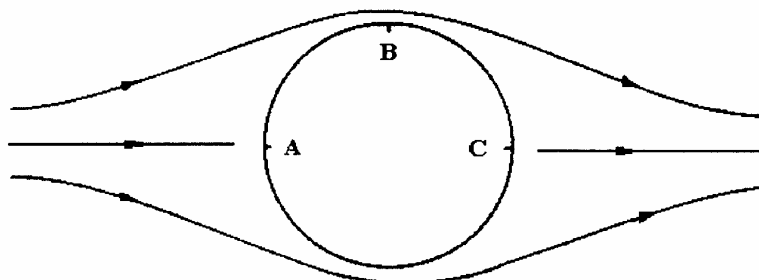
Como consequência deste desprendimento de vórtices, é gerada uma força oscilatória transversal ao fluxo, que age sobre o obstáculo. Se uma das frequências naturais do obstáculo estiver perto da frequência de formação dos vórtices, então esta força fará com que ele comece a vibrar em ressonância (LIMA, 2007).

### 2.3.2 Formação dos vórtices

Ainda analisando um cilindro cujo fluxo é transversal ao seu eixo, o campo de pressões não é mais constante, conforme Figura 19. O fluido tem a velocidade aumentada

entre A e B e tem a velocidade reduzida entre B e C. Pela equação Bernoulli, verifica-se uma diminuição na pressão entre A e B e um aumento entre B e C.

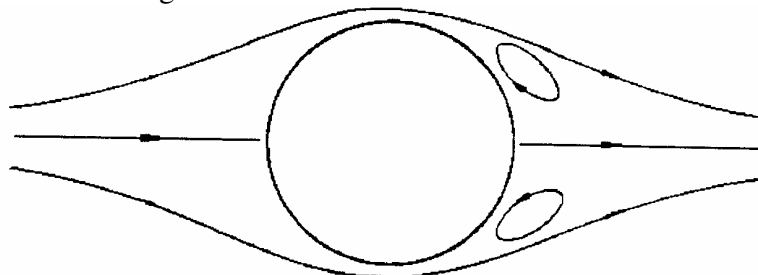
Figura 19 - Escoamento ao longo de um cilindro



Fonte: (LIMA, 2007)

Tomando como base agora toda a camada limite, entretanto, tem-se uma perda de energia cinética por fricção, devido principalmente à viscosidade do fluido e, como consequência disso a energia resultante pode se tornar insuficiente para suportar o aumento de pressão necessário para se chegar a C. Por este motivo, surge um movimento contrário à passagem do fluido, causando o deslocamento da camada limite em um ponto chamado ponto de separação, surgindo assim um par de vórtices estacionários como apresentado na Figura 20.

Figura 20 - Par de vórtices estacionários



Fonte: (LIMA, 2007)

### 2.3.3 Principais problemas acarretados pelo fenômeno de VIV

O fenômeno de VIV, como já visto anteriormente, tem sido objeto de estudo devido aos danos causados em estruturas *offshore*, e estes problemas possuem basicamente duas naturezas: danos estruturais devido à fadiga e danos estruturais devido a problemas na região de contato com o solo, pois a vibração próxima ao solo tende a solubilizá-lo, criando

uma trincheira. Porém, este efeito negativo no solo não é o foco de estudo deste trabalho e pode ser desconsiderado.

Os problemas das estruturas num ambiente oceânico mais recorrentes estão ligados à fadiga, uma vez que este fenômeno tem característica auto limitante e, portanto, não causa ruptura dos materiais devido a tensões máximas. As vibrações geralmente apresentam amplitudes pequenas, porém a estrutura pode ter problemas localizados de fadiga por causa da recorrência deste fenômeno, pois como é explicado no item 2.2, a falha por fadiga é causada por tensões abaixo do limite de resistência do material, muitas vezes por tensões baixíssimas.

## **2.4 Fadiga em dutos submarinos e estruturas *offshore***

As estruturas *offshore* (dutos, torres de sustentação, plataformas, cabos de sustentação das plataformas etc.) estão sujeitos aos processos de degradação estrutural ao longo do ciclo operacional das mesmas. O objetivo da análise da vida útil por fadiga nessas estruturas visa garantir que todos os componentes expostos a uma carga dinâmica tenha uma vida em fadiga controlada, principalmente para fins de manutenção preventiva, visto que os danos causados por uma falha nessas estruturas podem ser fatais, devido ao ambiente propício à propagação de poluentes, por exemplo.

Com o cálculo da vida em fadiga, temos alguns dados para selecionar, de acordo com a aplicação e ambiente, tais como: tipo de aço (ou outro material), detalhes estruturais, detalhes locais etc. Ao calcular a vida em fadiga, então, tem-se uma base para o projeto estrutural e em seguida forma-se a base do planejamento de um programa de inspeções durante a construção e a vida de operação da estrutura, bem como planejamento para a substituição dos dutos de tempos em tempos devido ao desgaste natural e tempo de serviço.

Os vários métodos para este cálculo já estão consagrados na literatura-base da Engenharia Naval, porém não se encontra no escopo deste trabalho o estudo destas análises.

O procedimento para calcular a vida em fadiga é altamente dependente da avaliação das dimensões da trinca, com a realização de ensaios não destrutivos, os quais constituem muitas vezes uma fonte de incerteza no método de análise.

### **2.4.1 Avaliação da influência da temperatura**

Se realizado um ensaio de fadiga em temperatura àquela inferior a ambiente, observa-se um aumento da resistência do material à fadiga (SCHIJVE, 2001). Em condição oposta, o material quando exposto a elevadas temperaturas apresenta um decréscimo de sua resistência à fadiga. Por outro lado fadiga térmica ocorre quando o material é submetido a ciclos consecutivos de aquecimento e resfriamento, fazendo com que a fratura do material seja causada não pelas tensões mecânicas, mas sim pelas tensões térmicas no interior do mesmo.

Na extração de petróleo e gás em ambiente *offshore*, vislumbram-se duas situações:

- i) Deve-se levar em consideração que o petróleo e o gás são captados juntos à temperatura entre 100 e 150°C, o que pode afetar o comportamento em fadiga;
- ii) O processo de fadiga envolve nucleação e propagação de trincas, esta mais rápida que aquela; i.e., a trinca se propagará mais rapidamente em baixas temperaturas. Assim, se houver um defeito como trinca no material, sua resistência à fadiga estará comprometida.

Levando em consideração ao mencionado acima, durante a extração do petróleo, possuímos a baixa temperatura dos oceanos, em situações próximas ao solo marítimo, dependendo da localização, temos temperaturas na casa de -10 até -30°C, e levando em consideração também que a temperatura interna da tubulação está na casa de 100°C, temos os dois problemas: a alta temperatura que facilita o processo da fadiga e, também, as baixas temperaturas que facilitam o processo de propagação de trincas.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a eficácia deste trabalho, definido no escopo do mesmo previamente a elaboração deste, definiu-se necessários os seguintes ensaios: vida em fadiga, tração do material-base, metalografia do material sob esforço de fadiga e MEV.

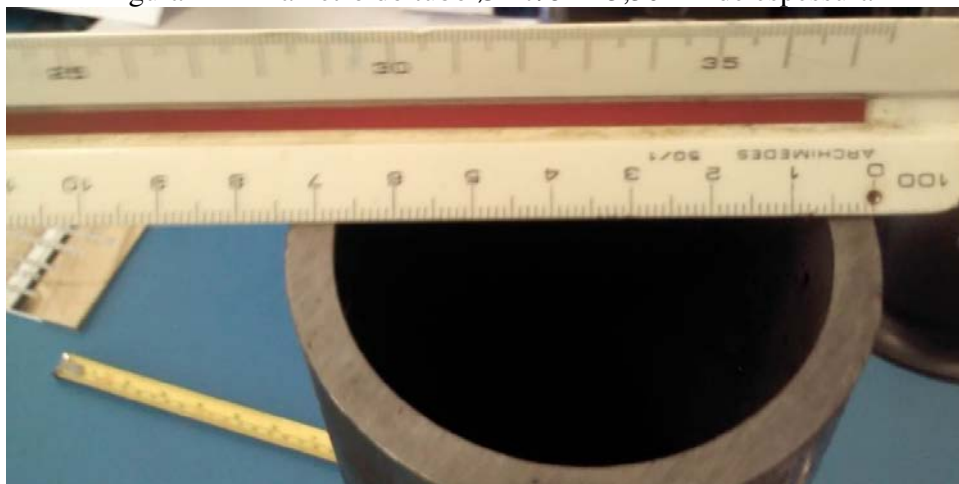
O tubo utilizado para o experimento, Figuras 21 e 22, é um tubo API 5CT T95 (1%Cr).

Figura 21 - Tubo API 5CT T95 - Rastreabilidade QU939 - Apolo Tubulars S/A



Cabe salientar que a rastreabilidade, comentada na Figura 21, é um código alfanumérico utilizado pela empresa Apolo Tubulars S/A, sequencial, que possui a finalidade de rastrear o lote, a data de fabricação em caso de possíveis análises posteriores à produção (como ensaios no laboratório etc.).

Figura 22 - Diâmetro do tubo Ø2 7/8" x 5,50mm de espessura



### 3.1 Materiais

#### 3.1.1 Corpos de prova para Vida em Fadiga

- 07 corpos de prova para vida em fadiga, Figura 23, para variação dos resultados ao longo das tensões aplicadas, do tubo QU939.

Os corpos de prova para ensaio de vida em Fadiga foram feitas conforme norma ASTM E466, as quais o desenho com as dimensões está no Anexo 1 deste trabalho.

Figura 23 - Corpo de prova para análise de vida em fadiga conforme norma ASTM E466



#### 3.1.2 Composição química

A composição química foi realizada conforme norma API 5CT (2011).

Tabela 1 - Composição química do tubo

| Tubo QU939 - API 5CT T95 |       |
|--------------------------|-------|
| Elemento                 | %     |
| 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 |

### 3.1.3 Corpo de prova de Tração

- 04 amostras para tração do tubo rastreadabilidade QU939, Figura 24.

As amostras para ensaio de tração foram feitas conforme norma ASTM E8, as quais o desenho com as dimensões estão no Anexo 2 deste trabalho.

Figura 24 - Corpo de prova para análise de vida em fadiga conforme norma ASTM E466



### 3.1.4 Amostras para metalografia

- 02 amostras de análise metalográfica, micrografia, usinadas, lixadas e polidas, com ataque químico de Nital 2% e sem ataque químico.

## 3.2 Métodos

### 3.2.1 Ensaio de fadiga

Para o ensaio de fadiga foi utilizada a máquina universal de ensaios da marca INSTRON, modelo 8801, de 100 kN de capacidade (Figura 25), na temperatura ambiente, amplitude constante (carregamento senoidal) e razão de carga  $R = 0,1$ . Os ensaios foram realizados com 20Hz, ou seja, 20 ciclos por segundo.

Figura 25 - Máquina Universal de Ensaio Instron 8801



### 3.2.2 Ensaio de tração

O ensaio de tração foi conduzido conforme a norma ASTM E8. Para este ensaio também foi utilizada a máquina universal de ensaios da marca INSTRON, modelo 8801, de 100 kN de capacidade (Figura 25), utilizando extensômetro (*straingauge*) em 20 mm, Figura 26, e com velocidade de deformação de 2mm/min.

Figura 26 - Extensômetro da máquina Instron 8801





### **3.2.3 Análise Metalográfica**

Para as análises macroscópica e microscópica, após polimento dos materiais, através de microscopia óptica, foram retiradas as imagens com e sem ataque químico (Nital 2%), para verificação de possíveis impurezas na solda e no corpo do tubo.

### **3.2.4 Análise de Superfícies de Fratura**

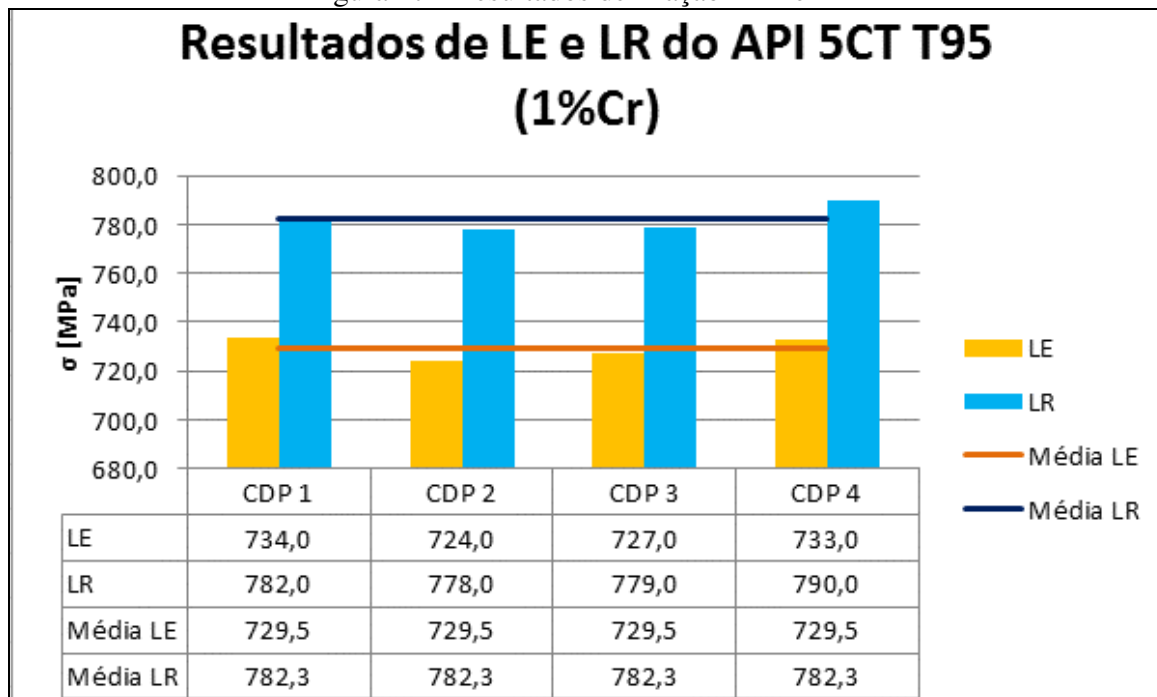
Através do microscópio eletrônico de varredura (MEV), foram obtidas as imagens para análise das superfícies de fratura. Imagens feitas desde 50 até 10000 vezes de magnitude.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.4 Ensaio de tração

Em primeiro lugar, realizou-se o ensaio de tração, para avaliação das propriedades do material. Os resultados de tração podem ser verificados a partir da Figura 27.

Figura 27 - Resultados de Tração - LE e LR



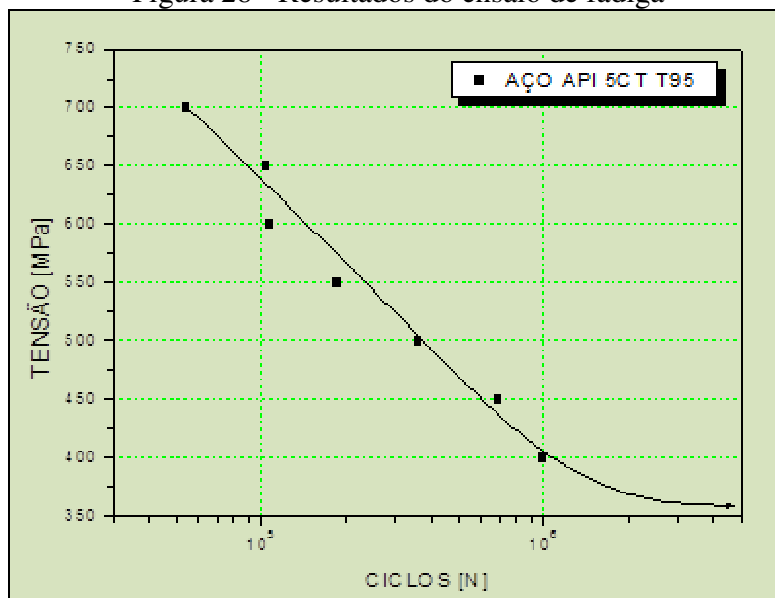
De acordo com a norma API 5CT (2011), os valores do limite de escoamento devem estar entre 655 e 758 MPa e o limite de resistência mínimo deve ser de 724 MPa, para o grau T95. Portanto, como todos os resultados ensaiados estão dentro dos valores estipulados pela norma, validando os ensaios de tração.

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.

#### 4.1 Resultados do ensaio de vida em fadiga

Os resultados do ensaio de fadiga são os mostrados na Figura 28 e na Tabela 2.

Figura 28 - Resultados do ensaio de fadiga



Foram simulados os ensaios nas tensões de 400 a 700 MPa, com variação de 50 MPa entre as tensões.

Tivemos dois resultados para ciclo aproximado de  $10^5$ , nas tensões de 600 e 650 MPa. Obviamente, o maior ciclo foi encontrado na menor tensão, sendo a tensão inicial limite de 350 MPa, pois vimos uma redução grande no número de ciclos entre as duas tensões iniciais aplicadas, caiu 1/3 dos ciclos ao aumentar 50 MPa na tensão, e entre 450 e 500 MPa tivemos o número de ciclos reduzidos pela metade, aumentando-se apenas 50 MPa.

Tabela 2 - Resultados do ensaio de fadiga

| Tensão [Mpa] | Número de ciclos [N] |
|--------------|----------------------|
| 700          | 54.385,00            |
| 650          | 103.992,00           |
| 600          | 107.830,00           |
| 550          | 186.664,00           |
| 500          | 359.989,00           |
| 450          | 692.235,00           |
| 400          | 1.000.000,00         |

Com estes resultados, entende-se que para uma vida em fadiga razoável, a tensão de 450 MPa, que correspondente a 1 milhão de ciclos já seria um pico ideal de tensões. Este resultado é bem considerável, visto que as tensões das VIV's são bem menores.

De acordo com Riva (2008), as tensões médias criadas a partir das VIV's estão entre 20 e 250 MPa, ou seja, bem abaixo da tensão de 350 MPa, que como visto na Figura 24, representa uma vida infinita estimada (10 milhões de ciclos, ou  $10^7$ ).

Como base para avaliação deste resultado obtido, no duto submarino o qual é objeto de estudo no trabalho apresentado por Lima (2007), a vida útil estimada é de 200 anos, baseando-se na norma DNV-RP-C206: 2006, o que torna este material estudado, API 5CT T95 (1%Cr), aplicável para esta finalidade, levando-se em consideração, obviamente, apenas a vida por fadiga, pois como mostra a Tabela 3, a reposição dos mesmos é bem menor do que a vida útil infinita estimada, calculada.

Tabela 3 - Vida útil dos tubos (dados estimados utilizados pela Petrobras)

| <b>Tipo de aplicação</b>                                                                                   | <b>Prazo estimado para substituição</b> | <b>Observação</b>                                                         |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| Transporte de fluidos.                                                                                     | 25 a 30 anos                            | Com revestimento e proteção catódica.                                     |
| Casing para revestimento de poço de petróleo.                                                              | 25 a 30 anos                            | Possui isolamento da zona produtora e inibidores de corrosão nos fluidos. |
| Tubing para produção em poço de petróleo, com revestimento.                                                | 2 a 5 anos                              | Ocorre desgaste por atrito.                                               |
| Produção de poço de petróleo "tubing", sem revestimento.                                                   | 6 meses a 1 ano                         | Ocorre desgaste por atrito e corrosão intensa.                            |
| Produção de poço de petróleo "tubing", sem revestimento, considerando recuperações passando de EU para NU. | 1 a 2 anos                              | Ocorre desgaste por atrito e corrosão intensa.                            |
| Produção de poço de gás "tubing", sem revestimento                                                         | 1 a 5 anos                              | Ocorre desgaste por atrito e corrosão moderada, exige menos intervenções. |
| Para refinarias, em caso de utilização de tubos de aço carbono                                             | 2 a 5 anos                              | Ocorre desgaste por atrito e corrosão moderada, exige menos intervenções. |

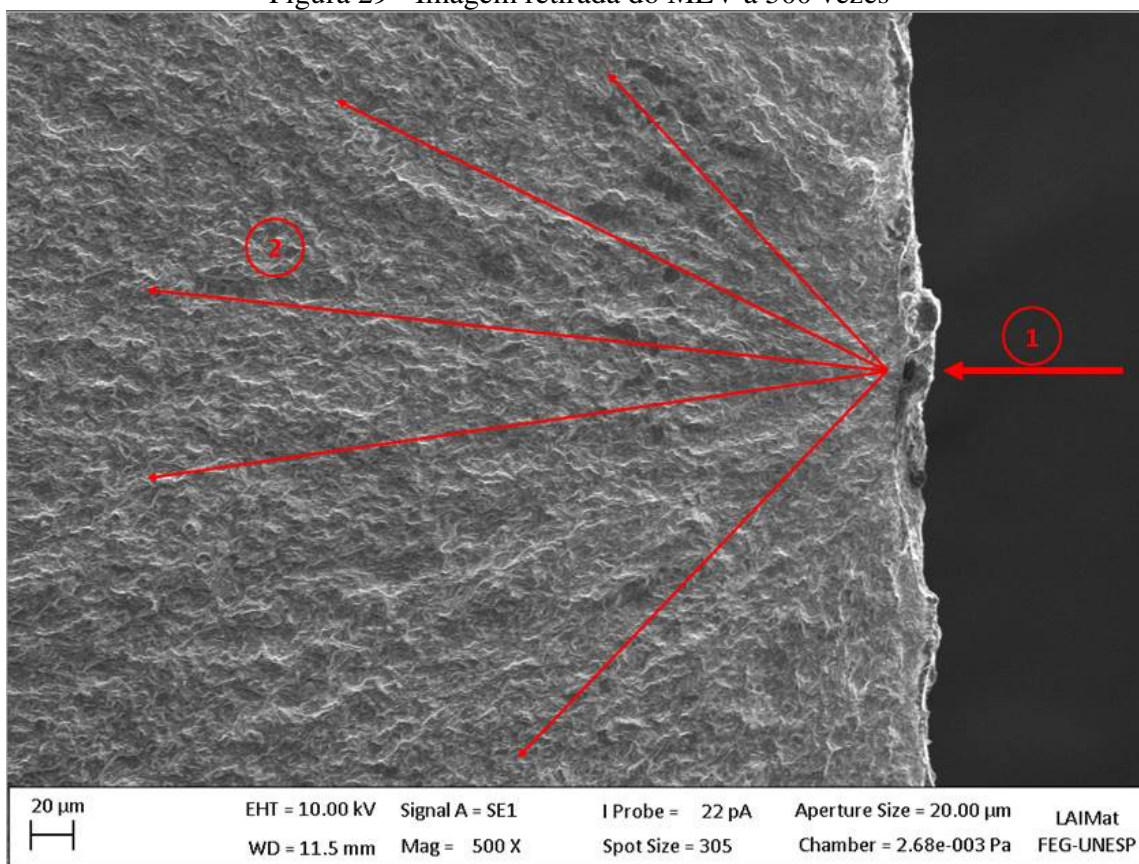
## 4.2 Resultados do MEV

Através do MEV (microscópio eletrônico de varredura), puderam-se verificar alguns efeitos do material após o rompimento causado no ensaio de vida em fadiga e, a partir destes resultados, foram obtidas várias informações importantes, conforme mostrado a seguir.

Com ampliação de 500 vezes, Figura 29, observa-se no ponto 1 a possível origem do processo de fadiga, nucleação da trinca. O início da trinca veio da superfície do material.

Outro aspecto importante pode ser visto no ponto 2, onde é destacado através das setas a propagação da trinca a partir do primeiro ponto, divergindo para o restante da amostra.

Figura 29 - Imagem retirada do MEV a 500 vezes

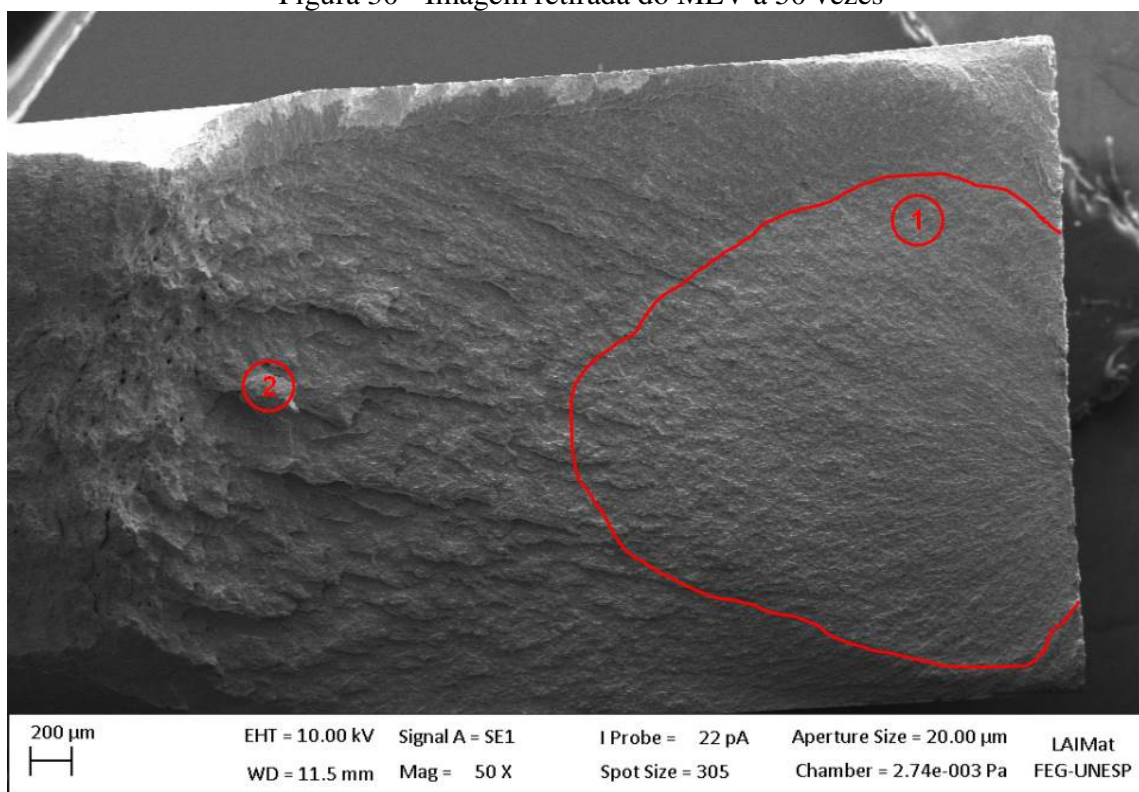


Com a ampliação de 50 vezes, Figura 30, praticamente o perfil inteiro da amostra é visto, podendo-se observar na região 1 a propagação da trinca, região preenchida pelo contorno vermelho.

A partir desta propagação, a trinca tomou toda a espessura da amostra e rompeu por tração – a fadiga levou à fratura por tração – destacado na região 2, pois a seção remanescente não resistiu às tensões.

Notam-se também na região 2 os dimples (alvéolos), ondulações, pequenas cavidades em destaque.

Figura 30 - Imagem retirada do MEV a 50 vezes

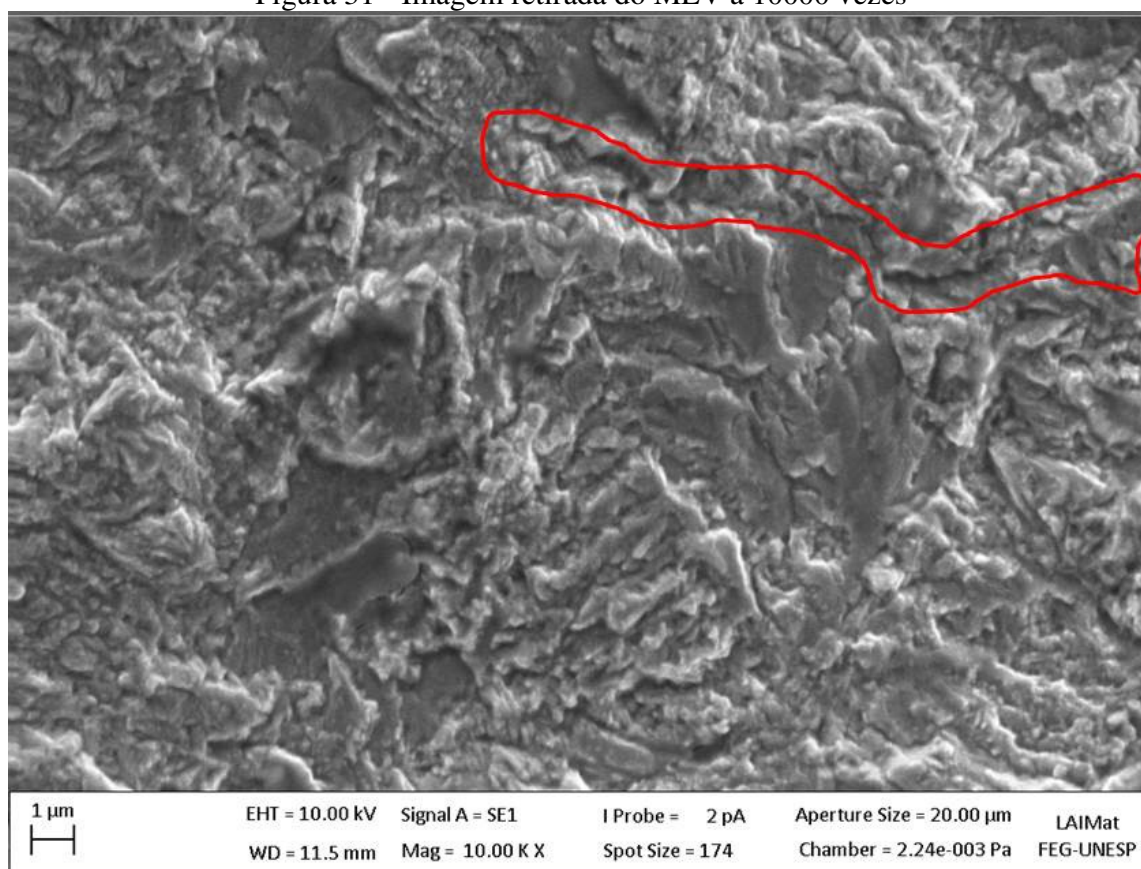




Na Figura 31, com ampliação de 10000 vezes, observa-se que a fratura foi transgranular, observando as facetas de clivagem, as regiões mais planas na imagem, a qual é a região por onde a trinca se propagou.

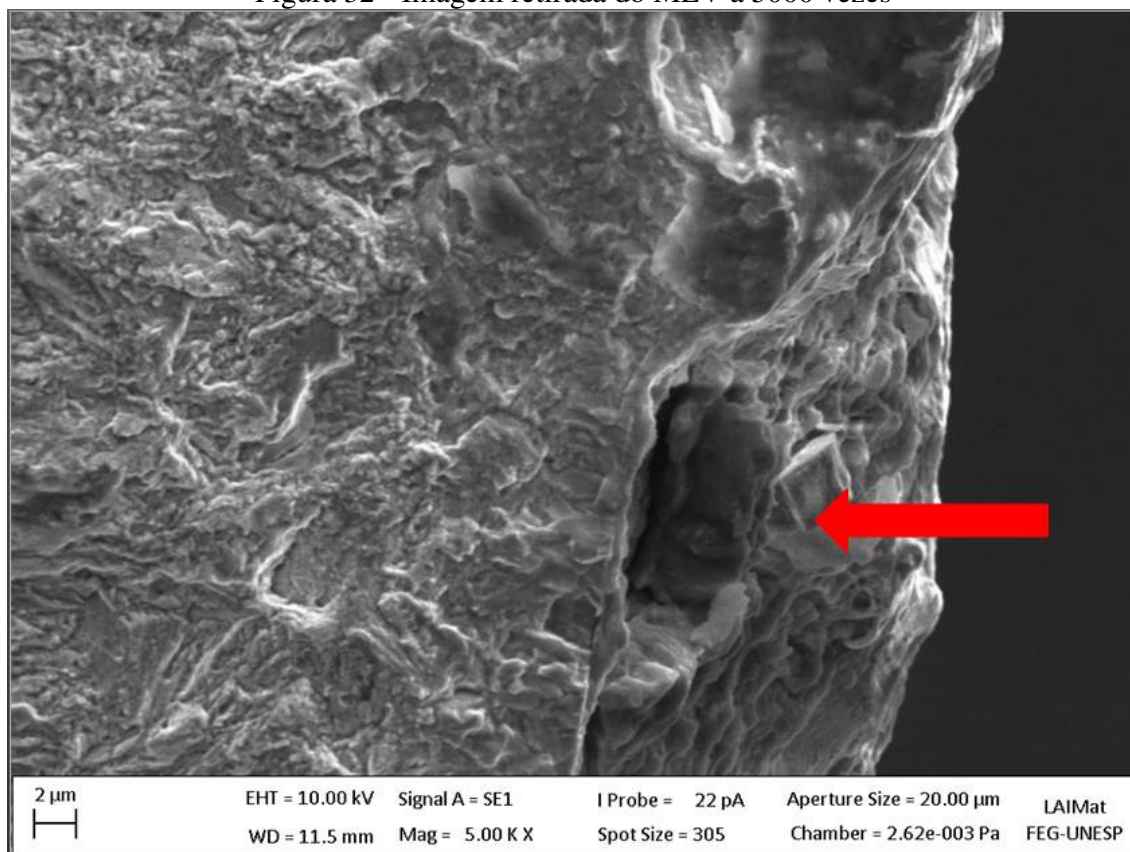
O destaque em vermelho mostra uma trinca secundária formada na região central do corpo de prova.

Figura 31 - Imagem retirada do MEV a 10000 vezes



Já na figura 32, com ampliação de 5000 vezes, observa-se com melhor resolução (indicado na seta) uma trinca secundária (perpendicular à de propagação), indicativa de que surgiram esforços (tensão) transversais ao plano de fratura (combinação de dois modos de carregamento, como Modo I e II ou I e III).

Figura 32 - Imagem retirada do MEV a 5000 vezes



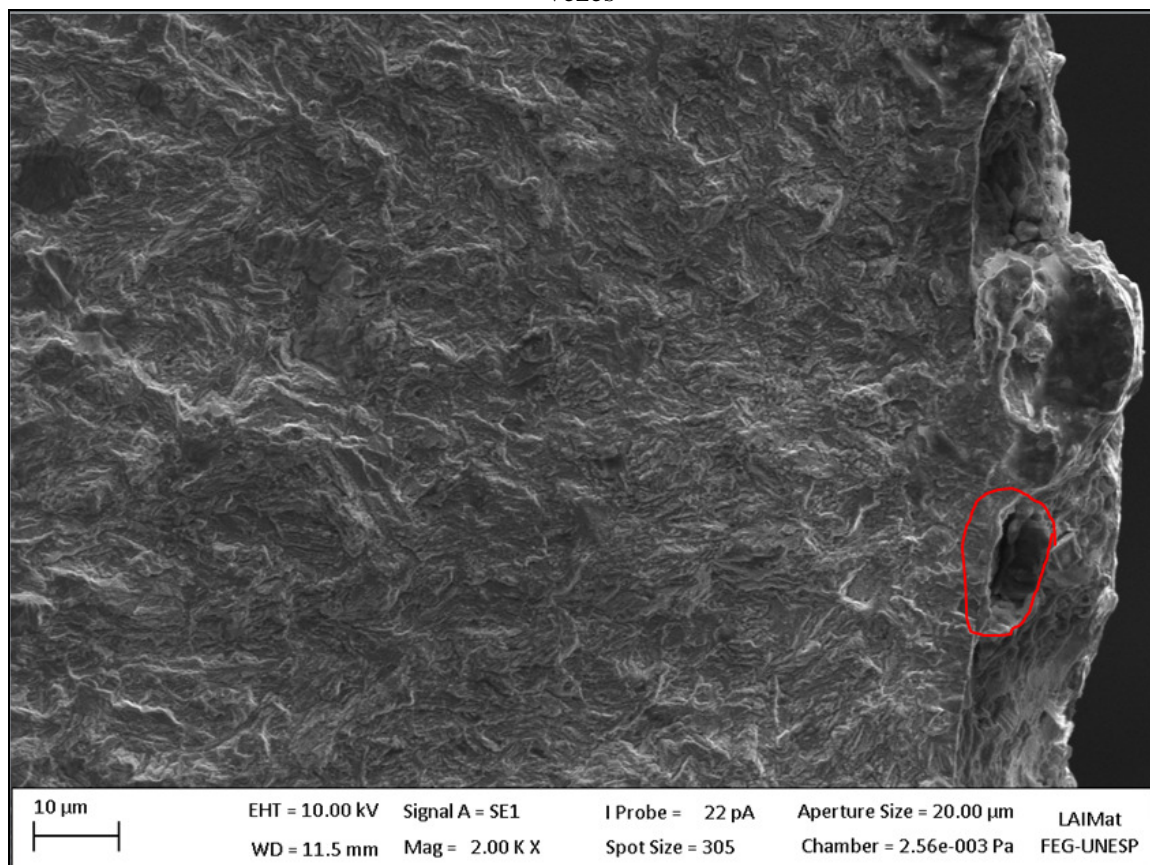


Por fim, na figura 33, com amplitude de 2000 vezes, verificamos o ponto em destaque:

Trinca secundária, mostrada em destaque na Figura 28.

Esta imagem consegue mostrar de forma geral os fatos comentados nas figuras anteriores, bem como mostra também que na região ensaiada não houve de fato problemas de inclusão, segregação, bolhas etc., pois o concentrador de tensão foi na região superficial já citada anteriormente.

Figura 33 - Imagem retirada do MEV a 2000 vezes



### 4.3 Resultados metalográficos

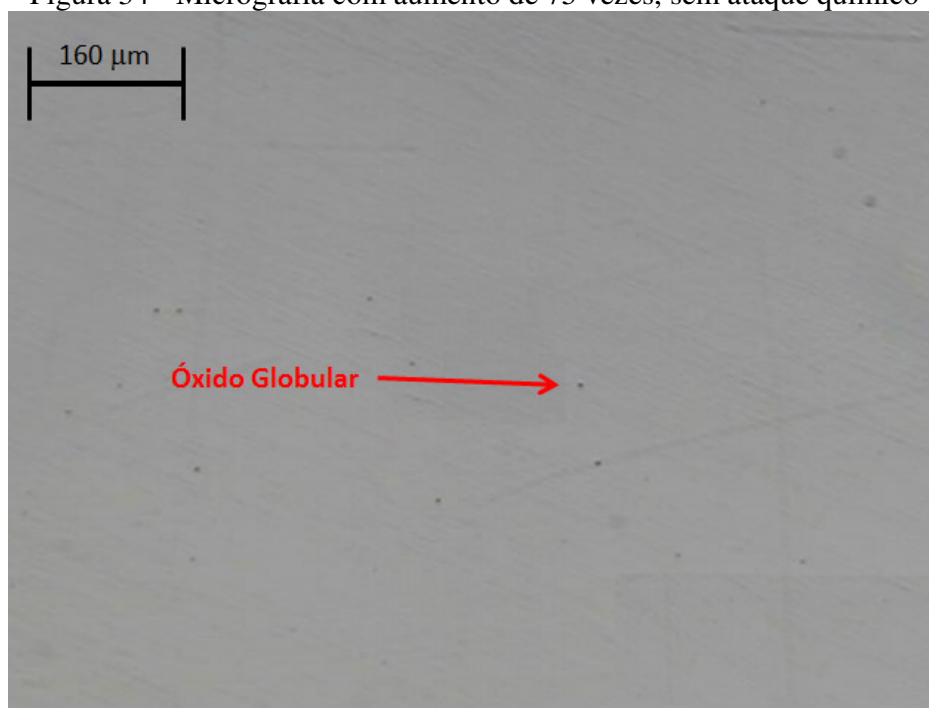
A partir das amostras retiradas para análise metalográfica, foram feitas duas análises:

#### 4.3.1 Verificação de inclusões a base de óxido globular

Esta verificação é feita utilizando o ataque químico de Nital 2%, de modo que esta análise nos mostrou a presença de poucos óxidos globulares, número 1, série fina, conforme norma ASTM E 45-51, transversal ao sentido de laminação, Figura 34.

Este defeito encontrado não interfere na integridade estrutural do material, como comprovado nos outros ensaios, inclusive no ensaio principal deste trabalho, de vida em fadiga.

Figura 34 - Micrografia com aumento de 75 vezes, sem ataque químico



#### 4.3.2 Verificação do contorno de grão e composição estrutural do material

Na figura 35, após o ataque com Nital 2%, sob aumento de 50 vezes e na Figura 36 sob o aumento de 100 vezes, verificamos a região mais, ferrita, e as regiões escurecidas são colônias de perlita bem como nota-se na estruturamartensita revenida.

Figura 35 - Micrografia do centro da linha de solda, amplitude de 150 vezes, API 5CT T95



Figura 36 - Micrografia com aumento de 600 vezes, Aço API 5CT



## 5 CONCLUSÕES

Como estudado neste trabalho, existe uma situação de pequenas tensões causadoras de falha por fadiga em tubos instalados *offshore*, criadas a partir da coluna d'água em movimento devido às marés (VIV's) e também as tensões por fadiga causadas pela diferença de temperatura na parte interna dos tubos (em alta temperatura temos redução da resistência à fadiga). Existe também um acelerador do processo de propagação de trincas, pois os tubos estão em contato permanente, na superfície externa, com água a baixas temperaturas (aumento de propagação de trincas).

Desta forma, a área da Engenharia de Petróleo, sub área da Engenharia Mecânica, em constante crescimento, precisa evoluir cada vez mais a respeito dos métodos de detecção dos concentradores de tensão, tais como trincas, segregações, bolhas, solda fria (para tubos soldados por indução) etc.

Conclui-se, por fim, que o aço avaliado, extraído do tubo QU939, aplicado à norma API 5CT T95, possui boa resistência à fadiga para utilização *offshore*, porém como foi dito que os tubos da norma API 5CT não possuem tanta influência das VIV's, devido às proteções que estes possuem contra estes fatores naturais. Porém este material, por ter se comportado bem, teria boa resistência caso fosse utilizado como *linepipe* (para transporte de fluidos em ambiente *offshore*). É uma aplicação ainda não tão divulgada, porém tem um campo muito promissor e, como mostrado neste trabalho, o material API 5CT T95 teria boa aplicabilidade.

Como apresentado nos resultados experimentais, obtivemos uma vida em fadiga infinita estimada, valor este de 10 milhões de ciclos, apresentado na literatura como valor ideal para resistência à fadiga, nas tensões menores ou iguais a 350 MPa, cujo pico das VIV's não alcança (entre 20 e 250 MPa).

Um fator não discutido neste trabalho, mas que tem suma importância, é referente aos revestimentos dos tubos, principalmente os casos estudados e quando há uma correlação entre fadiga e corrosão, como verificamos na Tabela 2 que os tubos tem uma vida útil maior quando revestido.

Num trabalho futuro é interessante avaliar a respeito da influência da corrosão na fadiga, que tem sido pauta de vários estudos nos últimos anos, analisando os vários tipos de revestimentos utilizados para aumento da vida útil.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALIZADEH H., D.A. HILLS, P.F.P. DE MATOS, et al. **A comparison of two and three-dimensional analyses of fatigue crack closure**, International Journal of Fatigue, v. 29, n. 2, pp. 222-231, 2007.

AMANATUREZA, **Efeitos da Chuva Ácida em Monumentos**. Acesso: <<http://amanatureza.com/conteudo/artigos/chuva-acida>>, página acessada em: 12 de Julho de 2013.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API Specification 5CT, Petroleum and natural gas industries - Steel pipes for use as casing or tubing for wells**. 9ª Ed., 270 p. New York, United States, 2011.

APOLO, Apolo Tubulars S/A. **Apresentação – Processo de Fabricação de Tubos, Módulo II, Formadora**. Lorena, São Paulo, Brasil, 2006.

ASSI, G. R. S. **VIV - Vibração Induzida por Vórtices**. 2013. 68 p. PNV5203 - Interação Fluido Estrutura I: fenomenologia e modelagem. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica. Escola Politécnica Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

BATALHA, A. F. **Análise de Fadiga de Estruturas Offshore Tipo Topside**. 2009. 154 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)– Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2009.

BBC, **Incêndio em oleoduto atinge favela no Quênia**. Acesso: <[http://www.bbc.co.uk/portuguese/videos\\_e\\_fotos/2011/09/110912\\_nairobi\\_rc.shtml](http://www.bbc.co.uk/portuguese/videos_e_fotos/2011/09/110912_nairobi_rc.shtml)>, página acessada em: 12 de Julho de 2013.

CALLISTER Jr., W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 724 p. 7ª Ed., São Paulo: Editora LTC, 2008.

CEPA, **História do petróleo**. Acesso: <<http://cepa.if.usp.br/energia/energia1999/Grupo1A/historia.html>>, Centro de Ensino e Pesquisa Avançada, USP. Página acessada em: 05 de Maio de 2013.

DET NORSKE VERITAS. **Recommended practice DNV-RP-C206: Fatigue Methodology of Offshore Ships**. 2006. Det Norske Veritas, Høvik, Noruega, 2006.

ÉPOCA, **Explosão de oleoduto no Quênia**. Acesso: <<http://revistaepoca.globo.com/Mundo/fotos/2011/09/explosao-de-oleoduto-no-quenia.html>>, página acessada em: 12 de Julho de 2013.

FERNANDES, S. A.; CYRYBIM J. C. R. **Análise de Fadiga de Estruturas Oceânicas**. 2010. 15 P. 23º Congresso Nacional de Transporte Aquaviário, Construção Naval e Offshore. Marinha do Brasil, COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 25 a 29 de Outubro de 2010.

FOX, R.W.; MCDONALD, A.T., **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. LTC, 4ª edição, Rio de Janeiro, Brasil, 1998.

GOMES, L. M. F.; MÜLLER, I. L. **Corrosão – fadiga em aço de alta resistência aspergido termicamente**. 2008, Art. 14. 13 p. Laboratório de Metalografia e Corrosão - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, FURG, Rio Grande, 2008.

KIYAN, C. **Ensaio de Fadiga**. Apostila 6, curso de Propriedades Mecânicas dos Materiais. Departamento de Materiais e Tecnologia, UNESP, Guaratinguetá, 2010.

LIMA, A. J. **Análise de Dutos Submarinos sujeitos a Vibrações Induzidas por Vórtices**. 2007. 120 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2007.

LOPES, R. K. D. **Análise de Estruturas Sujeitas a Vibrações Induzidas Por Vórtices**. 2006. 187 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2006.

MME, **Plano Nacional de Energia 2030**. 98 p., Ed. 2006 / 2007, Ministério de Minas e Energia, Brasília: Empresa de Pesquisa Energética, 2006.

SCHIJVE, J. **Fatigue of Structures and Materials** - Ed. 1, Kluwer Academic Publishers, Delft, Holanda, 2001.

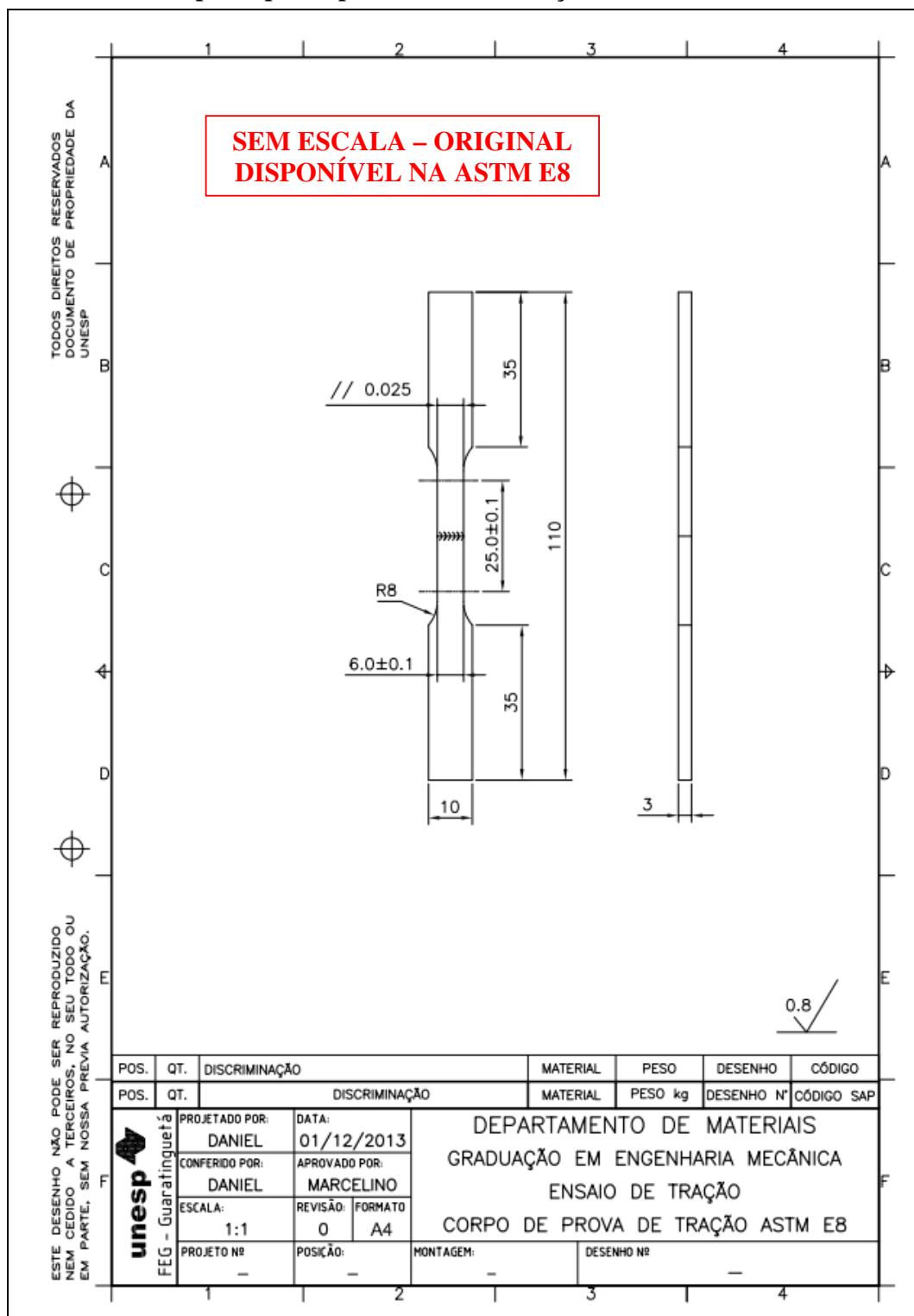
VALADÃO, A. M. F. **Análise de Fadiga de Estruturas Offshore Tipo Topside - Estudo de Caso.** 2011. 73 p. Monografia (Projeto de Graduação em Engenharia Civil) - Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

YERGIN, D. **O Petróleo - Uma História Mundial de Conquistas, Poder e Dinheiro.** 1096 p., 2ª Ed., Brasil: Editora Paz e Terra, 2010.

RIVA, I. R. **Análise de vibrações induzidas por desprendimento de vórtices no domínio da frequência considerando variação da massa adicionada.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2008.



# ANEXO 1 – Corpo de prova para ensaio de Tração ASTM E8





## ANEXO 2 – Corpo de prova para ensaio de Vida em Fadiga ASTM E466

