

Universidade Federal
do Rio de Janeiro
Escola Politécnica

ESTUDO DA VIABILIDADE DE UTILIZAÇÃO DA TÉCNICA DE BFS COMO UMA ALTERNATIVA PARA ENSAIOS DE CORROSÃO FADIGA

Tamara Nogueira Montes

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 Engenheira.

Orientador: Prof. Oscar Rosa Mattos, D.Sc.
Co-orientador: Rodrigo R. A. Garcia, M.Sc.

Rio de Janeiro
Março de 2015

ESTUDO DA VIABILIDADE DE UTILIZAÇÃO DA TÉCNICA DE BFS COMO UMA ALTERNATIVA PARA ENSAIOS DE CORROSÃO FADIGA

Tamara Nogueira Montes

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE
ENGENHARIA METALÚRGICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRA
METALÚRGICA.

Examinado por:

Oscar Rosa Mattos, D.Sc.

Rodrigo Roberto Alves Garcia, M.Sc.

Luiz Henrique de Almeida, D.Sc.

Rio de Janeiro, RJ - Brasil

Março de 2015

Montes, Tamara Nogueira

Estudo da viabilidade de utilização da técnica de BFS como uma alternativa para ensaios de corrosão fadiga / Tamara Nogueira Montes - Rio de Janeiro: UFRJ / Escola Politécnica, 2015.

xii, 71, p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Oscar Rosa Mattos

Projeto de Graduação - UFRJ / Escola Politécnica / Engenharia Metalúrgica, 2015.

Referências Bibliográficas: p.67-71

1. Corrosão Fadiga. 2. DCPD. 3. BFS, I. Mattos, Oscar Rosa. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Engenharia Metalúrgica. III. Estudo do crescimento de trinca por corrosão fadiga do aço carbono, usando as técnicas BFS e DCPD.

“Aqueles que sonham acordados têm consciência de mil coisas que escapam aos que apenas sonham adormecidos.” Edgar Allan Poe

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, eu agradeço a Deus pela minha vida e por todas as oportunidades que me proporcionou. Agradeço pela proteção e por me guiar no caminho do sucesso, com toda força necessária para seguir em frente quando eu mais precisei.

Agradeço muito à minha mãe Maria de Fátima e ao meu pai Alexandre, por me criarem e educarem com amor, paciência e conselhos. Sou muito grata pelo apoio ao longo de todos esses anos e pela compreensão e incentivo nos momentos mais difíceis, até mesmo quando eu estava longe. Vocês são o meu escudo e o meu chão.

Da mesma forma, agradeço à minha família, em especial minhas tias e meus tios que também sempre estiveram presentes quando eu precisei, guiando os meus passos junto aos meus pais.

Aos meus orientadores Rodrigo e Oscar, pelos ensinamentos e orientação durante esses anos de trabalho no LNDC. Um agradecimento especial também aos técnicos e engenheiros do LNDC, pela colaboração, principalmente Emmanuel, Alessandro e André.

Ao professor Luiz Henrique, meu orientador de curso que me acompanhou desde o primeiro período da faculdade, agradeço a disponibilidade e o interesse em participar da minha banca de projeto final.

Aos amigos que fiz durante a graduação, obrigada pelo carinho, pela ajuda nos estudos e pelas palavras de conforto nos momentos de tensão.

Agradeço também à professora Paula, pela oportunidade de ter vivido um ano em Lille, na França. Além de um sonho realizado, foi o ano em que eu amadureci e me desvencilhei da menina estudante para me tornar a mulher que, agora, se tornará Engenheira.

E, por fim, agradeço aos profissionais com quem tenho a oportunidade de trabalhar na Concremat, pela calma e benevolência nos momentos de provas e entrega deste projeto.

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

ESTUDO DA VIABILIDADE DE UTILIZAÇÃO DA TÉCNICA DE BFS COMO UMA ALTERNATIVA PARA ENSAIOS DE CORROSÃO FADIGA

Tamara Nogueira Montes

Março / 2015

Orientador: Oscar Rosa Mattos

Curso: Engenharia Metalúrgica

Os fenômenos associados à corrosão fadiga estão em destaque no mundo atual. A indústria petrolífera cresce associada a uma demanda de produção e inovação científica também em ascensão. Desta forma, a necessidade de estudos para entender e evitar falhas de estruturas metálicas é essencial.

A mecânica da fratura entra como metodologia de interesse na investigação da taxa de propagação de trincas geradas nos materiais, para evitar os danos causados pela corrosão fadiga. Para avaliar esses efeitos, foi selecionado o aço X70. A preparação dos corpos de prova foi feita com base na norma ASTM E647. Duas técnicas são expostas neste trabalho: a de Queda de Potencial por Corrente Contínua, conhecida como DCPD e a de Deformação na Face Oposta, conhecida como BFS.

Embora a primeira seja largamente difundida neste ramo, os resultados de simulações de fenômenos como o da corrosão localizada mostram que ela pode estar associada a limitações, no que diz respeito à influência da corrente na obtenção de dados. Chega-se a esta mesma conclusão quando comparada diretamente com a Norma BS 7910.

A técnica de BFS, por outro lado, mostrou-se viável em ensaios que simulavam condições severas, como em meio corrosivo e associada a fenômenos de corrosão localizada.

Palavras-chave: Corrosão Fadiga, DCPD, BFS, Mecânica da Fratura

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

STUDY OF THE PRACTICABILITY IN UTILIZATION THE BFS TECHNIQUE AS AN ALTERNATIVE TO CORROSION FATIGUE TESTING

Tamara Nogueira Montes

March / 2015

Advisor: Oscar Rosa Mattos

Course: Metallurgical Engineering

The phenomena associated with corrosion fatigue are highlighted in today's world. The oil industry grows associated with a demand for production and scientific innovation, also on the rise. Thus, the need for studies to understand and avoid failure of steel structures is essential.

The fracture mechanics comes as a methodology of interest in the investigation of the propagation of cracks generated in the material, to avoid such damage, which is caused by corrosion fatigue. To evaluate these effects, the X70 steel was selected. The preparation of the specimens was based on the Standard ASTM E647. Two techniques are presented in this work: the Direct Current Potential Drop, known as DCPD and the Back Face Strain, known as BFS.

Although the first one is widespread in this field, the results of some simulations, such as hydrogen embrittlement, show that it can be associated with limitations, as regards the influence of the current data recording. Similarly, we have arrived at the same conclusion when compared directly with the Standard BS 7910.

The BFS technique, on the other hand, proved to be feasible in tests simulating severe conditions such as in corrosive environment and associated with localized corrosion phenomena.

Keywords: Fatigue Corrosion, DCPD, BFS, Fracture Mechanics

Sumário

1. Introdução	1
2. Revisão Bibliográfica	3
2.1. Mecânica da Fratura.....	3
2.1.1. Mecânica da Fratura Linear Elástica.....	4
2.2. Fadiga	7
2.2.1. Nucleação e Propagação de Trincas.....	8
2.2.2. Similaridade na Fadiga.....	11
2.2.3. Curvas de Propagação de Trinca por Fadiga.....	13
2.3. Corrosão.....	14
2.4. Corrosão Fadiga.....	14
2.4.1. Mecanismos de Corrosão Fadiga.....	15
2.5. Métodos de Controle de Ensaio.....	18
2.6. Técnicas de Monitoramento de Trinca.....	22
2.6.1. DCPD.....	23
2.6.2. BFS.....	24
2.6.3. Norma BS 7910.....	30
3. Materiais e Métodos.....	32
3.1. Materiais e Equipamentos.....	32
3.1.1. Corpo de Prova.....	32
3.1.2. Solução de Ensaio.....	34
3.1.3. Máquinas de Ensaio.....	35
3.1.4. Equipamentos de Medição de Trinca.....	36
3.2. Metodologia.....	37
3.2.1. Pré-Trinca dos Corpos de Prova.....	37
3.2.2. Aplicação dos Strain Gages.....	39
3.2.3. Soldagem dos Fios do DCPD.....	40
3.2.4. Aplicação dos Revestimentos.....	41
3.2.5. Avaliação da Influência de Corrosão Localizada sobre as Técnicas de BFS e DCPD.....	42
3.2.5.1. Simulação da Influência da Perfuração do CP no Sinal do DCPD.....	43
3.2.5.2. Simulação por BFS.....	45
3.2.6. Avaliação da Influência da Passagem de Corrente Elétrica Utilizada pelo DCPD, no Sistema de Ensaio.....	47

3.2.7. Ensaio da Influência da Permeação por Hidrogênio nas Medidas de BFS.....	49
3.2.8. Comparação das Técnicas BFS e DCPD com a Norma BS 7910.....	51
4. Resultados e Discussão.....	54
4.1. Avaliação da Influência de Corrosão Localizada sobre a Técnica de DCPD.....	54
4.2. Avaliação da Influência de Corrosão Localizada sobre a Técnica de BFS.....	56
4.3. Avaliação da Influência da Passagem de Corrente Elétrica utilizada pelo DCPD, no Sistema de Ensaio.....	57
4.4. Ensaio da Influência da Permeação por Hidrogênio nas Medidas de BFS.....	59
4.5. Comparação das Técnicas BFS e DCPD com a Norma BS 7910.....	61
5. Conclusões.....	66
6. Referências.....	67

Índice de Figuras

Figura 1: Esquematização dos três modos de carregamento que podem ocorrer (adaptado do ANDERSON, 1995).....	4
Figura 2: Variação da tensão pelo tempo em ensaio com amplitude de carregamento constante (MEYERS; CHAWLA, 1982)	7
Figura 3: Formação das bandas de deslizamento e esquematização dos estágios de propagação de uma trinca por fadiga (HETZBERG, 1996)	9
Figura 4: Crescimento de trinca em fadiga, sob amplitude constante e condições de escoamento em pequena escala (adaptado de ANDERSON, 1995)	12
Figura 5: Curva representativa de um ensaio de crescimento de trinca por fadiga (ANDERSON, 1995)	13
Figura 6: Ilustração de propagação de trinca por: a) dissolução anódica em meio aquoso em um material que sofre passivação; b) fragilização pelo hidrogênio (adaptado de REVIE, 2000).....	16
Figura 7: Ilustração das diferentes etapas do mecanismo de fragilização pelo hidrogênio induzidas pelo escorregamento intergranular (FILHO, 2006)	17
Figura 8: Curva de aspecto geral do controle por K crescente e P constante. (LIMA, 2014).....	20
Figura 9: Curva de aspecto geral do controle por K crescente e P crescente. (LIMA, 2014)	20
Figura 10: Curva de aspecto geral do controle por K decrescente e R constante. (LIMA, 2014)	21
Figura 11: Aspecto geral do controle por K decrescente e K _{máx} constante. (LIMA, 2014)	22
Figura 12: Diagrama esquemático de funcionamento da técnica de medição comprimento de trinca por DCPD (adaptado de LIMA, 2014).....	23
Figura 13: Esquemático de funcionamento da técnica de medição comprimento de trinca por BFS (adaptado de NEWMAN, 2010)	26
Figura 14: Orientações dos planos de corpos de prova (adaptado de ANDERSON, 2003).....	32
Figura 15: Corpo de prova do tipo compacto - C(T) (adaptado da ASTM, 2011).....	33
Figura 16: Especificações e detalhamento do entalhe do corpo de prova C(T)	34
Figura 17: Fotos das máquinas utilizadas nos ensaios. (a) Instron 8801 L025 (b) Eletromecânica desenvolvida pelo LNDC	35
Figura 18: Ensaio de propagação da pré-trinca no corpo de prova C(T) em aço X70.	38
Figura 19: Foto da colagem do strain gage na face oposta à trinca no corpo de prova C(T).	40
Figura 20: Montagem dos corpos de prova de trabalho e de referência com seus respectivos terminais de solda.....	41
Figura 21: Foto do corpo de prova, representando o revestimento utilizado neste trabalho.	42
Figura 22: (a) Foto do corpo de prova sendo submetido a uma endentação, através do durômetro. (b) Foto do corpo de prova sendo perfurado por uma broca.	43
Figura 23: Foto do corpo de prova de trabalho, com as endentações, e do de referência.	44
Figura 24: Foto do corpo de prova de trabalho, com os furos, e do de referência.	45
Figura 25: Malha utilizada na simulação pelo método de elementos finitos na amostra CT.	46
Figura 26: Posição do Strain gage e do furo com furo de 5 mm de diâmetro por 2,25 mm de profundidade.	46
Figura 27: Tela capturada do software em funcionamento.	47
Figura 28: Ensaio da influência da passagem de corrente, através do método DCPD.	48
Figura 29: Esquema do Ensaio da influência da corrente, através da técnica DCPD.	49
Figura 30: a) Amostra com 1mm de espessura antes da colagem do strain gage. b) Amostra com o strain gage após o ensaio de 4hs de permeação.....	50
Figura 31: Célula de Permeação de Hidrogênio (VELASCO, 2007).....	50

Figura 32: Esquema do sistema de ensaio com as técnicas DCPD e BFS, separadas e simultaneamente.....	52
Figura 33: Curva de comparação entre a queda de potencial no CP de trabalho nos três ensaios (sem furo, após o primeiro furo e após o segundo furo).	55
Figura 34: (a) Malha utilizada na simulação pelo método de elementos finitos na amostra CT. (b) Strain Gage com 3mm de comprimento. (c) Simulação pelo método de elementos finitos na amostra CT com furo de 6 mm de diâmetro por 4 mm de profundidade.	57
Figura 35: Gráfico da influência da corrente no ensaio de DCPD	58
Figura 36: Diagrama de Pourbaix (ANDERSON, 2005).....	59
Figura 37: Micro deformações da amostra polarizada por 4 dias.	60
Figura 38: Curva de comparação entre os resultados da técnica DCPD e da norma BS 7910....	62
Figura 39: Curva de comparação entre os resultados da técnica BFS e da norma BS 7910	63
Figura 40: Curva de comparação entre os resultados da técnica DCPD (simultaneamente ao BFS) e da norma BS 7910.....	64
Figura 41: Curva de comparação entre os resultados da técnica BFS (simultaneamente ao DCPD) e da norma BS 7910	65

Índice de Tabelas

Tabela 1: Comparações entre as Técnicas DCDP e BFS.	27
Tabela 2: Resolução do comprimento de trinca no CT (W= 60 mm e B = 10 mm) – GECORF/LNDC*	28
Tabela 3: Memória de cálculo tempo mínimo na região próxima ao limiar a 0,2 Hz. - GECORF/LNDC	28
Tabela 4: Vantagens e desvantagens entre as técnicas DCPD e BFS. - GECORF/LNDC	29
Tabela 5: Aspectos críticos das técnicas DCPD e BFS. - GECORF/LNDC	29
Tabela 6: Informações Gerais das Máquinas de acionamento hidráulico e eletromecânico	36
Tabela 7: Especificações dos equipamentos utilizados para cada técnica de ensaio de fadiga... 36	
Tabela 8: Tabela com os dados do Ensaio de propagação da Pré-trinca.....	38
Tabela 9: Especificações do modelo de Strain Gage utilizado nos ensaios.	39
Tabela 10: Tabela com os dados do Ensaio de Fadiga com e sem as endentações.....	45
Tabela 11: Parâmetros do ensaio de Permeação por hidrogênio.....	51
Tabela 12: Tabela com os dados do Ensaio de corrosão Fadiga monitoradas por DCPD e BFS	52
Tabela 13: Tensões de trabalho e referência ao longo do teste.	54
Tabela 14: Tensões de trabalho e referência e comprimento de trinca ao longo do teste.	55
Tabela 15: Resultados obtidos na simulação.....	57
Tabela 16: Resultados do ensaio de Permeação por hidrogênio	60

1. INTRODUÇÃO

Muitos componentes mecânicos em serviço tendem a falhar devido à fadiga do material, tornando a determinação de sua vida útil uma etapa essencial. Além disso, há uma tendência natural de todos os metais e ligas sofrerem corrosão, dependendo das condições a que estão submetidos. Isso pode provocar uma perda de propriedades e características importantes do material, como a resistência mecânica (tanto em alta quanto em baixa taxa de deformação), a elasticidade e a ductilidade. .

As indústrias automobilística, aeroespacial, naval, nuclear e petrolífera têm investido em pesquisas de aplicação de materiais de alta tecnologia. A indústria petrolífera, por exemplo, é uma grande vítima desse fenômeno, uma vez que suas plataformas e equipamentos offshore, utilizados em refinarias de petróleo, estão sujeitas a falhas frequentes. Neste contexto, diversas técnicas vêm sendo utilizadas para o monitoramento do crescimento de trincas em ensaios de corrosão fadiga, embora haja uma suspeita do emprego indevido de algumas.

A corrosão associada à fadiga pode causar danos mais severos aos materiais, diminuindo sua vida útil. Por esta razão, tem se dado uma importância especial a esses fenômenos, que, interligados e associados a um efeito sinérgico, levam ao estudo da corrosão fadiga. A mecânica da fratura assume que uma falha pode ser idealizada como uma trinca que se propaga de acordo com a taxa de crescimento de trinca, da/dN , que é função da variação do fator de intensidade de tensões, ΔK , para o material que contém a falha.

Graças à demanda pelo estudo dos efeitos associados à corrosão fadiga, é necessário um conhecimento e emprego adequado das técnicas que são capazes de medir e caracterizar as taxas de crescimento de trincas. Além disso, uma pesquisa de novas

metodologias também pode ser considerada, uma vez que novas tecnologias surgem a todo instante.

Neste trabalho, são tratadas especificamente duas dessas técnicas de monitoramento e medida de propagação de trinca, a de Queda de Potencial por Corrente Contínua, do inglês *Direct Current Potential Drop* (DCPD) e de Deformação na Face Traseira, do inglês *Back Face Strain* (BFS). O DCPD é largamente difundido no mundo, contudo há relatos na literatura e até mesmo na principal norma padronizadora de ensaios de fadiga, a ASTM E647, de que a técnica DCPD poderia influenciar na propagação de trincas por corrosão fadiga.

O objetivo deste trabalho é verificar a possibilidade de viabilizar e difundir a técnica BFS como alternativa ao DCPD. Com este foco, o Laboratório LNDC (Laboratório de Ensaos Não Destrutivos, Corrosão e Soldagem), que realiza pesquisas no ramo da metalurgia e de materiais, tem estudado e adaptado essa metodologia para ensaios de corrosão fadiga.

A Metodologia aqui empregada foi baseada nos requisitos da norma ASTM E647 e o corpo de prova escolhido foi o aço X70. A pesquisa consiste na preparação adequada de todos os equipamentos e corpos de prova, em acordo com a norma. Os ensaios apresentados foram de simulações do fenômeno de corrosão localizada, utilizando as duas técnicas, DCPD e BFS; um estudo da influência da corrente nos testes via DCPD; além de ensaios envolvendo as duas técnicas de interesse, comparando as com a norma BS 7091. Desta forma, a aplicabilidade da técnica BFS para os ensaios de corrosão fadiga pode ser comprovada.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo foi realizada uma abordagem conceitual a respeito do fenômeno de corrosão fadiga, cuja velocidade de propagação da trinca possui uma dependência sinérgica entre os fenômenos de fadiga e corrosão. Antes de abordar o tema de Fadiga, julgou-se necessário apresentar primeiro os conceitos fundamentais. Foi tratado o fenômeno de fadiga, propriamente dito, e o de corrosão. Ao final deste capítulo, foi apresentado um item específico para assunto corrosão fadiga.

2.1.MECÂNICA DA FRATURA

Nos últimos anos, a Mecânica da Fratura esteve fortemente presente no problema da fadiga dos materiais. As metodologias atuais garantem a detecção de falhas ligadas aos tamanhos dos defeitos e de trincas. A possibilidade de qualificar e quantificar o crescimento de uma trinca em laboratório e em serviço é uma ferramenta de enorme interesse na engenharia e neste presente estudo.

A Mecânica da Fratura tem por objetivo avaliar se o material, submetido a uma determinada tensão, vai falhar, através de métodos experimentais ou equações matemáticas. O estudo da mecânica da Fratura, quando aplicado à fadiga, em adição aos fenômenos de corrosão, permite uma operação segura dos componentes com presença de defeito de fabricação ou trincas nucleadas, as quais podem afetar a resistência do material. Desta forma, o controle dessas trincas é necessário para preveni-las (HERTZBERG, 1980).

Atualmente, há dois tipos de metodologias:

- Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE): estuda o regime elástico linear da fratura, quando há possibilidade de ocorrer fratura sem ser precedida de extensa

deformação plástica, devido às propriedades do material, com alta resistência mecânica (ANDERSON, 1995).

- Mecânica da Fratura Elastoplástica (MFEP): ocorre quando a plasticidade na ponta da trinca é maior que o tamanho da trinca (ANDERSON, 1995).

A MFLE será a metodologia estudada neste trabalho, pois a partir dela pode se construir o estudo baseado nas curvas da/dN versus ΔK , mais a frente apresentadas.

2.1.1. MECÂNICA DA FRATURA LINEAR ELÁSTICA

Os princípios da Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE) são usados para entender melhor a distribuição de tensões na ponta da trinca. O fator de intensidade de tensão, K , é quem representa o estado de tensão na ponta da trinca.

A literatura destaca que há três modos principais de carregamento, o quais podem ser visualizados na figura 1 (modos I, II e III), cujas diferenças se encontram nos deslocamentos da superfície da trinca.

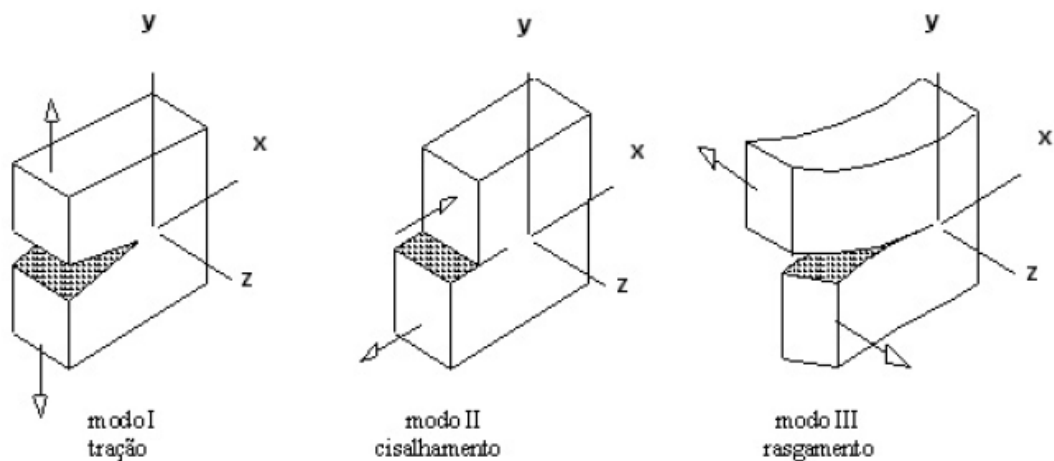


Figura 1: Esquemática dos três modos de carregamento que podem ocorrer (adaptado do ANDERSON, 1995)

O Modo I representa o carregamento em tração, cujo deslocamento das superfícies da trinca ocorre perpendicularmente ao seu próprio eixo. O Modo II ocorre com

cisalhamento, cujo deslocamento das superfícies da trinca acontece paralelo ao seu eixo e perpendicularmente à sua frente de propagação. O Modo III é o de rasgamento ou cisalhamento fora do plano, cujo deslocamento ocorre com uma superfície movendo-se para fora da outra. Cada um desses modos de carregamento está submetido aos respectivos fatores de intensidade de tensão (K_I , K_{II} e K_{III}).

Desses três, o modo mais importante e que será discutido neste trabalho é o K_I . Ele pode ser calculado em função da geometria do material e da trinca, do carregamento aplicado e do comprimento da trinca, através de equações que serão expostas a seguir. Quando o K_I atingir um valor crítico, intrínseco do material, K_{IC} (tenacidade à fratura do material no modo I de carregamento), o mesmo poderá fraturar (RUCHERT, 2007).

A partir de métodos analíticos para quantificar tensões na frente de trincas de materiais no regime linear elástico, Irwin definiu que o fator de intensidade de tensão K , no modo de carregamento trativo, pode ser dado por (ANDERSON, 1995):

$$K_I = \lim_{r \rightarrow 0} \{\sqrt{2\pi r} \sigma_{yy}\}$$

Equação 1

Neste caso, σ_{yy} é a tensão normal ao plano da trinca e θ ($=0$) é o ângulo entre a direção longitudinal à frente da trinca e o plano de tensão estudado, e r é o raio da zona plástica.

Para casos especiais, como, por exemplo, chapas com dimensões infinitas, que possuem uma trinca planar passante, com comprimento de $2a$, e carregada com tensão trativa, σ , uniformemente distribuída e uniaxial, perpendicular ao plano da trinca, a expressão se altera para:

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a}$$

Equação 2

Para corpos de prova com dimensões finitas, tem-se:

$$K_I = Y \sigma \sqrt{\pi a}$$

Equação 3

Onde Y é o fator de forma f(a/W), que representa um parâmetro ou função adimensional, dependente dos tamanhos e das geometrias da trinca e da amostra.

A variação do fator de intensidade de tensão, ΔK ($K_{\text{máx}} - K_{\text{mín}}$), de acordo com a norma ASTM E647 (2011) para o corpo de prova utilizado neste trabalho, o do tipo compacto, do inglês *Compact-Tension*, o C(T) é determinada pela seguinte equação:

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

Equação 4

Onde P é o carregamento, B é a espessura da amostra, W é a largura e $\alpha = a/W$. A validade desta equação se dá quando $a/W \geq 0,2$. O conceito do fator de intensidade de tensões é capaz de quantificar o campo de tensões em torno de uma trinca predominantemente elástica, o que depende da geometria e das dimensões da peça. A partir de estudos de propagação de trinca, Paris (1961) conseguiu provar que elas eram controladas pelo ΔK , em vez de pelo ΔP , conforme se pensava naquela época. Essa conclusão foi uma revolução no estudo da fadiga, pois possibilitou a previsão da vida residual das estruturas trincadas e deram origem às curvas da/dN vs. ΔK . A partir destas curvas é possível determinar a taxa de propagação da trinca em função da variação do fator de intensidade de tensões aplicado, através da utilização de um corpo de prova com geometria bem definida e contendo uma trinca que irá se propagar (LIMA, 2014).

Os ensaios para estudo da propagação de trincas por fadiga são realizados através de ciclos de tensões, que nucleiam e provocam propagação de trincas.

A faixa de tensão cíclica, ou variação da tensão é:

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$$

Equação 5

Onde σ_{max} é a tensão máxima e σ_{min} é a tensão mínima.

A figura abaixo apresenta um esquema de carregamento em ensaios de fadiga.

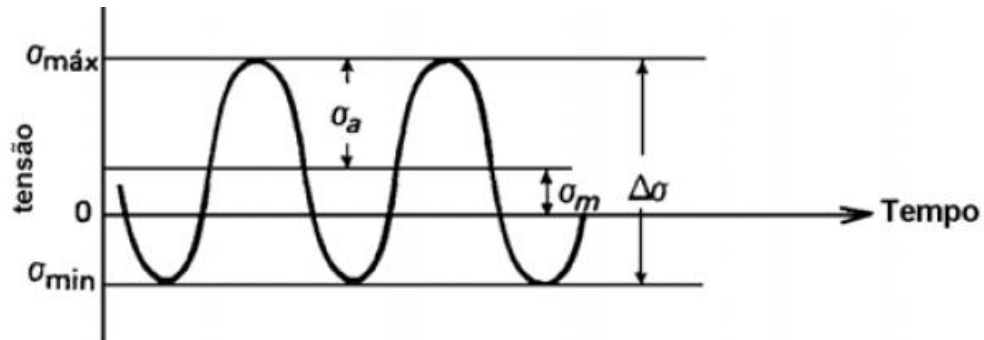


Figura 2: Variação da tensão pelo tempo em ensaio com amplitude de carregamento constante (MEYERS; CHAWLA, 1982)

Pode ser definida uma tensão média, como a média entre a tensão máxima e a mínima. Já a relação entre a tensão mínima e a máxima é dada pela razão de carregamento, R :

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$$

Equação 6

2.2. FADIGA

A Fadiga é definida, segundo a norma ASTM E-1823 (1996), como “O processo de modificação estrutural permanente, de forma localizada e progressiva, e que pode ocorrer em um material sujeito a variações de tensões e/ou deformações que produzem a nucleação de trincas ou fratura completa, após um número suficiente de ciclos”. De acordo com Dieter (1981), sabe-se que um metal submetido a tensões cíclicas rompe-se

a uma tensão inferior à necessária para fraturar por ação de uma carga estática ou monotônica.

Existem três principais testes para avaliar a fadiga em materiais: a metodologia clássica S-N (stress-based), também chamada de Curva de Whöler, usada em casos como o de fadiga de alto ciclo, relacionando tensão aplicada ao número de ciclos até ocorrer fratura; a metodologia ϵ -N (strain-based), utilizada para fadiga de baixo ciclo; e a metodologia da/dN- ΔK (tolerância a defeitos), utilizada em casos onde há defeito na estrutura. Esta última metodologia é a de interesse deste estudo.

2.2.1. NUCLEAÇÃO E PROPAGAÇÃO DE TRINCAS

O comportamento dos materiais submetidos à fadiga pode variar dependendo da sua composição química e da microestrutura, como tamanho de grãos e segregações, além de efeitos de tratamentos prévios. A deformação plástica ocorre pelo movimento das discordâncias nos planos de deslizamentos, sob ação de tensões cisalhantes, que posteriormente levam à nucleação e eventualmente à propagação de trincas. No entanto, esses defeitos não necessariamente provocam mudanças visíveis ao olho humano, apesar de serem capazes, mesmo assim, de provocar problemas catastróficos (SURESH, 1998).

Os movimentos cíclicos geram as bandas de deslizamento que formam pequenas fendas superficiais, chamadas intrusões, e também saliências de forma irregular, chamadas extrusões. Geralmente, as intrusões são aquelas onde as trincas são nucleadas. A figura 3 mostra esquematicamente a sequência de movimentos de deslizamento responsáveis pela formação de uma intrusão e de uma extrusão. Estas irregularidades formam pontos de concentração de tensão, que levam à formação de micro trincas, que se propagam paralelamente aos planos atômicos de deslizamento, coincidentes com um plano de máxima tensão cisalhante. Elas seguem crescendo até atingirem o tamanho

suficiente que lhes permita propagação perpendicular às tensões de tração que agem no material (HETZBERG, 1996) (SCHIJVE,2001).

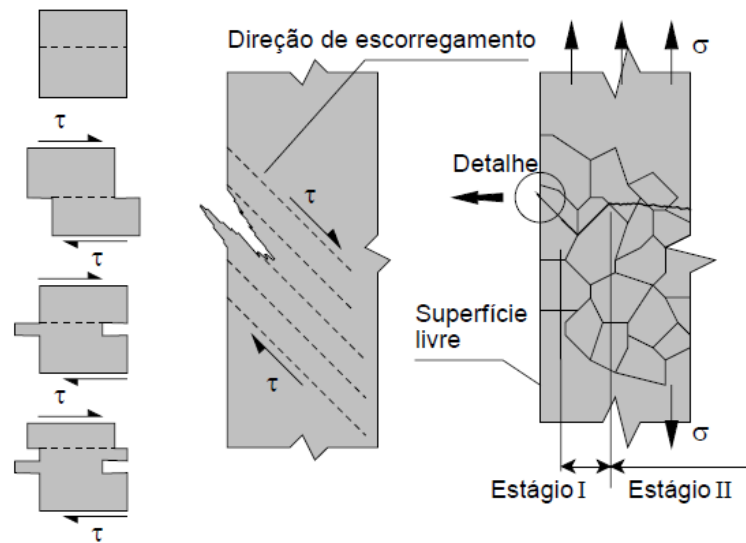


Figura 3: Formação das bandas de deslizamento e esquematização dos estágios de propagação de uma trinca por fadiga (HETZBERG, 1996)

O fenômeno da fadiga pode ser dividido em três estágios (RUCHERT, 2007). Inicialmente ocorre a nucleação das trincas, com a existência de singularidades ou descontinuidades que, quando formadas, tendem a se propagar ao longo dos planos de alta tensão cisalhante. As singularidades podem estar presentes no material desde o início ou surgir durante a deformação cíclica, como nas intrusões ou extrusões. Elas podem ser estruturais, como no caso das inclusões, ou geométricas, como riscos.

No primeiro estágio, ocorre o crescimento da trinca em bandas de deslizamento, próximas ao plano de cisalhamento. Neste estágio, as trincas são geralmente transgranulares, não são visíveis a olho nu e a taxa de propagação é da ordem de ângstrons por ciclo. Elas também são muito sensíveis à microestrutura, à presença de partículas de segunda fase, às mudanças de direção dos planos cristalográficos e aos contornos de grãos (RUCHERT, 2007).

No segundo estágio, a propagação da trinca se dá em um plano perpendicular à direção de máxima tensão de tração e de forma macroscópica. O fator de intensidade da tensão, K , citado anteriormente, aumenta por causa do crescimento da trinca ou elevação da tensão aplicada, então começam a ocorrer escorregamentos em planos diferentes do primário, próximos à ponta da trinca, iniciando o segundo estágio. A propagação neste estágio é caracterizada pela formação de estrias, que marcam a direção de crescimento da fratura a cada ciclo. Desta forma, quando ocorre uma redução de carga e/ou uma parada de equipamento, o crescimento da trinca cessa momentaneamente e a superfície do material pode ficar marcada pelas sucessivas posições da frente da trinca, dando origem ao que se chama de linhas de praia ou de repouso. No entanto, quando a carga que provoca a falha da estrutura por fadiga é constante, as linhas de praia não aparecem. Além disso, aumento da tensão pode provocar embotamento da trinca e uma região de deformação plástica. A propagação da trinca neste estágio não depende da orientação do grão, ocorre preferentemente transgranular e a taxa de propagação é da ordem de micros por ciclo (RUCHERT, 2007) (ANDERSON, 1995).

O estágio final é a ruptura brusca, que pode ser considerada frágil, pois sua superfície de fratura apresenta um aspecto áspero. No entanto, os estágios apresentados podem nem sempre ocorrer durante a propagação da trinca por fadiga. Por exemplo, a tensões muito baixas, o crescimento da trinca pode ocorrer exclusivamente nas bandas de deslizamento do primeiro estágio.

Recentemente, estudos sobre a formação e propagação das trincas por fadiga mostram que é possível a formação das trincas com um número ciclos de carregamento muito menor, com a formação das bandas de deslizamento e, em seguida, sua propagação no primeiro estágio para dentro do grão. A velocidade é decrescente à medida que a frente da trinca penetra no material, devido à presença de inclusões ou outros defeitos. Em

materiais frágeis ou duros, como ligas de alta resistência e os aços tratados, a nucleação das trincas tem início na interface entre a matriz e as inclusões, pois a primeira não se deforma plasticamente. Então, as bandas de deslizamento não aparecem na superfície livre, levando a nucleação a ocorrer no interior do material (RUCHERT, 2007).

2.2.2. SIMILARIDADE NA FADIGA

O estudo de defeitos por fadiga nos materiais é feito utilizando os conceitos da mecânica da fratura, conforme citado anteriormente. A principal abordagem é a da Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE), através do fator de intensidade de tensões, determinando através de carregamentos na estrutura. Dando continuidade ao que foi tratado no item 2.1.1, Paris (1961), a partir de dados e resultados empíricos, propôs o uso do intervalo do fator de intensidade de tensões ($\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$), para descrever o crescimento de uma trinca sob carregamento cíclico, através da seguinte expressão, conhecida como Lei de Paris:

$$\frac{da}{dN} = C'(\Delta K)^{\rho}$$

Equação 7

Onde da/dN é a taxa de incremento do comprimento da trinca, por ciclo, e C' e ρ são constantes empíricas, dependentes das propriedades do material, meio e condições do ambiente.

A partir da equação 7, está uma consideração importante: o princípio da similaridade, que está relacionado à ideia de usar ΔK como parâmetro que caracteriza a taxa de crescimento da trinca. De forma geral, o conceito da similitude, ou similaridade, estabelece que, se dois sistemas fisicamente idênticos estiverem sujeitos às mesmas condições, ambos os sistemas responderão da mesma forma (BROEK, 1976). De acordo

com Anderson (1995), a similaridade implica que, para um mesmo valor de ΔK , uma trinca em um material apresenta a mesma taxa de propagação de trinca da/dN , ou seja, se comportam de maneira idêntica.

Quando se considera o crescimento de trinca na presença de um fator de intensidade de tensão com amplitude cíclica constante, pode ser observado na figura 4, que uma zona plástica é formada na ponta da trinca. À medida que ocorre o crescimento dessa trinca, uma deformação plástica adjacente às suas faces é deixada para trás. (ANDERSON, 1995) (SURESH, 2003)

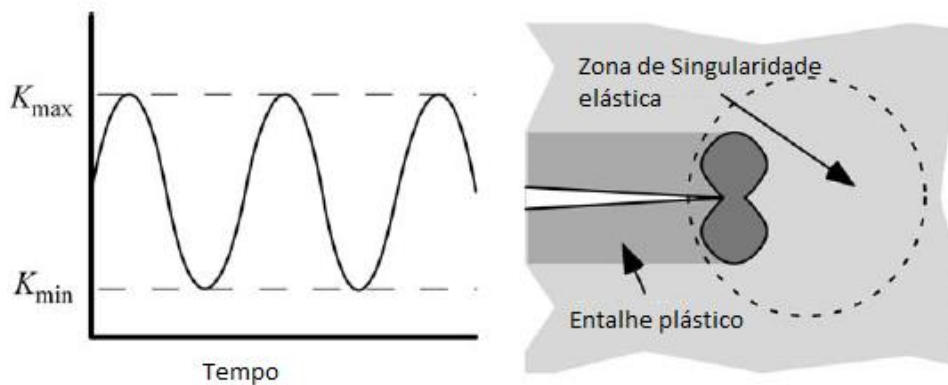


Figura 4: Crescimento de trinca em fadiga, sob amplitude constante e condições de escoamento em pequena escala
(adaptado de ANDERSON, 1995)

Quando um corpo de prova é submetido a carregamentos cíclicos, com tensões em modo I de carregamento, com uma variação de tensão constante, $\Delta\sigma$, entre os valores de mínimo e máximo, a intensidade de tensão, ΔK_I , é definida como:

$$\Delta K_I = K_{I_{max}} - K_{I_{min}}$$

Equação 8

Que também pode ser escrita como, para alguns tipos de corpo de prova específicos:

$$\Delta K_I = Y \Delta \sigma \sqrt{\pi a}$$

Equação 9

Onde Y é o fator de forma, $\Delta\sigma$, é a tensão uniaxial perpendicular ao plano da trinca e a é o tamanho da trinca. Segundo Anderson (1995), em fraturas monotônicas, o fator de intensidade de tensão, K , é a força motriz para a propagação da trinca, enquanto que, na fadiga, é a variação do fator de intensidade de tensão, ΔK .

2.2.3. CURVAS DE PROPAGAÇÃO DE TRINCA POR FADIGA

As trincas crescem sob influência das tensões cíclicas, então estudos de fadiga mostraram que a vida dos componentes estruturais está relacionada à taxa de crescimento da trinca. A determinação das curvas de propagação de trincas por fadiga da/dN , em função da variação do fator de intensidade de tensão ΔK , através de curvas, que podem ser obtidas durante os ensaios de fadiga e a partir delas são aplicados os conceitos da Mecânica da Fratura Elástica Linear Elástica. Em geral, a partir da figura 5 é possível ver a curva típica da/dN vs. ΔK , em que o crescimento da trinca em fadiga nos metais possui três regiões distintas.

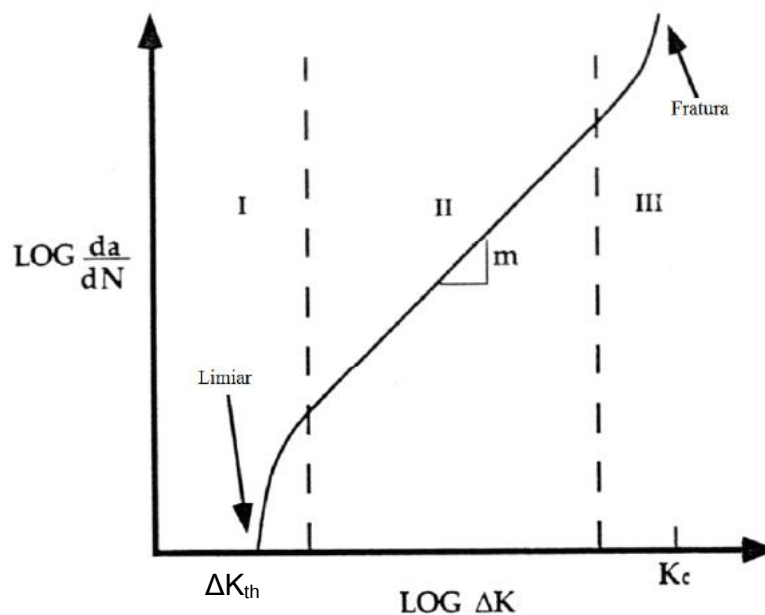


Figura 5: Curva representativa de um ensaio de crescimento de trinca por fadiga (ANDERSON, 1995)

A primeira região é a do limiar, onde da/dN diminui rapidamente com a redução do ΔK , com um valor limite ΔK_{th} , do inglês *threshold* (ASM HANDBOOK, 1996).

A segunda região, então, é aquela em que existe uma relação linear que correlaciona a taxa da/dN com ΔK , que se dá o nome de Equação de Paris, conforme mostrada na Equação 7. O crescimento das trincas ocorre através de uma consequente formação de estrias, que correspondem às posições sucessivas das frentes de propagação, por ciclo de tensão (WEBSTER, 1994).

Na região III, ocorre um rápido crescimento da taxa da/dN , até a ruptura final do corpo de prova, em que o $K_{máx}$ se aproxima do fator de intensidade de tensão crítico do material, K_C , quando o corpo de prova começa a entrar em instabilidade (ANDERSON, 1995).

2.3. CORROSÃO

A corrosão, de acordo com Gentil (2003), consiste na deterioração dos materiais metálicos pela ação química, eletroquímica ou eletrolítica do meio, podendo ou não estar associada a esforços mecânicos. Como a corrosão promove a perda de partes das peças de uma peça de aço, ela pode então ser a principal causa de colapso. Este é um assunto bastante difundido na literatura e, por isso, não será discutido neste trabalho.

2.4. CORROSÃO FADIGA

A corrosão fadiga é o fenômeno em que há uma susceptibilidade à fratura do material, sob uma ação conjunta do carregamento cíclico da fadiga e um ambiente agressivo (GENTIL, 2003). Quando combinados, o dano causado é maior do que a soma

dos danos causados separadamente pela corrosão e pela fadiga. Esse processo é resultado de uma sinergia entre o meio, a microestrutura, o tempo e o tipo de carregamento (ASM HANDBOOK, 1996).

O estudo de mecanismos de corrosão fadiga está se iniciando no meio científico recentemente, sendo ainda muito sujeito a controvérsias e descobertas. Diante desses fatos, os mecanismos mais aceitos até o presente momento serão melhores detalhados no item a seguir.

2.4.1. MECANISMOS DE CORROSÃO FADIGA

O meio externo que causa deterioração das propriedades de fadiga nos materiais pode ser em forma sólida, líquida ou gasosa. De acordo com a literatura, em meio aquoso, aquele de interesse deste trabalho, há dois diferentes tipos de mecanismos, que podem ocorrer exclusiva ou simultaneamente: a dissolução anódica e a fragilização por hidrogênio. Na figura 6 a) e b) são apresentados seus respectivos esquemas. (MATIAS, 2003) (REVIE, 2000) (SURESH, 1998)

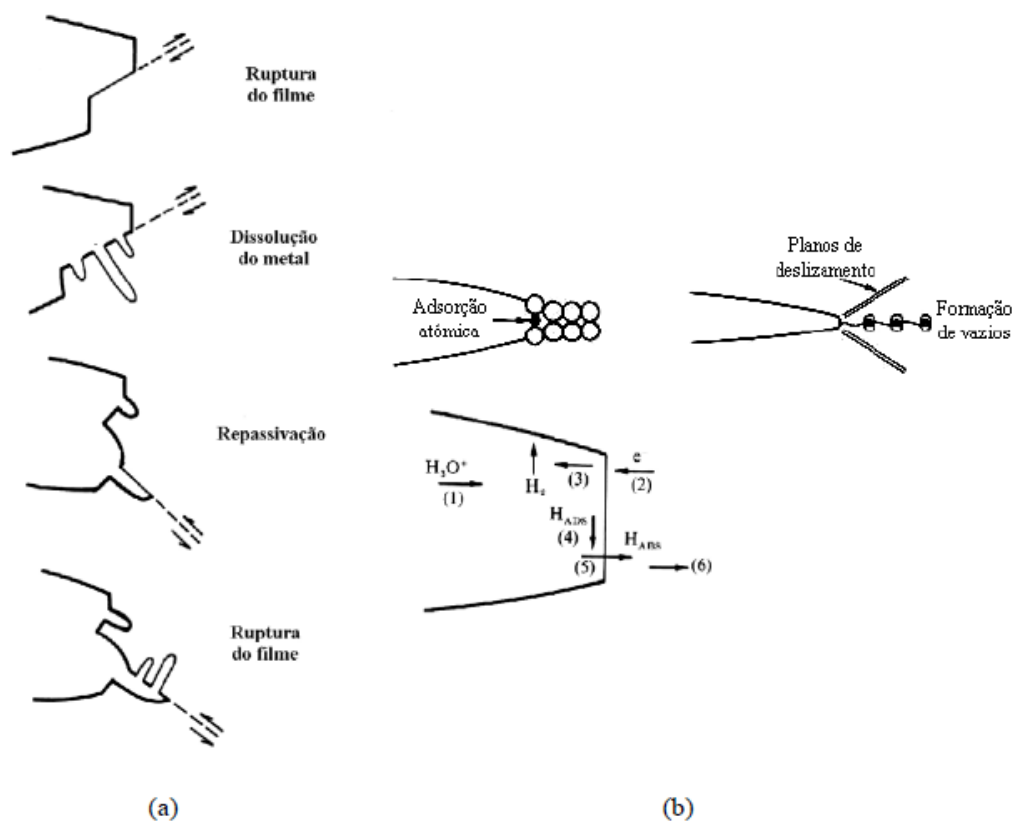


Figura 6: Ilustração de propagação de trinca por: a) dissolução anódica em meio aquoso em um material que sofre passivação; b) fragilização pelo hidrogênio (adaptado de REVIE, 2000)

A dissolução anódica é descrita pela difusão das espécies ativas, como os ânions halogenetos; pela ruptura do filme de proteção ou nas pontas da trinca, causados pela concentração de deformação ou de atrito entre as faces da trinca; pela dissolução da superfície exposta, considerada a reação anódica; e pela nucleação e crescimento dos óxidos na superfície exposta (SURESH, 1998).

Na fragilização por hidrogênio, ocorre a difusão dos íons em direção à ponta da trinca; a ação redutora do hidrogênio absorvido na superfície da ponta da trinca; a difusão do hidrogênio para os locais preferenciais; e a absorção desses átomos, adsorvidos na superfície, para locais críticos, como contornos de grão, lacunas e regiões de alta concentração de tensão (FILHO, 2006).

Algumas regiões são mais propensas ao escorregamento e à fragilização do material, como os pontos de junção dos grãos, o que ocasiona o surgimento de elevadas tensões nestes pontos. Isso já é o suficiente para a iniciação e a propagação das trincas. Na figura 7, pode ver visto um exemplo deste dano, causado pela fragilização por hidrogênio.

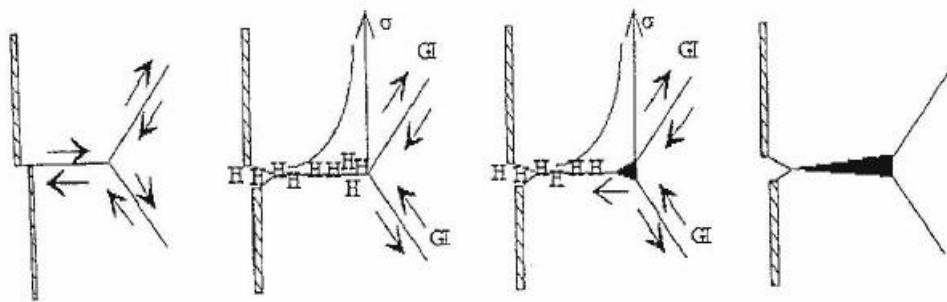


Figura 7: Ilustração das diferentes etapas do mecanismo de fragilização pelo hidrogênio induzidas pelo escorregamento intergranular (FILHO, 2006)

Já em ambientes contendo cloreto, como é o caso do presente estudo, o mecanismo de fragilização pelo hidrogênio deve ser levado em consideração. O efeito do meio durante os ensaios de fadiga feitos com esse tipo de solução é importante durante o carregamento cíclico, pois este é capaz de gerar deformação plástica. Desta forma, os efeitos do meio são dependentes do tempo dos ciclos, nos quais o material está sendo deformado plasticamente (FILHO, 2006).

Quando sujeito à pressão hidrostática do meio, a concentração de equilíbrio do hidrogênio na ponta da trinca aumenta quando o aço está sendo tensionado. O hidrogênio consegue se difundir para a ponta da trinca ainda durante o carregamento cíclico, nos casos em que ele é suficientemente lento, resultando na fragilização e no aumento da taxa de propagação das trincas. No entanto, quando o ciclo de carregamento é rápido, não há tempo para o hidrogênio se difundir, evitando a fragilização.

A formação do hidrogênio molecular, H_2 , na ponta da trinca, provoca um aumento no fator de intensidade de tensão, ΔK . Isso acontece, devido a entrada de hidrogênio atômico, H^0 , na zona plástica, acumulando-se na ponta da trinca. O acúmulo desse hidrogênio forma H_2 , provocando fragilização da região em que ele se encontra, resultando numa aceleração da taxa de propagação das trincas.

Ainda pode haver situações que envolvam repassivação, quando ocorre formação de camada de óxido nas superfícies criadas pela trinca. Neste caso, a reação na ponta da trinca sofre influência da dissolução, da redução dos íons hidrogênio ou do crescimento da trinca, sendo controladas pela taxa de ruptura do óxido, do fluxo da solução e da taxa de passivação.

Os dois estágios principais nos mecanismos de corrosão fadiga são a iniciação da trinca e a sua propagação, semelhante à fadiga ao ar, os quais já foram explicados no item 2.2.1. A grande diferença é que o meio corrosivo provoca uma interação com o material, podendo gerar pites ou outro tipo de corrosão localizada, que agirão como concentradores de tensão, sendo então locais preferenciais para a nucleação de trincas, reduzindo, em geral, seu tempo necessário para ocorrer (GENTIL, 2003). Além disso, na maioria das vezes, o tempo de propagação da trinca também é consideravelmente reduzido, devido ao efeito sinérgico entre corrosão e a fadiga.

2.5. MÉTODOS DE CONTROLE DE ENSAIO

O estudo da fadiga levou à criação de muitas técnicas para obtenção da curva de propagação de trincas, sendo a norma ASTM E647 (2011) uma das padronizações de ensaio mais utilizada na indústria atualmente. Ela permite medir desde valores próximos ao limiar, ΔK_{th} , até o seu valor máximo, onde a trinca se torna instável. De acordo com a

norma, os corpos de prova devem possuir uma espessura suficiente para impedir a flambagem e, também, devem ser capazes de manter o comportamento predominantemente elástico, durante todo o ensaio. Então, os corpos de prova possuem configurações previamente definidas, com dimensões proporcionais e ajustáveis às suas propriedades mecânicas.

Como modo de controle de ensaio, para obtenção eficiente dessas referidas curvas, a ASTM E647 (2011) reporta implicitamente três métodos:

- K crescente, podendo o P ser constante, ou C_k – gradiente de K normalizado;
- ΔK decrescente, podendo o $K_{m\acute{a}x}$ ser constante ou com razão de carregamento $R = \frac{K_{min}}{K_{m\acute{a}x}}$, constante;
- ΔK constante.

Geralmente, são utilizados softwares computacionais para controle do K aplicado, que é função da leitura do comprimento de trinca e do carregamento aplicado, conforme já apresentado nas equações 1, 2, 3 e 4. Para os ensaios com ΔK crescente ou decrescente faz-se necessária a resolução das equações 10, 11 ou 12, conforme serão apresentadas a seguir.

Nos ensaios com variação de carga (ΔP) constante, são mantidas constantes as cargas máxima e mínima, enquanto $K_{m\acute{a}x}$ e $K_{m\acute{i}n}$ e, conseqüentemente, ΔK aumentam à medida que a trinca cresce, conforme pode ser visto no esquema gráfico apresentado na figura 8. Este método tem uma grande vantagem pela facilidade de execução, pois não é necessário alterar os valores de carga aplicados ao longo do teste, apenas monitorar o crescimento da trinca. Este ensaio ocorre com ΔK crescente, à medida que a trinca cresce, e é o utilizado nos ensaios deste trabalho.

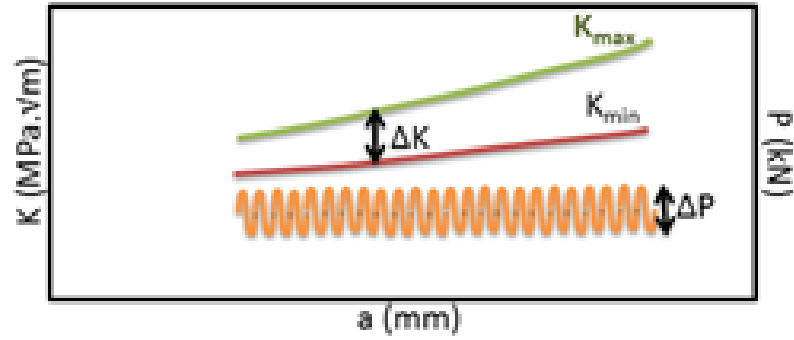


Figura 8: Curva de aspecto geral do controle por K crescente e P constante. (LIMA, 2014)

Outro tipo de ensaio com K crescente é aquele em que se utiliza:

$$C' = \left(\frac{1}{K}\right) \frac{dK}{da} > 0 \text{ mm}^{-1}$$

Equação 10

Onde dK/da é o incremento em K com o comprimento da trinca.

A Figura 9 apresenta o comportamento do ΔK em função do crescimento de trinca e que pode se notar que a variação do P aumenta em função do aumento do comprimento de trinca.

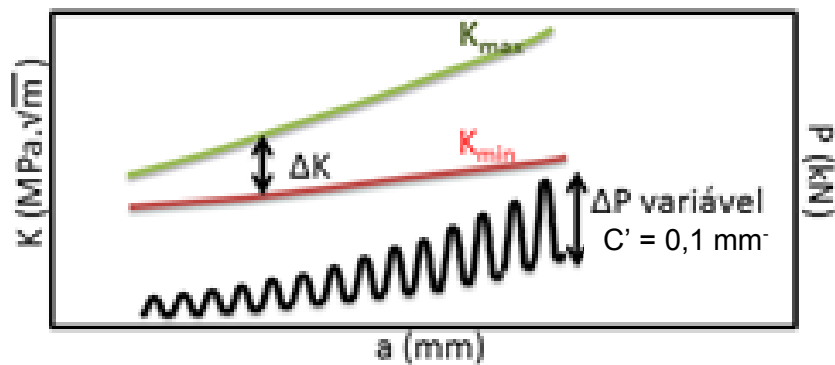


Figura 9: Curva de aspecto geral do controle por K crescente e P crescente. (LIMA, 2014)

No ensaio por redução de carga convencional, ou $\Delta K_{\text{decrecente}}$, as cargas máxima e mínima são reduzidas a uma determinada taxa à medida que a trinca cresce, de forma que

o ΔK diminui ao longo do ensaio, como pode ser visualizado no gráfico da figura 10. Este método ocorre com R constante, enquanto $K_{\text{máx}}$ e $K_{\text{mín}}$ decrescem em função da trinca.

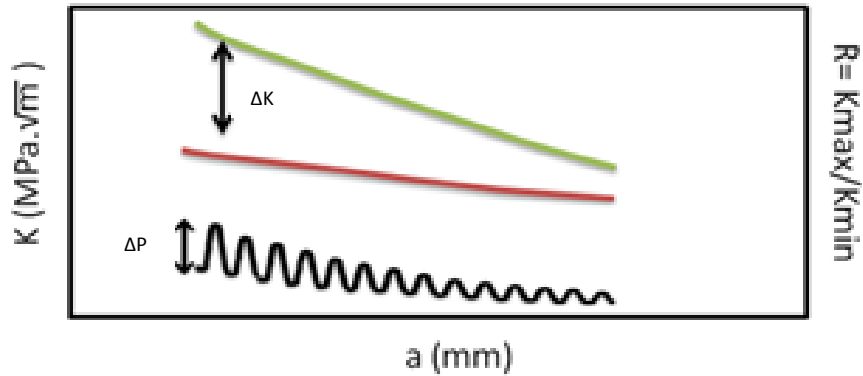


Figura 10: Curva de aspecto geral do controle por K decrescente e R constante. (LIMA, 2014)

A norma, entretanto recomenda a utilização deste apenas para valores de taxa de propagação de trinca inferiores a 10^{-8} m/ciclo. A taxa na qual a carga aplicada é reduzida é o gradiente de K (C'), sendo definido pela equação abaixo:

$$C' = \left(\frac{1}{K}\right) \frac{dK}{da} < 0 \text{ mm}^{-1}$$

Equação 11

No entanto, para que a propagação de trinca não seja afetada pelo histórico de carregamento, recomenda-se que :

$$C' = \left(\frac{1}{K}\right) \frac{dK}{da} > -0,08 \text{ mm}^{-1}$$

Equação 12

Outra modalidade de ensaio de $\Delta K_{\text{decrecente}}$ é a que promove o referido decrescimento em função de R variável e $K_{\text{máx}}$ constante, conforme a curva da figura 11. Esta metodologia baseia-se no aumento do valor da carga mínima, de forma a aumentar

o $K_{\min}$ à medida que a trinca cresce e, desta forma, diminuir o ΔK ao longo do ensaio, até chegar ao seu valor limite. No entanto, como o $K_{\max}$ tem a tendência de aumentar com o crescimento da trinca, é necessário diminuir o valor aplicado da carga máxima, para manter o $K_{\max}$ constante.

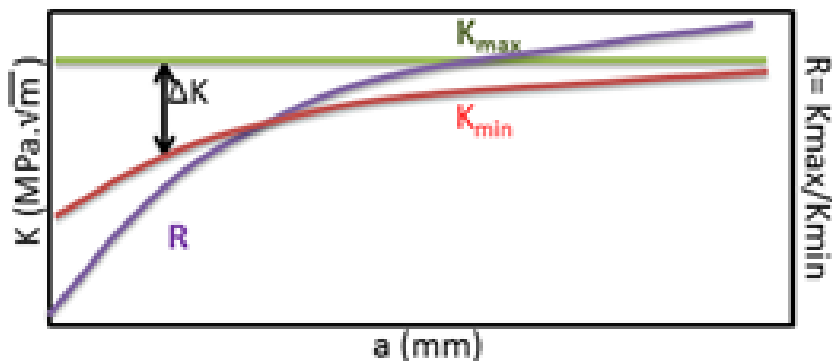


Figura 11: Aspecto geral do controle por K decrescente e $K_{\max}$ constante. (LIMA, 2014)

2.6. TÉCNICAS DE MONITORAMENTO DE TRINCA

Durante o ensaio de fadiga, é importante a medição do comprimento da trinca, que pode ser realizada de modo direto ou indireto. Uma das principais formas de medição direta é a observação visual através do microscópio ótico, em que mede o comprimento da trinca da superfície do corpo de prova. Atualmente, existe a possibilidade de se utilizar uma câmera acoplada ao microscópio, de forma a automatizar a aquisição de imagens e evitar interrupções. Porém, a obtenção de uma curva de da/dN VS. ΔK seria extremamente dispendiosa, além de possuir limitações em casos em que haja tunelamento e na aplicação de ensaios em meios corrosivos.

Dessa forma, atualmente são utilizadas metodologias para o monitoramento de trincas em ensaios de fadiga e corrosão fadiga, e alguns dos principais métodos de medição indireta são o DCPD e o BFS.

2.6.1. DCPD

A técnica de queda de potencial elétrico por corrente contínua, DCPD, tem sido usada para medir e caracterizar a propagação de defeitos nos espécimes metálicos por muitos anos. Ela é baseada no aumento da resistência elétrica do corpo de prova, à medida que a trinca cresce, resultando num aumento da queda de potencial elétrico, quando aplicada uma corrente elétrica constante.

Esta é uma técnica sensível ao tunelamento, em vez de apenas levar em consideração o comprimento da trinca nas laterais do corpo de prova, como ocorre nos métodos visuais. Um diagrama esquemático desta técnica pode ser visualizado na figura 12, onde a corrente entra pela parte superior, conforme seta indicativa, saindo pela parte inferior do CP. A trinca funciona fisicamente como um obstáculo às linhas de corrente, assim, à medida que a trinca aumenta, a resistência do corpo de prova aumenta, provocando um consequente aumento da queda de potencial, que é medida próxima ao entalhe, em lados opostos da trinca.

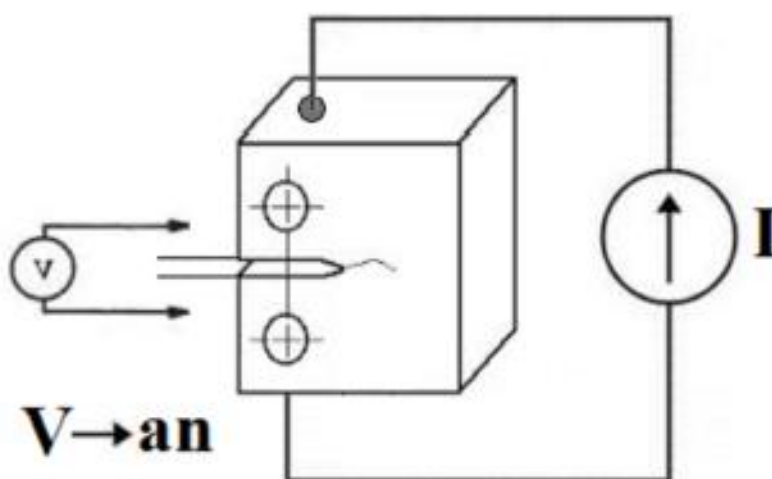


Figura 12: Diagrama esquemático de funcionamento da técnica de medição comprimento de trinca por DCPD

(adaptado de LIMA, 2014)

A relação entre voltagem da geometria do corpo de prova do tipo C(T) e o tamanho da trinca é apresentada na equação abaixo. Ela foi desenvolvida por Hicks e Pickard (1998) a partir da análise de elementos finitos e foi verificada através de técnicas experimentais e analógicas, para uma relação a/W variando entre 0,24 e 0,7. (ASTM E647, 2011).

$$\frac{V}{V_r} = A_0 + A_1 \left(\frac{a}{W} \right) + A_2 \left(\frac{a}{W} \right)^2 + A_3 \left(\frac{a}{W} \right)^3$$

Equação 13

Onde V é a voltagem medida; V_r é a voltagem de referência, correspondendo a $a/W=0,241$; a é o tamanho da trinca, W é a largura do corpo de prova, $A_0 = 0,5766$, $A_1 = 1,9169$, $A_2 = -1,0712$, $A_3 = 1,6898$.

2.6.2. BFS

Esta técnica faz uso de um extensômetro (strain gage) colado na face oposta do corpo de prova para obter a leitura da deformação, relacionando o comprimento da trinca com a largura (a / W).

Há mais de trinta anos, Deans e Richard (1979) começaram os estudos para desenvolver uma relação para os corpos de prova padrão do tipo C(T), para a avaliação da taxa de propagação de trinca, através de medições feitas na parte traseira e do uso de elementos finitos.

Recentemente, Newman et. Al., retomaram e adaptaram a metodologia para largas faixas de extensão de trinca no corpo de prova C(T) (NEWMAN, 2010). Mais recentemente, a metodologia vem sendo estudada no laboratório LNDC (GARCIA; MATTOS et al., 2015).

Através dos experimentos de Newman e Johnston (2010), foi possível chegar a uma equação que funcionou muito bem para a/W inferior a 0,8.

$$\frac{a}{W} = A_0 + A_1U + A_2U^2 + A_3U^3 + A_4U^4 + A_5U^5$$

Equação 14

Onde U é uma função de *compliance*, $A_0 = 1,0033$; $A_1 = -2,35$; $A_2 = 1,3694$; $A_3 = -15,294$; $A_4 = 63,182$; $A_5 = -74,42$.

No entanto, apesar das discrepâncias entre comprimentos de trinca reais e calculado para um a/W superiores a cerca de 0,8 foram observados. O objetivo dos estudos desta técnica foi entender as diferenças entre as diversas expressões BFS e desenvolver uma expressão para uma ampla gama das razões de comprimento e largura das trincas ($0,2 < a / W < 0,95$), através do cumprimento a norma ASTM (NEWMAN, 2010).

De forma geral, a medição é feita através do dispositivo eletrônico, strain gage, que pode ser visto na figura 13, fornecendo as medidas de deformações compressivas, como uma resposta à aplicação das cargas trativas durante o ensaio. O cálculo do comprimento de trinca é feito através de funções matemáticas pré-definidas, baseadas nas medidas de deformações fornecidas pela técnica e das cargas aplicadas durante o ensaio (RIDDELL; PIASCIK, 1998).

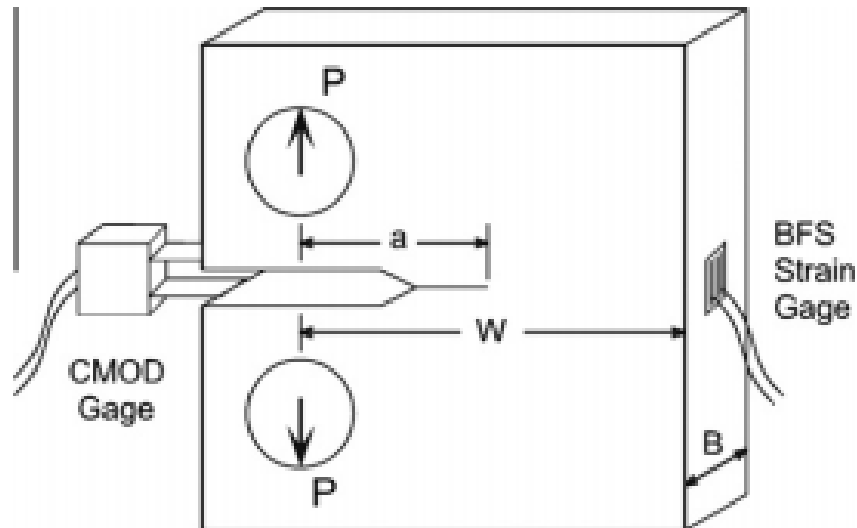


Figura 13: Esquemático de funcionamento da técnica de medição comprimento de trinca por BFS (adaptado de NEWMAN, 2010)

Enquanto que o DCPD já é largamente utilizado nos ensaios de fadiga, o BFS é apresentado aqui como uma proposta para ensaios de corrosão fadiga. A tabela 1 fornece comparações entre as duas técnicas, sendo que são apresentados na tabela 2 alguns valores obtidos do erro experimental para diferentes sistemas de DCPD, com base em resultados previamente alcançados pela equipe do GECORF/LNDC. A tabela 3 apresenta uma memória de cálculo do tempo mínimo para obtenção de 5 pontos na região próxima ao limiar e a tabela 4 mostra um resumo de vantagens e desvantagens entre as duas técnicas. Para finalizar, a tabela 5 indica aspectos críticos e ressalta alguns itens que serão testados neste trabalho.

Tabela 1: Comparações entre as Técnicas DCDP e BFS.

ITEM A SER COMPARADO	DCPD	BFS	REFERÊNCIA
*Resolução teórica do comprimento de trinca em ensaios de Fadiga	100 μm	10 μm	ASM HANDBOOK – vol. 19, página 518
** Resolução prática do comprimento de trinca no corpo de prova com $W= 60\text{ mm}$ e $B = 10\text{ mm}$	80 μm	15 μm	Relatórios Técnicos do GECORF/LNDC (ver tabela 2)
Erro típico da técnica	$\sim 2\%$	$\sim 0,5\%$	Holtum (2010) e Relatórios Técnicos do GECORF/LNDC
***Precisão típica das medições de trinca	70 μm	30 μm	Relatórios Técnicos do GECORF/LNDC
Mínimo incremento de trinca em regiões próximas ao limiar ($\Delta a_{\text{mínimo}}$)	700 μm	300 μm	Norma ASTM E647 (2011)
**** Tempo mínimo para obtenção de 5 pontos na região próxima ao limiar, em uma frequência de 0,2 Hz	9 meses	4 meses	Norma ASTM E647 (2011)

* Resolução: é a medida do menor valor que você pode medir com um instrumento de medição. Nos instrumentos digitais é a variação que ocorre no último dígito. (ISO GUM, 1995)

** De acordo com relatório técnico do GECORF/ LNDC, vide tabela 2.

*** Precisão: é a uma medida da concordância entre determinações repetidas de uma mesma grandeza. A precisão é usualmente quantificada como o desvio padrão de uma série de medidas. A precisão geralmente é associada com erros aleatórios do processo de medição, enquanto a exatidão está associada a fontes sistemáticas (ISO GUM, 1995). A ASTM E647 (2011) define como: “A precisão da medida do tamanho de trinca é aqui definida como o desvio padrão do principal valor determinado de tamanho de trinca para um conjunto de medições.”

**** Ver tabela 3, para memória de cálculo.

Tabela 2: Resolução do comprimento de trinca no CT ($W= 60\text{ mm}$ e $B = 10\text{ mm}$) – GECORF/LNDC*

	Sistema 1	Sistema 2	Sistema 3
Voltímetro	Voltímetro 8,5 dígitos Agilent	Matelect	Agilent 34420A, Nanovoltímetro
Fonte de corrente	Agilent 6652A, (corrente contínua)	Matelect (corrente pulsada)	Agilent 6652A, (corrente contínua)
Software	NI LabVIEW, software LNDC – DCPD Monitor Crack Growth (versão 1.0)	da/dN software Instron	NI LabVIEW, software LNDC – DCPD Monitor Crack Growth (versão 2.0)
Erro em Fadiga ao Ar	<3,5%	<2,0%	<2,0%
Resolução	~120 microns	~80 microns	~80 microns
Sinal	Analógico	Analógico	Analógico
Vantagem	-	Alta taxa de aquisição de dados	Taxa de aquisição de dados moderada; Baixo custo; Fácil acessibilidade.
Desvantagem	-	Alto custo; Importado da Inglaterra (sem representantes no Brasil); Acessibilidade a recursos muito restrita.	-

*Informações retiradas de um banco de dados da GECORF (Grupo de Ensaios de Corrosão Fadiga), do Laboratório LNDC.

Tabela 3: Memória de cálculo tempo mínimo na região próxima ao limiar a 0,2 Hz. - GECORF/LNDC

Ponto	Velocidade (mm/ ciclo)	Tempo (semana) via DCPD	Tempo (semana) via BFS
1	$5,0 \times 10^{-7}$	11	5
2	$6,25 \times 10^{-7}$	9	4
3	$7,50 \times 10^{-7}$	7	3
4	$8,75 \times 10^{-7}$	6	3
5	$1,00 \times 10^{-6}$	5	3
Total de meses=		9	4

Tabela 4: Vantagens e desvantagens entre as técnicas DCPD e BFS. - GECORF/LNDC

ITEM A SER COMPARADO	DCPD	BFS
Apresenta necessidade de CP de referência	SIM	-
Apresenta forte influência da temperatura	SIM	-
Pode apresentar efeito termoelétrico	SIM	-
Permite conhecer o valor real do tamanho da trinca com completo desconhecimento prévio do tamanho de trinca	-	SIM
Apresenta risco de morte do operador do ensaio	SIM	-
Dispensa a realização de pré-trinca para que a equação seja validada	-	SIM
Permite grandes comprimentos de trinca no CP, reduzindo o número de ensaios para a obtenção de uma curva da/dN completa	-	SIM
Apresenta frequentemente problemas relativos à avaria na solda elétrica, implicando em uma nova preparação do corpo de prova	SIM	-
Permite recomençar o ensaio imediatamente após uma possível queda de luz	-	SIM

Tabela 5: Aspectos críticos das técnicas DCPD e BFS. - GECORF/LNDC

ITEM A SER COMPARADO	DCPD	BFS
Apresenta questionamento quando ao fato de ser utilizada em solução aquosa?	Sim. A alta corrente aplicada neste método pode alterar a interface eletroquímica, (ASTM E647, 2011) (ASM HANDBOOK, 1996)	Não. Se for bem isolado por um revestimento elástico o sistema estará seguro.
Possíveis problemas de medição na região perto do limiar em meio corrosivo	Sim. Ver item A6.3.1 da ASTM E647	Não
Influência por corrosão localizada ou fragilização por hidrogênio	* Testado neste trabalho, a metodologia empregada será apresentada nos itens 3.2.5. e 3.2.5.1.	Testado neste trabalho, a metodologia empregada será apresentada nos itens 3.2.5. e 3.2.5.2.

*Teoricamente, a ocorrência de fragilização por hidrogênio/ corrosão localizada causará uma redução da área e conseqüentemente, aumentará a queda de potencial podendo provocar uma falsa leitura de crescimento de trinca.

2.6.3. NORMA BS 7910

A norma inglesa BS 7910 foi publicada em 1980, pela British Standard Institution, com o objetivo de avaliar a influência de defeitos na integridade dos equipamentos. Estas avaliações levavam em consideração aspectos relacionados à fratura frágil e à fadiga, embora outros mecanismos causadores de danos aos materiais também puderam ser tratados com menos rigor, como corrosão sob tensão, corrosão fadiga, fluência e flambagem (BS 7910, 1999).

Originária do documento PD-6493, sofreu algumas alterações até se tornar oficialmente uma norma. Em sua nova versão, ela apresentou alterações nos procedimentos de avaliação de fratura e fadiga e ainda acrescentou uma parte dedicada aos serviços em altas temperaturas.

A Norma BS 7910 é um guia para avaliar a aceitabilidade de falhas nos materiais metálicos, através de procedimentos de adequação ao uso e engenharia de avaliação crítica, ECA (do inglês, Engineering Critical Assessment), além de estabelecer diretrizes para uso de fatores de segurança, fatores de confiabilidade e métodos probabilísticos. Ela adota três níveis de avaliação de fratura, cuja determinação é em função dos materiais envolvidos, dos dados de entrada disponíveis e do conservadorismo requerido.

O Nível 1 é o mais simplificado e conservador, sendo aplicado quando as informações disponíveis sobre as propriedades dos materiais forem limitadas. O Nível 2 é o método normal, sendo dividido em dois subníveis: 2A, normalmente mais utilizado; e 2B, geralmente mais preciso e que requer uma curva tensão-deformação específica do material. O Nível 3 é o mais adequado para materiais dúcteis e subdividido em três subníveis: 3A, análogo ao 2A; 3B, análogo ao 2B; e 3C, mais específico para alguns tipos de materiais (RASTOGI, 2006).

Segundo Rastogi (2006), a avaliação deve iniciar através do nível 1. Caso a falha seja inaceitável, a análise é feita novamente, utilizando um nível mais elevado. Alega-se que a complexidade das análises aumenta para cada nível e tornam-se mais realísticas e menos conservadoras.

Esta norma é tomada como referência para comparação das curvas da/dN VS. ΔK , obtidas por DCPD e BFS, já que esta norma define as curvas características para diferentes tipos de aços, como os ferríticos, austeníticos ou duplex, em função do limite de escoamento, meio e temperatura.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A norma ASTM E647 (2011), conforme explicada no item 2.5 da revisão bibliográfica, padroniza dimensões geométricas de corpos de prova C(T), além de requisitos necessários para ensaios de fadiga. Desta forma, todos os materiais e métodos utilizados neste presente trabalho estão de acordo ou se basearam em itens da norma ASTM E647. Os itens a seguir detalham a metodologia e os materiais empregados neste trabalho.

3.1. MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

3.1.1. CORPO DE PROVA

O material selecionado para este estudo foi o aço X70, retirado de um tubo da Tenaris Confab, no sentido T-L, conforme apresentado na figura abaixo, dentro os outros sentidos.

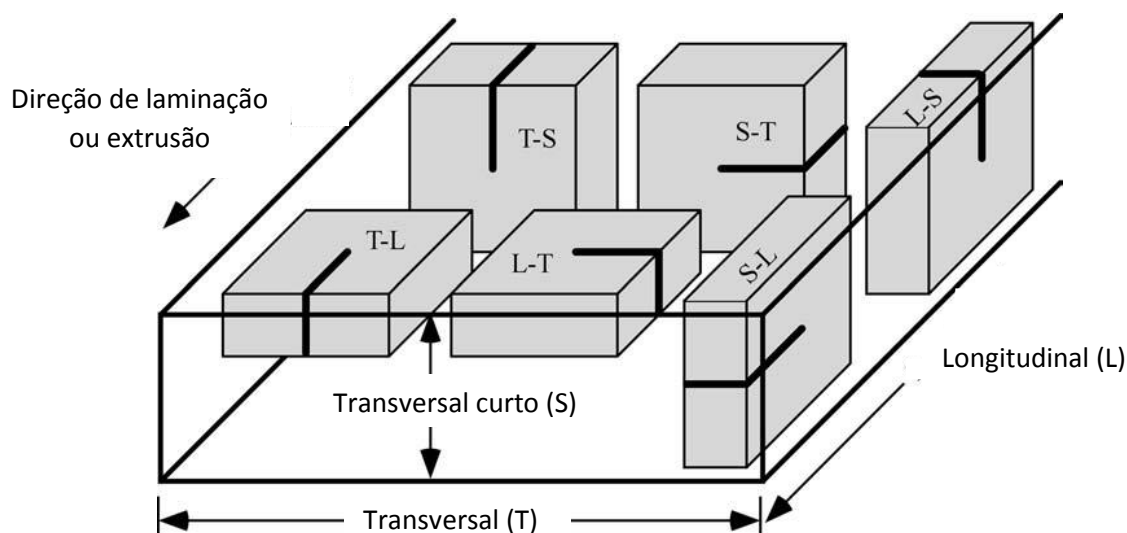


Figura 14: Orientações dos planos de corpos de prova (adaptado de ANDERSON, 2003)

O corpo de prova utilizado para os ensaios deste trabalho foi o C(T), conforme esquema apresentado na figura 15. Neste trabalho, foram utilizados valores para $W = 60$ mm, $B = 10$ mm e $a_n = 12$ mm.

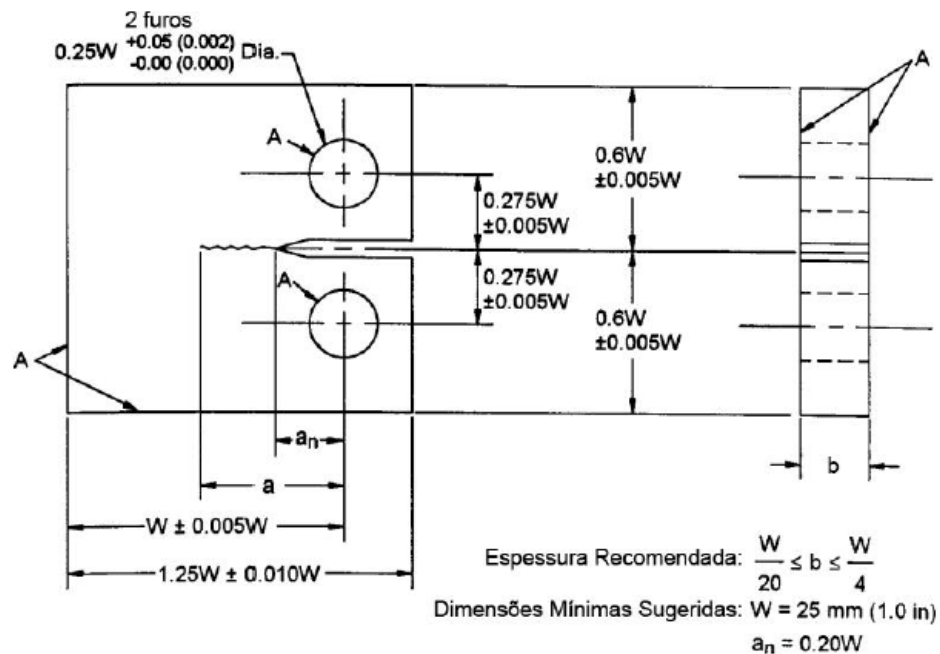


Figura 15: Corpo de prova do tipo compacto - C(T) (adaptado da ASTM, 2011)

As faces indicadas pela letra 'A' devem ter uma tolerância de até $\pm 0,002W$. A ponta do entalhe deve ter uma distância igual entre as faces superior e inferior do corpo de prova, com uma tolerância de até $0,005W$. Os acabamentos superficiais de usinagem e os dos furos devem conter $0,8$ mm de rugosidade ou mais liso. A norma não faz restrição sobre a espessura mínima do corpo de prova, apenas recomenda-se que a espessura, b , esteja dentro dos limites $(W/20) \leq b \leq (W/4)$. Além disso, é recomendado $a_n = 0,20W$. (ASTM, 2011).

O preparo do entalhe no corpo de prova foi feito por usinagem. O entalhe apresentou um ângulo de 30° , sendo esquematizado na figura 16.

Após a usinagem, foram instalados os dispositivos necessários para leitura de trinca para ambas as metodologias aqui estudadas, DCPD e BFS. Em seguida, o corpo de prova foi revestido para proteção em meio corrosivo, ficando expostos apenas os flancos do entalhe. Tal revestimento será melhor descrito posteriormente, no item 3.2.4.

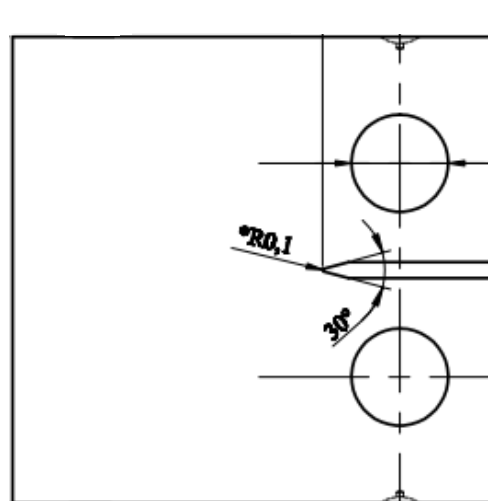


Figura 16: Especificações e detalhamento do entalhe do corpo de prova C(T)

3.1.2. SOLUÇÃO DE ENSAIO

A solução utilizada durante os ensaios de corrosão fadiga foi selecionada tendo como objetivo a comparação com a norma BS 7910, cuja condição relativamente severa é capaz de proporcionar uma maior propagação de trinca. A referida solução foi de NaCl 3,0% a ± 20 °C, simulando a situação marítima sem pressão. Para a renovação da solução, foi utilizada uma bomba com vazão de 60 mL/min, monitorando-se a temperatura e o pH da solução durante todo o ensaio realizado. O sistema completo de ensaio pra obtenção de curvas da/dN utilizado neste trabalho será melhor detalhado no item 3.2.8.

3.1.3. MÁQUINAS DE ENSAIO

Foram utilizadas basicamente duas máquinas de ensaio, uma de acionamento hidráulico (Instron), capaz de aplicar altas frequências, onde foram confeccionadas as pré-trincas a 50 Hz; e outra de acionamento eletromecânico, desenvolvida pelo LNDC, onde foram realizados os ensaios de corrosão fadiga em baixa frequência (0,2 Hz) (LIMA, 2014). Tais máquinas são apresentadas na figura 17, cujos softwares de controle das mesmas se encontram na tabela 6.

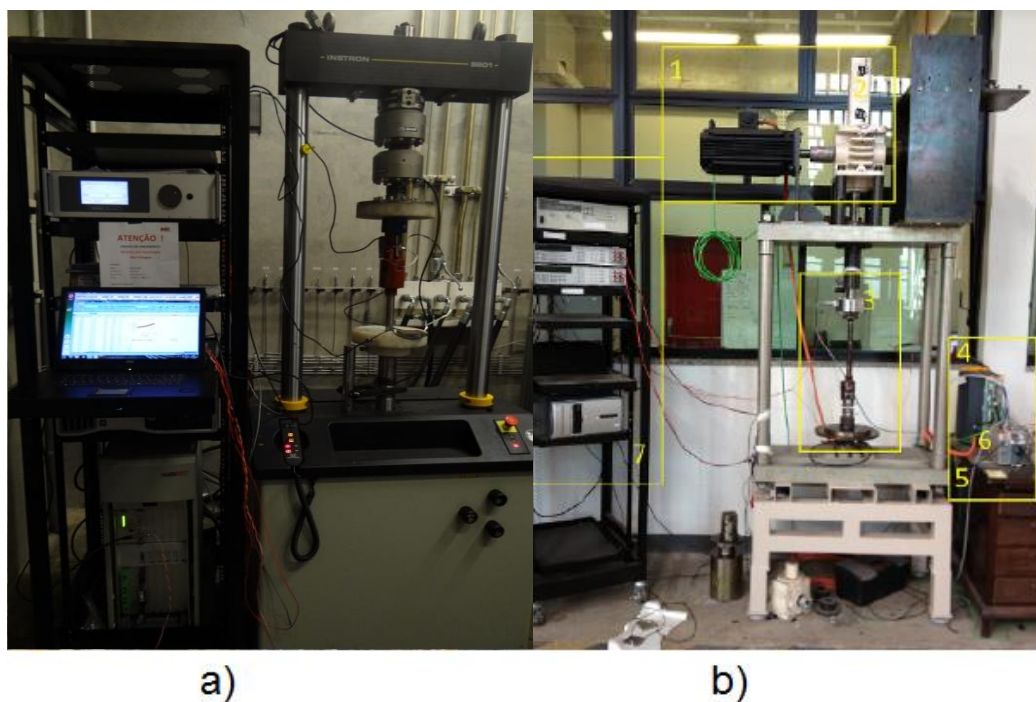


Figura 17: Fotos das máquinas utilizadas nos ensaios. (a) Instron 8801 L025 (b) Eletromecânica desenvolvida pelo

LNDC

Tabela 6: Informações Gerais das Máquinas de acionamento hidráulico e eletromecânico

Máquina	Modelo	Software
Servo-hidráulica	Instron 8801 L025	Software da/dN Instron ® para controle das máquinas de ensaio. Software desenvolvido pelo LNDC em plataforma LabView ® para medição do tamanho da trinca, utilizando-se as técnicas de DCPD e BFS
Eletromecânica	Eletromecânica Desenvolvido pelo LNDC	Software para controle das máquinas de ensaio desenvolvido pelo LNDC em plataforma LabView ®. Software desenvolvido pelo LNDC em plataforma LabView ® para medição do tamanho da trinca, utilizando-se as técnicas de DCPD e BFS

3.1.4. EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO DE TRINCA

Através do uso dos materiais e máquinas citados anteriormente, foram utilizadas duas técnicas para medição das trincas dos ensaios de fadiga, a de DCPD e a de BFS, explicadas no item 2.6 da revisão bibliográfica. A equação utilizada para obtenção do tamanho da trinca via DCPD foi a equação descrita no item 2.6.1 e aquela para determinação via BFS está descrita no item 2.6.2. Na tabela 7, estão relacionados os principais equipamentos envolvidos em cada uma dessas metodologias.

Tabela 7: Especificações dos equipamentos utilizados para cada técnica de ensaio de fadiga.

Técnica de Medição de trinca: DCPD
Nanovoltímetro de 34420A.
Fonte de corrente contínua de 6652A.
Corpos de prova de trabalho e de referência, conforme recomendado pela ASTM E647.
Técnica de Medição de trinca: BFS
Carta National NI 9205 - AI (Analogic Input), NI 9215 - AO (Analogic Output) e NI C-Daq.
Strain Gage roseta RS22, marca HBM, instalado na face traseira do CP (alinhado horizontal e verticalmente), instalado conforme foi mostrado anteriormente na fig. 14.

3.2.METODOLOGIA

Uma síntese da metodologia deste trabalho é listada a seguir.

- Preparação dos corpos de prova (detalhada nos itens 3.2.1 ao 3.2.4)
- Avaliação da influência de corrosão localizada sobre as técnicas de BFS e DCPD (item 3.2.5);
- Avaliação da influência da passagem de corrente elétrica utilizada pelo DCPD, no sistema de ensaio (item 3.2.6);
- Ensaio da influência da permeação por hidrogênio nas medidas de BFS (item 3.2.7)
- Comparação das técnicas BFS e DCPD com a Norma BS 7910 (item 3.2.8).

3.2.1. PRÉ-TRINCA DOS CORPOS DE PROVA

Conforme recomendação da ASTM E647, previamente à execução dos ensaios de fadiga, faz-se necessário abrir uma pré-trinca de fadiga, para obtenção de uma trinca com geometria de pequeno raio de curvatura, eliminação de efeitos gerados pela mudança de forma na ponta da trinca e/ou influência do histórico de carregamento. A abertura da pré-trinca, conforme citado anteriormente (item 3.1.3), foi realizada na máquina Instron ®, apresentada na figura 18. A tabela 8 fornece os dados em que se sucedeu a etapa de pré-trinca, cujo valor mínimo recomendado pela norma ASTM E 647 para as dimensões do CP utilizado neste trabalho foi de 2,42 mm de trinca percorrida.



Figura 18: Ensaio de propagação da pré-trinca no corpo de prova C(T) em aço X70.

Tabela 8: Tabela com os dados do Ensaio de propagação da Pré-trinca.

Parâmetros do Ensaio de Pré-trinca	
Frequência	30 Hz
Comprimento da trinca inicial a_0	12 mm
Largura, W	60 mm
Espessura, b	10 mm
Razão, R	0,5
Faixa mínima de trinca percorrida Δa	2,42 mm
ΔP	5700 N
Variação máxima de P e de ΔP	$\pm 2\%$

3.2.2. APLICAÇÃO DOS STRAIN GAGES

Visando a utilização da técnica do BFS (Back Face Strain), faz-se necessária a colagem dos dispositivos *strain gage* nos corpos de prova de trabalho, cujas especificações se encontram na tabela 9.

Tabela 9: Especificações do modelo de Strain Gage utilizado nos ensaios.

Modelo do Strain Gage	
Tipo	Roseta RS22
Marca	HBM
Resistência	350 Ω
Gage Factor	1,99
Comprimento	3 mm
Aço	Ferrítico

De acordo com a metodologia de colagem de *strain gages* do LNDC, deve ser feito um lixamento prévio da região de face oposta à trinca, em plano central, alinhado horizontalmente e verticalmente, onde será colado o *strain gage*. Para isso, foi utilizado um paquímetro para medir as dimensões da face e marcar o centro, onde o dispositivo seria colado.

Em seguida, o CP foi limpo com acetona ou álcool isopropílico. Para auxiliar a colagem, utilizou-se uma placa de vidro limpa. Após o posicionamento correto das peças, aplicou-se uma pequena quantidade de cola *Z70 Rapid Adhesive* para fixá-lo na região anteriormente marcada, pressionando por 5 minutos, conforme é mostrado na figura 19. O corpo de prova foi mantido em repouso por 24 horas, para melhor fixação da cola.



Figura 19: Foto da colagem do strain gage na face oposta à trinca no corpo de prova C(T).

3.2.3. SOLDAGEM DOS FIOS DO DCPD

Após o tempo indicado, os terminais foram preparados para receber os pontos de solda, certificando-se de limpar a superfície do terminal para remover os vestígios de cola. Então, com o auxílio de uma estação de solda, à temperatura de aproximadamente 285°C, derreteu-se o arame de solda, de maneira a fixar as antenas junto à parte metálica do terminal, visando um ponto de solda fino e consistente, evitando contato elétrico entre as referidas antenas. E, para soldagem dos fios ao terminal, o processo foi realizado na mesma faixa de temperatura, derretendo-se também o estanho para ser fundido ao terminal. O sistema final para o ensaio pode ser visualizado na figura 20.

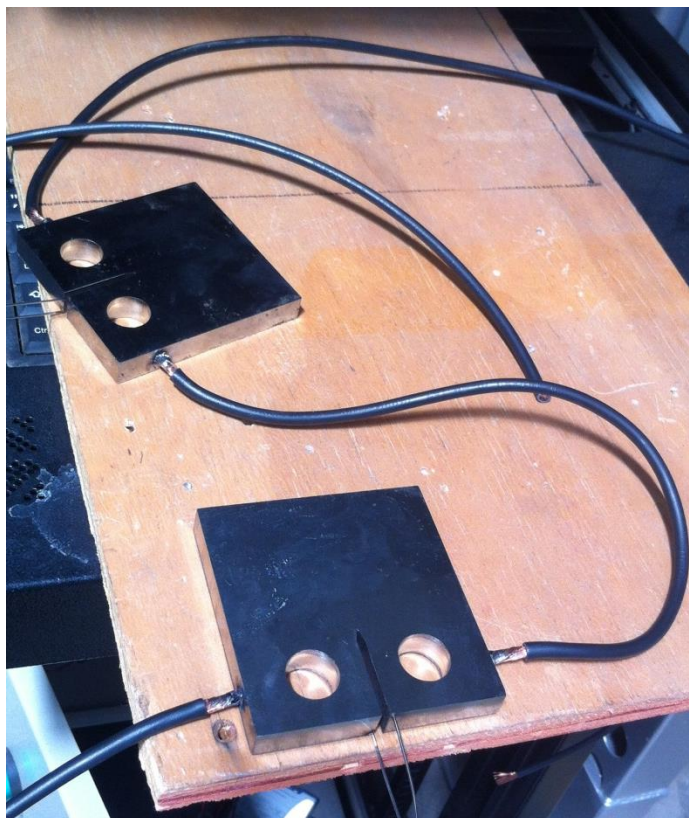


Figura 20: Montagem dos corpos de prova de trabalho e de referência com seus respectivos terminais de solda.

A metodologia aqui empregada está de acordo com todas as recomendações da ASTM E647.

3.2.4. APLICAÇÃO DOS REVESTIMENTOS

A aplicação de revestimentos dos corpos de prova foi feita por um padrão de revestimento desenvolvido pela equipe especializada do LNDC, que consiste de Epoxi e polinitril, cujo resultado final se encontra na figura 21. Trata-se de um elastômero inerte no meio corrosivo utilizado neste trabalho, possuindo baixíssimo coeficiente de Young (da ordem de kPa)

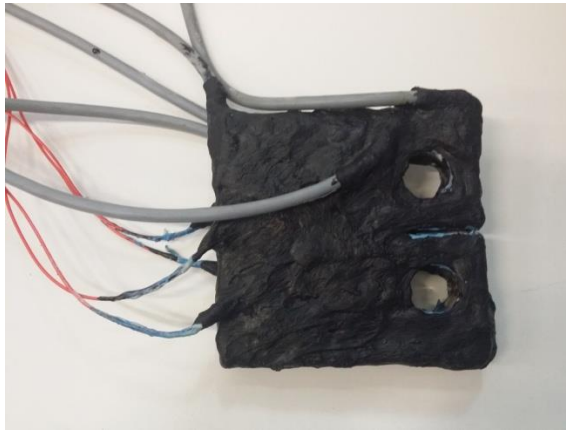


Figura 21: Foto do corpo de prova, representando o revestimento utilizado neste trabalho.

Além disso, esse revestimento é inerte em soluções de NaCl 3%, mostrando-se adequado ao fim a que se destina.

3.2.5. AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE CORROSÃO LOCALIZADA SOBRE AS TÉCNICAS DE BFS E DCPD

Com o objetivo de verificar se há diferenças na queda de potencial, quando o corpo de prova sofre corrosão localizada, foram realizadas três diferentes metodologias para simular sua influência na medição de trincas por fadiga, utilizando-se as técnicas de DCPD e BFS:

- Microdurômetro: Sem perda de massa e consequentemente perda de volume do CP desprezível;
- Furadeira elétrica: Com perda de massa do CP.
- Simulação, utilizando o método de elementos finitos.

3.2.5.1. SIMULAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA PERFURAÇÃO DO CP NO SINAL DO DCPD

Para verificar a influência dos valores de queda de potencial obtidos e, consequentemente, o falso valor de comprimento de trinca determinado por meio desta técnica, desejou-se perfurar o corpo de prova, como se fosse por ação de corrosão localizada. Foram utilizadas, inicialmente, duas metodologias distintas para averiguação, cujo cálculo do comprimento de trinca, a_n , foi realizado com scripts em Matlab, utilizando polinômio da Norma E647 com normalização das tensões medidas ($V=V_{trab}/V_{ref}$).

Desta forma, primeiramente, foram realizadas endentações, com a máquina utilizada para ensaios de dureza, conforme mostra a figura 22(a).

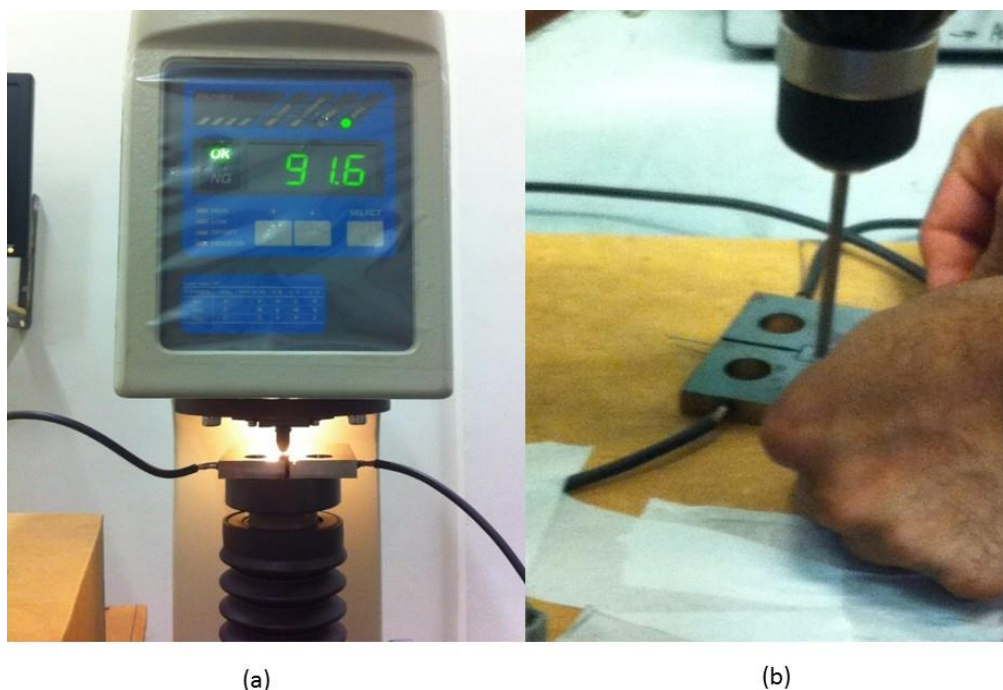


Figura 22: (a) Foto do corpo de prova sendo submetido a uma endentação, através do durômetro. (b) Foto do corpo de prova sendo perfurado por uma broca.

Com o intuito de tornar reproduzível a metodologia empregada nesta primeira análise, utilizou-se um durômetro, fazendo 100 endentações no corpo de prova de trabalho, conforme podem ser vistas na figura 23. A dureza média encontrada no material

foi de 92,45 HRB. O valor da dureza, embora fora de interesse neste estudo, pode ser lido diretamente na máquina de ensaio. Ele foi realizado em três etapas, sendo o corpo de prova primeiramente submetido a uma pré-carga, depois aplicando-se a carga maior, que, somada à pré-carga, resulta a carga total, ou nominal, do ensaio, para, por fim, retirar-se a carga.



Figura 23: Foto do corpo de prova de trabalho, com as endentações, e do de referência.

O sistema de corpos de prova foi submetido ao ensaio de fadiga, através da técnica do DCPD, sem endentações e posteriormente contendo as endentações.

Outra metodologia empregada, porém com perda de massa, foi a de simulação do fenômeno da corrosão localizada, através da confecção de furos na superfície do CP, que pode ser vista na figura 22(b). Com o uso de uma broca de 5 mm, foi realizado, inicialmente, um furo e, posteriormente, outro furo, ambos com 2,25 mm de profundidade, medidos com um paquímetro.

O corpo de prova, mostrado na figura 24, foi submetido ao ensaio de fadiga, através da técnica do DCPD, também de três formas diferentes: sem o furo, com o

primeiro furo e com o segundo. A corrente elétrica utilizada foi a mesma ($\sim 15\text{A}$) nos três ensaios, cujos parâmetros se encontram na tabela 10.



Figura 24: Foto do corpo de prova de trabalho, com os furos, e do de referência.

Tabela 10: Tabela com os dados do Ensaio de Fadiga com e sem as endentações.

Parâmetros do Ensaio com e sem as Endentações	
Corrente	15 A
Frequência de onda	2 Hz
Faixa de carregamento, ΔP	10000 N
Razão R	0,5

3.2.5.2. SIMULAÇÃO POR BFS

Para simular este efeito da fragilização por hidrogênio pela técnica do BFS, foi utilizado um software comercial chamado ANSYS 14.0, que é capaz de resolver problema do CP, através do método de elementos finitos.

O tipo de controle para a simulação é uma técnica articulada chamada “Mapped Face Meshing” (malha de face mapeada). Este mapeamento tem a vantagem de corrigir

distorções causadas durante uma estimativa de malha. Então o elemento de alta ordem do tipo TET10 foi definido por tetraedros e eles foram utilizados para modelagem 3D, com o número de nós de 23.771 e 15.745 elementos. A malha utilizada é detalhada na figura 25 e o comprimento do strain gage é de 3 mm. Destaca-se que o CP possui as mesmas dimensões daquele utilizado em todos os testes deste trabalho e a simulação aqui empregada é a mesma que a utilizada em (GARCIA, 2014).

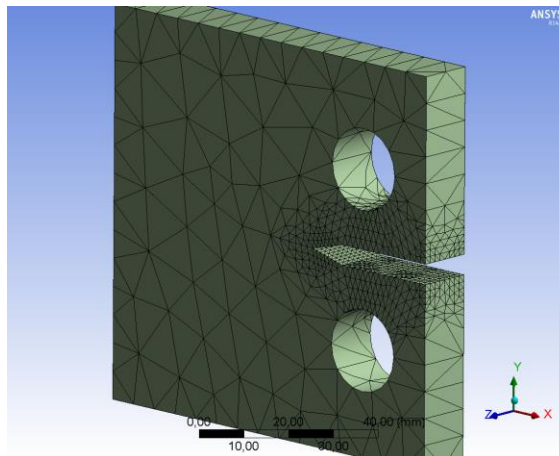


Figura 25: Malha utilizada na simulação pelo método de elementos finitos na amostra CT.

Além disso, ele possui um furo de 5 mm de diâmetro e 2,25 mm de profundidade, similar àquele feito na análise anterior, como é mostrado na figura 26.

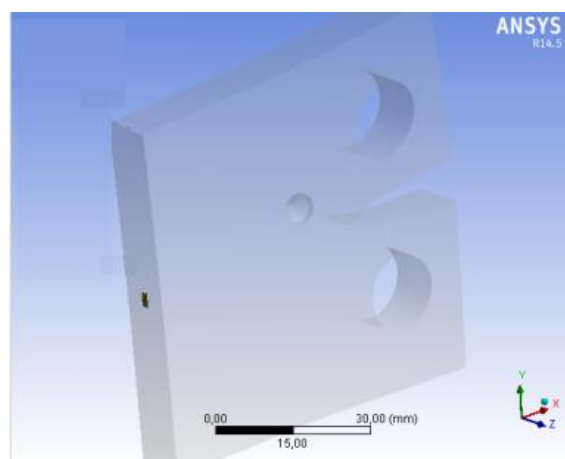


Figura 26: Posição do Strain gage e do furo com furo de 5 mm de diâmetro por 2,25 mm de profundidade.

3.2.6. AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA PASSAGEM DE CORRENTE ELÉTRICA UTILIZADA PELO DCPD, NO SISTEMA DE ENSAIO

Foram realizados ensaios para avaliar a influência da passagem de corrente elétrica utilizada pelo DCPD, no sistema de ensaio. Assim, o potencial eletroquímico era monitorado e, após um tempo suficiente para considerá-lo estacionário, a fonte de corrente do sistema de medição via DCPD era ligada, verificando se o potencial eletroquímico era influenciado pela referida passagem da corrente elétrica. Para tanto foi desenvolvido um software em plataforma LabView®, a fim de automatizar o processo, cujo sistema pode ser visualizado na figura 27, onde estão apresentados a forma de onda senoidal que respeita as recomendações da norma ASTM E647 (2011), os valores apresentados para os eletrodos de trabalho e referência, os valores de carga aplicada, o número de ciclos, o tamanho da trinca lido e outras informações e parâmetros relevantes.

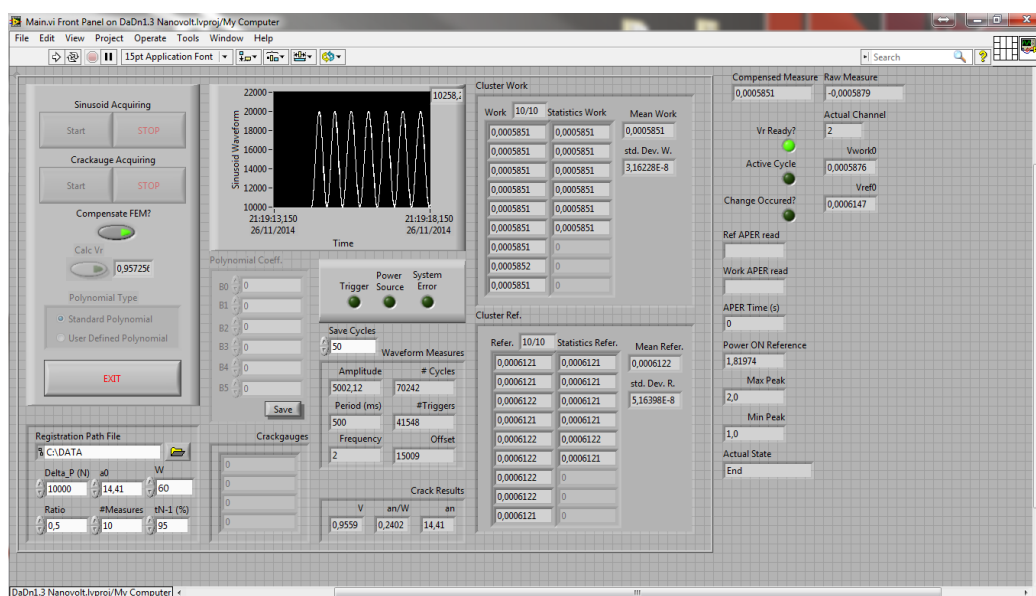


Figura 27: Tela capturada do software em funcionamento.

Para isso, utilizou-se um voltímetro de altíssima impedância ($\sim 10^{12}$ ohm) conectado em paralelo com o eletrodo de trabalho. Além disso, foram usados um eletrodo de referência eletroquímico (Fio de Hastelloy) e um eletrodo de referência para

normalizar o processo de corrosão e a temperatura, conforme recomendado pela norma ASTM E647. A foto deste ensaio pode ser visualizada na figura 28 e um esquema do sistema de funcionamento é apresentado na figura 29. A fonte e o voltímetro utilizados superam as recomendações da norma ASTM E647. A solução utilizada é descrita no item 3.1.2.



Figura 28: Ensaio da influência da passagem de corrente, através do método DCPD.

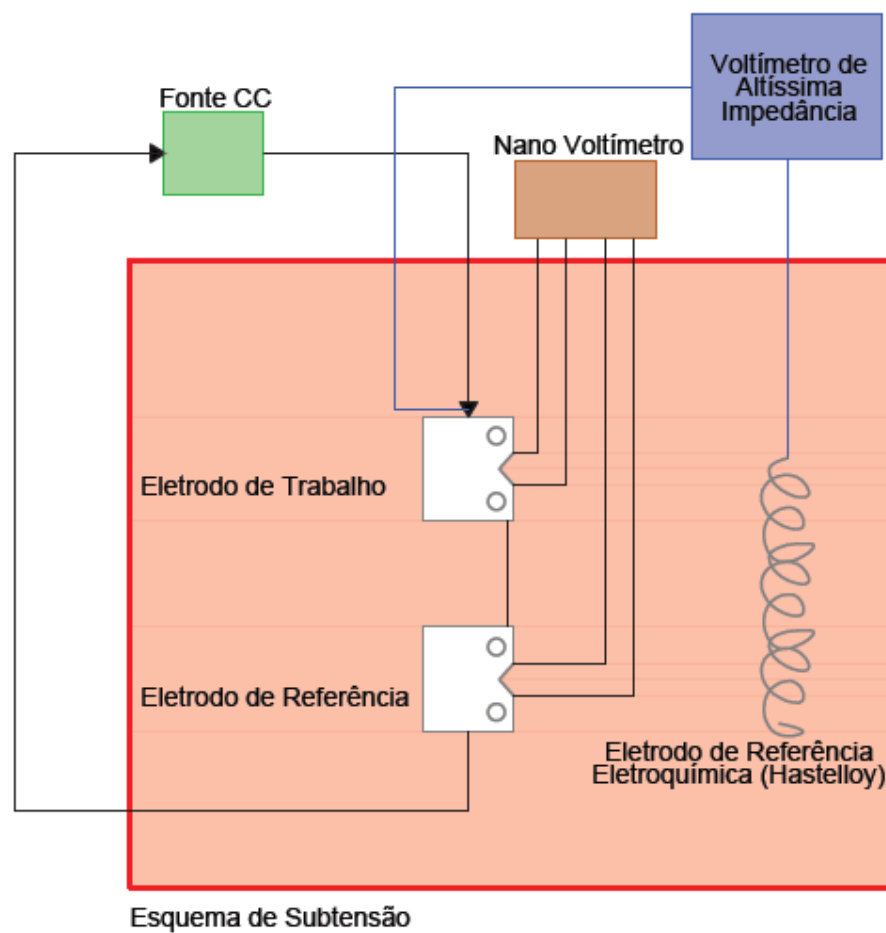


Figura 29: Esquema do Ensaio da influência da corrente, através da técnica DCPD.

3.2.7. ENSAIO DA INFLUÊNCIA DA PERMEAÇÃO POR HIDROGÊNIO NAS MEDIDAS DE BFS

Foi instalado um strain gage na face traseira de um corpo de prova em forma de disco. Aplicou-se o mesmo revestimento utilizado nos ensaios de corrosão fadiga via BFS, conforme pode ser visto na figura 30 (b). Após preparada a amostra, a mesma foi colocada em uma célula de Devanathan, cujo esquema é apresentado na figura 31. Trata-se de um ensaio de permeação por hidrogênio, bastante difundido na literatura. A ideia foi verificar se as deformações na amostra devido ao fenômeno de fragilização por hidrogênio iriam provocar deformações grandes o suficiente para que alterasse os valores

de deformação lidas pelo strain gage. Para tanto, submeteu-se a amostra a uma forte polarização catódica, do lado oposto do mesmo. A tabela 11 fornece os principais dados do ensaio.

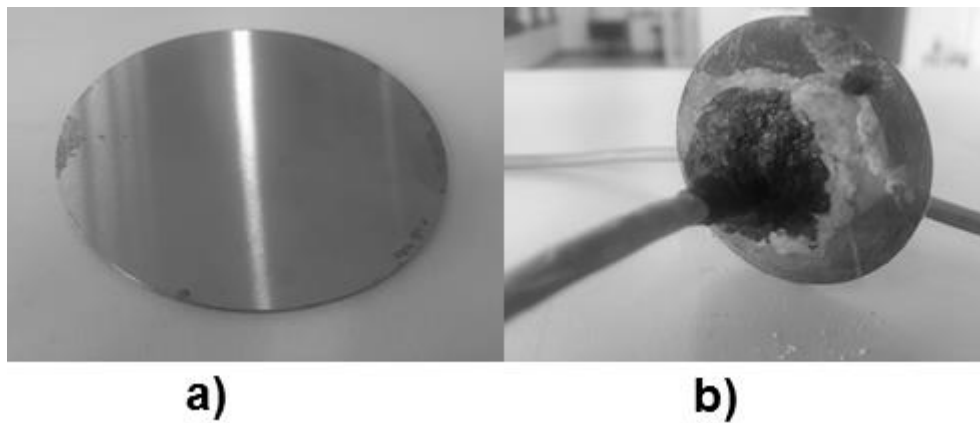


Figura 30: a) Amostra com 1mm de espessura antes da colagem do strain gage. b) Amostra com o strain gage após o ensaio de 4hs de permeação.

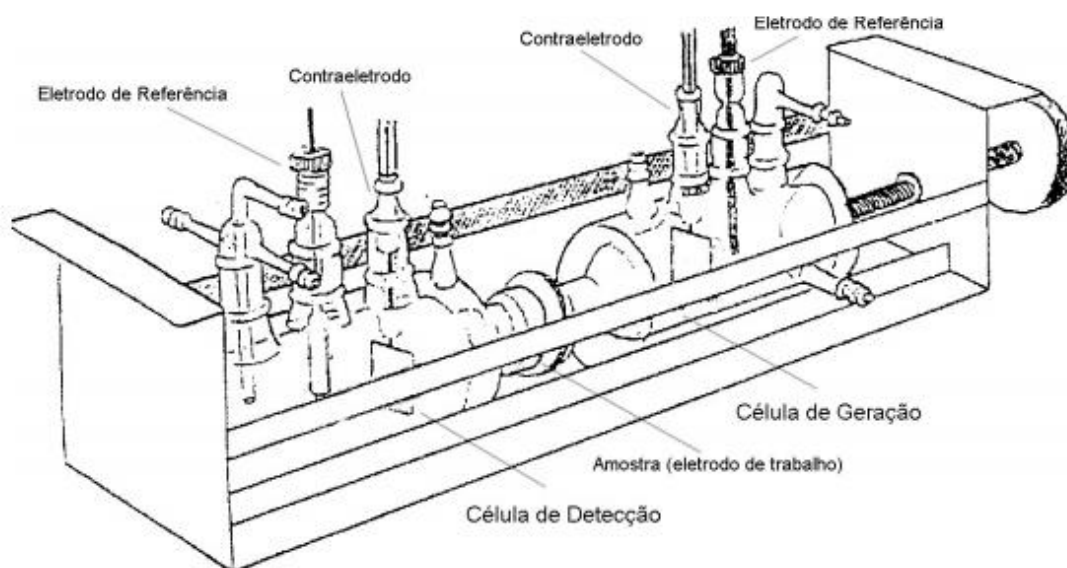


Figura 31: Célula de Permeação de Hidrogênio (VELASCO, 2007)

Tabela 11: Parâmetros do ensaio de Permeação por hidrogênio

Materiais:

Aço X70
Kit Resina HBM para auxiliar a integridade do sistema strain gage
Revestimento a base de Polinitrila
Meio de água do mar sintética

Equipamentos:

HBM MGC Plus
Software Catman®
Computador com processador Xeon

Corpo de Prova:

Área	5,0 cm ²
Diâmetro	1,6 mm
Espessura	1 mm

Potencial aplicado:

Catódico	1300 mV (ECS)
----------	---------------

3.2.8. COMPARAÇÃO DAS TÉCNICAS BFS E DCPD COM A NORMA BS 7910

Por fim, para comparação das técnicas de BFS e DCPD, (simultânea ou exclusivamente) com a Norma BS 7910, os procedimentos de preparação dos corpos de prova descritos anteriormente do item 3.2.1. ao 3.2.4. foram executados. Os equipamentos utilizados foram os especificados no item 3.1.4. e a leitura do comprimento de trinca, via DCPD e BFS foi feito através do software desenvolvido pelo LNDC em plataforma labview.

Para obtenção dos resultados desejados neste presente trabalho, foram realizados três ensaios. O primeiro somente com a utilização da técnica DCPD; o segundo fazendo

uso apenas do BFS; e o terceiro unindo as duas técnicas no mesmo ensaio. Os parâmetros utilizados para realização dos mesmos podem ser encontrados na tabela 12 e um esquema de montagem do ensaio pode ser visualizado na figura 32, onde se utilizou uma bomba para manter-se o sistema com pH praticamente constante, conforme já relatado no item 3.1.2.

Tabela 12: Tabela com os dados do Ensaio de corrosão Fadiga monitoradas por DCPD e BFS

Parâmetros dos Ensaio de Corrosão Fadiga	
ΔP constante	5800 N
Frequência de onda	0,2 Hz
$\Delta K_{inicial}$	~10 MPa
Razão R	0,5
Temperatura	20 ± 2 °C
[NaCl]	3%

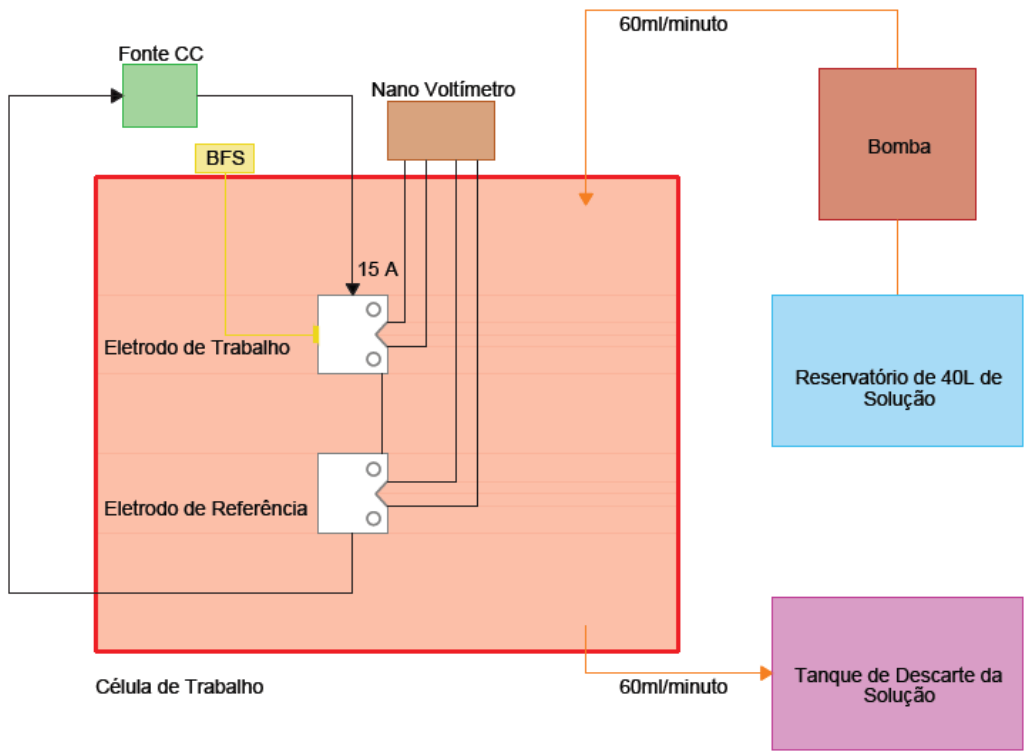


Figura 32: Esquema do sistema de ensaio com as técnicas DCPD e BFS, separadas e simultaneamente.

O objetivo foi corroborar se há influência da passagem de corrente elétrica, oriunda da técnica DCPD, na medição da velocidade de propagação de trinca por corrosão

fadiga. Para tanto a norma BS 7910 foi utilizada como referência, pois, por se tratar de um aço ferrítico com o limite de escoamento inferior a 600 N/mm^2 em $T=20^\circ\text{C}$ e meio de NaCl 3%, tal comparação é possível através da análise da Tabela 5, contida na mesma. Os dados de ensaio experimental das técnicas DCPD e BFS foram tratadas através da utilização das Equações 13 e 14, anteriormente expostas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, serão apresentados os resultados e as discussões acerca dos ensaios de corrosão fadiga e as simulações feitas e descritas anteriormente.

4.1. AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE CORROSÃO LOCALIZADA SOBRE A TÉCNICA DE DCPD

Endentações

O CP foi submetido inicialmente a uma leitura da queda de potencial, correlacionada com o comprimento de trinca. Os valores em *stand by* obtidos foram de 0,5837 mV (trabalho) 0,6109 mV (referência), conforme apresentado na tabela 13.

Tabela 13: Tensões de trabalho e referência ao longo do teste.

	V_{trab}	V_{ref}
Stand by	0,5837 mV	0,6109 mV
Após 30 min	0,5851 mV	0,6124 mV
Após as endentações	0,5850 mV	0,6120 mV

Verifica-se por meio desta tabela que houve mudanças de valores de tensão após 30 min tanto no CP de referência como no de trabalho, o que é um forte indício de ações da temperatura. Estas variações acarretaram uma oscilação de cerca 100µm de comprimento de trinca, ao utilizar a equação 13, o que não é tão significativo, uma vez que não houve um controle extremamente preciso de temperatura dos corpos de prova, particularmente nestes testes.

Uma limitação da utilização das endentações, para simular severos casos de corrosão localizada, está no fato de que tal metodologia não representaria bem tais

fenômenos, uma vez que ela não provoca perda considerável de material. Sendo assim, não houve mudança significativa da queda de potencial em ambos os eletrodos, conforme a tabela 13. Então foi escolhida outra metodologia para o ensaio de simulação do fenômeno da fragilização de corrosão localizada.

Furos

Nesta avaliação, retirou-se massa do CP por meio de furos e os ensaios realizados apresentaram resultados mais satisfatórios que o anterior, como podem ser vistos na tabela 14 e na figura 33.

Tabela 14: Tensões de trabalho e referência e comprimento de trinca ao longo do teste.

	V_{trab}	V_{ref}	a_n
Sem furo	0,585 mV	0,612 mV	14,41 mm
1º furo	0,603 mV	0,610 mV	15,64 mm
2º furo	0,606 mV	0,610 mV	15,82 mm

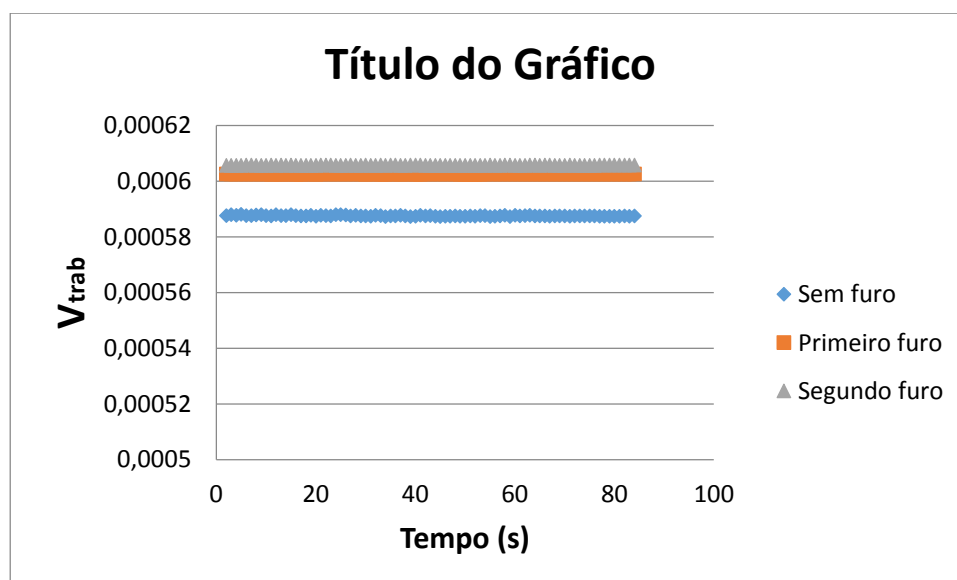


Figura 33: Curva de comparação entre as queda de potencial no CP de trabalho nos três ensaios (sem furo, após o primeiro furo e após o segundo furo).

A partir dos dados encontrados, verificou-se que uma única cavidade poderia gerar erros de leitura de trinca por fadiga com mais de 1 mm de diferença, o que acarretaria em erros elevados, de mais de 10% dependendo das dimensões geométricas. Uma análise da medida da queda de potencial também permite a constatação de uma alteração com a inserção do primeiro furo. Precisamente, a queda de potencial de trabalho mudou de 0,585mV para 0,603mV, ao passo que a medida de queda de potencial no corpo de prova de referência ficou praticamente inalterada. Este fato necessariamente implica um erro de medição de trinca bastante acentuado.

Por outro lado, a inserção do segundo furo não resultou em grandes alterações na tensão de trabalho. A explicação para isso talvez esteja na distância entre o furo e a trinca. Outra possível resposta seria o fato de que a presença de um único furo já provocaria erros consideráveis na medição de trinca.

4.2. AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE CORROSÃO LOCALIZADA SOBRE A TÉCNICA DE BFS

Foi colocado um CP sem furo com trinca de 12 mm, o qual foi submetido a um monitoramento da trinca com um delta $P=4000N$. A trinca medida (por simulação, em função da compliance determinada) foi de 12,03 mm, o que é bem próxima da trinca original, a qual mede 12,00 mm. Em seguida, furou-se o CP, semelhantemente à simulação descrita anteriormente. Imagens desta simulação podem ser vistas na figura 34.

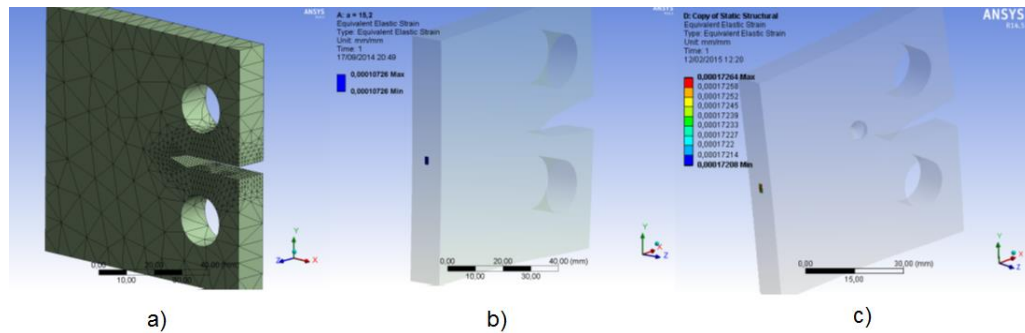


Figura 34: (a) Malha utilizada na simulação pelo método de elementos finitos na amostra CT. (b) Strain Gage com 3mm de comprimento. (c) Simulação pelo método de elementos finitos na amostra CT com furo de 6 mm de diâmetro por 4 mm de profundidade.

Por meio desta simulação, aliada à equação 14, obtêm-se os resultados que são apresentados na tabela 15, sendo o tamanho de trinca medido pela técnica de BFS de muito próximo do valor sem o furo, a saber, 12,07 mm. Isso é capaz de mostrar que a técnica de compliance possui sensibilidade relativamente baixa com relação a furos fora do plano da trinca, os quais poderiam ser causados por severa corrosão localizada.

Tabela 15: Resultados obtidos na simulação

	Sem furo	Com furo
Inclinação (compliance)	$5,575628 \cdot 10^{-7}$	$5,984353 \cdot 10^{-7}$
A solid Work E(eW)B/P	70,252914	75,402844
U	0,106590	0,103268
a (equação de Newman)	12,03 mm	12,07 mm

4.3. AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA PASSAGEM DE CORRENTE ELÉTRICA UTILIZADA PELO DCPD, NO SISTEMA DE ENSAIO

Como foi utilizado um voltímetro de altíssima impedância ($10^{12} \Omega$), esperou-se que não ocorresse passagem significativa de corrente elétrica por um caminho alternativo ao do sistema de DCPD. Contudo, observou-se um indício de sobretensão catódica consideravelmente elevada, da ordem de 200 mV, a qualquer momento em que a fonte de

tensão do DCPD fosse ligada com 15 A de corrente pulsada, conforme mostrado no gráfico da figura 35 (após tempo superior a 7000 segundos).

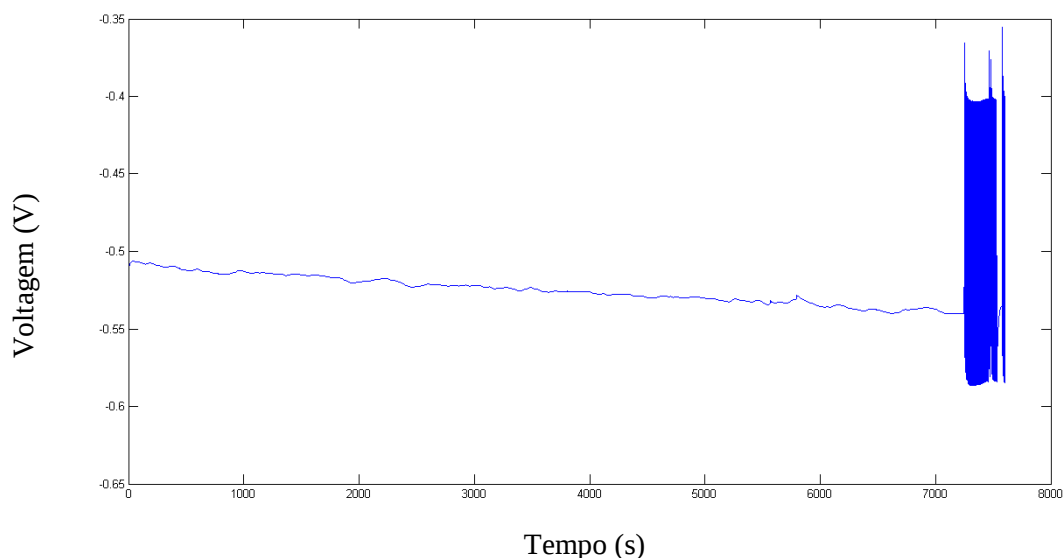


Figura 35: Gráfico da influência da corrente no ensaio de DCPD

Diante deste resultado, poderia se chegar a uma conclusão equivocada de que o sistema DCPD geraria uma considerável sobretensão, o que consequentemente provocaria erros significativos na taxa de propagação de trinca. Para obtenção de uma leitura eficiente da medição do comprimento da trinca por corrosão fadiga, basta essencialmente, que se tenha uma curva de calibração acurada. Entretanto, a velocidade de propagação da/dN pode ser influenciada pela passagem de corrente, conforme relatado na referência (ANDRESEN, 1996). Contudo, por inspeção visual, concluiu-se que tal polarização de 200 mV estaria relacionada a um problema elétrico, em vez de eletroquímico, já que não houve desprendimento de gás hidrogênio, característico de uma sobretensão eletroquímica desta magnitude.

Para corrigir esse problema, checaram-se os aterramentos e os isolamentos e não foram encontrados indícios de ineficiência em quaisquer deles. Todos os pinos foram revestidos por PVD (Physical Vapor Deposition) e ainda foram utilizadas buchas de

material cerâmico (Zircônia), garantindo total proteção elétrica e à corrosão. As garras foram revestidas por polifluoreto para obtenção de resistência à corrosão.

Em suma, a possibilidade de haver uma polarização não foi descartada. Entretanto o sistema utilizado não se demonstrou adequado para esta comprovação, assim sendo, uma sugestão seria confirmar esta hipótese em trabalhos futuros.

4.4. ENSAIO DA INFLUÊNCIA DA PERMEAÇÃO POR HIDROGÊNIO NAS MEDIDAS DE BFS

Inicialmente, observou-se o ensaio por 30 minutos e verificou-se que a variação no sistema de medição no software Catman® foi na ordem da quarta casa decimal no strain gage. Em seguida aplicou-se uma polarização catódica de 1300 mV, por quatro dias seguidos, provocando uma considerável redução da água e formando hidrogênio, conforme pode ser visto na figura 36, ressaltando que os aspectos termodinâmicos neste diagrama já são bastante conhecidos na literatura. Uma observação importante é que, neste diagrama, o potencial se encontra relacionado ao eletrodo de hidrogênio, sendo que neste trabalho foi utilizado o de hastelloy.

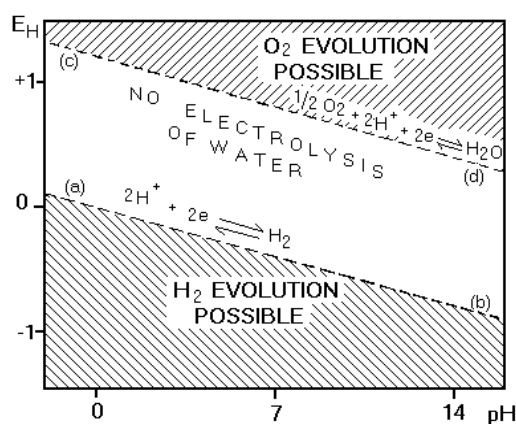


Figura 36: Diagrama de Pourbaix (ANDERSON, 2005)

Assim, esperava-se que após a referida polarização, fossem verificadas deformações consideráveis no strain gage, devido ao processo de permeação. A tabela 16 e o gráfico da figura 37 apresentam os resultados obtidos.

Tabela 16: Resultados do ensaio de Permeação por hidrogênio

Amostra polarizada por 4 dias	
Potencial Aplicado	- 1300 mV
Duração do Ensaio	96 h
Deformação total	6,4 μm

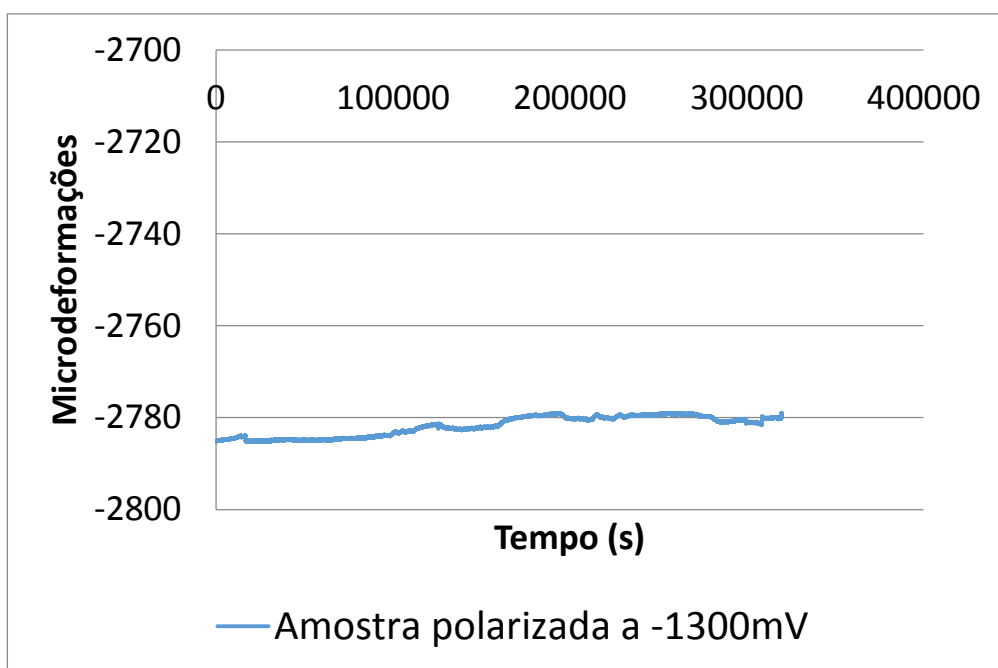


Figura 37: Micro deformações da amostra polarizada por 4 dias.

Por meio do gráfico, verificamos que as deformações encontradas estiveram sempre no máximo até a quarta decimal, o que significa que são desprezíveis, já que essas variações foram comuns até mesmo antes da polarização do material. Em suma, a variação máxima obtida no decorrer do ensaio correspondeu à 6,4 μm por um período de 4 dias. Ressalta-se que tal variação não tem nenhuma influência nos ensaios de corrosão fadiga, uma vez que a equipe de Fadiga do LNDC (GECORF) já havia constatado

experimentalmente que valores de deformação lidas pelo strain gage colocado na face traseira do corpo de prova C(T) inferiores a 10^{-4} são apenas ruído.

Cabe ainda ressaltar que o ensaio aqui realizado é muito conservativo, uma vez que o corpo de prova utilizado não representa o campo de tensões do tipo C(T), utilizado nos demais ensaios deste trabalho, além de possuir espessura extremamente pequena o que facilitaria em muito o tempo de difusão do hidrogênio. Existem trabalhos na literatura (ANDRESEN, 1996) que mostram que o hidrogênio tende a se acumular na região próxima ao entalhe, região compreendida pela zona plástica monotônica o que protegeria as regiões próximas ao BFS de sofrer deformações devido ao fenômeno de fragilização por hidrogênio.

4.5. COMPARAÇÃO DAS TÉCNICAS BFS E DCPD COM A NORMA BS 7910

Os resultados obtidos através dos ensaios com o uso das Técnicas DCPD, BFS e ambas simultaneamente foram comparados com os da Norma BS 7910, conforme exposto na Metodologia. Vale ressaltar que os gráficos obtidos por meio da norma são oriundos de um banco de dados que permite traçar uma curva de $da/dN - \Delta K$, capaz de abranger diversos materiais de determinadas características em comum.

Técnica DCPD

A figura 38 compara os resultados de DCPD com a Norma BS 7910. Por meio destes resultados, verifica-se que houve uma tendência da curva experimental se aproximar da curva BS 7910 com proteção catódica de 850 mV. Isto seria um indício de que haveria, de fato, uma polarização catódica causada pela passagem de corrente,

conforme se tentou quantificar no item 4.2, contudo sem obtenção de sucesso, como já relatado.

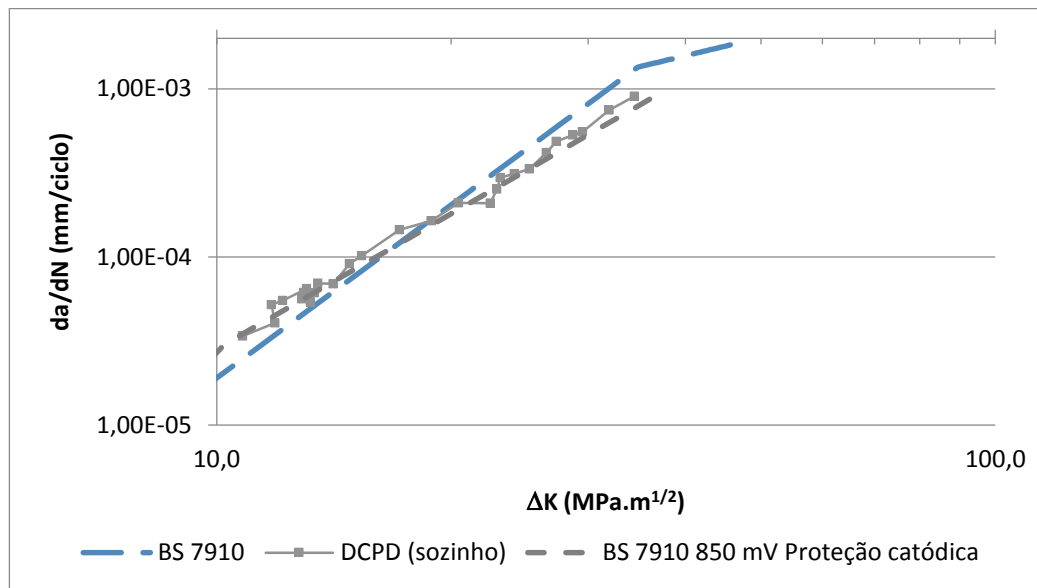


Figura 38: Curva de comparação entre os resultados da técnica DCPD e da norma BS 7910

Técnica BFS

A figura 39 compara os resultados do BFS com a Norma BS 7910. Através do gráfico, pode-se perceber que a tendência da curva experimental, desta vez, foi de se aproximar da curva BS 7910 sem proteção catódica, conforme seria o ideal, de acordo com a norma. Isto mostra um conflito entre as medições das mesmas, levando à conclusão de que uma das duas apresentaria resultados de taxa de crescimento de trinca influenciado por seu princípio de funcionamento. Um fato curioso é que a precisão de leitura de trinca de ambas é extremamente elevada, fato este que não se repetiu na medição da velocidade de propagação das mesmas.

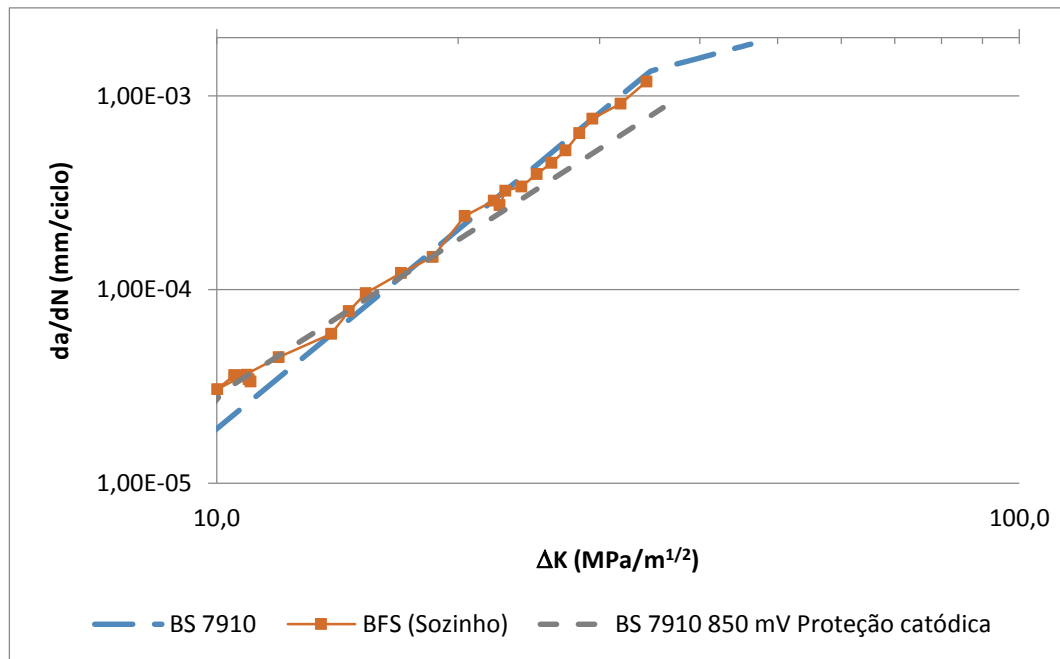


Figura 39: Curva de comparação entre os resultados da técnica BFS e da norma BS 7910

Técnica DCPD (simultaneamente ao BFS)

Através da análise da figura 40, que contém os resultados do ensaio de DCPD simultaneamente com o de BFS comparado à Norma BS 7910, pode-se constatar o mesmo de quando o DCPD foi testado sozinho. Verifica-se a mesma tendência da curva experimental de se aproximar da curva BS 7910 com proteção catódica de 850 mV, ao invés da curva BS 7910 sem a proteção, conforme diz a norma para aços ferríticos e com limite de escoamento menor que 600 MPa. Isto mais uma vez mostra uma possível polarização catódica causada pela passagem de corrente.

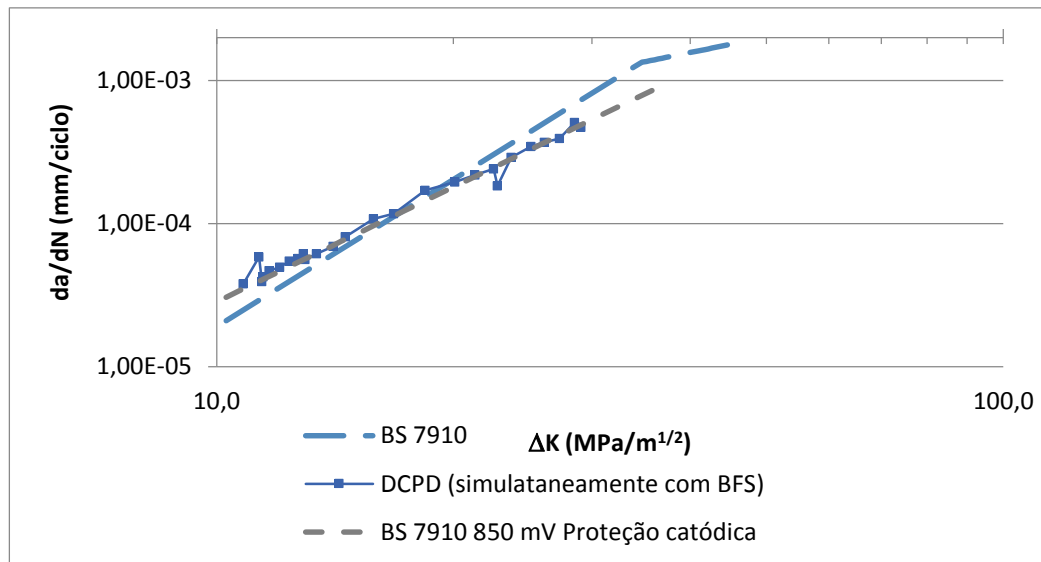


Figura 40: Curva de comparação entre os resultados da técnica DCPD (simultaneamente ao BFS) e da norma BS 7910

Ainda nesta etapa, comparou-se a precisão de ambas as técnicas, similarmente ao que já foi abordado na tabela 1 (revisão bibliográfica). Valores semelhantes foram obtidos, a saber, aproximadamente 30 μm e 70 μm respectivamente para o BFS e o DCPD, o que implica em um menor tempo de obtenção de dados de da/dN na região próxima ao limiar ao se utilizar a técnica de BFS.

Técnica BFS (simultaneamente ao DCPD)

Neste caso, a figura 41 mostra que a técnica do BFS quando utilizada ao mesmo tempo em que o DCPD também pode ser afetada pela passagem de corrente. Comparando-se com a Norma BS 7910, percebe-se que, desta vez, o BFS se aproximou da curva BS 7910 com proteção catódica, ao contrário do ensaio com BFS sozinho. Mais uma vez, os resultados indicam que a passagem de corrente na técnica DCPD é capaz de afetar as medidas de ensaio.

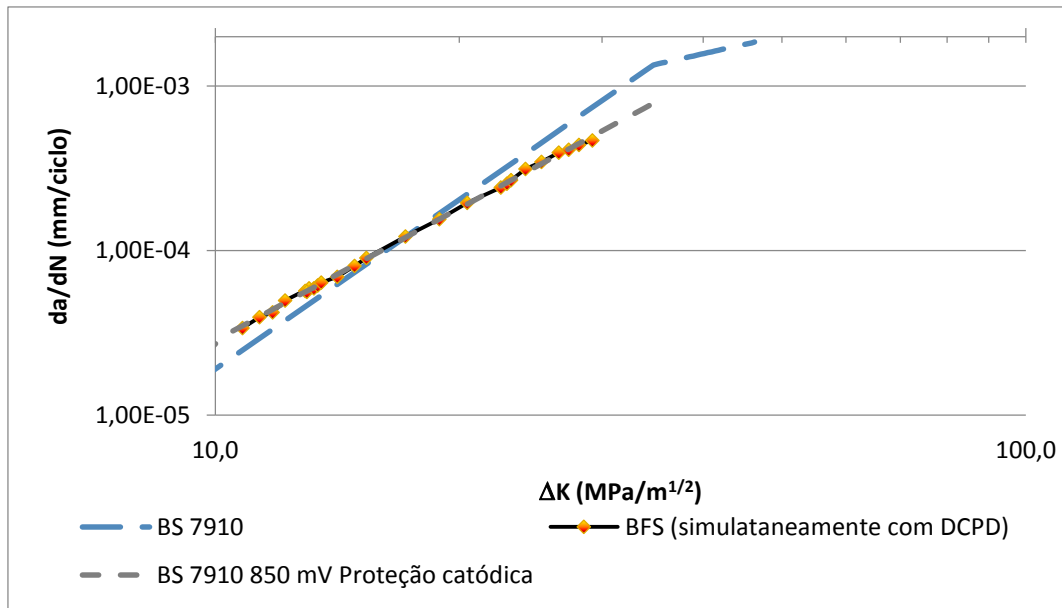


Figura 41: Curva de comparação entre os resultados da técnica BFS (simultaneamente ao DCPD) e da norma BS 7910

5. CONCLUSÃO

Enfim, após os resultados obtidos e de uma comparação entre ambas as técnicas aqui estudadas, podemos concluir que a utilização da técnica de BFS para ensaios de corrosão fadiga é de fato viável.

Algumas desvantagens da técnica de DCPD em relação à técnica de BFS foram verificadas ou corroboradas neste trabalho, tais como:

- Influência nas medidas das taxas de propagação de trinca (da/dN) em meio NaCl (3%), devido à passagem de corrente.
- O fenômeno de corrosão localizada pode gerar consideráveis erros tanto na leitura de comprimento de trinca, quanto na obtenção da taxa de propagação de trinca por fadiga.
- Dificuldade de leitura do potencial eletroquímico da interface, devido à complexidade elétrica que pode haver no sistema de corrosão fadiga, ao utilizar a técnica de DCPD.

Além disso, o BFS apresentou vantagens, tais como:

- Ele se mostrou adequado a ser utilizado em meios suscetíveis à corrosão localizada e até mesmo em condições sujeitas à fragilização por hidrogênio.
- Menor tempo de obtenção de dados de da/dN na região próxima ao limiar.

6. REFERENCIAS

- ANDERSON, T.L., *Fracture mechanics: fundamentals and applications*, 2ª ed., New York, CRC Press, 1995
- ANDRESEN, P.L., “Corrosion Fatigue Testing”, *GE Corporate Research & Development*, 1996
- ASM HANDBOOK, *Fatigue and Fracture*, vol. 19, Materials Park, ASM International, 1996
- ASM SPECIALTY HANDBOOK, *Aluminum and aluminum alloys in aluminum-lithium alloys*. Ohio, ASM International, 1993
- ASTM E1823-96, American Standards of testing materials international: *Standard Terminology Relating to Fatigue and Fracture Testing*, ASTM International, 2002
- ASTM E647, American Standards of testing materials international: *Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates*, ASTM International, 2011
- BASTIAN, F.L., *Aplicação da Mecânica da Fratura à Fadiga – Possibilidade e Limitações*, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1994
- BOES, N., ZÜCHNER, H. “Electrochemical methods for studying diffusion, permeation and solubility of hydrogen in metals”, *Journal of the Less Common Metals*, v. 49, 1976
- BROWN, B. F., “The Application of Fracture Mechanics to Stress-Corrosion Cracking”, *Metals and Materials and Metallurgical Reviews*, vol. 2, nº 12, 1968
- BS 7910, *Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures*, British Standard, 1999

- BUGAEV et al., “Mechanism of hydrogen – induced phase transformations in metals and alloys”, *International Journal of Hydrogen Energy*, V. 22, N.2/3, 1997
- COSTA, L. R. O., *Susceptibilidade à fragilização pelo hidrogênio da junta soldada do aço 2,25Cr-1Mo*, Tese de M.Sc., Programa de Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COOPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2011
- DEAN, W.F.; RICHARD; C.E., “A simple and sensitive method of monitoring crack and load in compact fracture mechanics specimens using strain gages”, *J Test Eval*, 1979
- DEVANATHAN ,M. A.V.; STACHURSKI , Z., "The Adsorption and Diffusion of Electolytic Hydrogen in Palladium", *Proceedings of the Royal Society of London*, vol. 270, 1962
- DIETER, G. E. – *Metalurgia Mecânica*, 2a ed., Guanabara Koogan, Rio de Janeiro – 1981
- DUTRA, A.C. e NUNES, L.P., *Proteção catódica - Técnica de combate à corrosão*, Rio de Janeiro, Editora Técnica, 1987
- FILHO, N. N. A., *Estudo da Influência do Meio Corrosivo na Resistência à Fadiga do Aço Estrutural SAE 8620*, Tese de M.Sc., Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2006
- FONTANA, M. G., GREENE, N. D., *Corrosion engineering*, 2ª ed., New York, McGraw-Hill, 1978
- FRANCISCO, J. C. S., *Avaliação da tenacidade à fratura de aço API 5L X70 utilizado na fabricação de dutos transportadores de gás e petróleo*, Tese de M.Sc., Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil, 2009

- GARCIA, R. R. A.; BESERRA, A.; DIAS, D. P.; ASSIS, K. S.; MATTOS, O. R., “Back-face strain compliance relation for SEN (B) specimens for wide range in crack lengths”, *NACE*, 2015
- GENTIL, V., *Corrosão*, 4ª ed., Rio de Janeiro, LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S/A, 2003
- GODOY, J.M., CAVALHEIRO, B.C., PEREIRA, M.S., “Avaliação da fissuração por fadiga em tubos durante transporte marítimo”, *Soldagem e Inspeção*, vol.15 nº 1, São Paulo, 2010
- HERTZBERG, R.W., *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials*, 4ª ed., Wiley, 1996
- HILLEBRAND, H.G.; HECKMANN, C.J.; NIEDERHOFF, K.A., “X80 linepipe for large-diameter high strength pipelines”, In: *Annual Conference x80 pipeline workshop*, Rottingen, Europipe. EP-TP47-02, 2002
- HOLTUM, C., *Structural Integrity Assessment of C-Mn Pipeline Steels Exposed to Sour Environments*, Tese de D. Sc., Loughborough University, Cambridge, UK, 2010
- ISO GUM, Evaluation of measurement data: *Guide to the expression of uncertainty in measurement*, JCGM, 1995
- JOHNSON, H. H., *Fracture*, vol. III, Liebowitz, Academic Press, 1971
- LIMA, A.S., *Controle por aprendizagem iterativa e controle repetitivo para máquinas de ensaio de fadiga*, Tese de M. Sc., Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2014
- MAKHLOUF, K.; SIDHOM, H.; TRIGUIA, I.; BRAHAM, C. “Corrosion fatigue crack propagation of a duplex stainless steel X6 CrNiMoCu25-6 in air and in artificial sea water”, *International Journal of Fatigue*. v. 25, 2003

- MEYERS, M.A; CHAWLA, K.K. *Princípios de metalurgia mecânica*, São Paulo, Edgard Blücher, 1982
- NEWMAN JR, J.C.; YAMADA, Y.; JAMES, M.A., “Back-face strain compliance relation is compact specimens is wide range in crack lengths”. *Nasa Publications*, vol. 72, 2010
- PARIS, P.C.; GOMEZ, M.P.; ANDERSON, W.E. “A rational analytic theory of fatigue”, *The Trend in Engineering*, vol. 13, 1961
- PEREZ, N., *Fracture Mechanics*, Kluwer Academic Publishers, 2004
- PREVEY, P.; CAMMET, J., “The influence of surface enchancement by low plasticity burnishing on the corrosion fatigue performance of AA7075-T6”, *Int J Fatigue*, vol. 26, 2004
- RASTOGI, Rohit. “An introduction to BS 7910: The UK guide on methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures” *Indian Nuclear Society – Lecutres on Welding, NDE and Integrity Assessment*, Mumbai, Lecture number 19b, 2006
- *Reactions*, 3^a ed., v.1, Houston, Butterwort-Heinemann, 2000
- REVIE, R. W. *Uhlig`s Corrosion Handbook. Electrochemical Society Series*. 2^a ed. New York, John Wiley & Sons, 2000
- RIDDELL, W.T.; PIASCIK, R.S., “A back face strain compliance expression for the compact tension specimen”. *NASA TM-208453*, 1998
- ROCHA, R.S., *Avaliação do alívio mecânico de tensões residuais devido a sobrecarga provocada por teste hidrostático*, Tese de M.Sc., Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM, Porto Alegre, RS, Brasil, 2009

- RUCHERT, C.O.F.T., *Estudo da Inferência de carregamento em histórias de vôos simulados na liga de Al aeronáutico SAE-MAS 7475 T7351*, Tese de D.Sc., Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil, 2007
- SCHIJVE, J., *Fatigue of Structures and Materials*, Kluwer, 2001
- SHI, P.; MAHADEVAN, S., "Corrosion Fatigue and Multiple Site Damage Reliability Analysis," *International Journal of Fatigue*, Vol. 25, nº. 6, 2003
- SHREIR, L. L.; JARMAN, R. A.; BURSTEIN, G. T. *Corrosion: Corrosion Control*. 3ª ed., v.2, Houston, Butterworth-Heinemann, 2000
- SHREIR, L. L.; JARMAN, R. A.; BURSTEIN, G. T. *Corrosion: Metal/Environmental*
- SURESH, S., *Fatigue of materials*, 2ª ed., Cambridge, Cambridge University Press, 1998
- TORRES, L. F. L., *Influência da microestrutura na interação do hidrogênio com o aço 2,25Cr-1Mo Envelhecido*, Tese de D.Sc., Programa de Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COOPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2011
- VELASCO, J.A.C., *Interação do hidrogênio com filmes passivos na célula eletroquímica de permeação*, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007
- YANG, Q.; LUO, J.L., "Martensite transformation surface crackinf of hydrogen charged an outgassed type 304 stainless steel", *Materials Science and Enginering A*, v.288, 2000