



Universidade Federal
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

METODOLOGIA PARA TESTES DE CORROSÃO FADIGA SOB ELEVADAS PRESSÕES UTILIZANDO CRACK GAUGE

Yuri Laet Ramalho

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro Metalúrgico.

Orientador: Oscar Rosa Mattos

Co-orientador: Rodrigo R. A. Garcia

Rio de Janeiro

Agosto de 2018



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais
DEMM/POLI/UFRJ



METODOLOGIA PARA TESTES DE CORROSÃO FADIGA SOB ELEVADAS
PRESSÕES UTILIZANDO CRACK GAUGE

Yuri Laet Ramalho

PROJETO FINAL SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO
DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS DA ESCOLA POLITÉCNICA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO METALÚRGICO.

Aprovado por:

Prof. Oscar Rosa Mattos, D.Sc.

Prof. Leonardo Salles Araújo, D.Sc.

Cesar Giron Camerini, D.Sc.

Rodrigo Roberto Alves Garcia, M.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

Agosto de 2018

Ramalho, Yuri Laet

Metodologia para Testes de Corrosão Fadiga sob Altas Pressões Utilizando Crack Gauge / Yuri Laet Ramalho – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2018.

XXII 37 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Oscar Rosa Mattos

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia Metalúrgica, 2018.

Referências Bibliográficas: p. 37-40.

1. Testes de corrosão fadiga. 2. Elevada pressão. 3. Célula de carga. 4. ASTM E647. 5. Extensômetros e transdutores. 6. DCPD I. Ramalho, Yuri. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Programa de Engenharia Metalúrgica. III.

“Uma mente que se abre a uma nova ideia jamais retorna ao seu tamanho original”

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

Não foram apenas os últimos anos que me formaram Engenheiro Metalúrgico. Essa formação começou 26 anos atrás. Então, eu gostaria de iniciar os agradecimentos por quem esteve comigo desde o início.

Inicialmente agradeço a Deus as principais dádivas concedidas, como minha vida, saúde e família. Agradeço também por cada oportunidade apresentada e toda a força e determinação para lutar pelos meus sonhos, mesmo em momentos de maior insegurança.

Impossível deixar de ser gratos aos meus pais, Maria Lúcia e Carlos Alberto, que com amor, paciência, conselhos e exemplo me ajudaram a me tornar o cidadão e profissional que eu sou hoje, vocês são a fundação na qual estou me construindo.

Agradeço também à minha irmã, Yane, que tantas vezes me ajudou e continua a ajudar a encontrar um eixo e focar nos meus sonhos, além dos meus tios, tias, primos e irmãos de coração e amigos cujas conversas me fizeram rir, rever conceitos, pensar por pontos de vista diferentes, enfim, me desenvolver mais como ser humano.

Aos meus orientadores Rodrigo e Oscar pela orientação e ensinamentos durante meus anos de trabalho e desenvolvimento no LNDC. Meu muito obrigado também ao corpo técnico do laboratório, em especial a Emanuel, André, Alessandro e Diego.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica / UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Metalúrgico.

METODOLOGIA PARA TESTES DE CORROSÃO FADIGA SOB ELEVADAS PRESSÕES UTILIZANDO CRACK GAUGE

Yuri Laet Ramalho

Agosto/2018

Orientador: Oscar Rosa Mattos

Co-orientador: Rodrigo Roberto Alves Garcia

Curso: Engenharia Metalúrgica

Uma previsão correta da vida útil de um componente torna menos dispendiosa a manutenção de equipamentos. Considerando que os fenômenos associados à corrosão fadiga estão em destaque, principalmente na indústria petrolífera, entende-se a necessidade dos estudos para compreender e evitar as falhas em estruturas metálicas.

Para compreensão do comportamento de defeitos como a taxa de propagação de trincas nos materiais associados causados pela corrosão fadiga serão utilizados conceitos da mecânica da fratura. O presente estudo utilizou como material de testes o aço HP1, tomando como base para a confecção dos corpos de prova a norma ASTM E647.

Este documento aborda as vantagens e limitações de técnicas já empregadas no estudo e caracterização de trincas por corrosão fadiga e sua aplicação sob elevadas pressões, além de uma solução alternativa para estes estudos sob as mesmas condições.

Palavras-chave: Testes de corrosão fadiga. Elevada pressão. Célula de carga. ASTM E647. Extensômetros e transdutores. DCPD.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Engineer.

METHODOLOGY FOR CORROSION TESTS FATIGUE UNDER HIGH PRESSURES USING CRACK GAUGE

Yuri Laet Ramalho

August/2018

Advisor: Oscar Rosa Mattos

Co-Advisor: Rodrigo Roberto Alves Garcia

Course: Metallurgical Engineering

A correct prediction of the life of a component makes it less expensive to maintain equipment. Considering that the phenomena associated with fatigue corrosion are prominent, especially in the oil industry, it is understood the need of studies to understand and avoid failures in metal structures.

To understand the behavior of defects as the rate of crack propagation in the associated materials caused by fatigue corrosion will be used concepts of fracture mechanics. The present study used HP1 steel as test material, based on the ASTM E647 standard.

This paper discusses the advantages and limitations of techniques already employed in the study and characterization of fatigue corrosion cracks and their application under high pressures, as well as an alternative solution for these studies under the same conditions.

Key-words: Corrosion fatigue tests. High pressure. Load cell. ASTM E647. Extensometers and transducers. DCPD.

SUMÁRIO

1	Introdução.....	1
1.1	Objetivo	2
1.2	Organização do estudo.....	2
2	Revisão bibliográfica.....	2
2.1	Definições básicas da Mecânica da Fratura	3
2.2	Definição de Fadiga conforme norma	4
2.2.1	Nucleação e Crescimento de trincas.....	4
2.2.2	Metodologias de ensaios de Fadiga.....	6
2.2.3	Influência da corrosão	8
2.2.4	Metodologias utilizadas atualmente	9
2.3	Técnicas de medição de trinca	11
2.3.1	Flexibilidade na face frontal (CMOD)	11
2.3.2	DICPD	12
2.3.3	Extensometria (EFS+BFS).....	13
2.3.4	Crack gauge	14
2.3.5	Fatores críticos de cada técnica e escolha do sistema envolvendo <i>crack gauge</i> e extensômetro	16
3	Materiais e métodos	18
3.1	Materiais e equipamentos	18
3.1.1	Corpo de prova	18
3.1.2	Máquinas de ensaio	19
3.1.3	Equipamentos de aquisição de dados	20
3.2	Metodologia	20
3.2.1	Usinagem e confecção das pré-trincas nas amostras.....	21
3.2.2	Instrumentação	21
3.2.3	Revestimento	25

3.2.4	Pré-trincas nas amostras	25
3.2.5	Aquisição de dados.....	26
3.2.6	Comparação de medidas de carregamento e comprimento de trinca por meio dos dois referidos sistemas	26
3.2.7	Influência de forças dissipativas em ensaios com vaso de pressão	26
4	Resultados e discussão	28
4.1	Resultados do teste via DCPD	29
4.2	Resultados do sistema CG+BFS	31
4.3	Comparação entre os resultados dos sistemas	32
4.3.1	Crack Gauge	34
5	Conclusão	35
6	Bibliografia.....	37

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de possíveis modos de carregamento	3
Figura 2. Círculo de Mohr	5
Figura 3. Nucleação e início de crescimento de microtrinca.....	6
Figura 4. Curva de Wöhler, metodologia S-N (adaptado de [2])	6
Figura 5. Curva log(DA/DN) por log(ΔK) com separação entre as regiões (adaptada de [2]) ..	7
Figura 6. Efeito do ambiente marinho na taxa de crescimento de trinca, da/dN para aço 4340 (adaptado de [20]).....	9
Figura 7. Formas de Carregamento com DK decrescente	10
Figura 8. Reduzindo o Carregamento de Forma Controlada é Possível Obter Ensaio Com ΔK Constante	10
Figura 9. Mantendo-se o DP constante, tem-se que o DK cresce a conforme o crescimento da trinca	10
Figura 10. Comportamento de ΔK quando ΔP é mantido constante	11
Figura 11. <i>Clip gauge</i> , adaptado de [2]	11
Figura 12. Geometria e posição de fios de aquisição de dados adaptado de ASTM E647.	13
Figura 13. Diagrama de posições dos strain gauges.....	14
Figura 14. Exemplo de crack gauge de leitura contínua.....	15
Figura 15. Esquema simplificado de um Crack Gauge de medição discreta	16
Figura 16. Layout da fabricação de amostras CT a partir de tubos [37].	18
Figura 17. (A) Especificação da norma ASTM E647 (B) Amostra utilizada.....	19
Figura 18. Máquina utilizada nos ensaios	19
Figura 19. Diagrama esquemático de instrumentação do sistema proposto.....	20
Figura 20. Esquema de componentes de comprimento de trinca [39].....	22
Figura 21. Strain gauge na posição de projeto para BFS	24
Figura 22. Corpo de prova instrumentado	24
Figura 23. Amostra revestida	25
Figura 24. Distinção das câmaras do vaso e força exercida nas faces internas devido à pressão	27
Figura 25. Efeito stick-slip	28
Figura 26. Malha gerada para amostra com $a/W = 60$	29
Figura 27. Geometrias de trinca simuladas	30
Figura 28. Resultados das simulações	31

Figura 29. Leituras referentes ao sistema CG+BFS	32
Figura 30. Comparação de medidas entre sistemas citados.....	33
Figura 31. Leituras do resultado do teste preliminar	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Composição química do material em peso[%]	18
Tabela 2. Especificação dos strain gauges.....	23
Tabela 3. Condições iniciais de ensaio.....	26
Tabela 4. Resultados da simulação computacional	30
Tabela 5. Condições de teste segundo sistema CG+BFS	33

1 Introdução

Um metal submetido a tensões repetidas ou flutuantes pode romper sob carregamentos relativamente baixos, quando comparado com a tensão de ruptura em regime estático. Este tipo de falha é conhecido como fratura por fadiga [1], sendo um grande problema para a indústria, pois não apresenta qualquer aviso óbvio por não apresentar deformação plástica considerável até o ponto de ruptura, tornando necessária uma avaliação constante dos materiais. Indústrias como aeronáutica, automobilística e em especial a marítima têm investido em pesquisa e inovação para entender e evitar tais falhas catastróficas.

Quando associado a um meio agressivo, as falhas por fadiga são ainda mais rápidas, demonstrando uma forte sinergia entre os efeitos de carregamento variável e agentes corrosivos, esta situação de rápido comprometimento do componente é conhecida por corrosão-fadiga. [2]

Desta forma a prospecção de petróleo sofre especialmente sob esse tipo de falha associada ao movimento natural de ondas e marés, além do meio agressivo, tanto do ambiente marinho, quanto de compostos extraídos com o petróleo (em especial H₂S).

Graças ao elevado investimento para compreensão deste fenômeno, muitos trabalhos têm sido feitos para avaliar e caracterizar o crescimento de trincas por corrosão-fadiga. Porém, com a descoberta do pré-sal, a prospecção deve ser feita em águas mais profundas [3], aumentando muito a pressão sob a qual os risers estarão submetidos. [4]

Geralmente os testes em laboratório na área de corrosão-fadiga são feitos sob pressão atmosférica, empregando um fator de segurança para altas pressões, o que significa que não temos real compreensão do efeito da pressão sobre o processo de propagação de um defeito por corrosão-fadiga. Surge então a demanda por um sistema robusto de estudo e caracterização de crescimento de trincas por corrosão-fadiga sob altas pressões. Em função disso, o Laboratório de Ensaios Não-Destrutivos, Corrosão e Soldagem (LNDC/UFRJ) tem desenvolvido sistemas de medição de trinca e carga para este fim.

O presente trabalho trata de mais uma alternativa viável à substituição das tradicionais células de carga em testes pressurizados para medida do carregamento sobre o corpo de prova.

A metodologia desenvolvida no presente trabalho utiliza um único *strain gauge* (extensômetro) na face dorsal do corpo de prova, além dos quais permitiram obter-se o carregamento diretamente aplicado sobre o corpo de prova, respeitando-se os requisitos básicos das Normas ASTM E4 [5], E647 [6] e E1820 [7]. Dessa forma, tornou-se uma alternativa viável

para testes de corrosão fadiga sob elevada pressão. O estudo foi baseado em testes experimentais e comparação dos resultados por diferentes alternativas.

A escolha de se desenvolver um sistema capaz de ler o carregamento diretamente aplicado no corpo de prova possibilita conhecer a verdadeira taxa de propagação de trinca por fadiga em elevadas pressões, os quais tem forte aplicação nos campos do pré-sal.

1.1 Objetivo

O presente trabalho estudou as técnicas de medição de trinca atualmente empregadas visando o desenvolvimento de uma nova técnica de medição de trinca em ensaios de corrosão fadiga sob alta pressão. Para tanto, testes experimentais foram efetuados, com o intuito de avaliar a metodologia proposta e comparar com resultados de ensaios semelhantes apresentados em [8], consequentemente, corroborar a existência de uma possível influência da força de atrito que atua nos testes devido à pressão interna do vaso, a qual estrangula o sistema de vedação sobre o eixo, dissipando a energia aplicada pela máquina.

1.2 Organização do estudo

Este trabalho foi dividido em cinco capítulos.

No primeiro capítulo foi feita uma introdução, onde aspectos gerais acerca do tema abordado são ressaltados, citando-se os principais pontos de relevância acadêmica e do setor de petróleo e gás.

O segundo capítulo ficou reservado para abranger uma fundamentação teórica juntamente com a revisão bibliográfica. Como fundamentação teórica, foram tratados aspectos que influenciam na corrosão-fadiga, além de destacar-se a definição dos testes experimentais, bem como quais variáveis atuam nos testes. Enquanto que, como revisão bibliográfica, realizou-se uma abordagem histórica e classificativa de alternativas de testes de corrosão fadiga em elevada pressão, tratando-se em especial da nova proposta a qual é apresentada neste trabalho.

No terceiro capítulo são apresentados os materiais e a metodologia experimental. Então, no quarto capítulo, é realizada a apresentação dos resultados concomitantemente com sua respectiva discussão. Para encerrar, o quinto capítulo é reservado às conclusões obtidas.

2 Revisão bibliográfica

Este capítulo aborda as bases para a compreensão do fenômeno de corrosão-fadiga, cujo estudo da velocidade de propagação de trinca mostra uma forte sinergia entre corrosão e fadiga. Também são abordadas superficialmente algumas das técnicas de medição de trinca.

2.1 Definições básicas da Mecânica da Fratura

As bases de entendimento da deterioração do material por fadiga encontram-se na mecânica da fratura, as quais aliadas às técnicas atuais possibilitam estimar a vida útil de um componente novo (sem defeitos), bem como sua vida remanescente quando detectada e caracterizada uma trinca [9]. Estimativas estas feitas através da devida comparação com testes laboratoriais e métodos experimentais [10].

Atualmente existem duas categorias de estudo relacionadas à mecânica da fratura, que são:

- Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE): Aplicável somente aos materiais que obedecem à lei de Hooke. Embora as correções para a plasticidade em pequena escala tenham sido propostas em 1948, essas análises são restritas a estruturas cujo comportamento global é linear elástico. [11]
- Mecânica da Fratura Elastoplástica (MFEP): Utilizada quando a plasticidade na ponta da trinca toma proporções consideráveis, o que invalida as considerações relativas à tensão elástica e interfere na velocidade de propagação da trinca.

Utilizaremos a MFLE para estes estudos devido ao carregamento empregado ser insuficiente para gerar uma região deformada plasticamente significativa.

Para melhor compreensão da distribuição de tensões na ponta da trinca se faz o uso do *fator de intensidade de tensões* (K), o qual a literatura apresenta em 3 modos principais de carregamento, conforme apresentado na Figura 1.

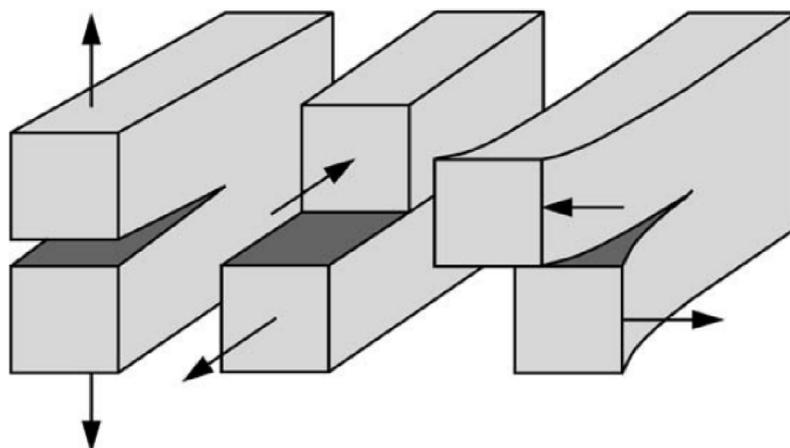


Figura 1. Esquema de possíveis modos de carregamento

Os modos de carregamento representados na Figura 1 são respectivamente tração, cisalhamento e rasgamento (K_I , K_{II} e K_{III}), dos quais apenas o primeiro será abordado neste trabalho visto sua

importância. As amostras utilizadas são do tipo *Compact Tension* (CT), assim sendo a variação em seu K_I ($\Delta K_I = K_{I-Max} - K_{I-min}$) é calculada utilizando a Equação 1 referida em [12].

Equação 1. Cálculo de ΔK para amostra CT

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B\sqrt{W}} \frac{2 + \alpha}{(1 + \alpha)^{\frac{3}{2}}} (0,886 + 4,64\alpha - 13,32\alpha^2 + 14,72\alpha^3 - 5,6\alpha^4)$$

Onde ΔP é a variação do carregamento aplicado, B a espessura, W a largura do corpo de prova (CP), α o comprimento de trinca normalizado a/W e a é o comprimento da trinca. Um dos requisitos da Equação 1 são valores de α maiores que 0,2.

Este conhecimento é importante, pois os experimentos de apresentados em [13] demonstraram que a propagação de trincas é regida por ΔK , e não ΔP como se pensava na época, dando origem às curvas da/dN vs. ΔK [14]. Este estudo possibilitou uma previsão mais acurada da vida útil do componente trincado. A partir destas curvas é possível relacionar a taxa de propagação de trinca em função do ΔK aplicado, utilizando um corpo de prova pré-trincado e de geometria bem definida. [15].

2.2 Definição de Fadiga conforme norma

De acordo com [2] a Fadiga é a mudança estrutural progressiva, localizada e permanente que ocorre em um material submetido a deformações repetitivas ou flutuantes em tensões nominais que têm valores máximos inferiores (e frequentemente muito inferiores) à tensão limite de escoamento do material. A fadiga pode culminar em trincas e causar fraturas após um número suficiente de flutuações. O dano por fadiga é causado pela ação simultânea de tensões cíclicas, tensão de tração e deformação plástica. Se qualquer um desses três não estiver presente, uma trinca por fadiga não será iniciada e propagada. A deformação plástica resultante do carregamento cíclico inicia a trinca; a tensão de tração promove o crescimento (propagação) de trinca. Embora as tensões de compressão não causem fadiga, as cargas de compressão podem resultar em tensões trativas locais. Deformações plásticas microscópicas também podem estar presentes em pequena escala, mesmo quando a tensão pode parecer completamente elástica.

2.2.1 Nucleação e Crescimento de trincas

O comportamento dos materiais submetidos à fadiga pode variar dependendo da sua composição química, microestrutura, tamanho de grãos, segregações, bem como seu volume e dispersão, tratamentos prévios (térmicos, químicos e/ou mecânicos), bem como a condição ambiental ao qual o material está exposto.

O processo de trincamento pode ser dividido em duas etapas, a saber: nucleação e propagação de trincas. De acordo com a literatura [16] a nucleação possui cerca de 80 a 90% da vida em fadiga. Essas etapas serão melhor discutidas a seguir.

A nucleação é decorrente da deformação plástica que ocorre pelo movimento das discordâncias nos planos de deslizamentos submetidos a tensões cisalhantes, que posteriormente levam à propagação de trincas. Raramente é possível detectar uma trinca à olho nu, mesmo algumas técnicas de ensaios não destrutivos podem não ser capazes de detectá-las, e ainda assim elas podem ser capazes de provocar problemas catastróficos [16].

De acordo com o círculo de Mohr, representado na Figura 2, a direção de máxima tensão cisalhante é a 45° da direção de tensão principal. O aço HP1, que foi escolhido como material de estudo, apresenta uma microestrutura supermartensítica, além disso é um material policristalino e apresenta uma textura cristalográfica homogênea (as direções de orientação dos sistemas cristalinos dos grãos do material não foram controlados durante o processo de fabricação, sendo portanto, aleatórias), dessa forma alguns grãos superficiais devem apresentar um plano de deslizamento preferencial alinhado com a máxima tensão cisalhante, nesses grãos começam a ocorrer pequenos escorregamentos entre os planos, levando a formação de bandas de deslizamento, e posterior formação de pequenas intrusões e extrusões, concentrando tensões nessa região e formando microtrincas que se propagam naquele plano paralelo à direção de máxima tensão cisalhante.

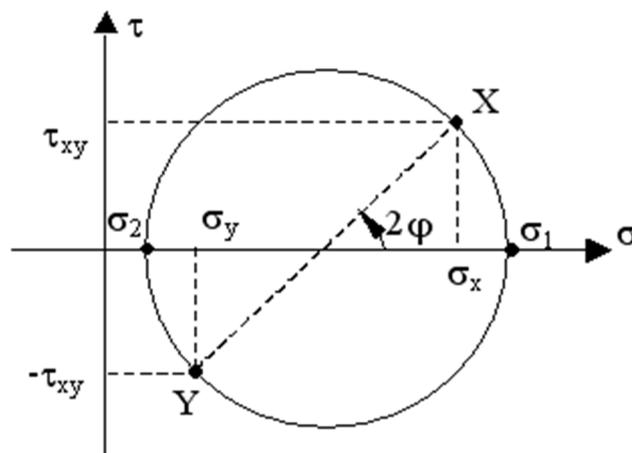


Figura 2. Círculo de Mohr

Ao atingir tamanho suficiente, a trinca passa a se propagar numa direção perpendicular à de tração que age no material como um todo, como exemplificado na Figura 3.

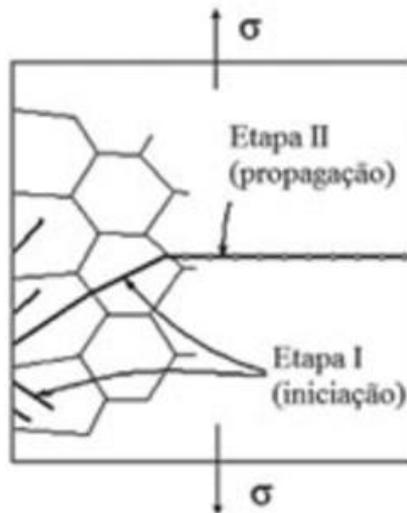


Figura 3. Nucleação e início de crescimento de microtrinca.

Portanto, torna-se necessário conhecer o comportamento em fadiga de materiais com ou sem defeitos [15]. Para isso, existem testes cuja finalidade é estimar a vida útil do componente. As principais metodologias serão abordadas a seguir.

2.2.2 Metodologias de ensaios de Fadiga

As principais metodologias de caracterização de materiais frente à fadiga são:

- Curva de Wöhler: A clássica metodologia S-N, relacionando a amplitude de carregamento (S) e o número de ciclos aplicados até falha (N), muito empregada para casos de fadiga de alto ciclo em amostras sem defeitos detectáveis, exemplificada na Figura 4;

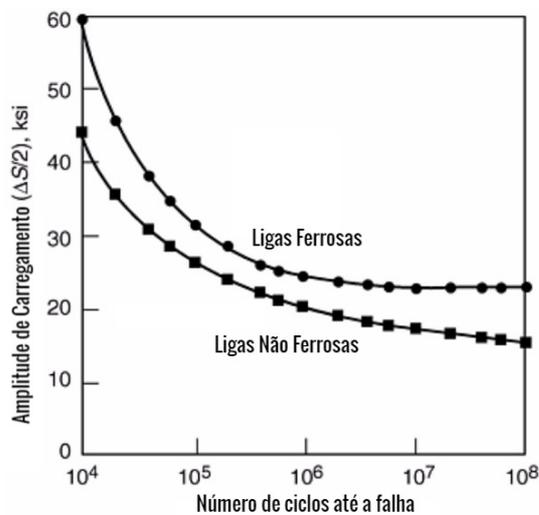


Figura 4. Curva de Wöhler, metodologia S-N (adaptado de [2])

- Metodologia ε -N: Em geral, para casos de fadiga de baixo ciclo em amostras sem defeitos, relacionando ε (deformação) e o número de ciclos até a falha, de forma análoga à curva de Wöhler;
- Curva da/dN : Metodologia de tolerância a defeitos, utilizada para estruturas que já contenha um defeito. Através da curva da/dN vs. ΔK exemplificada na Figura 5, pode-se estimar a vida útil remanescente do componente. Esta será abordada neste estudo.

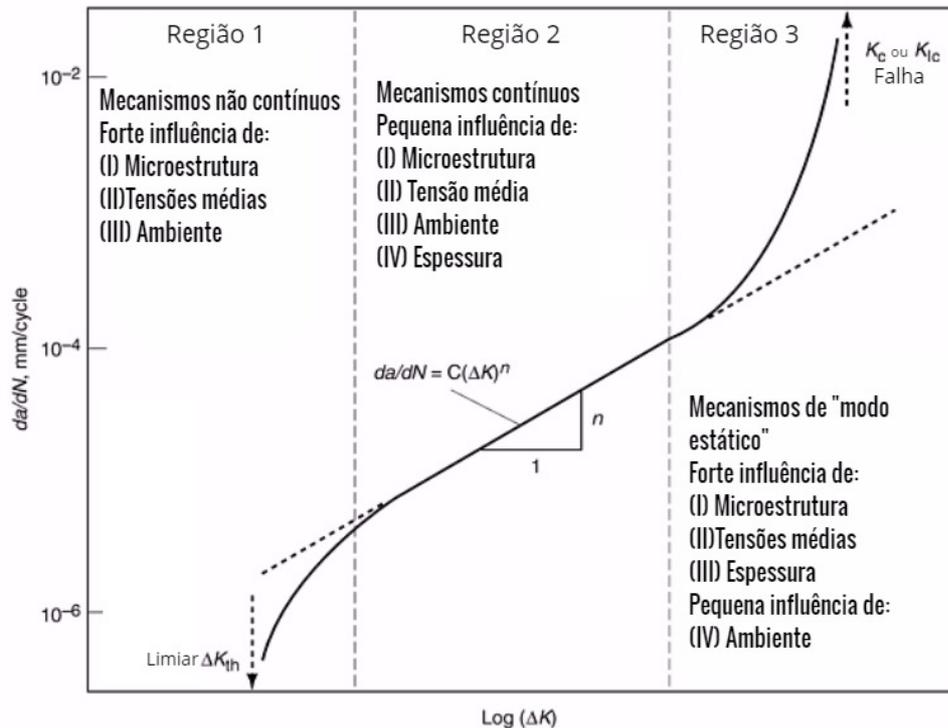


Figura 5. Curva $log(DA/DN)$ por $log(\Delta K)$ com separação entre as regiões (adaptada de [2])

Os estágios da propagação de trinca sob fadiga explicitados na Figura 4 são:

- Região I (Nucleação): Região Limiar ou próxima ao limiar, graficamente expressa entre o início da propagação da trinca e proximidades do início da região modelada pela Lei de Paris. O comportamento nesta região da curva é fortemente influenciado pela microestrutura (como orientação granulométrica, contornos de grão e precipitados), carregamento médio e a interação com o ambiente;
- Região II (Crescimento estável): Esta região não é tão dependente da microestrutura ou propriedades mecânicas macroscópicas. Há uma relação exponencial entre a taxa de crescimento de trinca e ΔK , conhecida como lei de Paris [13] onde C e m são constantes de ajuste. A trinca se propaga pela formação de estrias a cada ciclo de carregamento.

Equação 2. Lei de Paris [13]

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \Delta K^m$$

- Região III (Crescimento instável): A taxa de crescimento de trinca cresce fortemente quando K_{max} se aproxima de K_C ou K_{IC} (dependendo do estado de tensões), assim sendo o crescimento se torna instável até a ruptura da amostra.

2.2.3 Influência da corrosão

A corrosão consiste na deterioração de um material, geralmente metálico, por ação química ou eletroquímica do meio, associada ou não a esforços mecânicos. A deterioração causada pela interação físico-química entre o material e seu meio operacional representa alterações prejudiciais e indesejáveis [17].

Corrosão-fadiga (ou corrosão sob fadiga), por sua vez consiste no fenômeno sob o qual ocorre crescimento de trinca devido à aplicação de tensão cíclica em presença de um meio corrosivo. Essa combinação de corrosão e tensão cíclica apresenta efeito de interação sinérgica, que pode modificar consideravelmente a taxa de crescimento do defeito. Dessa forma, a velocidade de propagação pode se tornar mais intensa que uma combinação dos efeitos isoladamente [18]. Estes processos podem ocorrer em inúmeros casos, como cabos submarinos, eixos de hélice de navios, timões, tubos de evaporadores, componentes de turbinas, motores ou bombas e tubulações de transporte de líquidos agressivo [19].

Na Figura 6, verificamos a influência da corrosão por meio de 2 diferentes fatores: a composição do meio e a frequência de atuação da carga. Analisando os mesmos, fica evidente que a velocidade de propagação da trinca por fadiga é consideravelmente maior no meio contendo NaCl do que ao ar. Além disso, a frequência apresenta um papel importante, já que, em frequências mais baixas (0,1 Hz, por exemplo), há mais tempo para que a corrosão atue no processo de corrosão fadiga, ao passo que em frequências maiores (10 Hz), a corrosão não atua tão intensamente [20]. Uma explicação simples está no fato de que corrosão é um fenômeno dependente do tempo, segundo [21], também expresso na Figura 6.

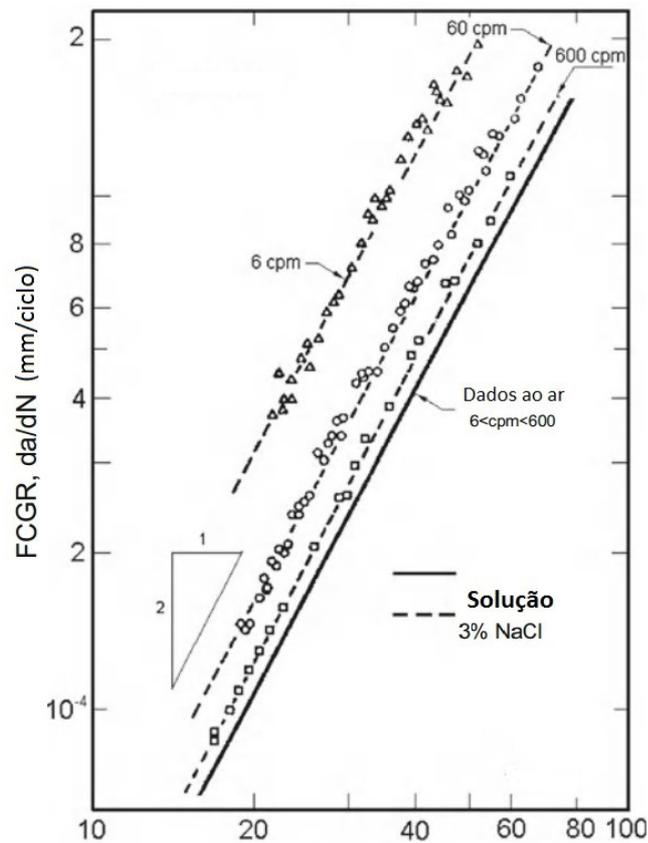


Figura 6. Efeito do ambiente marinho na taxa de crescimento de trinca, da/dN para aço 4340 (adaptado de [20])

Além desses fatores sabe-se que há outros fatores que influenciam na corrosão-fadiga tais como: forma de onda, microestrutura, razão de carregamento ($R = K_{MIN}/K_{MAX}$ ou P_{MIN}/P_{MAX}) e etc, mas não será dada grande ênfase aqui por já serem difundidas na literatura [22-23].

2.2.4 Metodologias utilizadas atualmente

A Norma ASTM E647 [6] reporta algumas metodologias de controle de K, para curvas de crescimento de trinca por fadiga, dentre as quais se destacam as seguintes:

- ΔK decrescente: São recomendações manter constante ou o K_{MAX} ou a razão de carregamento [24]. Ou mantendo constante o gradiente normalizado de K (C), cujo valor, em primeira instância, deve estar no intervalo $-0,08mm^{-1} < C < 0$ onde $C = \frac{1}{\Delta k} \frac{d\Delta K}{da}$. Para mais detalhes consultar o item 8.6.2 da norma.

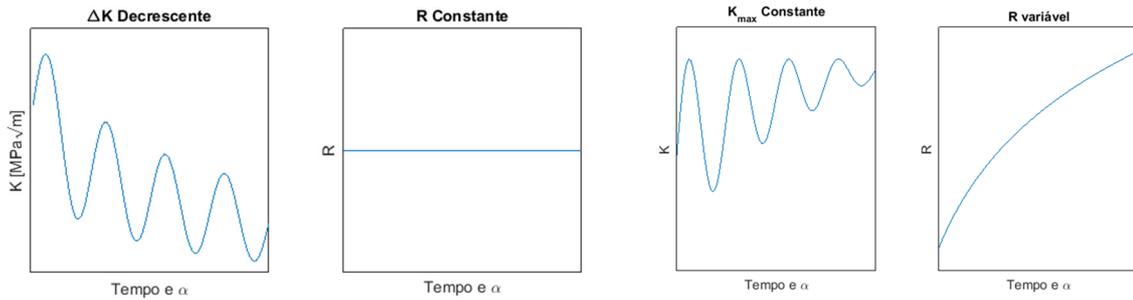


Figura 7. Formas de Carregamento com DK decrescente

- ΔK constante: Reduzindo a faixa de carregamento aplicado conforme o crescimento da trinca de forma a manter o ΔK constante. Trata-se de um teste com a finalidade de obter ou confirmar um único ponto por teste da dN vs. ΔK .

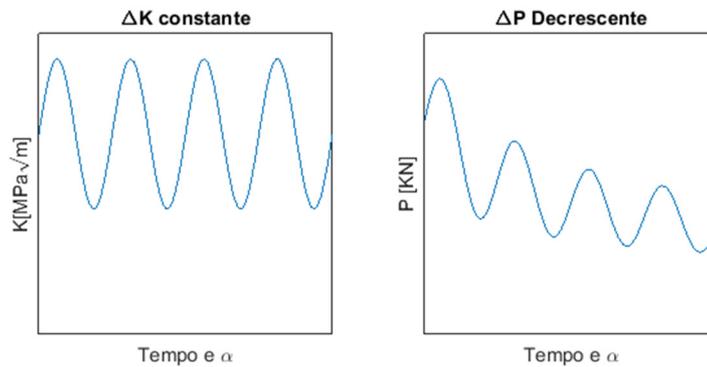


Figura 8. Reduzindo o Carregamento de Forma Controlada é Possível Obter Ensaio Com ΔK Constante

- ΔK crescente: A mais comum é optar ou por manter constante a faixa de carregamento (ΔP) ou aplicar o método de gradiente K normalizado (C), desde que $C > 0$;

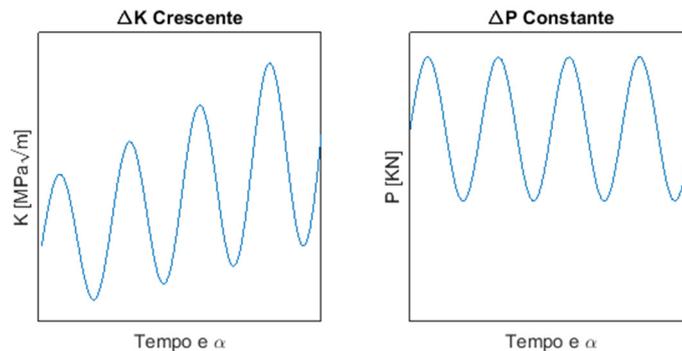


Figura 9. Mantendo-se o DP constante, tem-se que o DK cresce a conforme o crescimento da trinca

Os ensaios efetuados para este estudo mantiveram constantes P_{MIN} e P_{MAX} , consequentemente mantendo o ΔP constante. Dessa forma o ΔK aumenta conforme o crescimento da trinca [25], como exemplificado na Figura 10. A grande vantagem deste teste é a facilidade de execução pela manutenção da faixa de carregamento aplicado, tornando necessário monitorar apenas o comprimento da trinca.

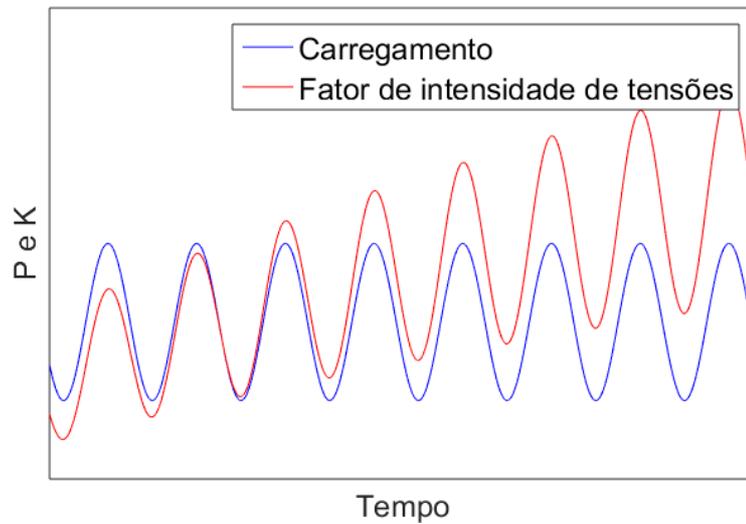


Figura 10. Comportamento de ΔK quando ΔP é mantido constante

Uma vez definido que o ensaio será controlado por ΔP constante e, conseqüentemente, ΔK crescente, devemos monitorar constantemente o tamanho da trinca. Para isto serão analisadas algumas técnicas empregadas para a caracterização de trincas nos ensaios.

2.3 Técnicas de medição de trinca

2.3.1 Flexibilidade na face frontal (CMOD)

O principal dispositivo para análise baseado no princípio da flexibilidade na face frontal é o *Clip Gauge*, composto por uma caixa resistente da qual se projetam duas hastes equipadas com um conjunto de extensômetros. Para seu uso é necessária a fixação de um suporte no CP ou entalhe no mesmo, de forma que as hastes do *clip gauge* permaneçam fixas na amostra durante o ensaio, como mostra esquematicamente a Figura 11.

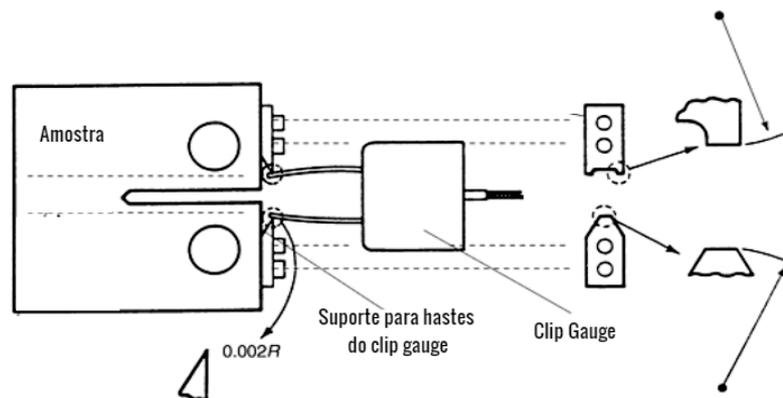


Figura 11. *Clip gauge*, adaptado de [2]

Este equipamento é baseado na flexibilidade (compliance) da amostra, ou seja, sua relação entre carregamento aplicado e o deslocamento na extremidade do CP. Para cálculo de

compliance para ensaios de fadiga, a prática usual é o uso da compliance normalizada (EBv/P) tanto quanto o comprimento de trinca normalizado (a/W). Onde E é o módulo de Young, B é a espessura do CP, v é o deslocamento na face frontal, e P o carregamento aplicado [26]. A equação de controle desta técnica encontra-se na Equação 3.

Equação 3. Comprimento de trinca por Clip Gauge

$$\frac{a}{W} = C_0 + C_1 u_x^1 + C_2 u_x^2 + C_3 u_x^3 + C_4 u_x^4 + C_5 u_x^5$$

Onde $u_x = [(EBv/P)^{1/2} + 1]^{-1}$, e as constantes polinomiais são dependentes de onde as extremidades do *clip gauge* são fixadas, conforme item A1.5.2.1 da norma ASTM E647. A faixa de aceitação desta equação de controle é de $0,2 \leq a \leq 0,975$. Cabe lembrar que a correta geometria do suporte do *clip gauge* é indispensável para a leitura eficiente do sistema. [7]

2.3.2 DCPD

Queda de potencial em corrente contínua (Direct Current Potential Drop – DCPD) também é uma técnica indireta de medição de comprimento de trinca em materiais metálicos. Esta técnica é baseada na variação da resistência elétrica da amostra em função do comprimento de trinca, pois conforme esta se propaga, haverá uma redução na área condutora que, por conseguinte, um aumento na diferença de potencial elétrico entre os pontos medidos.

A técnica é esquematizada na Figura 12, utilizando um corpo de prova do tipo *Compact Tension* onde a corrente entra na face superior, na direção do centro do furo, saindo pela face inferior. A trinca funciona como uma barreira às linhas de corrente, dessa forma alterando o fluxo de corrente através da amostra, e conseqüentemente, o potencial em cada ponto. Com o crescimento da trinca a barreira se torna mais significativa, ocorrendo assim uma queda de potencial crescente nos pontos medidos, com o aumento do comprimento de trinca.

Esta técnica geralmente utiliza correntes muito elevadas, a saber, 10 a 50A. Sendo que quanto mais elevada a corrente, melhor se torna a resolução do tamanho de trinca, uma vez que a queda ôhmica se torna maior, passando a não precisar de equipamentos tão sensíveis, que em certos casos poderiam nem estar disponíveis no mercado.

Por outro lado, a utilização de correntes muito elevadas provoca efeito joule capaz de modificar substancialmente a resistividade do material e, conseqüentemente, a queda ôhmica será alterada, gerando medidas de comprimento de trinca inexatas. Para evitar este problema pode-se utilizar um outro corpo de prova como eletrodo de referência, cuja geometria de trinca

inicial padronizada por [6], submetido às mesmas condições da amostra ensaiada, excetuando-se o carregamento.

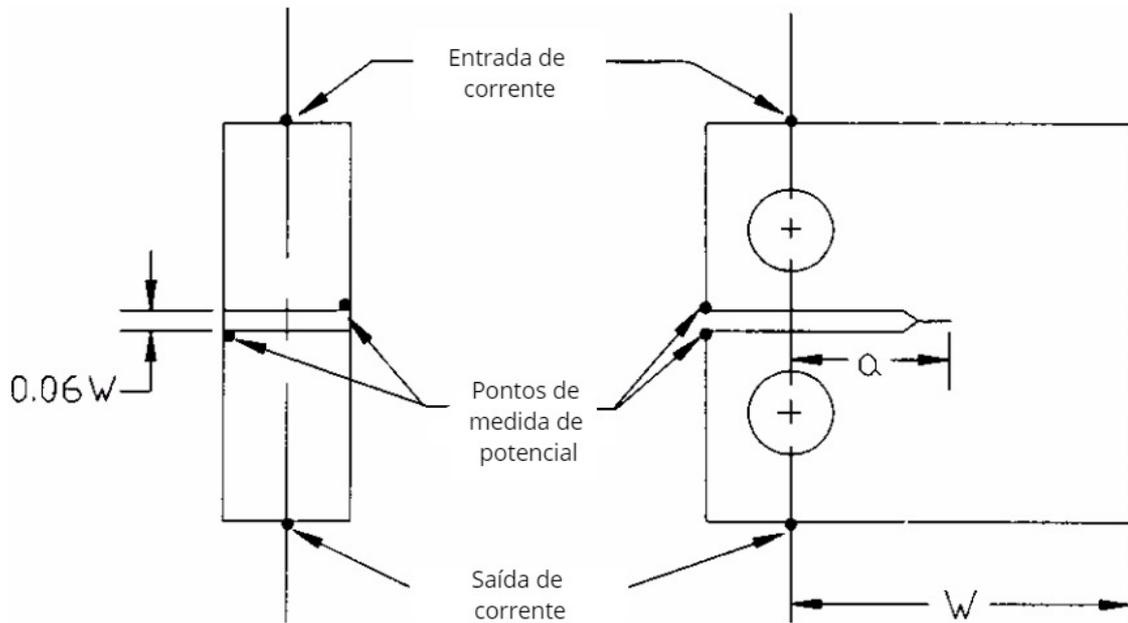


Figura 12. Geometria e posição de fios de aquisição de dados adaptado de ASTM E647.

A leitura do comprimento de trinca é realizada de acordo com a Equação 4, onde V é a diferença de potencial entre os pontos medidos durante o teste e V_r é esta diferença quando $\alpha = 0,241$. Os coeficientes de ajuste são $B_0 = -0.5051$, $B_1 = 0.8857$, $B_2 = -0.1398$, $B_3 = 0.0002398$.

Equação 4. Comprimento de trinca por DCPD

$$\frac{a}{W} = B_0 + B_1\left(\frac{V}{V_r}\right) + B_2\left(\frac{V}{V_r}\right)^2 + B_3\left(\frac{V}{V_r}\right)^3$$

2.3.3 Extensometria (EFS+BFS)

Este novo sistema empregando extensômetros (*strain gauges*, SG) foi desenvolvido [27] para aplicações na aquisição de dados de carregamento e comprimento de trinca, associando medidas de deformação em pontos estratégicos do corpo de prova (EFS e BFS, respectivamente Extremes Face Strain e Back Face Strain) e modelagem numérica por elementos finitos [28]. A medida de extensômetros nas posições indicadas na Figura 13 torna o próprio um transdutor, tornando possível fazer leituras referentes ao carregamento aplicado e o comprimento de trinca [29], e conseqüentemente, ao estado de tensões aplicado ao corpo de prova sem o auxílio de sensores externos à amostra. Por este motivo, sua utilização em testes pressurizados é altamente recomendada em detrimento de se utilizar a configuração tradicional, que utiliza células de carga para medir o carregamento sobre o corpo de prova.

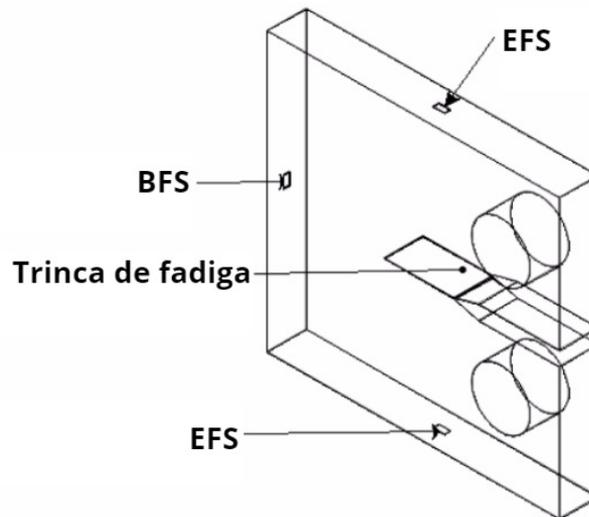


Figura 13. Diagrama de posições dos strain gauges.

Com as deformações medidas pelas técnicas EFS e BFS, referidas respectivamente como ϵ_{EFS} e ϵ_{BFS} , teremos que $m = \frac{\epsilon_{BFS}}{\epsilon_{EFS}}$ e $M = \frac{1}{m^{0,5+1}}$. Através dessa função da flexibilidade normalizada M, é possível estimar α através da Equação 5.

Equação 5. Fração percorrida pela trinca

$$\frac{a}{W} = C_0 + C_1M + C_2M^2 + C_3M^3 + C_4M^4 + C_5M^5$$

Onde constantes são $C_0 = -1,18$, $C_1 = 21,75$, $C_2 = -91,822$, $C_3 = -179,1$, $C_4 = -169,79$ e $C_5 = 60,559$. Com o comprimento normalizado de trinca e a deformação lida pelo BFS é possível calcular o carregamento aplicado à amostra utilizando a Equação 6 [12], dessa forma, através da Equação 1 [30], obtém-se o K aplicado à amostra.

Equação 6. Relação entre carregamento e deformação em função do comprimento de trinca [12]

$$|EWB \left(\frac{\epsilon}{P} \right)| = \frac{1,41 - 1,462\alpha + 20,45\alpha^2 - 26,83\alpha^3 + 11,45\alpha^4}{(1 - \alpha)^2}$$

2.3.4 Crack gauge

Existem basicamente 2 tipos de *crack gauges*:

- Leitura contínua de queda de potencial: Semelhante a um DCPD indireto, este sensor mede a queda de potencial entre 2 pontos de um circuito próprio, gerando uma leitura contínua do tamanho da trinca [31];
- Leitura discreta de resistência: Este sensor é colado na lateral do corpo de prova, utiliza filamentos de resistência padrão em paralelo, de forma alterar a resistência do componente conforme o crescimento de trinca.

Deve-se ressaltar que é sugerido o uso deste sensor em ambos os lados da amostra, devido a leitura ser apenas superficial, não apresentando assim, sensibilidade ao fenômeno do tunelamento.

O *crack gauge* de leitura contínua pode ser um sensor a ser colado na amostra ou pode ser feito diretamente no corpo de prova. A [32] apresenta um sensor do segundo tipo, feito a partir da pulverização e remoção de materiais conforme tratado em [31], permitindo uma adesão mais intensa na amostra e uma resistência maior à temperatura, quando comparado à versão colável deste sensor.

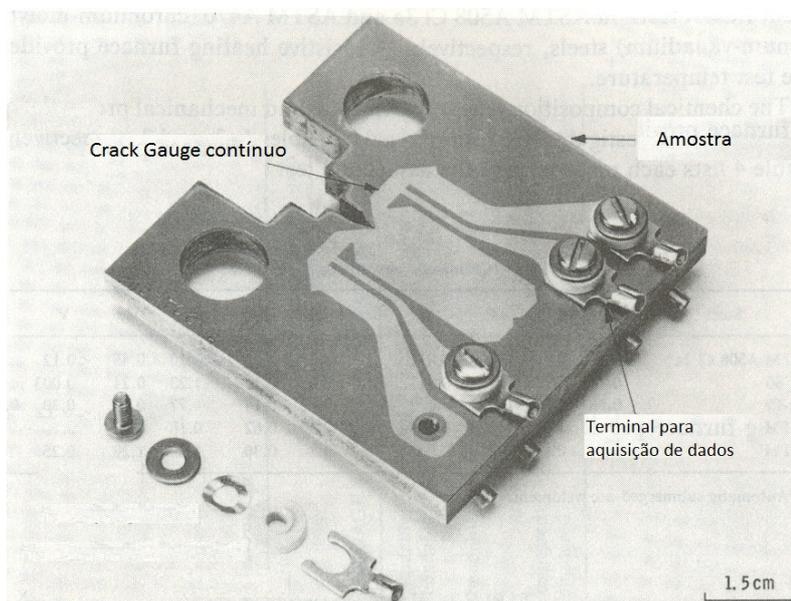


Figura 14. Exemplo de crack gauge de leitura contínua

Deve-se considerar que boa parte das publicações utilizando estes sensores são da década de 80, e desde então houve um considerável desenvolvimento na área de polímeros, otimizando a eficácia das colas empregadas, além de muitas dessas publicações não apresentarem as curvas de calibração para destes sensores.

Em se tratando do tipo discreto, que é abordado no presente trabalho, apresenta algumas vantagens e desvantagens em relação ao contínuo. Dentre as vantagens, podemos citar a facilidade de aquisição no mercado nacional e custo mais acessível. Como desvantagem pode-se citar o fato de apresentar uma curva com formato “exponencial” que pode dificultar a determinação do tamanho da trinca principalmente no início da propagação, já que a incerteza da medição da resistência de cada filamento inicialmente se confunde com a variação de resistência equivalente.

Contudo, no presente trabalho, desenvolveu-se uma metodologia computacional em Labview® capaz de contornar este problema, possibilitando a utilização desse tipo de crack gauge em testes de corrosão fadiga.

O *crack gauge* de medição discreta apresentado na Figura 15 também utiliza medidas elétricas para avaliar o tamanho da trinca. Com o crescimento da trinca, seus filamentos são rompidos, o que modifica a resistência elétrica do componente, resistência esta que é continuamente medida durante o ensaio.

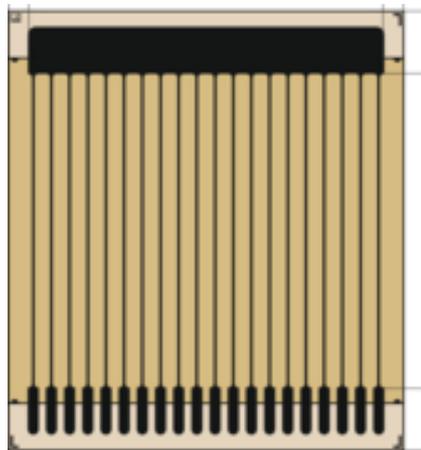


Figura 15. Esquema simplificado de um Crack Gauge de medição discreta

Cada filamento é dotado da mesma resistência, tornando fácil calcular a resistência equivalente com a ruptura progressiva ocasionada pela propagação da trinca. O número de filamentos restantes pode ser obtido pela comparação da leitura com dados com a Equação 7.

Equação 7. Resistência equivalente teórica do crack gauge em função do número de filamentos remanescentes

$$R_{eq} = \frac{R_i}{N}$$

Dessa forma podemos acompanhar a ruptura de cada elemento do sensor, associado a um incremento padrão no comprimento de trinca. Combinando esses dados com a geometria do corpo de prova, o número de ciclos, frequência e o carregamento aplicado podemos obter as curvas A vs N e da/dN do material.

2.3.5 Fatores críticos de cada técnica e escolha do sistema envolvendo *crack gauge* e extensômetro

As técnicas citadas nos itens anteriores possuem algumas vantagens e desvantagens inerente aos respectivos dispositivos principais empregados, que, no caso de testes de corrosão fadiga em elevada pressão, podem dificultar ou até mesmo impossibilitar a aquisição de dados

com uma acurácia satisfatória. A seguir, serão abordados alguns aspectos relevantes a respeito disso e a adaptação de uma nova metodologia.

O *Clip Gauge* é capaz de medir o comprimento de trinca pela abertura na face da amostra, a leitura se dá através da aquisição de dados dos extensômetros em cada lado de suas hastes, disponibilizando uma leitura contínua e indireta, além de desacoplar automaticamente da amostra quando esta chega ao limite de deslocamento. Este sistema é bem consolidado, sendo fácil de utilizar e com medidas de precisão aceitável para vários ensaios. Porém, torna-se difícil isolar este sistema para adaptá-lo às altas pressões exigidas ao teste.

A técnica de DCPD também já está consolidada na academia, sendo utilizada em diversos estudos na área e, diferentemente das outras metodologias abordadas neste trabalho, precisa de um isolamento satisfatório, a fim de não trazer medições erradas, danificar equipamentos por descargas elétricas ou até mesmo colocar em risco a segurança humana. É necessário muito cuidado ao utilizar este recurso, pois para obter uma sensibilidade adequada é preciso utilizar correntes entre 10 e 50 ampères, lembrando que 0,3 ampères é o suficiente para provocar uma parada cardíaca. Além disso, não se sabe a influência dessa corrente na interface eletroquímica do sistema, sendo possível que uma polarização no sistema causado pela passagem de alta corrente possa alterar o comportamento do material sob as condições de ensaio. Em função disso, esta técnica não foi escolhida como alternativa para a medição do tamanho de trinca, porém neste trabalho será avaliada sua sensibilidade ao fenômeno do tunelamento.

A técnica de BFS, depende da utilização de célula de carga, que conforme [8,27, 32-32-34] não é indicada para testes em elevadas pressões, devido ao surgimento de forças não conservativas que atuam sobre o eixo, dissipando parte da força que atua sobre o corpo de prova, fazendo com que o valor do carregamento medido pela célula de carga não coincida com o valor real atuando sobre o corpo de prova. Conforme, mencionado anteriormente, a técnica de EFS se mostra uma boa alternativa à célula de carga para testes em elevada pressão. Esta técnica combinada (BFT+BFS) encontra-se esquematizada na Figura 13.

O sistema proposto neste trabalho consiste em uma metodologia alternativa que possibilita, com os dados de deformação do BFS [36] e o comprimento de trinca do *crack gauge*, calcular o carregamento aplicado diretamente na amostra e, conseqüentemente, o valor de ΔK aplicado segundo a Equação 1 [30]. Os resultados das técnicas apresentadas no presente trabalho serão comparados com o sistema proposto aqui apresentado para verificar sua aplicabilidade para testes de corrosão fadiga em elevadas pressões. [37]

3 Materiais e métodos

A confecção das amostras foi feita com base na Norma ASTM E647 [6], que padroniza as dimensões de corpos de prova, metodologias e requisitos para ensaios de fadiga. A seguir serão detalhados os materiais, equipamentos e metodologias empregados neste trabalho.

3.1 Materiais e equipamentos

3.1.1 Corpo de prova

As amostras são corpos de prova (CP) tipo CT, do inglês *Compact Tension*, e foram extraídas de um tubo de aço HP1 da empresa Tenaris Confab no sentido L-C, conforme Figura 16. A composição química em massa do referido aço encontra-se na Tabela 1.

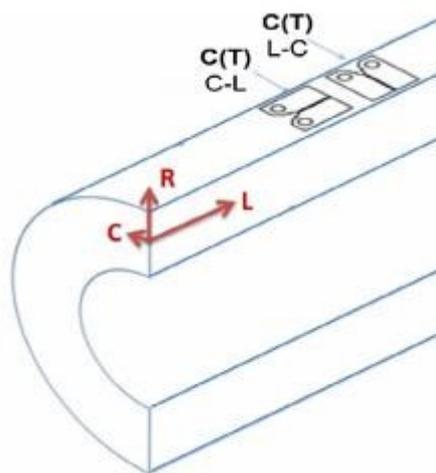


Figura 16. Layout da fabricação de amostras CT a partir de tubos [38].

Tabela 1. Composição química do material em peso[%]

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
Max 0,04	Max 0,5	Max 0,6	Max 0,02	Max 0,01	13	4,2	1,1

Os corpos de prova utilizados neste estudo, do tipo CT, segundo orientações da norma que podem ser verificadas na Figura 8, devem apresentar rugosidade superficial máxima de 0,8 mm, tanto nas faces, quanto nos furos. A largura, W , é a referência mais importante para padronização dimensional, sendo que as faces indicadas com “A” devem apresentar tolerância máxima de $0,002W$ e a ponta do entalhe deve ter o mesmo comprimento que a distância entre as faces inferior e superior do mesmo. Por fim, a espessura, B , do corpo de prova deve estar na faixa de $(W/20) < B < (W/4)$ e o comprimento de trinca inicial (a_n) sugerido é de $0,2W$, como

3.1.3 Equipamentos de aquisição de dados

Para leitura de carregamento e comprimento de trinca foi utilizado o sistema proposto no item 2.3.5 (denominado no presente trabalho como CG+BFS), exemplificado na Figura 19. Além disso, uma célula de carga externa ao vaso também é utilizada.

Uma vez que a célula de carga é capaz de fornecer dados de carregamento instantaneamente, ainda que com magnitudes atenuadas, ela é utilizada pelo sistema de controle para delimitar o início e fim de cada ciclo de carregamento, garantir o formato senoidal da onda e monitorar limites de segurança. Paralelamente, o sistema CG+BFS fornece informações precisas sobre o carregamento e comprimento de trinca, porém estas informações são atualizadas somente ao término de cada ciclo de carregamento.

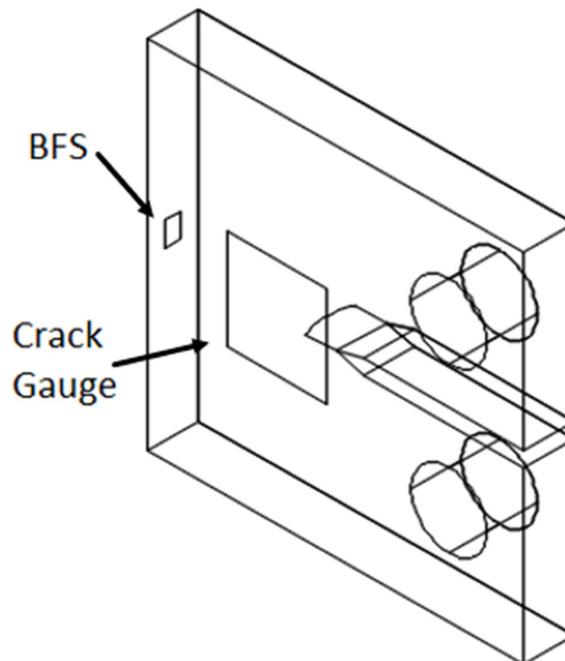


Figura 19. Diagrama esquemático de instrumentação do sistema proposto

Dessa forma, possibilitou-se a comparação de medidas sob determinadas condições de carregamentos e pressões [32].

3.2 Metodologia

A lista a seguir é uma síntese da metodologia adotada:

- Usinagem das amostras;
- Instrumentação das amostras.

- Aplicação dos revestimentos para manutenção da integridade do sistema de medição de comprimento de trinca e carga;
- Confeção das pré-trincas;
- Aquisição de dados dos ensaios;
- Comparação de medidas de carregamento e comprimento de trinca por meio dos dois referidos sistemas;
- Avaliação de influência de forças dissipativas relativas às variáveis de projeto avaliadas nos ensaios.

3.2.1 Usinagem e confecção das pré-trincas nas amostras

As amostras foram usinadas de acordo com a norma ASTM E647, conforme geometria apresentada anteriormente na Figura 17 e descrita no item 3.1.1. Após esta etapa, as amostras foram instrumentadas, conforme detalhamento a seguir.

3.2.2 Instrumentação

A seguir serão detalhadas as técnicas utilizadas no presente trabalho.

3.2.2.1 Clip Gauge

O *clip gauge* mede a flexibilidade na face frontal da amostra através da deflexão de hastes conectadas ao corpo do sensor, conforme explicado anteriormente no item 2.3.1. Isto significa que uma tentativa de revestimento para este tipo de sensor poderia ocasionar uma medida inacurada, restando procurar instrumentos que pudessem suportar as pressões exigidas para os testes [2,6].

Foram comparados os resultados dos testes via *clip gauge* em duas situações diferentes: com e sem revestimento. O objetivo desta comparação foi verificar a ocorrência de possíveis diferenças nas medidas em decorrência do revestimento.

3.2.2.2 DCPD

Neste trabalho, optou-se por uma análise por elementos finitos, em vez de testes experimentais, tais como utilizados nas outras técnicas, já que o objetivo foi verificar a influência do tunelamento na medida indireta de trinca via DCPD. Para isso utilizou-se o software ANSYS Workbench, em que inicialmente foi realizada uma etapa de qualificação das condições de contorno da simulação. A Equação 4 (do DCPD) proposta em [6] serviu como

referência. Cabe lembrar que tal equação foi obtida cerca de 30 anos atrás experimentalmente e é bem difundida na academia.

Após a obtenção de sucesso nesta etapa, a influência do tunelamento foi estudada, para isso, realizou-se uma comparação dos resultados obtidos por trincas com $\alpha_n + \alpha_{fat}$ idênticos, ver Equação 8, em concordância com a ISO 12108:2002(E) [40], explicitada na Figura 20.

Equação 8. Comprimento Efetivo de Trinca segundo [40]

$$\alpha = \alpha_n + \alpha_{fat} + \alpha_{cor}$$

Onde:

- α é o comprimento efetivo de trinca;
- α_n é o comprimento do entalhe usinado;
- α_{fat} é a extensão superficial de trinca a partir da extremidade do entalhe usinado;
- α_{cor} é a correção da curvatura da frente de trinca, ou seja, do tunelamento.

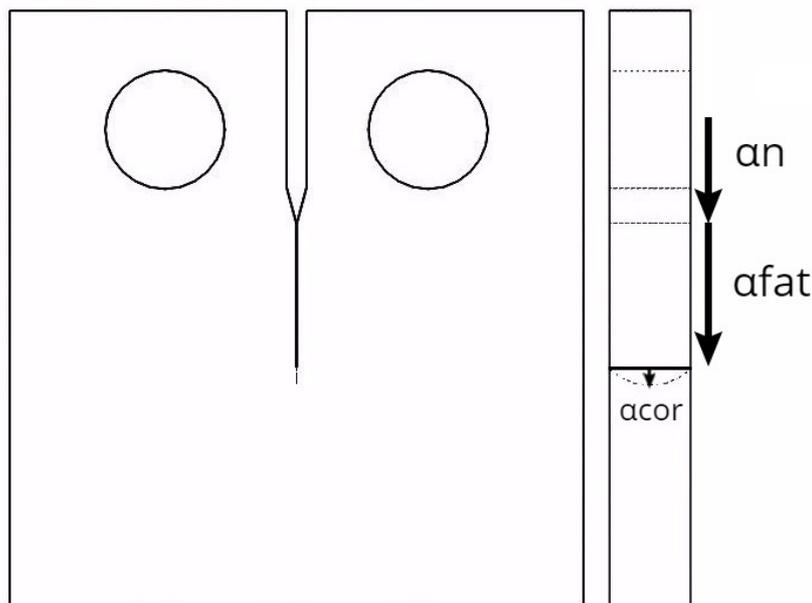


Figura 20. Esquema de componentes de comprimento de trinca [40].

Comparou-se nas simulações o efeito do tunelamento, mensurando a diferença de potencial elétrico nos pontos de medição, ver item 2.3.2. Cada simulação foi feita em pares, com $\alpha_n + \alpha_{fat}$ constantes e α_{cor} de 0 e 0,503 mm. Essa correção do tunelamento foi realizada pela média de 3 pontos, sendo dois deles distanciados a $0,25B$ da superfície lateral e o terceiro ponto no centro [40].

Em todas as simulações foram aplicados carregamentos na faixa de 8 a 16 KN de tração na área dos pinos das garras e corrente de 30 A através de uma área circular de 5mm de diâmetro na direção do centro do furo para a garra, sendo a saída de corrente na mesma posição na face oposta. [2]

3.2.2.3 Extensometria

Como mencionado no item 2.3.3, este sistema transforma o estímulo mecânico da deformação em pontos específicos da amostra, em um sinal elétrico através do uso de *strain gauges* (SGs). O processo e uso serão descritos abaixo.

3.2.2.3.1 Aplicação dos strain gauges

Para utilizar as técnicas de aquisição de dados BFS (Back Face Strain – Deformação na face traseira) é necessária a colagem de *strain gauges* nas amostras, esse sistema lê a deformação no corpo de prova para avaliar o comprimento de trinca, tornando assim o próprio CT um transdutor [41]. As especificações destes extensômetros encontram-se na Tabela 2.

Tabela 2. Especificação dos strain gauges
Especificação dos Strain Gages utilizados

Marca	HBM
Resistência	350 ± 0.35 Ω
Gage Factor	2.02 ± 1%
Comprimento	3 mm
Tipo	Linear
Aço	Ferrítico

Instalação dos sensores (*strain gauge*)

Seguindo a metodologia do LNDC, as regiões nas quais seriam colados os *strain gauges* foram lixadas nas áreas de colagem, sendo as posições de colagem dos SGs foram marcadas com paquímetro. De forma a auxiliar o posicionamento para colagem foi utilizada uma placa de vidro limpa, assim como o corpo de prova, com acetona ou álcool isopropílico. Após o correto posicionamento dos SGs aplicou-se uma pequena quantidade da cola *Z70 Rapid Adhesive* para posicioná-los nas posições relativas ao uso de BFS e EFS totalizando três *strain gauges* colados, após o posicionamento, cada SG foi pressionado por aproximadamente cinco minutos para evitar formação de bolhas e melhor fixação dos mesmos, posteriormente a amostra foi mantida em repouso por 24 horas para assegurar uma perfeita cura da cola.

Após este período os extensômetros foram limpos e preparados para receber o ponto de solda nos terminais, este ponto de solda foi aplicado de forma a manter um contato elétrico fino, porém consistente, evitando contato entre os fios e terminais, a temperatura de solda empregada

foi 300°C. Para a soldagem dos fios ao terminal o processo foi o mesmo, novamente tomando cuidado para evitar o contato elétrico entre os terminais. Após este processo o SG tem os fios imobilizados na região imediatamente posterior à solda para proteção mecânica provisória por fita isolante como apresentado na Figura 21.



Figura 21. Strain gauge na posição de projeto para BFS

3.2.2.4 Crack Gauge

O *Crack Gauge* fornece uma medida do comprimento de trinca superficial. A aplicação do sensor é semelhante ao do extensômetro, mudando apenas a posição. O corpo de prova então devidamente instrumentado encontra-se na Figura 22. Assim como o strain gauge, este sensor requer, da mesma forma, um revestimento adequado.

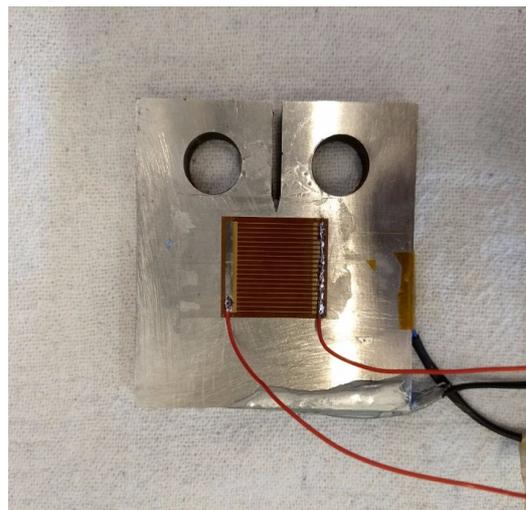


Figura 22. Corpo de prova instrumentado

3.2.3 Revestimento

A solução utilizada nos testes com vaso de pressão foi de NaCl 3% a aproximadamente 20°C, simulando a condição marítima, em conformidade com a Norma BS 7910 [30]. Visando a integridade do sistema de aquisição de dados via SG e *crack gauge* deve-se revestir a amostra.

Inicialmente, visando garantir proteção relativa à altas pressões, foi utilizado um revestimento que em testes preliminares resistiu a pressões superiores a 300 bar (4350 psi), porém sua resistência mecânica foi tal que impediu a deformação do corpo de prova, tornando-o impróprio para este teste.

O revestimento mais adequado aos testes foi capaz de permitir isolamento dos sensores até que a trinca crescesse ao comprimento de 60% de W, garantindo a integridade dos sensores. O revestimento usado no presente trabalho é um elastômero que apresenta as seguintes características: resistência a tração de 19 MPa, 95 Shore A - DIN 53505, resistência à ruptura 22,766 KN/m e não apresenta corrosão química ou eletroquímica (DIN 50900).

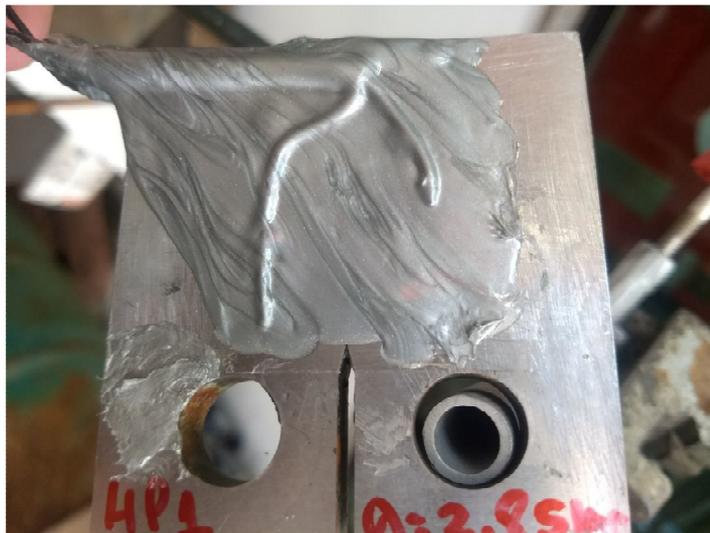


Figura 23. Amostra revestida

3.2.4 Pré-trincas nas amostras

Objetivando uma trinca com pequeno raio de curvatura e eliminação de efeitos de histórico de carregamento e/ou mudança de forma da trinca foi feita uma pré-trinca, conforme recomendação da norma ASTM E647 [6]. A abertura da pré-trinca foi feita com frequência de 50Hz até o comprimento de 14,52 mm ($\alpha=0,242$) também como orientação da norma, na máquina Instron apresentada na Figura 18(B) . Este procedimento é comum às 3 técnicas supracitadas (DCPD, BFS e Clip gauge).

3.2.5 Aquisição de dados

O sistema proposto utiliza a combinação de um extensômetro, com a técnica BFS, e um crack gauge. Segundo a equação de Equação 6 [12] a razão de ϵ/P é proporcional a uma função do comprimento de trinca, dessa forma, se com a medida o comprimento de trinca pelo *crack gauge* é possível determinar o carregamento no corpo de prova de forma independente da célula de carga.

Tal metodologia será comparada ao conjunto de *strain gauges* utilizando os o sistema EFS+BFS descrito no item 3.2.2.3. A célula de carga pode informar a carga aplicada, porém o sistema EFS necessita de um tratamento de dados mais complexo, visto que é baseado nas simulações via elementos finitos detalhados em [28], onde o carregamento é medido pela deformação no extensômetros do sistema EFS. Com estes dados podemos calcular o ΔK aplicado segundo a Equação 1 [6].

3.2.6 Comparação de medidas de carregamento e comprimento de trinca por meio dos dois referidos sistemas

Os sistemas CG+BFS e EFS+BFS foram comparados entre si visando analisar a viabilidade de uso do sistema proposto para mensurar carregamento aplicado e comprimento de trinca, e conseqüentemente, estado de tensões, sob regime de corrosão fadiga em altas pressões. Verifica-se também a faixa de aplicação do sistema proposto e algumas outras limitações.

3.2.7 Influência de forças dissipativas em ensaios com vaso de pressão

Foram realizados testes em 4 diferentes condições, conforme representado na Tabela 3, além das características comuns aos ensaios, a saber carregamento senoidal com $\Delta P = 8\text{KN}$, $R=P_{\min}/P_{\max}=0,5$ e frequência de 0,25 Hz.

Tais testes foram realizados com o intuito de melhor compreender a influência da utilização do vaso de pressão e sistema de compensação (desenvolvido pelo LNDC) em diferentes pressões.

Tabela 3. Condições iniciais de ensaio

Teste	Usa Vaso	Pressão [barg]	Sistema de compensação
1	Não	1	Não
2	Sim	1	Não
3	Sim	180	Não
4	Sim	180	Sim

O sistema de compensação atua de forma semelhante à prensa hidráulica, na qual a grande diferença entre as áreas da secção transversal do eixo e a do êmbolo da câmara do sistema de compensação formam um calço hidráulico cuja pressão, que não precisa ser tão alta (neste caso, aproximadamente 2,2 Bar) se contrapõe a força de ejeção do eixo de aproximadamente 12,27 KN. A câmara de compensação, melhor detalhada na Figura 24, é ligada a um pulmão para minimizar a variação de pressão pelo deslocamento do eixo, atuando como um vaso comunicante. A Figura 24 é uma representação esquemática do sistema desenvolvido no LNDC.

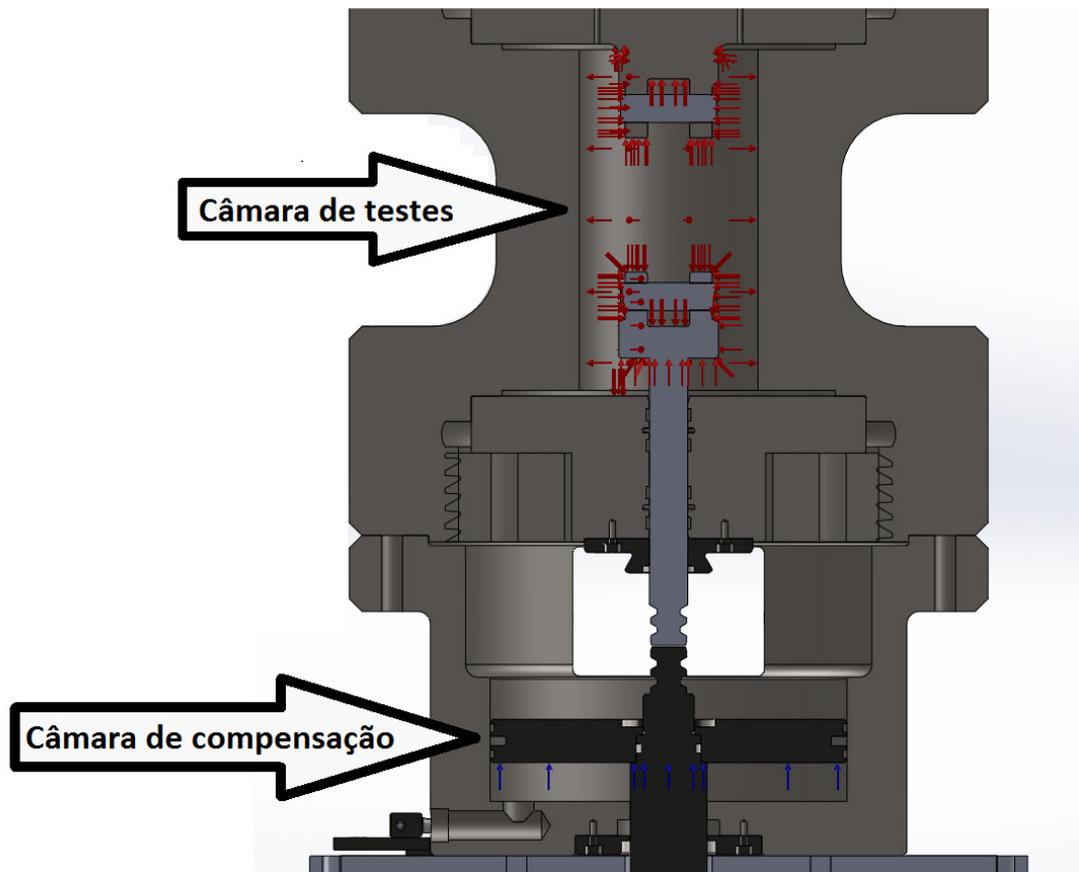


Figura 24. Distinção das câmaras do vaso e força exercida nas faces internas devido à pressão

Como a câmara de testes foi projetada para ensaios de alta pressão, suas medidas de estanqueidade suportam até 600 bar, entretanto isto gera um efeito de perda de carga por forças dissipativas e não lineares (consideradas genericamente como atrito), que influenciarão na resultante de forças sobre o corpo de provas, em outras palavras o carregamento aplicado sobre a amostra passaria a diferir daquele medido por uma célula de carga externa.

A força aplicada pelo sistema de carregamento desloca o eixo e deforma a amostra, porém em baixas frequências o regime é quase estático (ou seja, o movimento é constituído de pequenas deformações seguidos de deslizamentos, como apresentado na Figura 25). Devido ao

deslocamento mínimo e baixa frequência torna-se necessário um rigoroso controle para garantir a movimentação do eixo, garantindo assim um carregamento mais preciso do CP. Tanto o vaso quanto o software utilizados foram otimizados para minimizar o efeito *stick-slip* [42], conforme esquematizado na Figura 25.

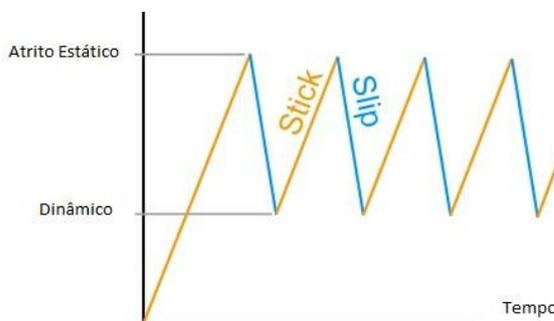


Figura 25. Efeito stick-slip

O sistema de aquisição de dados recebe leituras dos *strain gauges* e *crack gauge* através de um controlador Compact-Rio[®] produzido pela National Instruments[®], leituras essas tratadas por um software desenvolvido pela equipe do laboratório em LabView[®]. Este software controla os parâmetros de teste como carga aplicada e frequência, e retorna os dados necessários como registros de carregamento na amostra, comprimento de trinca, fator de concentração de tensões, frequência de carregamento e número de ciclos durante todo o teste.

Os ensaios foram realizados com amplitudes de carregamento (ΔP) de 8 KN utilizando pressão ambiente ou 180 Bar utilizando N_2 , com ou sem uso do sistema de compensação. Todos os testes feitos no vaso de pressão foram realizados com a solução apresentada no item 3.2.3. Além disso todos foram feitos com

4 Resultados e discussão

Pode-se antecipar que a combinação das técnicas *crack gauge* e BFS apresenta limitação em casos em que há tunelamento da amostra devido à leitura do *crack gauge* ser superficial [2]. Contudo, sabe-se da literatura que não é comum a ocorrência de tunelamento apreciável em amostras como a do presente trabalho, a saber, amostra fina (10 mm), homogênea, sem tensões residuais apreciáveis. Para corroborar essa expectativa, as amostras foram analisadas conforme recomendações da ISO 12108 [40] e não foi encontrado tunelamento apreciável.

Cabe aqui destacar que uma das técnicas que tem como vantagem a sensibilidade ao tunelamento é o DCPD. Entretanto, com o intuito de realizar uma rápida análise da influência do tunelamento nesta técnica, foram executadas simulações computacionais, conforme mencionado no item 3.2.2.2, os resultados serão tratados a seguir.

4.1 Resultados do teste via DCPD

Como anteriormente mencionado, seria usado um CP de referência, de acordo com a norma [6]. Entretanto, neste trabalho optou-se por simulações numéricas, a fim de se evitar incertezas experimentais, além de se reduzir o tempo de execução e, dessa forma, a utilização do referido CP de referência não se faz necessária segundo [42,43].

As malhas geradas para estas simulações exemplificadas na Figura 26 foram otimizadas para simulações eletromagnéticas e utilizaram o elemento TET10 [45], que retorna os valores das funções de forma e suas derivadas em um ponto especificado para um elemento tetraédrico de dez nódulos; a função aproximada será contínua através dos limites do elemento.

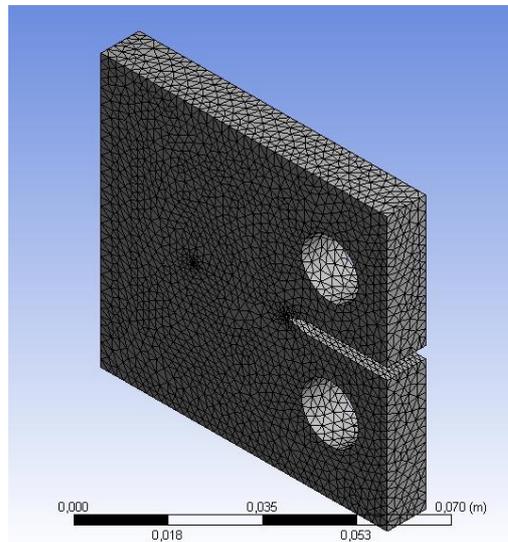


Figura 26. Malha gerada para amostra com $a/W = 60$

As simulações, empregando a metodologia DCPD, apresentaram um resultado dentro da faixa de aceitação da literatura em geral [46], com um erro menor que 2%.

Entretanto, ocorreu um resultado diferente do esperado quando a trinca apresenta um leve tunelamento ($\alpha_{cor} = 0,50$ mm). Neste caso, a trinca medida via DCPD se mostrou ligeiramente menor que a trinca plana (sem tunelamento), o que não representa o fenômeno real. Dessa forma, uma nova batelada de simulações, com um tunelamento um pouco mais intenso, utilizando α_{cor} de 1,02 mm foi realizada. Ou seja, foram testadas 3 geometrias de trinca para cada comprimento aparente, essas geometrias estão representadas na Figura 27.

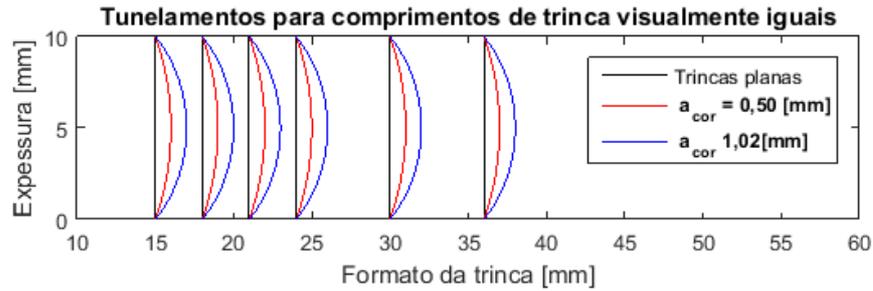


Figura 27. Geometrias de trinca simuladas

Conforme resultados exibidos na Tabela 4, as medidas de comprimento de trinca via DCPD apresentaram novamente um resultado dentro da faixa de aceitação (2%). Contudo, dessa vez o comprimento da trinca aferido via DCPD mostra-se maior que o da trinca sem tunelamento, conforme Figura 28. Ou seja, em uma faixa estreita de tunelamento, o comprimento da trinca pode estar sendo subestimado pela técnica de DCPD.

Tabela 4. Resultados da simulação computacional

α	Trincas planas		Trincas α_{corr} de 0,5029 mm		Trincas α_{corr} de 1,0221 mm	
	V/Vr	α calculado	V/Vr	α calculado	V/Vr	α calculado
25%	1,0163	0,2509	1,0155	0,2504	1,0189	0,2525
30%	1,1058	0,3037	1,1052	0,3033	1,1141	0,3085
35%	1,2013	0,3576	1,1967	0,3550	1,2105	0,3626
40%	1,3010	0,4111	1,2978	0,4094	1,3090	0,4153
50%	1,5112	0,5149	1,5064	0,5127	1,5202	0,5191
60%	1,7434	0,6154	1,7372	0,6129	1,7543	0,6197
	Nós	Elementos	Nós	Elementos	Nós	Elementos
	6,61E+04	4,18E+04	3,57E+04	2,10E+04	9,79E+04	5,95E+04

Além disso, esta técnica geralmente exige o uso de altas correntes, tornando seu emprego mais perigoso que as outras técnicas. Uma vez que a montagem experimental deste sistema é complicada em meios corrosivos em alta pressão para longos períodos de testes, e que não haveria vantagem no caso das amostras aqui empregadas em relação ao tunelamento, bem como, considerando-se que não há um consenso de que a técnica de DCPD possa interferir ou não na velocidade de propagação da trinca, os resultados experimentais obtidos no presente trabalho não foram obtidos por meio da presente técnica, mas sim por meio da combinação *crack gauge + strain gauge (CG+BFS)*, conforme detalhado a seguir.

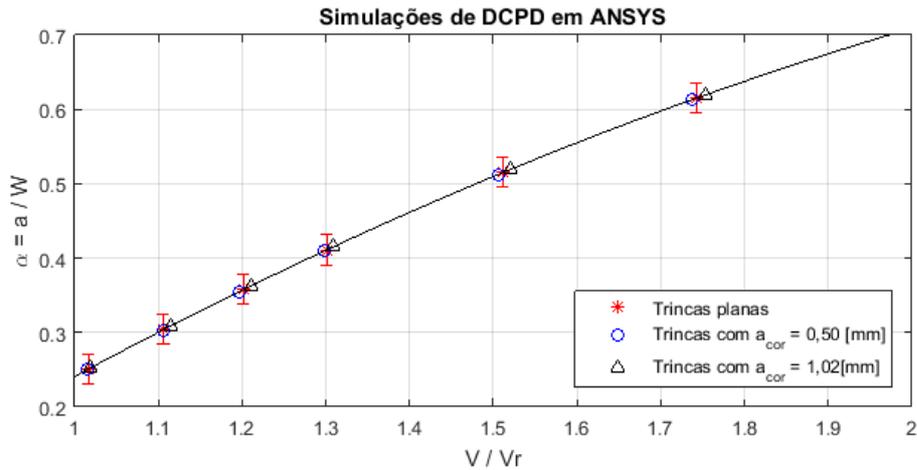


Figura 28. Resultados das simulações

4.2 Resultados do sistema CG+BFS

Por meio do sistema de medição desenvolvido no presente trabalho, foram executados testes em pressões baixas e elevadas, a saber, 1 bar e 180 bar empregando N_2 . Em suma, inicialmente os resultados de medida de trinca e carga foram respectivamente comparados com os valores medidos por microscópio óptico e célula de carga em testes ao ar sem vaso de pressão. Em seguida, o corpo de prova foi inserido no vaso de pressão da máquina de testes de corrosão fadiga, a fim de se fazer a mesma comparação entre os valores medidos.

O sistema apresentou ligeira instabilidade em leituras nos testes utilizando ΔP inferior a 7KN. Sendo assim, visando um comparativo com o sistema EFS+BFS foram testadas apenas as condições relativas a ΔP nominal de 8 KN, considerando as forças dissipativas, que no presente trabalho foram generalizadas como atrito (para fins didáticos), como já expresso no item 3.2.7. O resultado dos ensaios encontra-se na Figura 29.

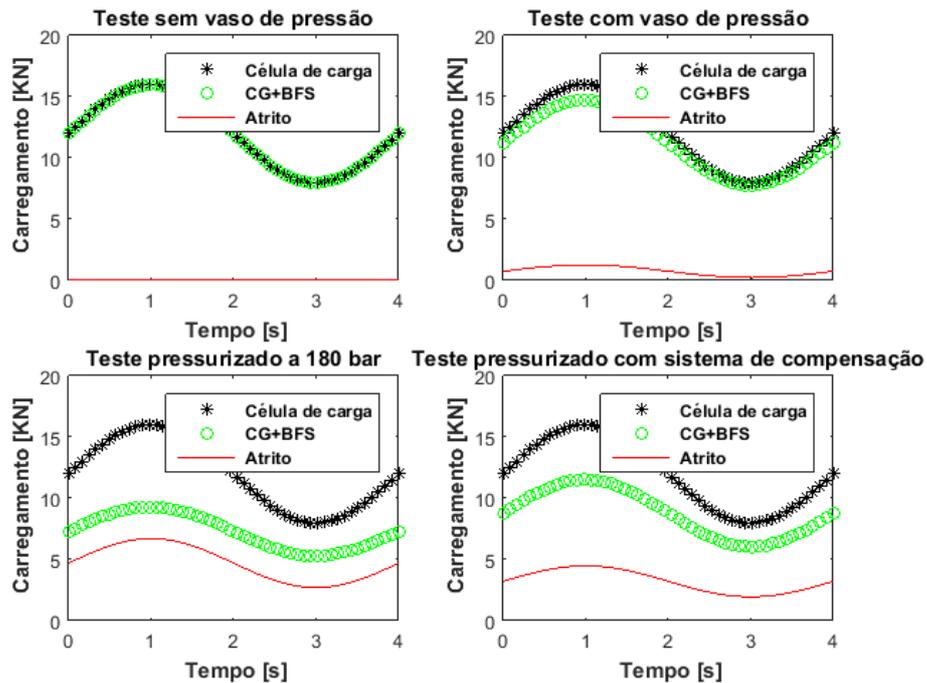


Figura 29. Leituras referentes ao sistema CG+BFS

4.3 Comparação entre os resultados dos sistemas

Analisando-se os resultados apresentados no item 4.2, pode-se verificar que:

- Quando o vaso é pressurizado a diferença entre os valores lidos pela célula de carga e sistema CG+BFS são substancialmente diferentes;
- A força de atrito é diferente em cada teste;
- Mesmo durante um ciclo o atrito não é constante;
- O incremento da pressão aumenta a diferença entre as leituras de carregamento entre a célula de carga e o sistema proposto;
- A célula de carga não é adequada para testes em alta pressão.

Diante das dificuldades de comparação de medidas do carregamento aplicado no corpo de prova, o presente trabalho visou uma comparação dos resultados aqui obtidos com aqueles obtidos com o sistema EFS+BFS [28]. Para avaliação das leituras e comparações são definidas as variáveis: P_{CC} como o carregamento lido pela célula de carga; P_{EFS} como carregamento lido pelo sistema EFS+BFS; P_{SP} como carregamento lido pelo sistema proposto. A Figura 30 apresenta os resultados de uma comparação entre os sistemas supracitados.

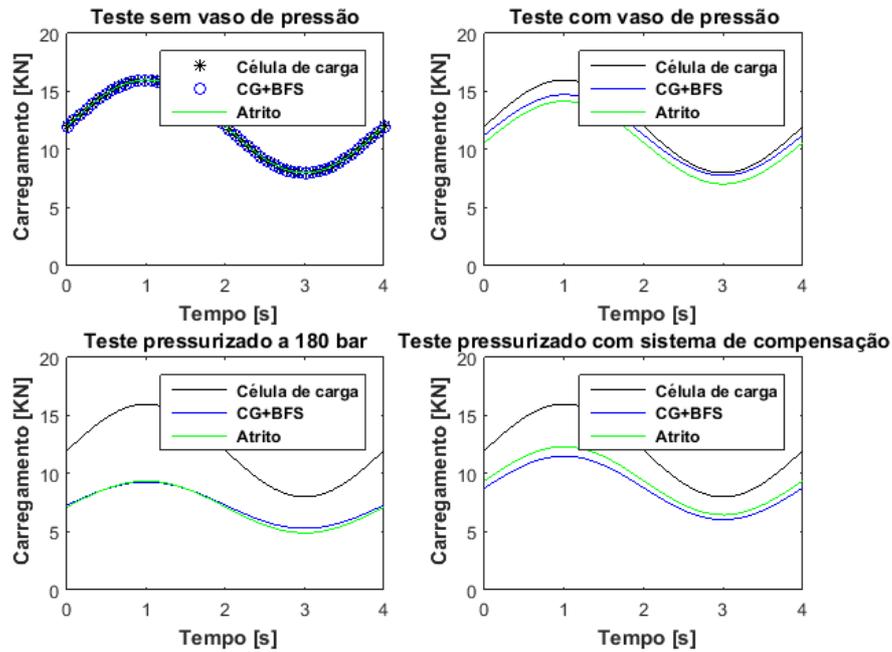


Figura 30. Comparação de medidas entre sistemas citados

O sistema proposto ratificou que o atrito entre o vaso de pressão e os pistões deixa de ser desprezível em elevadas pressões, atenuando substancialmente o carregamento imposto ao corpo de prova. Além disso, a elevada pressão tende a proporcionar uma intensificação do efeito stick-slip, como consequência temos a tendência em obter valores de carregamento não-conservativos, que em outras palavras, os resultados obtidos de maneira tradicional, por meio de célula de carga, superestimam a tenacidade à fratura do material testado, em testes sob elevada pressão.

Nos testes sem vaso de pressão, as leituras da célula de carga e dos sistemas comparados estão compatíveis, ratificando sua efetividade na aquisição de dados de teste. Porém, apenas ao se introduzir o vaso de pressão a diferença entre as medidas entre a célula de carga e ambos os sistemas torna-se significativa. Esta diferença é atribuída a forças dissipativas e não linearidades, como o atrito entre o eixo e vaso.

Os dados dos ensaios com os parâmetros mais importantes no estudo de fadiga podem ser mais bem resumidos na Tabela 5, assim como a forma de cálculo de erro em ΔP , segundo Equação 9.

Tabela 5. Condições de teste segundo sistema CG+BFS

Teste	ΔP CÉLULA DE CARGA [KN]	ΔP BFS+EFS [KN]	ΔP CG+BFS [KN]	FAIXA DE FORÇAS DISSIPATIVAS [KN]	ERRO EM ΔP
1	8,00	7,997	7,995	0,005	0,06%
2	8,00	7,121	6,964	1,036	14,88%
3	8,00	4,458	3,998	4,002	100,10%
4	8,00	5,869	5,472	2,528	46,20%

Equação 9. Erro em ΔP segundo sistema CG+BFS

$$Erro = \frac{|\Delta P_{CC} - \Delta P_{SP}|}{\Delta P_{SP}}$$

4.3.1 Crack Gauge

A trinca pode propagar de forma diferente em ambas as laterais do corpo de prova utilizado. Dessa forma seria necessário aplicar este sensor nos dois lados para contornar esta pequena desvantagem.

Para avaliar a necessidade do uso de dois destes sensores simultaneamente, foi feito um teste preliminar. Os resultados encontram-se na Figura 31.

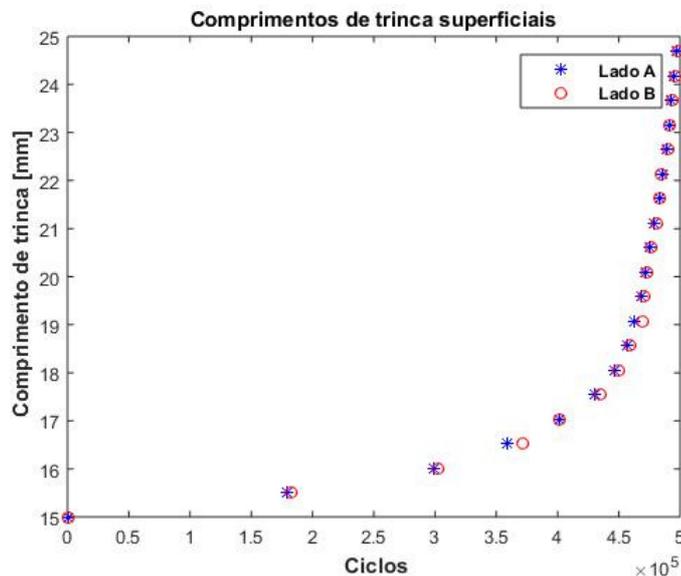


Figura 31. Leituras do resultado do teste preliminar

O resultado apresentou boa compatibilidade entre as medições do comprimento de trinca em ambos os lados da amostra, estando em conformidade com o item 8.3.4 da ASTM E647 [6]. Sendo assim, a partir de então os testes posteriores foram realizados utilizando somente um *crack gauge*.

O Crack gauge utilizado possui comprimento de 22 mm, tornando possível uma varredura de 61% da largura do CP, considerando-se a pré-trinca de 2,5 mm, gerando informação sobre o comprimento de trinca a cada instante.

Cabe aqui destacar que, além da referida metodologia, desenvolvida no presente trabalho, tentou-se utilizar a técnica de *clip gauge* protegido por revestimento do meio corrosivo, porém infelizmente nenhum dos revestimentos testados apresentou boa compatibilidade com este sistema. Em todos os casos, a leitura foi mascarada pela resistência do próprio revestimento, reduzindo a deformação nas hastes e em um dos testes foi perdido o equipamento, devido a não

estanqueidade do revestimento na pressão de ensaio. Desta forma, não foi possível utilizar o *clip gauge* como sistema de controle de comprimento de trinca nos testes com fluidos.

5 Conclusão

O presente estudo avaliou as metodologias de caracterização de crescimento de trincas por corrosão-fadiga sob alta pressão e o resultado foi o seguinte:

- O DCPD é capaz de medir o comprimento de trinca com certa sensibilidade ao tunelamento, porém há indícios de haver uma pequena faixa de tunelamento, capaz de causar um decremento em vez de incremento das medidas de trinca em relação ao valor real, o que em outras palavras significa que haveria uma sensibilidade apenas parcial ao tunelamento;
- Ao pressurizar o vaso de pressão, as leituras da célula de carga e o sistema apresentado neste trabalho se tornam significativamente diferentes;
- Com o incremento da pressão no vaso, a diferença entre as medidas de célula de carga e o sistema CG+BFS se torna maior;
- As medidas de carregamento da célula de carga em testes pressurizados são superiores às aferidas pelo sistema CG+BFS, superestimando o carregamento aplicado e, conseqüentemente, a tenacidade à fratura do material testado. Isto significa que o material em campo falharia antes do previsto por um estudo utilizando célula de carga;
- Para testes pressurizados a célula de carga deixa de ser indicada, pelas conclusões supracitadas;
- A resultante das forças dissipativas, seja em cada teste, seja dentro de um mesmo ciclo, não permanece constante. Isto significa que não é indicado o uso de um fator de segurança devido a flutuação inconstante de forças não conservativas;
- O tunelamento apresentado nos testes realizados neste trabalho foi insuficiente para acarretar diferença significativa entre os comprimentos de trinca medidos pelos sistemas comparados, ou seja, o a_{cor} é considerado desprezível, possibilitando a validação da referida metodologia;
- Houve uma excelente concordância entre os resultados deste trabalho com os de [28], ratificando a eficácia do sistema CG+BFS proposto neste trabalho.

Este estudo mostrou que o sistema proposto, composto de *crack gauge* e *strain gauge* na configuração BFS é capaz de medir tanto o comprimento de trinca quanto o carregamento aplicado ao corpo de prova, desde que não haja tunelamento apreciável, devido a uma ótima

aproximação dos dados com os do sistema ao qual foi comparado. Considerando a necessidade dessa aquisição de dados, o sistema mais simples é o $CG+BFS$, devido a necessidade de instalação de menos sensores para a obtenção destes dados.

6 Bibliografia

1. DIETER, G. E. **Metalurgia Mecânica**. 2nd. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1981.
2. ASM HANDBOOK. **Vol. 19 - Fatigue and Fracture**. [S.l.]: ASM International, 1996.
3. DE MORAIS, J. M. **Petróleo em águas profundas: Uma história tecnológica da Petrobrás na exploração e produção offshore**. Brasília: [s.n.], 2013.
4. DE ALMENDA, E. et al. **Gás do Pré-sal: Oportunidades, Desafios e Perspectivas**. Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis. [S.l.]. 2017.
5. ASTM E4. **Standard Practices for Force Verification of Testing Machines**. [S.l.]: ASTM International, 2014.
6. ASTM E647. **Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates**. [S.l.]: ASTM, 2015.
7. ASTM E1820. **Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness**. [S.l.]: West Conshohocken, 2015A.
8. GARCIA, R. R. A. et al. A critical insight on the use of external load cells for fatigue tests in pressurized systems. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 181, 2017.
9. HERTZBERG, R.. **Deformation and fracture mechanics of engineering materials**. 4th. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc., 1976.
10. JANSSEN, M. **Fracture Mechanics**. 2ed. ed. [S.l.]: Spon Press, 2004.
11. ANDERSON, T. L. **Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications**. 3ª ed. ed. New York: CRC Press, 2011.
12. NEWMAN, J. C.; YAMADA, Y.; JAMES, M. A. "**Engineering Fracture Mechanics, Back-face strain compliance relation for compact specimens for wide range in crack lengths**". [S.l.]: [s.n.].
13. PARIS, P. C.; GOMES, M. P.; ANDERSON, W. E. A Rational Analytic Theory of Fatigue. **The Trend in Engineering**, v. 13, 1961.
14. BASTIAN, F. L. **Aplicação da Mecânica da Fratura à Fadiga - Possibilidade e Limitações**. Rio de Janeiro: Coppe/UFRJ, 1994.

15. E399, A. **Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness K_{Ic} of Metallic Materials**. [S.l.]: ASTM International, 2012.
16. SURESH, S. **Fatigue of Materials**. [S.l.]: Cambridge University Press, 1998.
17. GENTIL, V. **Corrosão**. 3ed. ed. [S.l.]: LTC - Livros Técnicos e Científicos, 1996.
18. KING, R. N. **A Review of Fatigue Crack Growth Rates in Air and Seawater**. Norwich: Health and Safety Executive Books, v. OTH511, 1998.
19. HEALY, J.; BILLINGHAM, J. **A Review of the Corrosion Fatigue Behaviour of Structural Steels in the Strength Range of 350-900 MPa and Associated High Strength Weldments**. Cranfield: Health and Safety Executive Books, v. OTH 532, 1997.
20. MILELLA, P. P. **Fatigue Corrosion in Metals**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2012.
21. ASTM INTERNATIONAL. Environmental Cracking - Corrosion Fatigue. In: GANGLOFF, R. P. **Corrosion Tests and Standards, Applications and Interpretations**. 2 nd. ed. [S.l.]: [s.n.], Cap. 26.
22. SCHIJVE, J. **Fatigue of Structures and Materials**. 2ed. ed. [S.l.]: Springer, 2008.
23. VOSIKOVSKY, O. Effects of mechanical and environmental variables on fatigue crack growth rates in steel. A summary of work done at Canmet. **Canadian Metallurgical Quarterly**, v. 19, 1980.
24. PRIDDLE, E. K. The Influence of Test Variables on the Fatigue Crack Growth Threshold. **Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures**, 2007.
25. E467, A. **Standard Practice for Verification of Constant Amplitude Dynamic Forces in an Axial Fatigue Testing System**. [S.l.]: ASTM, 2008.
26. ASTM E1823. **Standard Terminology Relating to Fatigue and Fracture Testing**. [S.l.]: ASTM, 2013.
27. GARCIA, et al. Corrosion-fatigue tests using strain gauges on the specimen to monitoring the load applied under specimen subject to high pressure. **Intercorr**, Búzios, 2016.

28. GARCIA, R. R. A.; CALDAS, F. C. C.; MATTOS, O. R. Corrosion-Fatigue Tests Using Strain Gauges for Measuring Load and Crack Length. **Corrosion**, v. 72, n. 12, p. 1547-1555, 2016.
29. ANDOLFATO, R. P.; CAMACHO, J. S. **Extensometria Básica**. Ilha Solteira: UNESP, 2004.
30. BRITISH STANDART. "**BS 7910, Guide to Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Metallic Structures**". [S.l.]: British Standart, 2015.
31. LIAW, P. K. et al. Krak-Gages for Automated Fatigue Crack Growth Rate Testing: A Review. In: CULLEN, et al. **Automated Test Methods For Fracture And Fatigue Crcack Growth**. [S.l.]: ASTM, 1985.
32. ASTM, STP 877. **Automated Test Methods for Fracture and Fatigue Crack Growth**. [S.l.]: ASTM, 1985.
33. DEAN, W. F.; RICHARD, C. E. **A Simple and Sensitive Method of Monitoring Crack and Load in a Compact Fracture Mechanics Specimens Using Strain Gages**. [S.l.]: J Test Eval, 1979.
34. ASM HANDBOOK. **Vol. 8 - Mechanical Testing and Evaluatuon**. [S.l.]: ASM International, 2000.
35. MAXWELL, C. D. **Strain Based Compliance Method for Determining Crack Lengh for a C(T) Specimen**. [S.l.]: AFWAL-TR-87-4046, 1987.
36. RIDDELL, W. T.; PIASCIK, R. S. **A Backface Strain Compliance Expression for the Compact Tension Specimen**. [S.l.]: NASA TM-20845, 1998.
37. GARCIA, R. R. A. et al. **Back Face Strain Compliance Relation for SENB Specimens for Wide Range in Crack Lenghts**. [S.l.]: NACE, 2015.
38. AURORA, P.; SINGH, P. K.; RAO, A. R. "**Effect of dissolved oxygen and temperature on fatigue crack growth rate behaviour of SA312 Type 304L(N) material in water environment**". [S.l.]: International Journal of Fatigue, 2017.
39. LIMA, A. S. **Controle por aprendizagem iterativa e controle repetitivo para máquinas de ensaio de fadiga**. [S.l.]: Coppe/UFRJ, 2014.

40. ISO, B. S. **ISO 12018: Metallic materials — Fatigue testing — Fatigue crack growth method.** London: [s.n.], 2012.
41. ASTM E251. **Standard Test Methods for Performance Characteristics of Metallic Bonded Resistance Strain Gages.** [S.l.]: ASTM, 2004.
42. GAO, C.; KUHLMANN-WILSDORF, D.; MAKEL, D. D. The dynamic analysis of stick-slip motion. **Elsevier**, 1994.
43. ISO GUM, Evaluation of Measurement Data: Guide to the expression of Uncertainty in Measurement. [S.l.]: JCGM, 1995.
44. GEORGSSON, P. **The Determination of Uncertainties in Fatigue Crack Growth Measurement.** Volvo Aero Corporation. Trollhättan. 2000.
45. ANSYS INC. **Ansys Mechanical APDL Element Reference.** [S.l.]: [s.n.], 2011.
46. HOLTAM, C. **Structural integrity assessment of C-Mn pipeline steels exposed to sour environments.** [S.l.]: [s.n.], 2010.