

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS
GERAIS – CAMPUS BETIM
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

VARNEY DA SILVA MEDEIROS JUNIOR

**ANÁLISE DE BOLHAS DESPRENDIDAS DURANTE O ENSAIO POR
FADIGA REALIZADO EM AMBIENTE SUBAQUÁTICO**

Betim

2021

VARNEY DA SILVA MEDEIROS JUNIOR

**ANÁLISE DE BOLHAS DESPRENDIDAS DURANTE O ENSAIO POR
FADIGA REALIZADO EM AMBIENTE SUBAQUÁTICO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso Bacharelado em Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Minas Gerais – Campus Betim para obtenção do grau de bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Msc. Gabriel Mendes de Almeida Carvalho

Betim

2021

REDE DE BIBLIOTECAS

FICHA CATALOGRÁFICA PARA TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

FICHA CATALOGRÁFICA

M2488a Medeiros Júnior, Varney da Silva.

Análise de bolhas desprendidas durante o ensaio por fadiga realizado em ambiente subaquático. / Varney da Silva Medeiros Júnior. - 2021.
63p.:il.

Orientador: Prof. Me. Gabriel Mendes de Almeida Carvalho.
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Instituto Federal de Minas Gerais. *Campus* Betim, 2021.

1. Fadiga. 2. Ambiente subaquático. 3. Mecânica de fratura.
I. Instituto Federal de Minas Gerais. II. Título.

CDD 531

Catálogo: Rejane Valéria Santos - CRB-6/2907

VARNEY DA SILVA MEDEIROS JUNIOR

**ANÁLISE DE BOLHAS DESPRENDIDAS DURANTE O ENSAIO POR
FADIGA REALIZADO EM AMBIENTE SUBAQUÁTICO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso Bacharelado em Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Minas Gerais – Campus Betim para obtenção do grau de bacharel em Engenharia Mecânica.

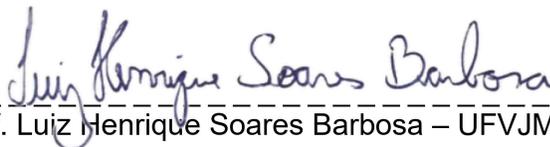
Aprovado em: 14 / 12 / 2021 pela banca examinadora:



Prof. Msc. Gabriel Mendes de Almeida Carvalho – IFMG (Orientador)



Prof. Fagner Coelho - UFMG



Prof. Luiz Henrique Soares Barbosa – UFVJM

AGRADECIMENTO

Certamente estes parágrafos não irão atender a todas as pessoas que fizeram parte dessa importante fase de minha vida. Portanto, desde já peço desculpas àquelas que não estão presentes entre essas palavras, mas elas podem estar certas que fazem parte do meu pensamento e de minha gratidão.

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus por ter me capacitado e me proveu de sabedoria para que eu possa alcançar os meus objetivos

Agradeço ao meu orientador Prof. Msc. Gabriel Mendes, pela sabedoria e companheirismo que me auxiliou em toda essa trajetória, me guiando e me aconselhando.

Aos meus colegas de sala.

A coordenação do Curso, pela cooperação.

Gostaria de deixar registrado também, o meu reconhecimento à minha noiva Andreza Linhares e a minha família, pois acredito que sem o apoio deles seria muito difícil vencer esse desafio.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização deste trabalho.

Ao IFMG, que ao longo de todos esses anos, me instruiu e me formou ao profissional que sou hoje.

Agradeço a UFMG que disponibilizou os equipamentos para que fossem realizados os ensaios.

RESUMO

Com a diminuição da oferta das reservas de recursos naturais em terra a busca desses recursos em ambiente subaquático vem ganhando magnitude nas últimas décadas, principalmente pela exploração do petróleo em plataformas *offshore*, com isso há a necessidade de que projetos e manutenção de componentes que trabalhem em ambiente molhado sejam otimizados para estes meios, buscando assim maior confiabilidade e vida útil para estes componentes. Este trabalho tem como objetivo estudar o desprendimento de bolhas durante o ensaio por fadiga realizado em ambiente subaquático, buscando o entendimento do fenômeno. A partir dos testes, foi observado que as bolhas aparecem em momentos específicos do ensaio, seguindo um comportamento onde a mesma cresce até atingir um diâmetro médio máximo e após isso, tende a diminuir desaparecendo antes do final do ensaio.

Palavras-chave: Fadiga. Ambiente subaquático. Mecânica de fratura.

ABSTRACT

With the decrease in the supply of natural resource reserves on land, the search for these resources in the underwater environment has been gaining magnitude in recent decades, mainly through the exploration of oil on *offshore* platforms, with this there is a need for projects and maintenance of components that work in a wet environment are optimized for these means, thus seeking greater reliability and service life for these components. This work aims to study the detachment of bubbles in a fatigue test carried out in an underwater environment, seeking to understand the phenomenon. From the tests, it was observed that the bubbles appear at specific moments of the test, following a behavior where it grows until reaching a maximum average diameter and after that, it tends to decrease, disappearing before the end of the test.

Keywords: Fatigue. Underwater environment. Fracture mechanics.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquema de deslizamento devido a cargas externas mostrando a formação de extrusão/intrusão.	18
Figura 2 - Esquema do crescimento da trinca de fadiga microscópica nas regiões I [modo de cisalhamento] e II [modo de tração].	19
Figura 3 - Estágios do processo de fadiga. Nucleação da trinca, propagação e fratura final.	20
Figura 4 - Os três modos de deslocamento da superfície de uma trinca. (a) Modo I, modo de abertura ou de tração; (b) Modo II, modo de deslizamento; e (c) Modo III, modo de rasgamento.	21
Figura 5 - Distribuição de tensões na vizinhança no vértice da trinca.	22
Figura 6 - Representação esquemática do crescimento de uma trinca de fadiga.	25
Figura 7 - Representação esquemática da variação da velocidade de propagação da trinca, da/dN , em função de ΔK no caso geral de aços, apresentando-se os diferentes estágios na propagação de trinca por fadiga.	26
Figura 8 - Efeito da razão de tensão na taxa de crescimento da trinca de fadiga.	30
Figura 9 - Ilustração esquemática do efeito de variáveis ambientais, frequência e razão de carregamento na taxa de trincas por fadiga em aços de alta resistência. ...	32
Figura 10 - Mudança na taxa de propagação da trinca devido a alterações da frequência de carregamento.	32
Figura 11 - Ensaio de fadiga com K-crescentes segundo ASTM E647.	34
Figura 12 - Esquema do corpo de prova que será utilizado - C(T).	36
Figura 13 - Diferentes direções de para a retirada do corpo de prova de uma chapa laminada.	36
Figura 14 - Esquema do Corpo de Prova com Pré-trinca.	37
Figura 15 - Câmara hiperbárica que será utilizada nos ensaios em meio aquoso. ...	38
Figura 16 - Tampas em acrílico para possibilitar visualização do corpo de prova durante o ensaio.	39
Figura 17 - Eixo construído para transmissão do atuador da INSTRON para o CP dentro da câmara.	40
Figura 18 - Imagem do sistema montado com destaque para o corpo de prova imerso dentro da câmara.	40
Figura 19 - Posicionamento da câmera junto à máquina INSTRON.	41
Figura 20 - Curvas $a \times N$ para os CP1 e CP2.	44
Figura 21 - Medição da imagem no CP2 com ciclo de 100000 no instante de 0,2s. .46	46
Figura 22 - Medição da imagem no CP2 com ciclo de 100000 no instante de 0,4s. .46	46
Figura 23 - Imagem das bolhas captadas no CP1 com ciclo de 75000.	47
Figura 24 - Imagem das bolhas captadas no CP1 com ciclo de 77000.	48
Figura 25 - Imagem das bolhas captadas no CP1 com ciclo de 79000.	48
Figura 26 - Imagem das bolhas captadas no CP1 com ciclo de 81100.	48
Figura 27 - Imagem do CP1 com ciclo de 83000.	49
Figura 28 - Imagem das bolhas captadas no CP2 com ciclo de 79000.	49

Figura 29 - Imagem das bolhas captadas no CP2 com ciclo de 80000.....	50
Figura 30 - Imagem das bolhas captadas no CP2 com ciclo de 86000.....	50
Figura 31 - Imagem das bolhas captadas no CP2 com ciclo de 100000.....	50
Figura 32 - Imagem do CP2 com ciclo de 103000	51
Figura 33 - Tamanho Médio das Bolhas CP1-5-10	52
Figura 34 - Tamanho Médio das Bolhas CP2-5-30	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características dos diferentes regimes de crescimento de uma trinca	28
Tabela 2 - Coeficiente C e m obtidos para condição de ensaio	33
Tabela 3 – Composição química do aço para confecção dos CPs.	35
Tabela 4 - Parâmetros do ensaio	43
Tabela 5 - Corpos de Prova ensaiados.	45

LISTA DE ABREVIATURAS

a_0	Comprimento inicial da trinca [mm]
a_c	Comprimento crítico da trinca [mm]
da/dN	Taxa de propagação de trinca por fadiga [mm/ciclo]
$f(a/W)$	Fator geométrico [adimensional]
K_{IC}	Fator de intensidade de tensão crítico no modo I de fratura no estado plano de deformações [MPa m ^{0,5}]
K_C	Fator de intensidade de tensão crítico no estado plano de tensões [MPa m ^{0,5}]
$K_{máx}$	Fator de intensidade de tensão máximo [MPa m ^{0,5}]
$K_{mín}$	Fator de intensidade de tensão mínimo [MPa m ^{0,5}]
K_{th}	Fator de intensidade de tensão limite [MPa m ^{0,5}]
ΔK	Variação do fator de intensidade de tensão [MPa m ^{0,5}]
σ_e	Limite de escoamento [MPa]
$\sigma_{máx}$	Tensão máxima [MPa]
$\sigma_{mín}$	Tensão mínima [MPa]
σ_{xx}	Tensão na direção x [MPa]
σ_{yy}	Tensão na direção y [MPa]
σ_{zz}	Tensão na direção z [MPa]
$\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yy}$	Tensões de cisalhamento [MPa]

LISTA DE SIGLAS

ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
MFLE	Mecânica de Fratura Linear Elástica
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVOS	15
2.1. OBJETIVO GERAL	15
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
3. JUSTIFICATIVA	16
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
4.1. FADIGA	17
4.1.1 Aspectos Gerais da Fadiga	17
4.1.2 Mecânica de Fratura Aplicada à Fadiga	20
4.2 PROPAGAÇÃO DA TRINCA POR FADIGA	23
4.3 FATORES QUE AFETAM A PROPAGAÇÃO DA TRINCA POR FADIGA	28
4.3.1 Influências da Microestrutura	28
4.3.2 Carregamento	29
4.3.3 Efeito da Razão de Carregamento (R)	29
4.3.4 Influência do Meio na Propagação da Trinca	30
4.3.5 Influência da frequência	32
4.4 ENSAIOS DE PROPAGAÇÃO DE TRINCA POR FADIGA	33
5. METODOLOGIA	35
5.1. INTRODUÇÃO	35
5.2. CORPOS DE PROVA	35
5.2.1. PRÉ-TRINCAMENTO	37
5.3. MÁQUINA E DISPOSITIVO	38
5.3.1. Máquina Servo-Hidráulica Universal	38
5.3.2. Câmara Hiperbárica	38
5.3.3. Montagem Dos Equipamentos Na Máquina	40
5.4. FILMAGEM E ANÁLISE DAS IMAGENS	41
5.5. TIPOS DE AMBIENTE	42
5.5.1. Ambiente Subaquático	42
5.6. TIPO DE ENSAIO	42
5.7. PARÂMETROS DO ENSAIO	42
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
6.1. CURVAS A X N	44
6.2. ANÁLISE DAS BOLHAS	45
6.2.1. CP 1	47
6.2.2. CP 2	49
6.2.3. Diâmetro Das Bolhas X Ciclos	51
7. CONCLUSÃO	53
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54

1. INTRODUÇÃO

Devido à expansão das usinas hidrelétricas e petrolíferas, estudos relacionados à vida útil dos componentes metálicos estão em constante desenvolvimento nas universidades e indústrias para aperfeiçoar as tecnologias existentes [MADDOX; RAZMJOO, 1998]. Este aperfeiçoamento visa entender os materiais e garantir uma maior vida útil das estruturas, de forma que haja uma maior competitividade entre as empresas e possa evitar acidentes ao meio ambiente e como consequência afetar negativamente a economia.

As plataformas petrolíferas modernas são projetadas para suportar exposições aos esforços provocados por tempestades, furacões e grandes quantidades de ondas. [CARVALHO, 2007]. Esses esforços, além de possuírem alta magnitude, normalmente são cíclicos e perenes, apresentando, portanto, flutuações das cargas impostas durante toda a vida do componente.

Considera-se que a estimativa da vida útil de estruturas submetidas a esse fenômeno é de grande importância no projeto de uma obra ou equipamento para garantir a sua estabilidade [TAIER, 2002].

Além da preocupação necessária a respeito do ambiente corrosivo que esses materiais estão submetidos, um outro mecanismo que deve ser levado em consideração é a fratura por fadiga que esses componentes podem apresentar. A fadiga já é amplamente difundida e considerada em projetos mecânicos, porém, na sua grande maioria, os ensaios são realizados em ambiente seco e conseqüentemente os dados e as propriedades coletadas não levam em consideração importantes interações que o material pode ter com o meio de trabalho que será realmente encontrado pelos componentes offshore.

Para a determinação dos cálculos dessas estruturas, as cargas externas são estabelecidas separadamente para os efeitos locais (estrutura) e globais (ambientais), pois podem ocasionar falhas por fadiga [PICCINNI, 2003]. Por exemplo, os efeitos da pressão hidrostática no chapeamento, enrijecedores de uma estrutura semi-submersível, são determinados pela ação direta da pressão na chapa do flutuador. Além disso, deve-se verificar o colapso hidrostático analisando a possibilidade de um membro tubular ser deformado em face de ação da pressão hidrostática em conjunto com os demais esforços solicitantes [PINHO, 2001], que são fatores que contribuem

para a ocorrência de fadiga subaquática. Todas as solicitações que variam em intensidade e/ou direção provocam alteração de tensões na estrutura e podem causar falhas por fadiga [KIEPPER, 2004].

Na elaboração do projeto, o engenheiro deve considerar a ação da pressão hidrostática em conjunto com os demais esforços para a falha por fadiga subaquática. Como evidenciado, a fadiga é um fator importante a ser observado durante a elaboração de um projeto. Diante dessa situação, algumas considerações devem ser feitas, como a amplitude da tensão alternada. Com a tensão alternada constante é possível trabalhar utilizando as curvas S-N-P, obtidas experimentalmente, e determinar a probabilidade de falha de um material. Devido aos fatos relatados, é importante conhecer as propriedades mecânicas dos materiais utilizados nessas construções mecânicas, tais como: limite de ruptura, limite de elasticidade e a fadiga, pois estão em um ambiente diferente e na presença da pressão hidrostática [CARVALHO, 2007].

Para esse trabalho será estudada a propagação de trinca por fadiga em ambiente subaquático. Serão realizados testes em ambiente aquoso variando o meio em que o corpo de prova será inserido, ou seja, algumas características do ambiente serão variadas afim de reprimir ou promover a ocorrência de fenômenos que podem propagar as trincas. Além da alteração do meio outros parâmetros como a frequência e razão da aplicação da carga (R) serão estudados para relacionar a influência destes parâmetros na ocorrência do fenômeno.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Apresentar o desprendimento de bolhas durante o ensaio de fadiga realizado em ambiente subaquático e demonstrar a ocorrência desse fenômeno.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Visando atingir o objetivo principal, alguns objetivos são requeridos:

- Comparar a propagação de trincas por fadiga do aço A36 ensaiado em ambiente subaquático para o mesmo nível de carregamento e para frequências diferentes.
- Capturar, através de imagens e vídeos, o desprendimento de bolhas ocorrendo durante o ensaio de fadiga.

3. JUSTIFICATIVA

O fenômeno da fadiga subaquática deve ser estudado e trabalhado, pois os testes realizados em materiais normalmente são feitos ao ar, não retratando a real situação. No ambiente aquático, a peça está em um outro ambiente, onde as características do meio são diferentes, como densidade, viscosidade, pressão, interação química, etc. e podem influenciar na propagação de trincas e consequente vida útil de componentes utilizados nestes ambientes.

Ressalta-se que a previsão da vida útil de estruturas submetidas à fadiga é de grande importância no projeto de uma obra ou equipamento. Portanto, existe a necessidade de um estudo para analisar esse fenômeno considerando o meio ambiente e outros fatores.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1. FADIGA

O termo fadiga pode ser definido como um processo pelo qual mudanças progressivas e localizadas de natureza irreversível ocorrem no material sujeito a tensões ou deformações flutuantes. Esses esforços podem resultar em trincas ou na falha completa do material. [ASTM E-1823-96].

Fadiga mecânica é a degradação das propriedades mecânicas levando à falha do material ou de um componente sob carregamento cíclico [MEGGIOLARO; CASTRO, 2003].

4.1.1 Aspectos Gerais da Fadiga

O mecanismo de falha por fadiga compreende as seguintes fases sucessivas: nucleação de uma ou mais micro trincas, propagação destas nos planos de alta tensão de tração formando bandas de deslizamento e fratura final [GUIMARÃES, 2009].

Uma consideração estrutural marcante na fadiga é pelo fato de as trincas de fadiga geralmente serem nucleadas em uma superfície livre e nas raras situações em que essas discontinuidades iniciam no interior do material, sempre existe uma interface envolvida [DIETER, 1981]. Essa etapa de iniciação é considerada como sendo o estágio I do processo de fadiga e denomina-se nucleação da trinca. Além disso, na superfície ocorrem geralmente defeitos gerados pelo processo de fabricação, que podem funcionar como concentradores de tensão, podendo ainda ser agravados pela atuação do meio ambiente agressivo [GUIMARÃES, 2009].

A nucleação preferencial das trincas por fadiga na superfície ou nas proximidades a ela sob carregamento cíclico é explicada pelo fato de que a deformação plástica ocorre com mais facilidade na superfície e que as etapas de deslizamento. Todavia, o surgimento de micro trincas é fortemente influenciado pelas características de deslizamento dos planos cristalográficos, pelo tamanho de grão e pela extensão de plasticidade próxima à ponta da trinca [STEPHENS et al., 2001]. O processo de deslizamento é causa da formação de uma Intrusão e Extrusão na superfície do material. Este fenômeno é apresentado na figura abaixo:

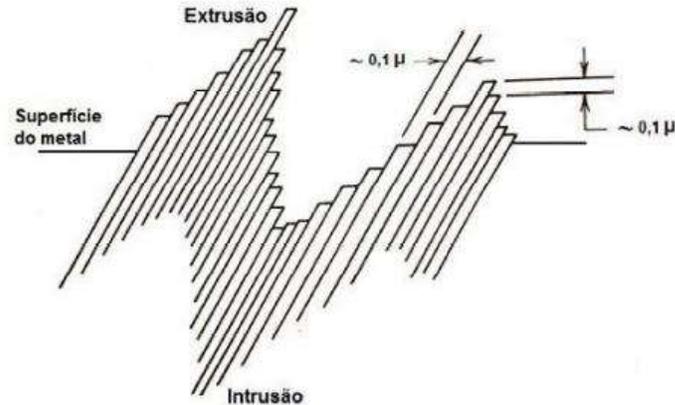
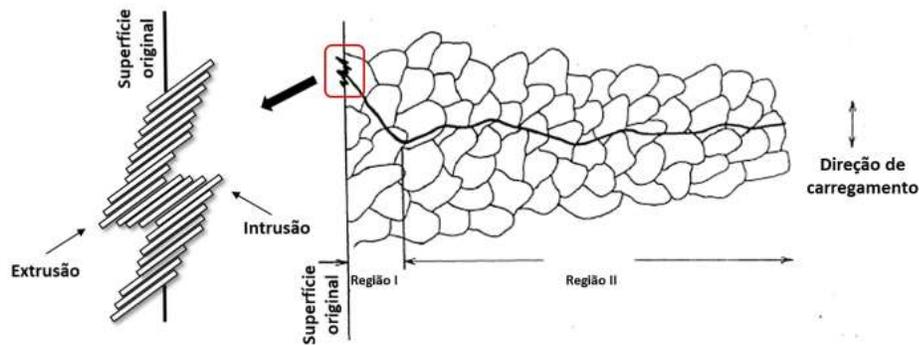


Figura 1 - Esquema de deslizamento devido a cargas externas mostrando a formação de extrusão/intrusão.

FONTE – STEPHENS et al., 2001. [Adaptada]

A transição do estágio I para o estágio II de propagação acontece devido à redução da tensão de cisalhamento e aumento na tensão de normal de tração na ponta da trinca. O crescimento da trinca passa então a propagar em um plano perpendicular a direção de máxima tensão de tração. Quando a intensidade de tensão cresce devido ao crescimento da trinca e/ou aumento de tensão aplicada, escorregamentos começam a ocorrer em planos diferentes do estágio I, iniciando o estágio II de propagação. [ANDERSON, 2005].

É mostrado na Figura 2 um esquema do processo de transição do estágio I para o estágio II na propagação da trinca por fadiga nos metais, tem-se o início da nucleação de uma trinca em uma região de bandas de escorregamento, que formam as intrusões e extrusões na superfície e que geram concentração de tensão. Com o aumento do número de ciclos, a rugosidade superficial provocada pelo aumento de intensidade das intrusões e extrusões leva à formação de discontinuidades que podem ser consideradas micro trincas [PERES, 2008].



**Figura 2 - Esquema do crescimento da trinca de fadiga microscópica nas regiões I [modo de cisalhamento] e II [modo de tração].
 FONTE – STEPHENS et al., 2001. [Adaptada]**

O período de transição da iniciação para propagação da trinca não tem uma definição precisa. Entretanto, no final do estágio de iniciação da trinca, o tamanho da trinca é da ordem de alguns poucos grãos do material. Para os aços, este tamanho de trinca compreende a faixa típica de 0,1 a 1,0 mm. Geralmente, o período de iniciação da trinca responde pela maior parte da vida em fadiga de um componente de aço, particularmente no regime de alto ciclo de fadiga (número de ciclos acima de 10^4). No regime de baixo ciclo de fadiga (número de ciclos abaixo de 10^4), a maior parte da vida é gasta na propagação da trinca [GUIMARÃES, 2009].

O estágio II refere-se à propagação da macro trinca, normalmente ao plano de tensão principal. Esse estágio é responsável por caracterizar a região de fratura mais característica do processo de fadiga, as “marcas de praia”, que são normalmente visíveis a olho nu e pode corresponder à maioria da área da superfície da fratura, ainda que não corresponda necessariamente à maior parte do número de ciclos total suportado pela peça [CETLIN e SILVA, 1979].

Com a contínua evolução da frente de trinca, num determinado momento, a seção remanescente do material não mais resiste à solicitação e ocorre então, na última fase do processo (Estágio III), a falha final que pode ser através da fratura do tipo frágil, dúctil ou uma combinação destas a depender do material. A ruptura final do material ocorre quando a trinca desenvolvida progressivamente atinge o tamanho crítico para uma propagação instável, e a área da fratura desenvolvida progressivamente depende das tensões aplicadas e das propriedades do material, como resistência mecânica e tenacidade [CETLIN e SILVA, 1979].

Na Figura 3 é apresentada um esquema da superfície de fratura de um componente que sofreu o processo de fadiga e ao lado uma imagem de um

componente fraturado por fadiga, comparando as regiões como as apresentadas no esquema.

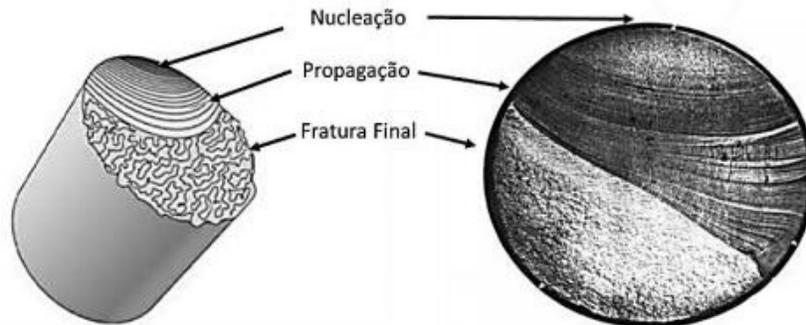


Figura 3 - Estágios do processo de fadiga. Nucleação da trinca, propagação e fratura final.
FONTE – NORTON, 2004. [Adaptada]

4.1.2 Mecânica de Fratura Aplicada à Fadiga

A iniciação de uma trinca compreende as mudanças em nível microestrutural que causam nucleação de danos permanentes, seguidos pela criação de microdefeitos até o crescimento e coalescência desses defeitos, o que produz uma trinca dominante, com comprimento muitas vezes maior que o diâmetro dos grãos que formam a microestrutura do material [ARIAS, 2017]. A propagação da trinca dominante tem uma etapa com crescimento subcrítico, ou seja, crescimento estável, até atingir um tamanho crítico, que causará a instabilidade da estrutura ou fratura da mesma. Suresh [2004] enfatiza a grande influência dos fatores mecânicos (carregamento, tensões residuais), microestruturais (arranjo cristalino) e ambientais (ambiente ácido ou básico) sobre a nucleação e taxa de crescimento de defeitos. Nos dias atuais, avalia-se a vida à fadiga de um componente estrutural de três formas:

1. A metodologia clássica $S-N$ (*stress-based*) denominada de alto ciclo devido a grande quantidade de ciclos para ocorrência da falha por fadiga.
2. A metodologia $\epsilon-N$ (*strain-based*) usada para fadiga de baixo ou alto ciclo;
3. A metodologia $da/dN - \Delta K$ (*defect-tolerant*).

A propagação de trinca por fadiga é usualmente calculada usando uma metodologia conhecida como “dano tolerável” (defect tolerant) [ARIAS, 2017]. Uma grande porcentagem das estruturas utilizadas pela engenharia possui algum defeito devido ao seu processo de fabricação ou da sua utilização, o que gera, que a vida desses componentes finda devido a propagação de um defeito que existia anteriormente.

4.1.2.1 Mecânica de fratura linear elástica (MFLE)

A Mecânica de Fratura Linear Elástica (MFLE) descreve matematicamente uma relação entre a magnitude e distribuição do campo de tensões na ponta de uma trinca e a tensão nominal aplicada na peça. Este campo de tensões na ponta da trinca pode ser caracterizado por um parâmetro K , chamado fator de intensidade de tensão, que por sua vez, está relacionado com a tensão nominal e ao tamanho da trinca [ANDERSON, 2005]

A tenacidade à fratura de componentes que contém descontinuidades pode também ser estudada por meio de análise de tensões, baseada nos conceitos da teoria da elasticidade [KANNINEN et al, 1986]. Irwin (1957) publicou soluções para distribuições de tensões no vértice da trinca associadas com os três modos principais de carregamento apresentados na Fig. 4, os quais envolvem diferentes deslocamentos das superfícies da trinca [ANDERSON, 1995].

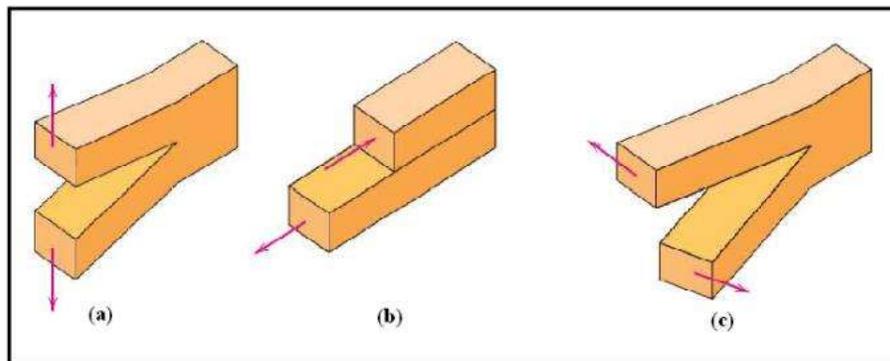


Figura 4 - Os três modos de deslocamento da superfície de uma trinca. (a) Modo I, modo de abertura ou de tração; (b) Modo II, modo de deslizamento; e (c) Modo III, modo de rasgamento.
FONTE – [ANDERSON, 1995]

Modo I: Modo de abertura ou tração, no qual as superfícies da trinca se deslocam perpendicularmente a si mesmas e na direção das cargas. O modo I de carregamento é o encontrado na maioria das situações de engenharia.

Modo II: Modo de carregamento de cisalhamento puro, o deslocamento das superfícies da trinca é paralelo a elas e perpendicular à frente de propagação.

Modo III: Modo de rasgamento ou de cisalhamento transversal, no qual as superfícies da trinca se movem uma relativa à outra e paralelamente à aresta da trinca.

Westergaard determinou a natureza das distribuições de tensões na ponta de uma trinca, utilizando uma análise de tensões baseada em conceitos da teoria da elasticidade [SIH, 1966]. Observando a Figura 5 e utilizando as teorias e análise de tensões de Irwin, com a utilização de coordenadas polares, obtêm-se às seguintes equações:

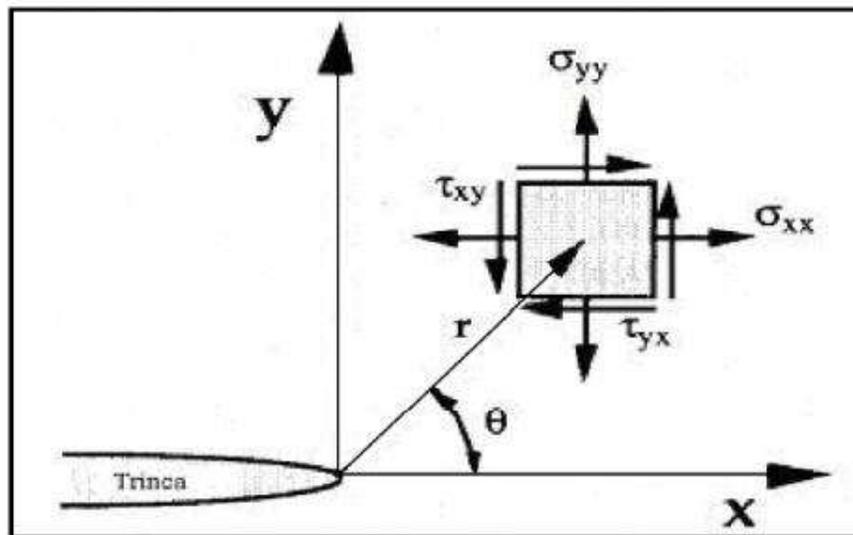


Figura 5 - Distribuição de tensões na vizinhança no vértice da trinca
 FONTE – [ANDERSON, 1995]

$$\sigma_{yy} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (4.1)$$

$$\sigma_{xx} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (4.2)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \quad (4.3)$$

Definie-se o K como o fator de intensidade de tensão. Basicamente, o K exerce uma função de fator de escala de forma que seja possível definir o campo de tensões no vértice da trinca. Observa-se, a partir das equações acima, o fator K pode ser descrito como uma função da tensão e do comprimento da trinca, ou seja,

$$K = f(\sigma, a) \quad (4.3)$$

A espessura do corpo de prova também influencia no estado de tensões. De modo onde, caso a chapa seja fina, a tensão na direção da espessura é nula, onde $\sigma_{zz} \approx 0$. Caso a chapa apresente uma espessura considerável, de forma que a tensão não seja desprezível, então $\sigma_{zz} = \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})$ e ocorre restrição à deformação ao longo da espessura. Neste caso, tem-se a condição de estado plano de deformação. Em geral, a expressão de K assume a forma:

$$K = \sigma\sqrt{\pi a} f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (4.4)$$

Onde, $f\left(\frac{a}{W}\right)$ é uma função de fatores geométricos.

Assegurando que a falha de um material se associa a uma combinação de tensões e deformações, pode-se esperar que a propagação instável da trinca ocorra, quando K atingir ou exceder um valor crítico [OHJI, 1983]. Em condições de estado de plano de tensões, este valor crítico recebe a denominação de K_C . O valor de K_{IC} se relaciona ao modo I e é uma propriedade do material em estado plano de deformação [ANDERSON, 1995]. Assim, K_{IC} representa a resistência inerente do material à falha, na presença de uma trinca. Esse fator intensidade de tensão crítica é uma constante do material, quando certas condições são encontradas [OHJI, 1983].

4.2 PROPAGAÇÃO DA TRINCA POR FADIGA

Na Mecânica de Fratura Linear Elástica, a introdução do conceito do fator de intensidade de tensões (K) é de extrema importância, pois descreve o campo de tensões na ponta da trinca. Esse é definido de acordo com a equação 4.5. Durante os ciclos de fadiga, para carregamento de amplitude constante, a variação do

carregamento aplicado é responsável pela alternância na tensão entre um valor mínimo e um valor máximo, ou seja, submetendo a estrutura a uma variação de tensão constante $\Delta\sigma$, que em um corpo trincado, corresponde à variação entre um K_{min} e K_{max} . A diferença entre K_{min} e K_{max} é denominada amplitude do fator de intensidade de tensões [ARIAS, 2017]. Portanto:

$$\Delta K = K_{max} - K_{min} = \Delta\sigma\sqrt{\pi a} f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (4.5)$$

Estudando o crescimento das trincas por fadiga, Paris et al. [1960] observou que o crescimento da trinca por ciclo de carregamento era função de ΔK atuando na ponta da trinca. Partindo desse princípio, utilizou-se o fator de intensidade de tensões (ΔK) para descrever a propagação das trincas por fadiga. A taxa de crescimento de trinca por fadiga pode ser definida como a razão da extensão da trinca, Δa , pelo número de ciclos associado com este crescimento, ΔN , ou seja, $\Delta a/\Delta N$, quando $\Delta N \rightarrow 0$:

$$\lim_{\Delta N \rightarrow 0} \frac{\Delta a}{\Delta N} = \frac{da}{dN} \quad (4.6)$$

A partir de experimentos, observou-se que a evolução das trincas por fadiga durante o carregamento cíclico pode ser representada através de uma curva relacionando o comprimento da trinca (a) em função do número de ciclos (N).

Curvas que descrevem o crescimento da trinca em função do número de ciclos da aplicação da carga, em solicitações de variação constante de tensão, são esquematizadas na Figura 6. A curva 1 demonstra um ciclo com amplitude de tensão σ_1 , enquanto a curva 2 corresponde a um ciclo com amplitude de tensão σ_2 em que $\sigma_1 > \sigma_2$ [HERTZBERG *et al*, 1977]. Considera-se que em ambos os casos a trinca foi iniciada a partir do mesmo entalhe ou defeito inicial de dimensão a_i , propagando-se com uma velocidade crescente da/dN até atingir uma dimensão crítica a_c em que ocorre a ruptura ou propagação instável. O número de ciclos necessários para que a trinca atinja a dimensão crítica a_c e, conseqüentemente, a ruptura é denominado, N_r .

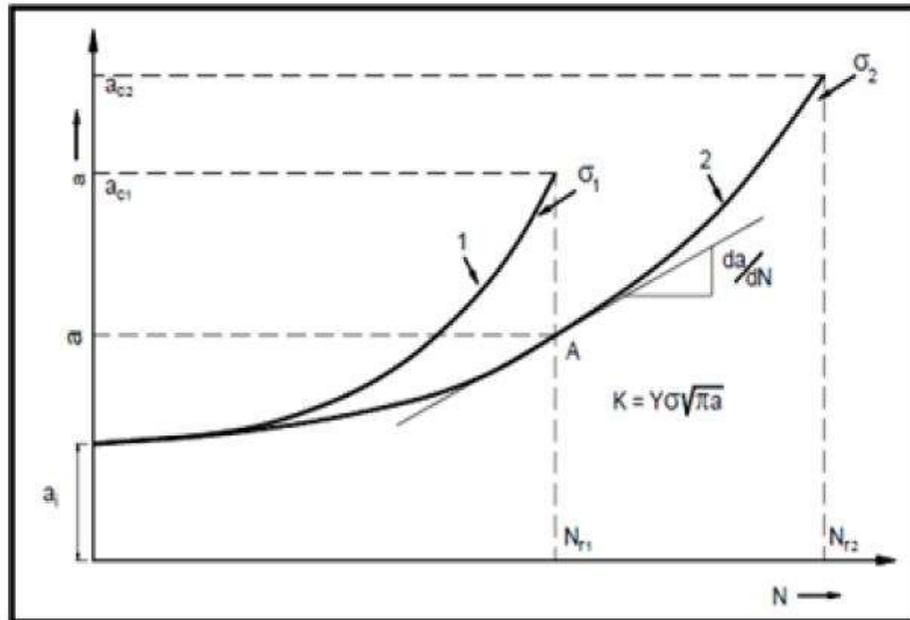


Figura 6 - Representação esquemática do crescimento de uma trinca de fadiga.
 FONTE -(HERTZBERG et al, 1977).

A Figura 6, mostra que a amplitude da tensão é um parâmetro importante do processo de propagação. Para as amplitudes de tensão $\sigma_1 > \sigma_2$, as curvas de propagação são semelhantes, mas a inclinação da curva 1 é maior que a da curva 2, entretanto, o comprimento crítico e o número de ciclos necessários para a ruptura na curva 1 são menores que os da curva 2 [ARIAS, 2017]. Este resultado é coerente uma vez que a amplitude da tensão 1 é maior que a amplitude da tensão 2.

Observa-se que a velocidade de propagação da trinca, da/dN , é uma variável importante para a determinação da vida em fadiga de uma estrutura e está relacionada ao valor da variação do fator de intensidade de tensões atuante. Os valores possíveis de variação do fator de intensidade de tensões atuante são inferiores à tenacidade à fratura, K_{IC} , valor crítico que provocaria a fratura instável do material. Em uma análise de fadiga, o valor do fator de intensidade de tensão é variável devido à variação cíclica da tensão aplicada e ao incremento no comprimento da trinca. Logo, o fator de intensidade de tensão também descreve o campo de tensão na ponta de uma trinca em análise de fadiga. Existe, portanto, uma relação entre a taxa de propagação da trinca e a variação do fator de intensidade de tensões [PARIS et al, 1960]. A relação entre eles é representada pela curva da/dN vs ΔK em escala logarítmica, como na Figura 7.

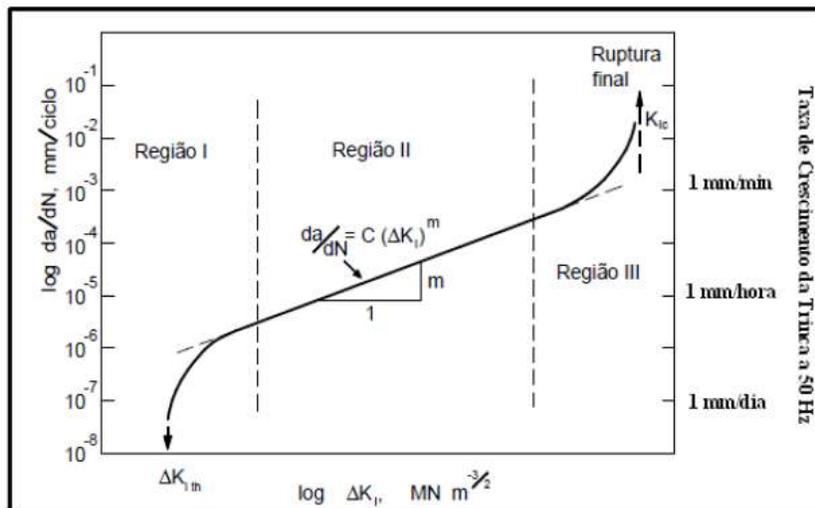


Figura 7 - Representação esquemática da variação da velocidade de propagação da trinca, da/dN , em função de ΔK no caso geral de aços, apresentando-se os diferentes estágios na propagação de trinca por fadiga.
FONTE - (SURESH, 2004)

A curva apresentada na Figura 7 tem uma forma sigmoide, destacando-se três regiões bem distintas.

Região I: Região correspondente a velocidades muito baixas de propagação onde é possível definir um valor de ΔK_I abaixo do qual não há propagação, ou não tem significado por ser menor que 10^{-7} mm/ciclo. Este limiar é representado por ΔK_{Ith} (th, do inglês, threshold), abaixo do qual não há crescimento observável [RITCHIE, 1979]. Outra definição para ΔK_{Ith} é, de acordo com a ASTM E647-15, o valor de ΔK que corresponde a uma taxa de propagação da trinca de 10^{-7} mm/ciclo. Este valor corresponde, na frequência de 1 Hz, a um crescimento de trinca de 0,259 mm em 30 dias. Esta região é bastante sensível à microestrutura do material (morfologia, dispersão de partículas de segunda fase, tamanho de grão e inclusões), razão de tensões e ao meio ambiente [RITCHIE, 1979]. Nesta região, tem sido demonstrado que o aumento de R (Razão de carregamento) acarreta a diminuição do ΔK_{Ith} , sendo que muitos autores [MINAKAWA et al, 1981][FORTH et al, 2003] atribuem esse fenômeno à influência dos mecanismos de fechamento de trinca atuantes e ao efeito do histórico de carregamento.

Lawson (1999) menciona a existência de critérios de carregamento definindo a existência de dois tipos de limite. O limite de propagação da trinca de fadiga é aquele

no qual as trincas por fadiga não crescem significativamente, enquanto o limite de fadiga é aquele em que as trincas não são formadas

Região II: A taxa típica de propagação da trinca correspondente aos resultados obtidos utilizando a norma ASTM E647-15 estão na faixa de 10^{-5} e 10^{-3} mm/ciclo [BEDEN, 2009]. Nessa região, o gráfico mostra uma relação linear entre $\log(da/dN)$ e $\log(\Delta K)$, que pode ser expressa pela equação de Paris, [PARIS et al, 1960].

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K_I)^m \quad (4.6)$$

Onde: da/dN é a taxa de crescimento da trinca por fadiga; C e m são constantes que dependem da tensão média e das condições ambientais. Matematicamente, estes parâmetros são o coeficiente linear e angular da reta, respectivamente.

Neste estágio ocorrem valores de intensidade de tensão mais elevados com a zona plástica na ponta da trinca incorporando muitos grãos. O processo de crescimento de trinca envolve fluxo através de dois sistemas de escorregamento e a trinca cresce através do avanço de uma quantidade fixa por ciclo de tensão com evidência das estrias de fadiga [LAL, 1994].

Região III: É correspondente à aproximação da condição para a propagação instável da trinca, onde a taxa de propagação da trinca é muito elevada, valores de da/dN maiores a 10^{-3} mm/ciclo e a vida restante em propagação é muito pequena. É uma região de superposição de mecanismos de estrias e fratura monotônica. Reflete a proximidade da propagação instável da trinca quando o valor de K_{max} atinge a tenacidade à fratura. Esta região é controlada primariamente pela tenacidade à fratura do material [BEDEN, 2009]. As características de cada regime de propagação são resumidas na Tabela 1.

Tabela 1 - Características dos diferentes regimes de crescimento de uma trinca

	Estágio I	Estágio II	Estágio III
Terminologia	Baixa taxa de Crescimento (quase linear)	Média taxa de Crescimento (Regime de Paris)	Alta taxa de Crescimento
Modo Microscópio de Falha	Estágio I, cisalhamento simples	Estágio II (estriações) e duplo deslizamento	Modos estáticos adicionais
Superfície de Fratura	Faceta ou Serrilhada	Plana, com ondulações	Em geral clivagem ou coalescência de microcavidades
Nível de Fechamento de Trinca	Alto	Baixo	N/A
Efeito da Microestrutura	Alto	Baixo	Alto
Efeito da Razão de Carregamento, R	Alto	Baixo	Alto
Efeito do Estado de Tensões	N/A	Baixo	Alto

FORTE – (SURESH, 2004)

4.3 FATORES QUE AFETAM A PROPAGAÇÃO DA TRINCA POR FADIGA

A taxa de propagação de trinca sofre a influência de muitas variáveis podendo ser externas ou do próprio material. Assim, nos materiais metálicos de um modo geral, os fatores mais comumente considerados na literatura que tendem a influenciar a propagação de uma trinca de fadiga são: microestrutura, carregamento e meio-ambiente [CUI, 2002] [NEWMAN, 1998].

4.3.1 Influências da Microestrutura

O tipo do material, tal como, ferro fundido, alumínio, titânio, aços e outros, e as condições de processamento, como por exemplo, forjamento à quente ou à frio, extrusão, laminação, tratamentos térmicos e demais processos, são importantes fatores que afetam o comportamento à fadiga dos materiais e são responsáveis pelas variações microestruturais nos mesmos [CUI, 2002].

Segundo, Das et al. [2006], a abordagem sobre a influência da microestrutura na propagação de trinca por fadiga inclui diversos parâmetros, tais como: tamanho e

de grão e textura, distribuição e composição das fases, tamanho e distribuição de partículas e precipitados, entre outros.

Liaw (1988) discute a influência da microestrutura [tamanho de grão] na taxa de propagação de trinca por fadiga no cobre na região de ΔK_{th} para diferentes valores de R. Ele observou que em relação à microestrutura, para valores de R baixos, o aumento do limite de escoamento do material geralmente decresce a resistência à propagação da trinca próximo ao *threshold*, enquanto o aumento do tamanho de grão promove o efeito inverso. Para valores de R elevados, houve diminuição da influência da microestrutura e do meio ambiente na taxa de crescimento da trinca de fadiga [ARIAS, 2017].

4.3.2 Carregamento

É bem documentado que a aplicação de carregamento cíclico pode acarretar o processo de fadiga. No entanto, uma mudança na intensidade do carregamento invariavelmente resulta em efeitos transitórios que afetam o crescimento de trinca por fadiga e, por conseguinte, a vida em fadiga dos componentes. Por esse motivo, o estudo da quantificação desses efeitos tem sido realizado por mais de trinta anos [SADANANDA, 1999].

4.3.3 Efeito da Razão de Carregamento (R)

A razão entre as cargas mínima e máxima é utilizada como o principal parâmetro mecânico nos ensaios de propagação de trinca por fadiga. Fixado o R, a taxa de propagação dependerá de ΔK . Para um mesmo ΔK e aumentando-se R, aumenta-se K_{min} e K_{max} e há uma tendência ao aumento da taxa de propagação de trinca [KUJAWSKI et al, 1987]. O aumento na taxa de propagação ocorre em todas as regiões da curva sigmoideal Figura 8.

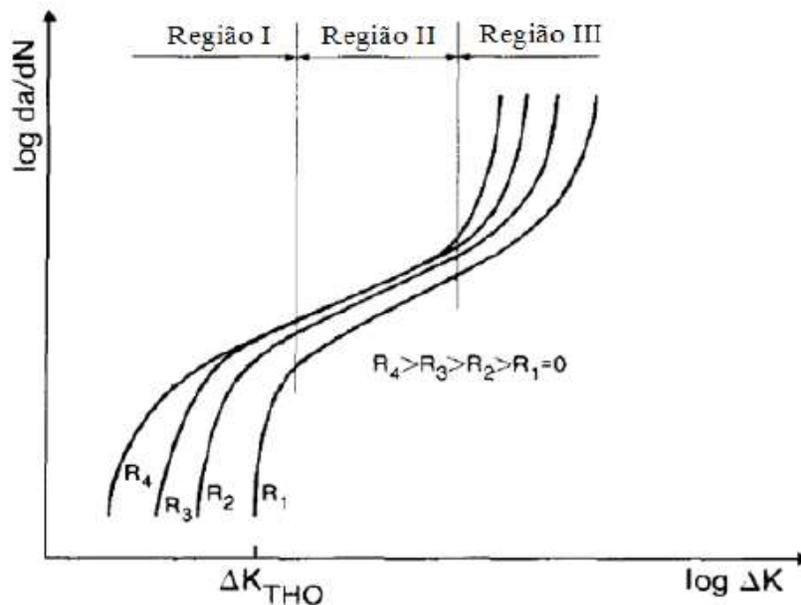


Figura 8 - Efeito da razão de tensão na taxa de crescimento da trinca de fadiga.
 FONTE - (KUJAWSKI et al, 1987)

Enquanto na região II este aumento é pequeno, na região III, onde a tenacidade à fratura K_{IC} controla o comportamento, há uma acentuada influência de R na taxa. Na região I, tem sido demonstrado que o aumento de R acarreta a diminuição do ΔK_{th} , sendo que muitos autores [MINAKAWA et al, 1981][RITCHIE, 1979][VOSIKOVSKY, 1979], atribuem esse fenômeno à influência dos mecanismos de fechamento de trinca atuantes e ao efeito do histórico de carregamento.

4.3.4 Influência do Meio na Propagação da Trinca

Sob amplitude de carregamento constante, outros fatores, além da razão de tensão, influenciam a propagação de trinca por fadiga. São eles: meio ambiente, frequência e espessura do material, entre outros. O meio ambiente pode afetar de maneira severa o comportamento em fadiga dos metais. Corrosão e temperatura são os dois principais fatores que afetam a taxa de crescimento de trinca [CUI, 2002]. As falhas em componentes de engenharia sujeitos a um ambiente agressivo (como por exemplo ambiente salino) podem ocorrer sob tensões bem abaixo daquelas em ambientes inertes ou relativamente inofensivos.

Intrusões e extrusões formadas em meios mais agressivos favorecem a adsorção de espécies fragilizantes (como oxigênio ou hidrogênio) ou a formação de

camadas de óxidos que torna difícil a reversibilidade destas [SURESH et al, 1981]. Assim, a corrosão-fadiga é um fenômeno que pode produzir falha em um componente ou estrutura por intermédio da combinação de cargas cíclicas com um ambiente agressivo gasoso ou líquido, que isoladamente não necessariamente produziria uma falha [ARIAS, 2017].

A iniciação de trincas por fadiga em ambientes agressivos aquosos ocorre de forma acelerada em relação ao ar. Os mecanismos responsáveis podem estar associados ao aumento de concentração de tensões em pites de corrosão formados em ataque localizado; à dissolução preferencial em região de maior deformação plástica, que age como anodo; à ruptura de filmes protetores pelos ciclos de deformação; à redução da energia superficial causada pela adsorção de espécies presentes no meio, promovendo a propagação de trincas por fadiga; ou ainda à fragilização por hidrogênio [WEI, 1970]. Todos estes efeitos podem agir separadamente ou em conjunto.

Um ambiente agressivo também tende a aumentar a taxa de crescimento de trincas por fadiga. Em aços de alta resistência, o efeito de gases e meios aquosos é ilustrado na Figura 9. A presença desse meio agressivo acelera a taxa de crescimento de trinca em muitas ordens de magnitude quando o fator de intensidade de tensões máximo (K_{max}) é maior que o fator de intensidade de tensões no trincamento por corrosão sob tensão, quando submetido à tração [SCHIJVE, 2009] [BAXTER et al, 2007].

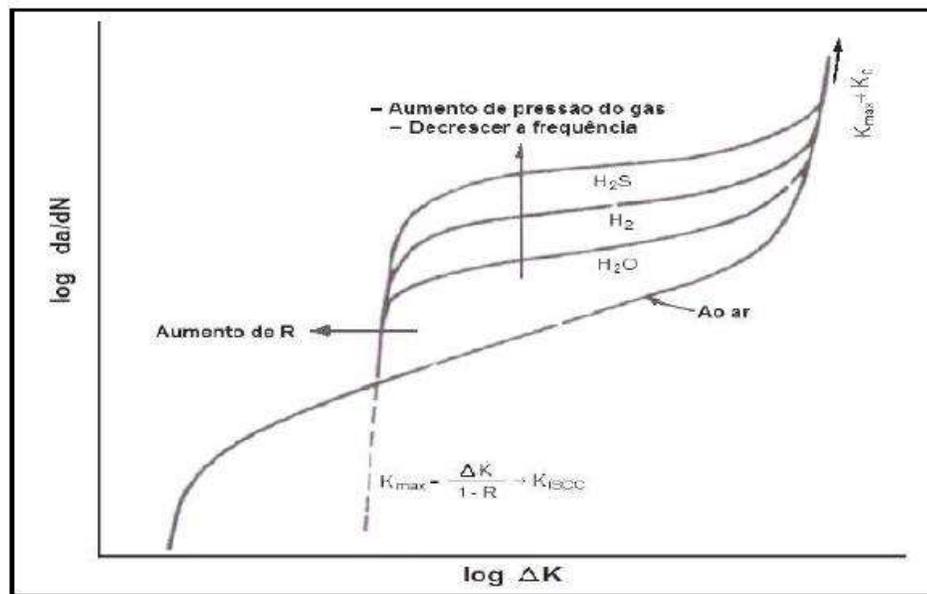


Figura 9 - Ilustração esquemática do efeito de variáveis ambientais, frequência e razão de carregamento na taxa de trincas por fadiga em aços de alta resistência.
 FONTE – SURESH, 2004

4.3.5 Influência da frequência

É bem difundido na literatura que o comportamento em fadiga num meio corrosivo é fortemente afetado pela frequência. Observa-se, através da Figura 10 que, para frequências mais baixas, o meio corrosivo atua acelerando a taxa de propagação de fadiga. [HUDAK et al, 1981] realizaram ensaios variando a frequência de 0,1 a 10 Hz e constataram que a taxa de propagação diminuía com o aumento da frequência.

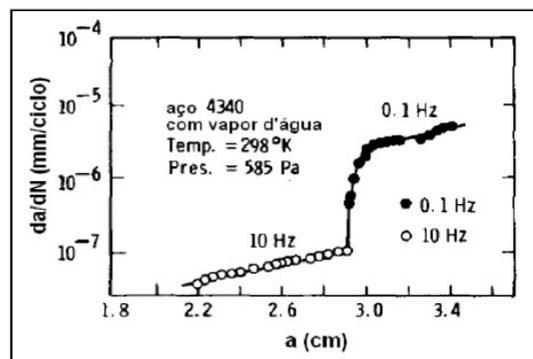


Figura 10 - Mudança na taxa de propagação da trinca devido a alterações da frequência de carregamento
 FONTE – (HUDAK et al, 1981)

Arias [2012] estudou a velocidade de propagação da trinca de fadiga no aço ASTM-A36 testado em condições atmosféricas e subaquáticas, nesta última considerando o efeito da profundidade. O trabalho mostra uma leve diferença da taxa de crescimento da trinca por fadiga em condições subaquáticas, notando-se maior velocidade nas condições de 20 m de profundidade. Na tabela 2, apresentam-se os fatores C e m da equação de Paris que descreve o comportamento da velocidade de propagação da trinca para cada condição.

Tabela 2 - Coeficiente C e m obtidos para condição de ensaio

Equação de Paris:					
$\frac{da}{dN} = C (\Delta K_I)^m$					
Ar		Lâmina de Água		20 m de profundidade	
C	m	C	m	C	m
$3,6906 \times 10^{-11}$	4,6944	$6,3991 \times 10^{-12}$	5,0849	$9,3887 \times 10^{-13}$	5,7588

FONTE – (ARIAS, 2012)

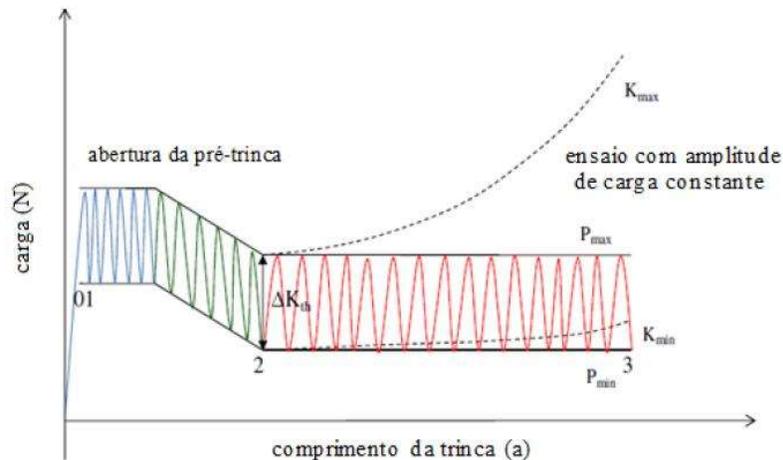
4.4 ENSAIOS DE PROPAGAÇÃO DE TRINCA POR FADIGA

A norma ASTM E647-15 considera a medição de taxas de crescimento desde a região próxima ao limiar de propagação até elevadas taxas de crescimento na região de elevado ΔK . Para tanto, os resultados são expressos na forma do fator de intensidade de tensões na ponta da trinca, de acordo com os critérios estabelecidos na mecânica de fratura linear elástica.

Diferentes métodos de ensaio são indicados e dependem fortemente da magnitude da taxa de crescimento da trinca que se deseja medir. Essencialmente a norma ASTM E647-15 propõe 3 diferentes procedimentos sendo eles: amplitude de carga constante, ΔK -decrecente e K_{max} -constante.

No ensaio com amplitude de carga constante, as cargas máxima e mínima são mantidas constantes. Enquanto isso, K_{max} e K_{min} aumentam à medida que a trinca cresce, conseqüentemente, o ΔK aumenta, conforme mostrado na Figura 11. A grande vantagem deste tipo de ensaio é a facilidade de execução, já que não é necessário alterar o valor máximo e mínimo da carga aplicada ao longo do teste e nem controlar o valor de K_{max} e K_{min} aplicado, bastando apenas monitorar o

crescimento da trinca. Contudo, este procedimento é recomendado apenas para valores de taxa de propagação de trinca superiores a 10^{-5} mm/ciclo. Este ensaio também é conhecido como ensaio a K-crescente.



**Figura 11 - Ensaio de fadiga com K-crescentes segundo ASTM E647.
FONTE – (KUJAWSKI et al, 2009).**

No ensaio por redução de carga (ou ΔK -decrecente), tanto a carga máxima como a carga mínima são reduzidas mantendo-se R constante a uma determinada taxa à medida que a trinca cresce de tal forma que o ΔK diminui ao longo do ensaio como mostrado na Figura 11.

A ASTM E647-15 recomenda a utilização do ensaio a ΔK -decrecente apenas para valores de taxa de propagação de trinca inferiores a 10^{-5} mm/ciclo, visando principalmente a obtenção da amplitude do fator de intensidade de tensões no limiar de fadiga (ΔK_{th}). O método de ΔK -decrecente não é recomendado para taxas de propagação acima de 10^{-5} mm/ciclo uma vez que o histórico de carregamento associado aos valores de ΔK envolvidos pode influenciar no crescimento próximo ao limiar.

5. METODOLOGIA

5.1. INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta, em detalhes, os materiais e equipamentos utilizados, a seleção e usinagem dos corpos de prova, incluindo ensaios realizados e projeções futuras.

5.2. CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova (CP) foram confeccionados em aço A36. A composição química do aço utilizado é apresentada na seguinte tabela.

Tabela 3 – Composição química do aço para confecção dos CPs.

Elemento	Fe	C	Mn	Cu	Si	S	P
%Peso	Bal.	0,25	1,03	0,20	0,28	0,05 máx	0,05 máx

Seguindo a norma ASTM E647-15, serão utilizados corpos de prova do tipo C(T), onde as dimensões deste CP são demonstradas na da Figura 12. Os corpos de prova serão fabricados utilizando processos de usinagem sendo que os entalhes foram feitos pelo processo eletroerosão a fio, obtendo uma precisão das dimensões. Os corpos de prova tiveram as suas superfícies retificadas de forma a que a rugosidade esteja entre 0,4 a 0,8 microns para melhor visualização da trinca.

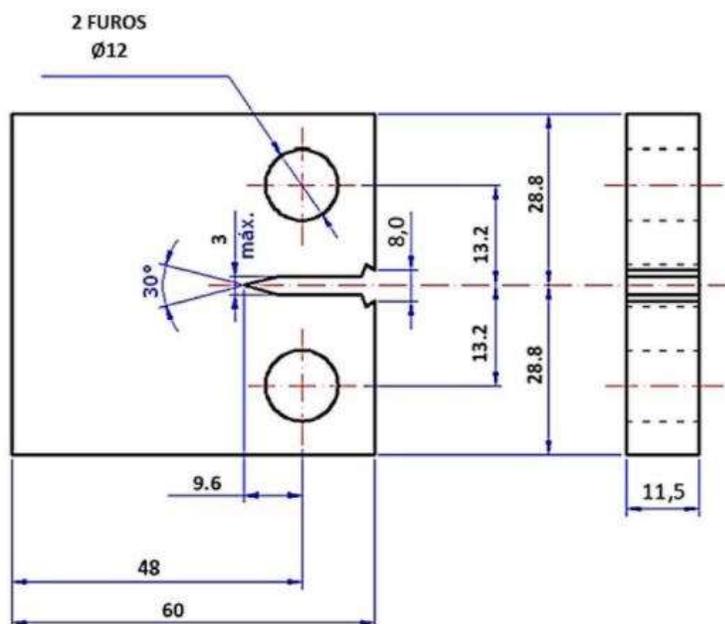


Figura 12 - Esquema do corpo de prova que será utilizado - C(T)
 FONTE - (ASTM E647, 2015)

Todas as amostras também serão padronizadas quanto à direção de laminação visto que, essa é também uma variável que influencia na resistência à fratura do material (ALMEIDA,2016). As amostras serão retiradas das chapas laminadas na direção L-T, de forma que, durante o processo de propagação de trinca, a mesma atravesse transversalmente as linhas de laminação para que durante as análises seja possível observar uma diferença na propagação.

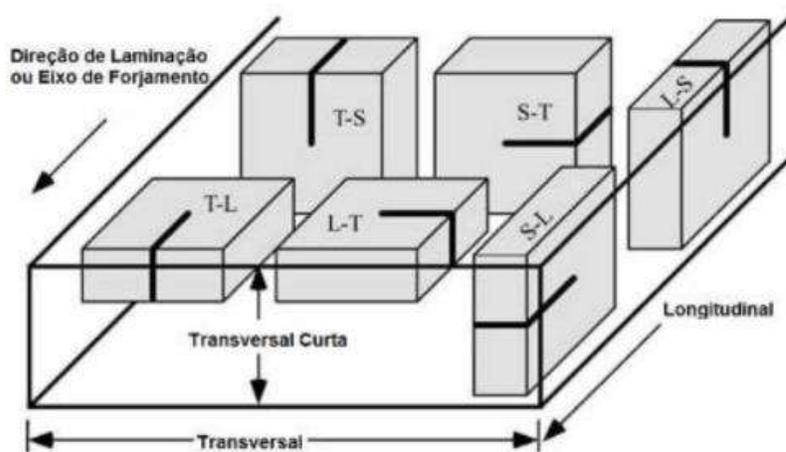


Figura 13 - Diferentes direções de para a retirada do corpo de prova de uma chapa laminada
 FONTE - (Adaptado ASTM, 2015)

5.2.1. Pré-Trincamento

De forma a evitar que as garras responsáveis pela fixação e aplicação das cargas impeçam uma visualização da região da trinca, buscou-se realizar uma trinca inicial para que facilitasse a visualização.

A pré-trinca com o comprimento de 7,4 mm foi realizada nos corpos de prova. Onde a distância entre o final da pré-trinca em relação ao centro dos furos do CP, totalizou 17 mm. Na figura a seguir é apresentado o esquema do corpo de prova com a pré-trinca.

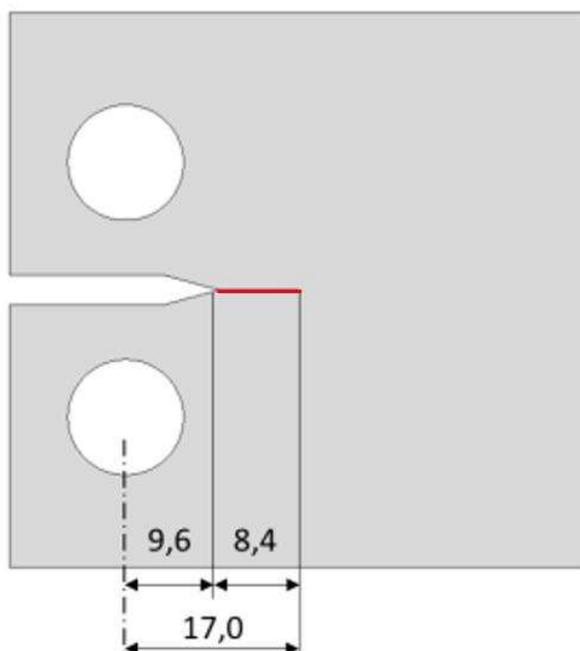


Figura 14 - Esquema do Corpo de Prova com Pré-trinca
FONTE - (CARVALHO, 2020)

Para controlar os parâmetros e a pré-trinca, utilizou-se do *software* da INSTRON (“Console”), juntamente com o método da *compliance* aliado a um *clipgage* e uma célula de carga de 25kN. A pré-trinca foi realizada utilizando carga decrescente, com a razão de tensões $R = 0,1$ e frequência $f = 30\text{Hz}$ [CARVALHO,2020].

5.3. MÁQUINA E DISPOSITIVO

5.3.1. Máquina Servo-Hidráulica Universal

Os testes de fadiga por propagação de trinca serão realizados pela INSTRON, modelo 8802 B1, que apresenta um sistema de teste servo-hidráulico de alta capacidade. Esta máquina é equipada com um sistema dinâmico com capacidade máxima de 250 kN, contendo um controlador eletrônico digital de carga e posicionamento, construído em torre modular para cinco controladores.

Junto a máquina está instalado o *software* “Console”, que disponibiliza programas e aplicativos projetados para que os requisitos dos testes sejam atendidos.

5.3.2. Câmara hiperbárica

Para que seja possível simular as condições subaquáticas, foi acoplado na máquina INSTRON 8802, uma câmara hiperbárica, similar a um vaso de pressão, com a finalidade de suportar a pressão interna ao qual será realizado os testes. O desenho do esboço para o dispositivo é apresentado na Figura 15.



**Figura 15 - Câmara hiperbárica que será utilizada nos ensaios em meio aquoso.
FONTE - (CARVALHO, 2020. Adaptado)**

De forma a permitir uma visualização adequada e a filmagem do corpo de prova durante os ensaios, serão utilizadas tampas fabricadas em material transparente, como o policarbonato, permitindo o acompanhamento da propagação da trinca durante os testes. As tampas são acopladas as duas extremidades da câmara hiperbárica e são apresentadas na Figura 16. A tampa em policarbonato será utilizada para ensaios em pressões mais elevadas.



Figura 16 - Tampas em acrílico para possibilitar visualização do corpo de prova durante o ensaio.

FONTE - (ARIAS, 2012)

Para transmitir o carregamento imposto pela máquina de ensaio INSTRON 8802 ao corpo de prova, foram construídos os eixos que são mostrados na Figura 17, que apresentam ranhuras no corpo do eixo, com a finalidade de facilitar a colocação dos anéis de vedação, permitindo que a pressão dentro do dispositivo seja mantida e mantendo a mobilidade dos sistemas de atuação de carga.

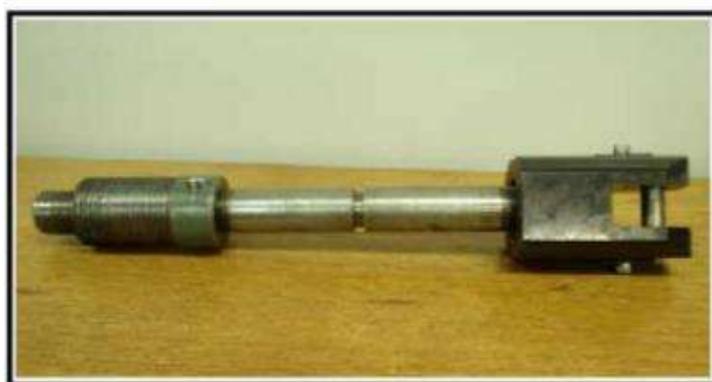


Figura 17 - Eixo construído para transmissão do atuador da INSTRON para o CP dentro da câmara.

FONTE - (ARIAS, 2012)

5.3.3. Montagem dos equipamentos na máquina

É apresentado na Figura 18 a montagem dos equipamentos na máquina, instalado e acoplado na máquina de ensaio, onde além da câmara hiperbárica, é possível observar a célula de carga, o acionador da máquina, o manômetro e o suporte do dispositivo (câmara hiperbárica).

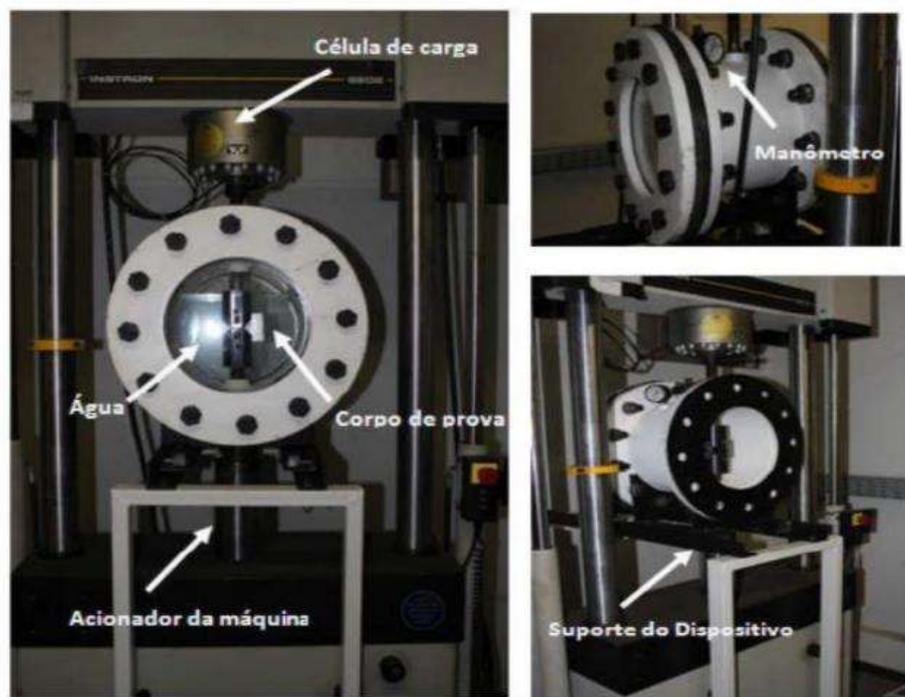


Figura 18 - Imagem da montagem dos equipamentos na máquina, com destaque para o corpo de prova imerso dentro da câmara.

FONTE - (ARIAS, 2012)

5.4. FILMAGEM E ANÁLISE DAS IMAGENS

Para análise e acompanhamento da propagação da trinca, será utilizada uma câmera de alta velocidade modelo Phantom Miro LAB110. Permitindo adquirir até 10000fps, possibilitando a análise de eventos rápidos. Junto a câmera, têm-se o *software* (PCC) que permite análise das filmagens obtidas.

Com a filmagem espera-se conseguir principalmente as velocidades instantâneas de pontos próximos à região de propagação da trinca.

Após os ensaios realizados, as imagens foram extraídas dos vídeos e tratados para se obter uma melhor visualização do ensaio. Para a imagem, análise e medições, foi utilizado o *software* “ImageJ”.



Figura 19 - Posicionamento da câmera junto à máquina INSTRON
FONTE - (CARVALHO, 2020)

5.5. TIPOS DE AMBIENTE

5.5.1. Ambiente Subaquático

Será utilizado como meio para o ensaio de propagação da trinca a água proveniente do sistema de abastecimento de Belo Horizonte - Mg (água de torneira).

A água foi devidamente caracterizada levando em consideração principalmente a composição química, pH, gases solubilizados e quantidade de matéria orgânica presente.

5.6. TIPO DE ENSAIO

Para determinação da taxa de crescimento da fadiga que ocorre na região II, será utilizado o método de ensaio com amplitude de carga constante, as cargas máxima e mínima são mantidas constantes, com uma variação senoidal entre elas e variando a frequência em dependência da taxa de crescimento da trinca.

Destacando que para o ensaio com carga constante ocorrerá o aumento de K_{max} e K_{min} à medida que a trinca cresce, conseqüentemente, o ΔK aumenta.

5.7. PARÂMETROS DO ENSAIO

Para os CPs em aço, foi utilizado o método de ensaio com amplitude de carga (ΔP) constante. Onde as cargas máximas ($P_{máx}$) e mínima ($P_{mín}$) são mantidas constantes de modo que, $K_{máx}$ e $K_{mín}$ aumentam à medida que a trinca cresce. A aplicação de carga teve uma variação senoidal entre máximo e mínimo. A temperatura dos testes foi mantida em torno de 25°C.

Foram ensaiados 2 CPs pré-trincados, variando alguns parâmetros. A configuração para cada CP é apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros do ensaio

Nº do CP	Ambiente	ΔP (kN)	f (Hz)	$P_{\text{máx}}$ (kN)	R
1	Água de Torneira	5	10	5500	0,1
2	Água de Torneira	5	30	5500	0,1

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos testes e serão realizadas as discussões com base na literatura. Os testes de fadiga realizados foram comparados com testes anteriores relatado por outros autores, onde os mesmos foram realizados em condições semelhantes.

A análise terá como foco principal a observação do desprendimento de bolhas durante o ensaio de fadiga.

6.1. CURVAS A X N

Neste tópico estão apresentadas as curvas do comportamento do crescimento da trinca no decorrer do ensaio. Pela Figura 20 pode-se observar que com uma maior frequência, obtém-se uma menor vida útil do corpo de prova, ou seja, a velocidade da propagação de trinca é diminuída.

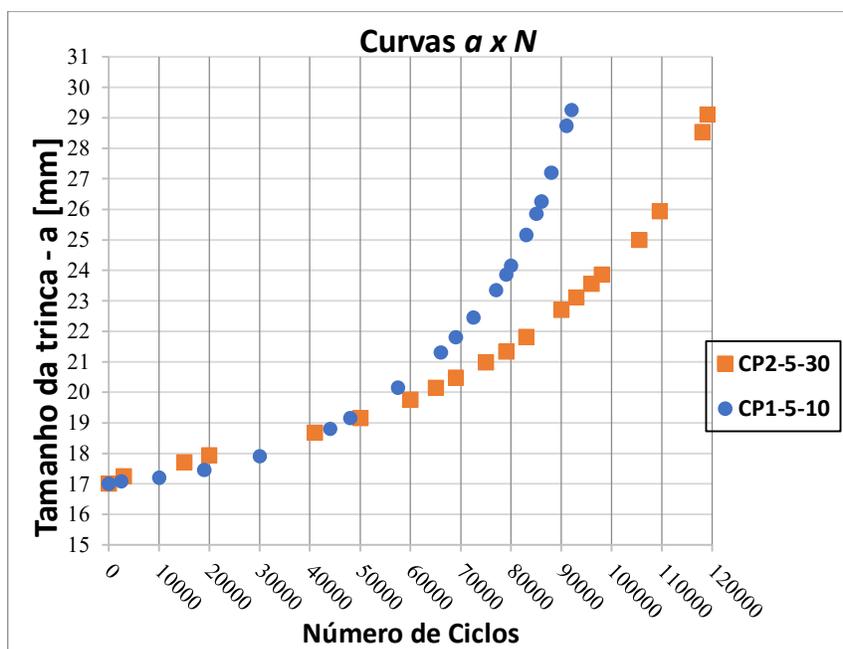


Figura 20 - Curvas $a \times N$ para os CP1 e CP2
FONTE - (CARVALHO, 2020. Adaptado)

Devido ao ambiente subaquático, existe a influência do ambiente corrosivo, que “ataca” o aço que foi exposto pela propagação da trinca. Quando a frequência é menor, têm-se um tempo maior para que o fluido aja dentro da trinca, magnificando o efeito corrosivo, que é o principal efeito da diminuição da propagação da trinca quando em comparado com ambiente seco.

6.2. ANÁLISE DAS BOLHAS

Durante o ensaio de fadiga, observou-se que ocorria o surgimento de bolhas em regiões próximas à ponta da trinca em certos momentos do ensaio e era possível detectar esse fenômeno nos corpos de prova ensaiados.

Tabela 5 - Corpos de Prova ensaiados.

Corpo de Prova	Carga (kN)	Oscilação [Hz]	Desprendimento de bolhas
1	5	10	Sim
2	5	30	Sim

A partir de um certo momento do ensaio, não era possível observar novas aparições de bolhas.

Foi criado um canal no *YouTube* com uma seleção de vídeos do desprendimento de bolhas, onde é possível ver facilmente o fenômeno.

Disponível em:

https://www.youtube.com/playlist?list=PLAxRcLxEyrWqluwtJEVMzwbjYs_zwq7B8

Para analisar as imagens, foi utilizado o *ImageJ*, para que pudesse ser acompanhado o movimento realizado pelas bolhas e pudesse ser realizado a medição do seu diâmetro.

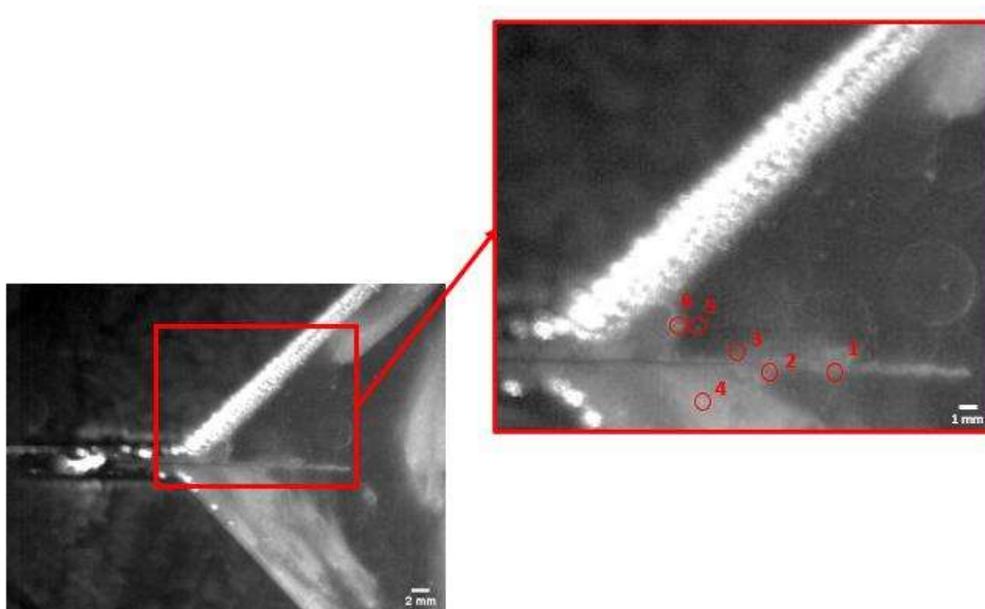


Figura 21 - Medição da imagem no CP2 com ciclo de 100000 no instante de 0,2s.

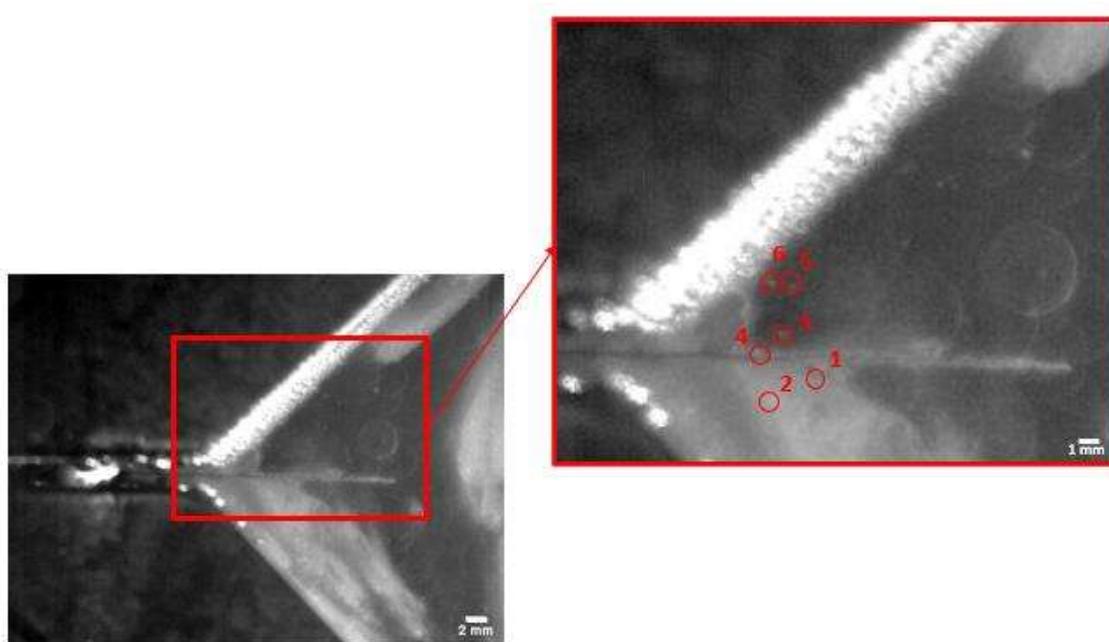


Figura 22 - Medição da imagem no CP2 com ciclo de 100000 no instante de 0,4s.

6.2.1. CP 1

Notou-se que quando as bolhas surgiam, elas apresentavam um diâmetro inferior quando se comparado com as outras bolhas que surgiam ao decorrer do ensaio, mas surgiam em maior quantidade.

Ao decorrer do ensaio, as bolhas apresentavam um aumento considerável no seu diâmetro e uma diminuição da quantidade.

Nas próximas imagens podemos observar como as bolhas se movimentam durante alguns determinados momentos do ensaio.

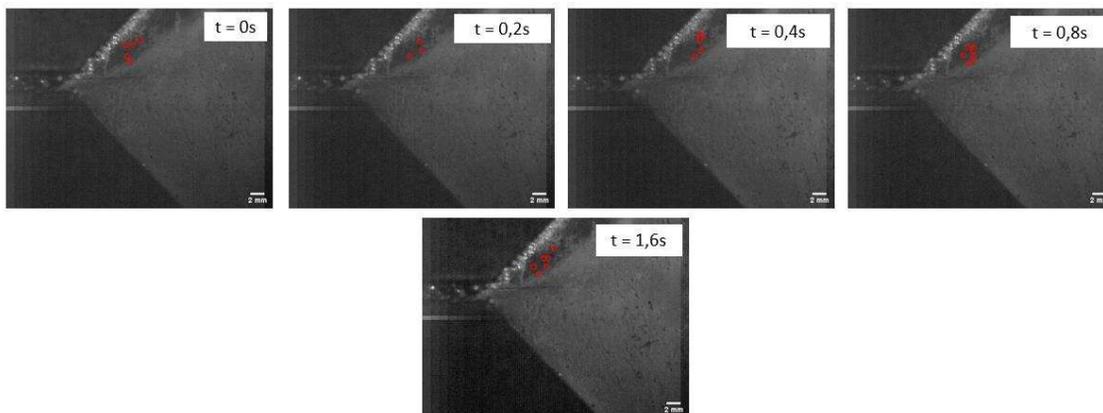


Figura 23 - Imagem das bolhas captadas no CP1 com ciclo de 75000.

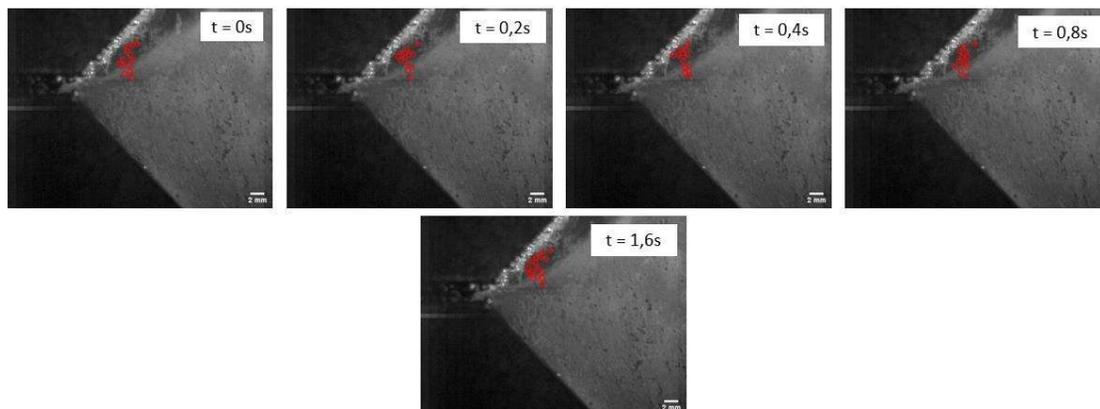


Figura 24 - Imagem das bolhas captadas no CP1 com ciclo de 77000.

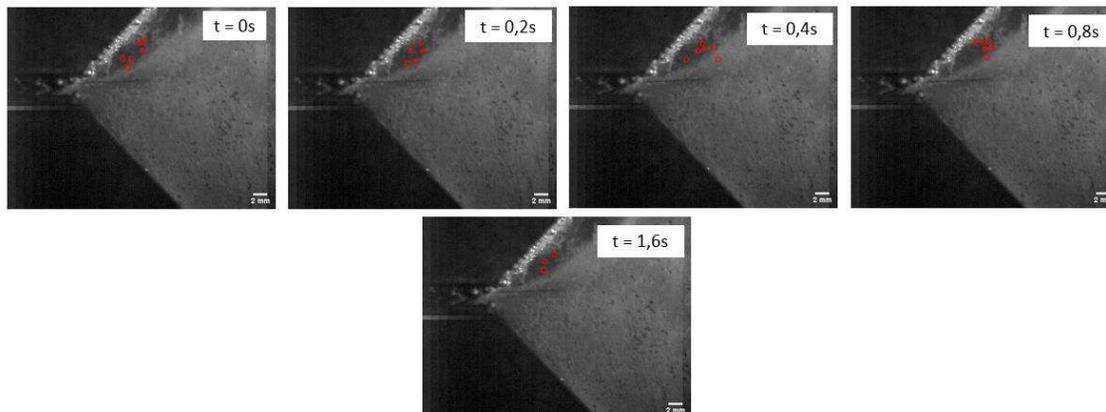


Figura 25 - Imagem das bolhas captadas no CP1 com ciclo de 79000.

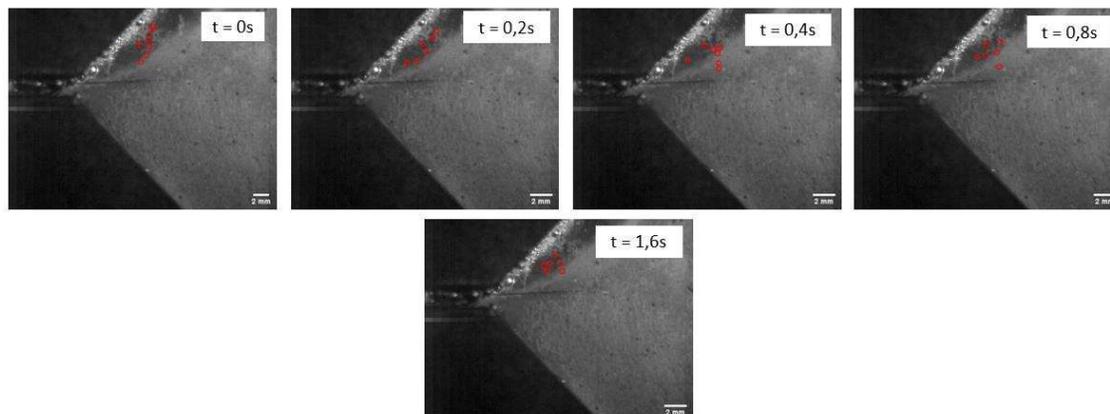


Figura 26 - Imagem das bolhas captadas no CP1 com ciclo de 81100.

O final do ensaio é definido, pela norma ASTM E647-15 em relação ao parâmetro ΔK e tem relação com a resistência do material ensaiado, tamanho da trinca e geometria do corpo de prova. Para o CP ensaiado o valor máximo da trinca considerado foi de 29,0mm representando um valor de ΔK de 32,5 MPa \sqrt{m} .

Próximo ao fim do ensaio, ou seja, próximo do tamanho final da trinca, não foi detectado aparecimento de novas bolhas.

Para o CP 1, não foi possível observar o surgimento de novas bolhas a partir da faixa de ciclos dos 82000. O final do ensaio ocorreu aos 92000 ciclos.

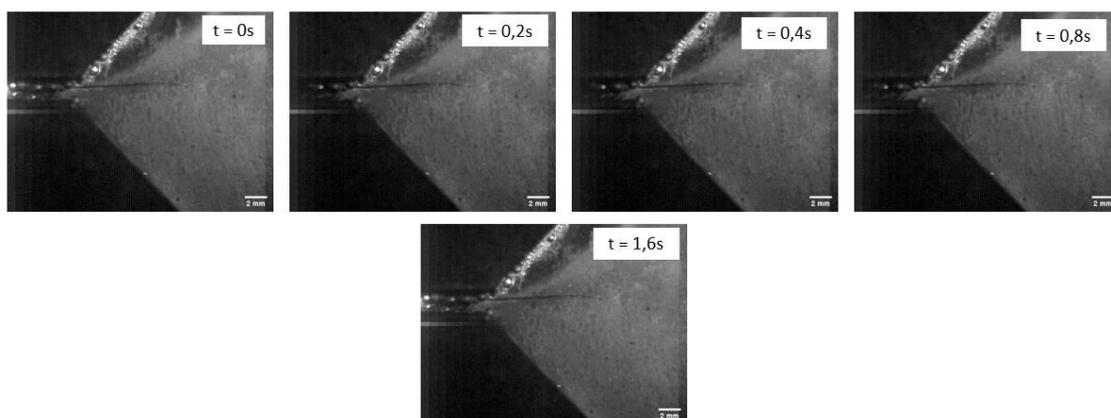


Figura 37 - Imagem do CP1 com ciclo de 83000.

6.2.2. CP 2

Para o CP2, observa-se o mesmo fenômeno, onde pelas imagens, é visível o movimento das bolhas durante o ensaio.

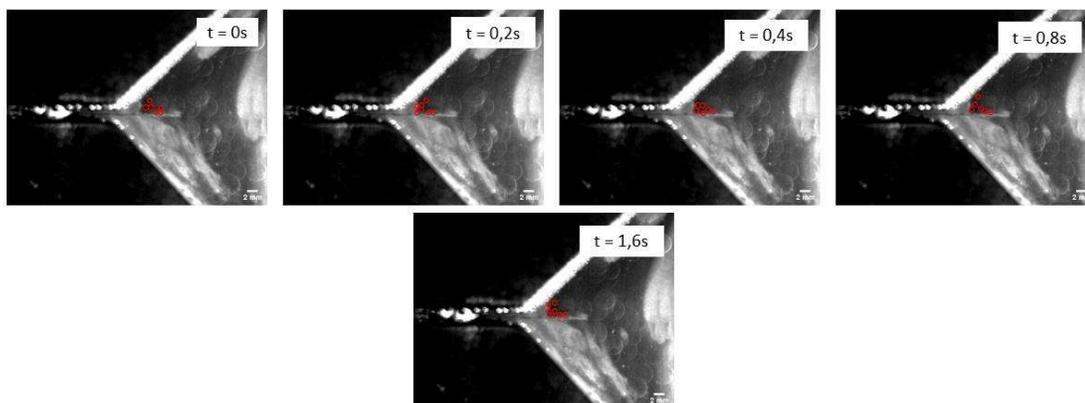


Figura 28 - Imagem das bolhas captadas no CP2 com ciclo de 79000.

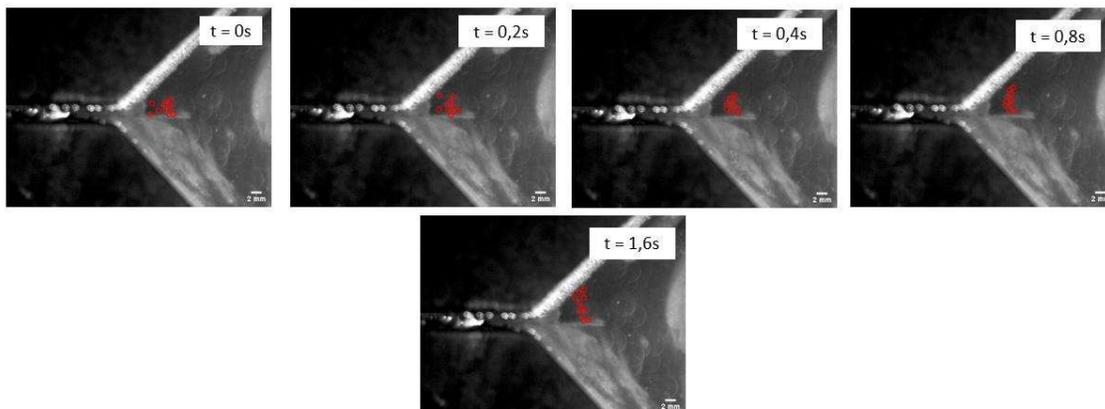


Figura 29 - Imagem das bolhas captadas no CP2 com ciclo de 80000.

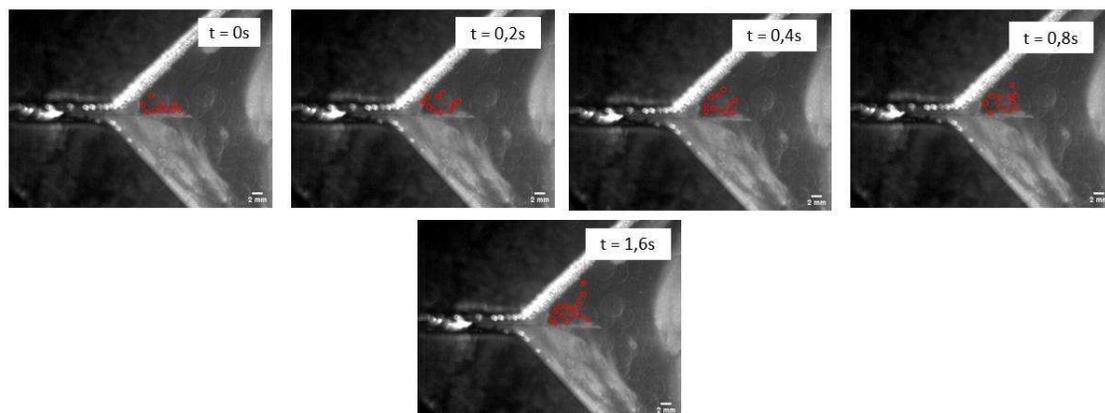


Figura 30 - Imagem das bolhas captadas no CP2 com ciclo de 86000.

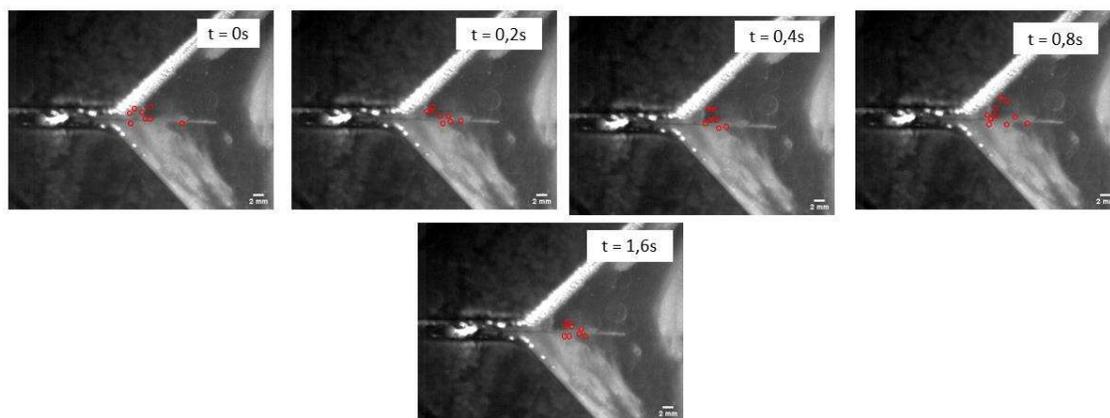


Figura 31 - Imagem das bolhas captadas no CP2 com ciclo de 100000.

Nesse ensaio, não era possível observar o surgimento de bolhas a partir do ciclo em 103000.

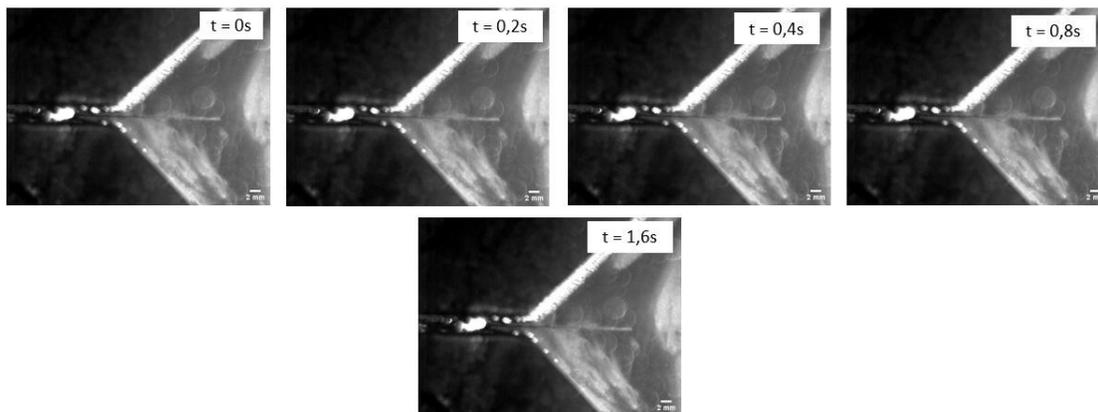


Figura 32 - Imagem do CP2 com ciclo de 103000

6.2.3. DIÂMETRO DAS BOLHAS X CICLOS

Nesse tópico será apresentado as curvas demonstrando o comportamento das bolhas em relação ao aumento dos ciclos.

Pela figura 33, é possível observar que as bolhas para o CP1 tendem a crescer, atingindo um diâmetro médio máximo de aproximadamente $272\mu\text{m}$, e após esse instante, tende a diminuir o diâmetro médio novamente até o fim do surgimento das bolhas.

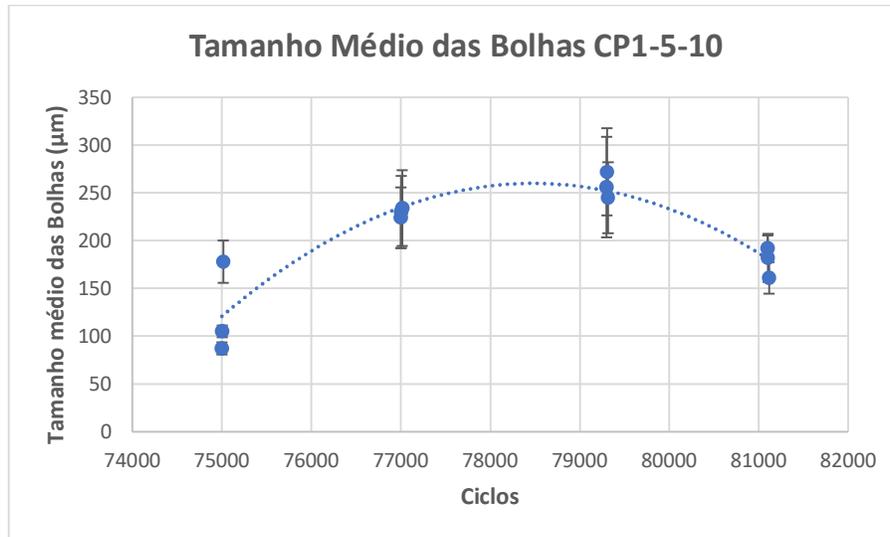


Figura 33 - Tamanho Médio das Bolhas CP1-5-10

Para o CP2, o diâmetro médio das bolhas também tende crescer até atingir um diâmetro máximo médio, onde para esse corpo prova foi de 266 μm , e assim como observado no outro teste, o diâmetro médio das bolhas tendem diminuir após esse pico.

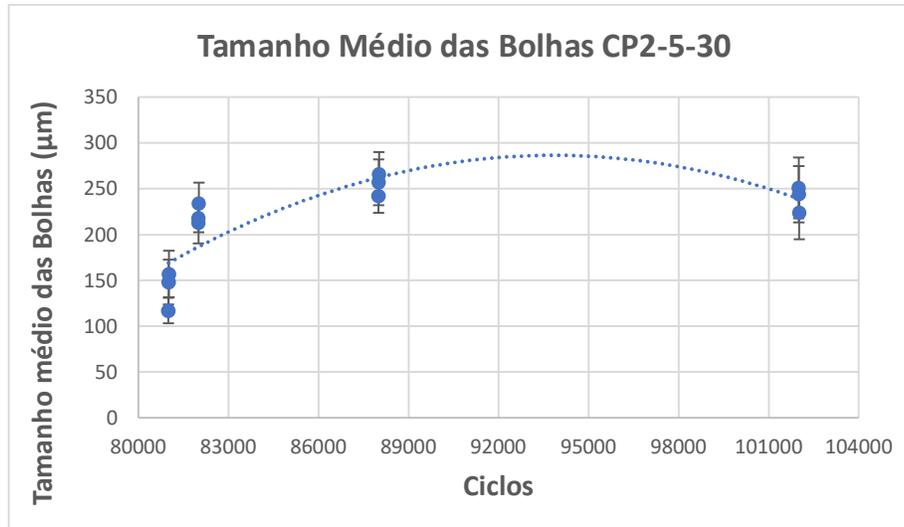


Figura 34 - Tamanho Médio das Bolhas CP2-5-30

7. CONCLUSÃO

Nesse trabalho buscou-se capturar e demonstrar a ocorrência do desprendimento de bolhas durante o ensaio de fadiga e ambiente subaquático. O fenômeno repetiu-se em ambos os ensaios realizados para a mesma variação de carga aplicada ($\Delta P=5\text{kN}$) e frequência diferentes (10Hz e 30Hz). A partir dos dados obtidos durante os ensaios e tendo baseamento teórico de trabalhos anteriores, chegou-se as conclusões:

- Durante o ensaio de fadiga, com uma maior frequência, obtém-se uma menor velocidade da propagação de trinca.
- O desprendimento de bolhas ocorreu para as duas frequências ensaiadas.
- O desprendimento de bolhas foi detectado em momentos específicos do ensaio.
- A partir de um certo ponto do ensaio não é possível detectar o surgimento de novas bolhas.
- O diâmetro médio das bolhas tende a crescer, atingindo um diâmetro médio máximo e após isso tende a diminuir, até ocorrer a supressão do fenômeno e não mais ser observado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, A. F. **Avaliação Do Efeito Da Direção De Laminação Sobre A Taxa De Propagação De Trincas No Alumínio 7050-T7451**. Dissertação de Mestrado em Integridade de Materiais da Engenharia, Publicação 33A/2016, Faculdade UnB Gama/FT/Universidade de Brasília, DF, no.129 p. 2016.

ANDERSON, T. **Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications**. CRC Press, 2a ed. 1995. v. 2.

ANDERSON, T. L. **Fracture mechanics fundamentals and applications**, 3.ed. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis, 621p, 2005.

ARIAS, A. R. **Comportamento Da Velocidade De Propagação De Trinca Por Fadiga Do Aço Astm-A36 Em Condições Atmosféricas E Subaquáticas**. Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFMG, 2012.

ARIAS, A. R. **Avaliação Da Propagação De Trinca Por Fadiga Em Soldas Subaquáticas Molhadas**. Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da UFMG, 2017.

ASTM A 36/A 36M – 00a. **Standard Specification for Carbon Structural Steel**, 2000

ASTM, E 1823-96. **Standard Terminology Relating to Fatigue and Fracture testing**, 1996.

ASTM, E-8M. **Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials**, 2000.

ASTM, E 92-82. **Standard Test Methods for Vickers hardness of Metallic Materials**, 1997.

ASTM. ASTM E399-12e3, **Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness K_{Ic} of Metallic Materials**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.

ASTM. ASTM E1823-13, **Standard Terminology Relating to Fatigue and Fracture Testing**, AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.

ASTM. ASTM E647-15. **Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates**. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM International, 2015.

BANNANTINE, J. A.; COMER, J.; HANDROCK, J. **Fundamentals of Fatigue Analysis**, pp. 273, 1990.

BAXTER, D. P.; MADDOX, S. J.; PARGETER, R. J. **Corrosion Fatigue Behaviour of Welded Risers and Pipelines**. OMAE 2007, p. 117–124.

BEDEN, S. **Review of fatigue crack propagation models for metallic components**. European Journal of Scientific Research, v. 28, p. 364–397, 2009.

CARVALHO, C.A. **Estudo Do Comportamento À Fadiga De Metais Dentro E Fora Da Água Na Presença Da Pressão Hidrostática**. Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFMG, 2007.

CARVALHO, G. M. A. **Análise Do Desprendimentos De Bolhas E Seus Efeitos Na Propagação Da Trinca Por Fadiga Em Ambiente Subaquático**. Qualificação de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFMG, 2020.

CETLIN, P.R., SILVA, P.S.P., **Análise de Fraturas**. Associação Brasileira de Materiais - ABM. São Paulo, 1979.

ÇENGEL, Y. A.; CINBALA, J. M. **Mecânica dos fluidos: Fundamentos e Aplicações**. São Paulo: Mcgraw – Hill, 2007.

CUI, W. **A state-of-the-art review on fatigue life prediction methods for metal structures**. Journal of Marine Science and Technology, v. 7, n. 1, p. 43–56, 1 jun. 2002.

DAS, S. K. et al. **The effect of variation of microstructure on fracture mechanics parameters of HSLA-100 steel**. Materials Science and Engineering: A, v. 431, n. 1–2, p. 68–79, set. 2006.

DIETER, G.E. **Metalurgia mecânica**, 2nd ed. Rio de Janeiro: Ed. Guanabara Dois, 653p, 1981.

DOWLING, N. E., **Mechanical behavior of materials. Engineering methods for deformation, fracture, and fatigue**; 2 ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1999.

DUTRA, A. C.; NUNES, L. P., **Proteção Catódica: Técnica de combate à corrosão**. 5a ed. Rio de Janeiro: Inter ciência. 2006.

EBARA, R.; YAMADA, T.; KAWAN, H. **Corrosion Fatigue Process of 12 Cr Stainless Steel**, ISIJ International, Vol. 30, No. 7, pp. 535-539, 1990.

FATEMI, A., YANG, L. **Cumulative fatigue damage and life prediction theories: a survey of the state of the art for homogeneous materials**, Int. J Fatigue Vol. 20. No. 1, pp. Y-34, 1998.

FILHO, N. N. A. **Estudo do Meio Corrosivo na Resistência à Fadiga do Aço Estrutural SAE 8620**, Dissertação de Mestrado, CDTN, pp. 130, 2006.

FORTH, S.; NEWMAN, J.; FORMAN, R. **On generating fatigue crack growth thresholds**. International Journal of Fatigue, v. 25, n. 1, p. 9–15, jan. 2003.

FREITAS, M. A.; COLOSIMO, E. A. **Confiabilidade: Análise de Tempo de Falha e Testes de Vida Acelerados**. Volume 12, pp. 309, 1997.

GANGLOFF, R. P. **Environmental cracking corrosion fatigue**. Corrosion Tests and Standards: Application and Interpretation-Second Edition, ASTM. p. 1-20, 2005.

GDOUTOS, E. E. **Fracture Mechanics: An Introduction**. Springer Science & Business Media, 1993.

GRIFFITH, A. A. **The phenomena of rupture and flow in solids**. Phil. Trans. Roy. Soc., v. 221A, n. 163, 1920.

GUIMARÃES, S. R. **Desenvolvimento e aplicação de uma metodologia para previsão de vida de eixos de mandris de bobinadeiras de laminação a frio submetidas a danos acumulados por fadiga**. Dissertação em Engenharia Mecânica. Belo Horizonte: UFMG, 2009.

HAHIN, C. **Effects of Corrosion and Fatigue on the Load Carrying Capacity of Structural and Reinforcing Steel**, Physical Research Report No. 108, Illinois Department of Transportation, pp.114, 1994

HANDROCK, J. L.; COMER, J. J.; BANNANTINE, J. A. [1990]. **Fundamentals of metal fatigue analysis**. Prentice-Hall, Inc: Englewood Cliffs, 1990.

HERTZBERG, R. W.; HAUSER, F. E. **Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials**. Journal of Engineering Materials and Technology, v. 99, n. 1, p.96, 1977.

HUANG, X.; MOAN, T. **Improved modeling of the effect of R-ratio on crack growth rate**. International Journal of Fatigue. Volume 29, Issue 4, 2007.

HUDAK; S.J JR, WEI R.P., **Consideration of non-steady-state crack growth in materials evaluation and design**, International Journal of Pressure Vessels and Piping, v. 9, p. 63-74, 1981.

HIROSHIO, Y, J. K.; SOYA, I.; OKAMOTO, K. **Fatigue Crack Growth in a High Tensile and Several Other Environments Strength Steel in Seawater**, ISIJ International, pp 451-459, 1994

HUDSON, C. M. **Investigation of the Vacuum Environment on the Fatigue and Fracture Behavior of 7075-T6**, J. Vac. Sci. Technol., Vol 9, nº 6, 1972.

IRWIN, G. R. Fracture Dynamics. **Fracturing of Materials**, American Society for Metals, Cleveland OH, p. 147-166, 1948.

IRWIN, G.R. **Analysis of stress and strains near the end of a crack traversing a plate**, Journal of Applied Mechanics, v. 24, p. 361-364, 1957.

JÚNIOR, A. A. **Avaliação Experimental dos Efeitos da Fadiga Térmica nas Propriedades Mecânicas de um Aço Inoxidável Austenítico**, Tese de Doutorado, UFMF, pp.129, 2006.

KANNINEN, M.F.; POPELAR, R.C.H. **Advanced Fracture Mechanics**, Oxford: Oxford University Press, 1985.

KIEPPER, B. O. **Análise Estrutural Estática, Via Elementos Finitos, do Segmento Tubo Flexível-Enrijecedor**, Dissertação de Mestrado, UFRJ, pp 103, 2004.

KOMAI, K. **Corrosion fatigue. Comprehensive structural integrity: fracture of materials from nano to macro**. Amsterdam: Elsevier. V.4, p.345-3458, 2003.

KUJAWSKI, D.; ELLYIN, F. **A fatigue crack growth model with load ratio effects**. Engineering Fracture Mechanics, v. 28, n. 4, p. 367–378, jan. 1987.

KUJAWSKI, D.; SREE, P. C. R. **Generation and analysis of FCG data using a single specimen and $K_{max}-\Delta K$ testing matrix**. International Journal of Fatigue, v. 31, n. 11–12, p. 1638–1647, nov. 2009.

LAL, D. **A new mechanistic approach to analysing LFM fatigue crack growth behaviour of metals and alloys**. Engineering Fracture Mechanics, v. 47, n. 3, p. 379–401, fev. 1994.

LAWSON, L. **Near-threshold fatigue: a review**. International Journal of Fatigue, v. 21, p. 15–34, set. 1999.

LIAW, P. **Overview of Crack Closure at Near-Threshold Fatigue Crack Growth Levels**. Mechanics of Fatigue Crack Closure. 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959: ASTM International, 1988. p. 62-62–31

LYNCH, S.P. **Metallographic contributions to understanding mechanisms of**

environmentally assisted cracking. *Metallography*, 23[2], pp. 147–171, 1989.

LOPES, F. C. A. **Estimativa de propriedades mecânicas e análise estrutural dia método de elementos finitos de hélices navais produzidos na Amazônia**. TCC do Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará, Belém, 2003.

MADDOX, S. J.; RAZMJOO, G. R. **Fatigue Performance of Large Girth Welded Steel Tubes**, 17th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OMAE, 1998.

MAGNABOSCO, R. **Técnicas de Ensaio para Previsão da Vida em Fadiga de Liga de Alumínio AA7175**, LabMat - FEI - Faculdade de Engenharia Industrial, 2000.

MANSUR, T. R. **Avaliação e Desenvolvimento de Modelos de Determinação de acúmulo de Danos por Fadiga em um Aço Estrutural**, Tese de Doutorado, UFMG, pp 185, 2003.

MASOUNAVE, J.; BAFLON, J. P. **Effect of Grain Size on the Threshold Stress Intensity Factor in Fatigue of a Ferritic Steel**. *Scripta Metallurgica*, v. 10, p. 165-170, 1976.

MEGGIOLARO, M. A.; DE CASTRO, J. T. P. **Comparing Overload-Induced Retardation Models on Fatigue Crack Propagation**, 56° Congresso Anual da ABM, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, 16 – 19 Julho, 2001.

METALS HANDBOOK. **Failure Analysis and Prevention**, Vol. 10. American Society for Metals^{8ª} ed. – Metals Park, Ohio, 1975.

MEYERS, M.; CHAWLA, K. **Mechanical Behavior of Materials**. 2nd ed. Cambridge University Press, 2009.

MIRANDA, A. C. O. **Propagação de Trincas por Fadiga em Geometrias 2D Complexas sob Cargas Cíclicas Variáveis**, Tese de Doutorado, PUC-Rio, pp.125, 2003.

MINAKAWA, K.; MCEVILY, A. J. **On crack closure in the near-threshold region**. *Scripta Metallurgica*, v. 15, n. 6, p. 633–636, jun. 1981.

MITCHELL, M. R. **Fatigue analysis for design**. I Seminário Internacional de fadiga, SAE Brasil São Bernardo do Campo – SP p. 1-29, 31 de outubro de 2001.

MOIA, D. G. **Previsão da Vida em Fadiga de Materiais Metálicos Parte I: Estudo Preliminar da vida em fadiga do aço ABNT1016 recozido**, FEI, pp.1-41, 2001.

NEWMAN Jr, J.C. **The merging of fatigue and fracture mechanics concepts: a historical perspective**, Progress in Aerospace Sciences, v.34, issues 5-6, p.347-390, 1998.

NORTON, R. L. **Projeto de Máquinas**, 2 ed. Porto Alegre: Artmed, 931 p. 2004.

NUNES, L. P. **Fundamentos de Resistência à Corrosão**. Rio de Janeiro: Interciência Ltda, 2007.

OKAMOTO, M. A. **Danos causados pelo hidrogênio em aços API 5L X65 e X80**. Monografia apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

OLIVEIRA, S. P.; MIRANDA, P. E. V. **Concentração crítica de hidrogênio para a fragilização pelo hidrogênio em aços**. Revista Matéria. Rio de Janeiro, 2008.

OHJI, K. **Introduction to Fracture Mechanics**. Journal of the Society of Materials Science, Japan, v. 32, n. 359, p. 935–941, 1983.

PARIS, P. C.; ERDOGAN, F. **A Critical Analysis of Crack Propagations Laws**. Journal of Basic Engineering, v. 85, p. 528-534, 1960.

PARIS, P. C.; GOMEZ, M. P.; ANDERSON, W. P. **A Rational Analytic Theory of Fatigue**. The trend in Engineering, v. 13, p. 9-14, 1961.

PERES, L. O. R., **Efeito de Concentração de Tensão na Vida em Fadiga de Aço Utilizado em Spindle de Laminador de Chapas Grossas – Análise Experimental e Modelamento via MEF**. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da REDEMAT. Ouro Preto, 2008

PERNS, T. P.; ALSTETTER, C. J. **Hydrogen effects in austenitic stainless steels**. Materials Science and Engineering A, v. 129, n.1, 1990.

PICCININI, F. C. **Um Estudo do Carregamento Hidrodinâmico sobre estruturas Oceânicas Esbeltas**, Dissertação de Mestrado, FURG, pp. 107, 2003.

PINHO, A. L. S. **Redução de Tensões em Risers Rígidos de Plataformas TLP**, COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Civil, XI, pp.102, 2001.

PUNDT, A., KIRCHHEIM, R., 2006. **Hydrogen in metals: microstructural aspects**. Annu. Rev. Mater. Res. 36, 2006.

RICHARDS, H. A., SANDER, M., FULLAND, M. KULLMER, G. **Development of fatigue crack growth in real structures**. Engineering Fracture Mechanics v. 75, 2008.

RITCHIE, R. O.; SURESH, S. **Some Considerations on Fatigue Crack Closure at Near-Threshold Stress Intensities Due to Fracture Surface Morphology.** Metallurgical Transactions A, v. 13A, p. 937-940, 1982.

RITCHIE, R. O. **Near-threshold fatigue-crack propagation in steels.** International Materials Reviews, v. 24, n. 1, p. 205–230, 1 jan. 1979.

ROBERTSON, I.M.; SOFRONIS, P.; NAGAO, A.; MARTIN, M.L.; WANG, S.; GROSS, D.W.; E NYGREN, K.E. **Hydrogen Embrittlement Understood.** Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science, 2015.

RONG, W. **A Fracture model of corrosion fatigue crack propagation of aluminum alloys based on the material elements fracture ahead of a crack tip.** International Journal of Fatigue, v.30, n.8, p. 1376-1386, 2008.

ROSADO, D. B. **Comparação do efeito da fragilização por hidrogênio e aços com resistência à tração acima de 1000 MPa.** Dissertação de Mestrado da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

ROYLANCE; D.; **Introduction to Fracture Mechanics.** 17 f., Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 2001.

SADANANDA, K. **Analysis of overload effects and related phenomena.** International Journal of Fatigue, v. 21, p. 233–246, set. 1999.

SANTOS, E. A. **Resistência à fadiga de tubo API 5L X65 cladeado e soldado circunferencialmente com eletrodos de Inconel® 625.** Dissertação de mestrado do programa de pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. Escola de Engenharia de São Carlos – USP. São Carlos, 2016.

SCHIJVE, J. **Fatigue of Structures and Materials.** Dordrecht: Springer Netherlands, 2009.

SIH, G. C. **On the westergaard method of crack analysis.** International Journal of Fracture Mechanics, v. 2, n. 4, p. 628–631, dez. 1966.

SILVEIRA, N. P. P. **Simulação de Propagação de Trincas com o Uso do Método dos Elementos de Contorno,** Tese de Doutorado, UFRJ, pp 87, 2003.

SNEDDON, I. N. **The Distribution os Stresses in the Neighbourhood of a Crack in an Elastic Solid.** Proceedings, Royal Society of London, v. A-187, 1946.

SOUZA, S. A. **Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos,** pp. 172-200, 1995.

STROHAECKER, T. R. **Mecânica da fratura**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012. Apostila disponível em: <ftp://ftp.feq.ufu.br/Claudio/1.pdf>.

STEPHENS, R.L. et al. **Metal Fatigue in Engineering**. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 2001.

SURESH, S. **Fatigue of Materials**. 2a. ed. [S.l.]: Cambridge University Press, 2004.
SURESH, S.; ZAMISKI, G. F.; RITCHIE, D. R. O. **Oxide-Induced Crack Closure: An Explanation for Near-Threshold Corrosion Fatigue Crack Growth Behavior**. Metallurgical Transactions A, v. 12, n. 8, p. 1435–1443, ago. 1981.

TAIER, R. **Análise de Fadiga em Juntas Tubulares de Plataforma Offshore Fixa Através de Modelos em Elementos Finitos**. Dissertação de Mestrado, UFOP, pp. 159, 2002.

TALBOT, D.; TALBOT, J. **Corrosion Science and Technology**. Boca Raton: CRC press, 1998.

VERBURG, T. J. C. F.; OLIVEIRA, A. R. C.; GANANÇA, D. L. S.; MORAIS, G. T.; SILVA, F. C.; MOREIRA, A. G.; MORAIS W. A. **Avaliação Termográfica das características de Deformação Plástica de Metais para Conformação**. Unisanta Science and Technology, 2019.

VOSIKOVSKY, O. **The effect of stress ratio on fatigue crack growth rates in steels**. Engineering Fracture Mechanics, v. 11, n. 3, p. 595–602, jan. 1979.

WANG, Y.; CHENG, G.; QIN, M.; LI, Q.; ZHANG, Z.; CHEN, K.; LI, Y.; HU, H.; WU, W.; ZHANG, J. **Energy of High Temperature Deformation on the Microstructure, Mechanical Properties and Hydrogen Embrittlement of 2.25Cr-1-Mo-0,25V Steel**. International Journal of Hydrogen Energy. IK, 2017.

WEI, R. P. **Some aspects of environment-enhanced fatigue-crack growth**. Engineering Fracture Mechanics, v. 1, n. 4, p. 633–651, abr. 1970

WELLS, A. A. **Unstable Crack Propagation in Metals: Cleavage and Fast Fracture**. Proceedings of the Crack Propagation Symposium, Cranfield, UK, v. 1, Paper 84, 1961.

WILLIAMS, M. L. **On the Stress Distribution at the Base of a Stationary Crack**. Journal of Applied Mechanics, v. 24, p. 109-114, 1957.

XIONG, Y.; HU, X. X. **The effect of microstructures on fatigue crack growth in Q345 steel welded joint**. Fatigue Fracture of Engineering Materials Structures, n. 35, p. 500–512, 2012.

YAKOVLEVA, T. Y.; MATOKHNYUK, L. E. **Prediction of Fatigue Characteristics of Metals at Different Loading Frequencies**, Strength of Materials, Vol. 36, No. 4, 2004.

ZERBST, U. et al. **About the fatigue crack propagation threshold of metals as a design criterion – A review**. Engineering Fracture Mechanics, n. 153, p. 190-243, 2016.