



PROJETO DE GRADUAÇÃO

AVALIAÇÃO DA TAXA DE PROPAGAÇÃO DE TRINCAS EM CORPOS DE PROVA UTILIZANDO A TÉCNICA DE MEDIÇÕES DA DEFORMAÇÃO DA FACE TRASEIRA.

Por:

Antônio Julien Bertin Robert Koffi N'Guessan

Brasília, 17 de dezembro de 2014

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica

PROJETO DE GRADUAÇÃO
AVALIAÇÃO DA TAXA DE PROPAGAÇÃO DE
TRINCAS EM CORPOS DE PROVA
UTILIZANDO A TÉCNICA DE MEDIÇÕES DA
DEFORMAÇÃO DA FACE TRASEIRA

POR:

Antônio Julien Bertin Robert Koffi N'Guessan

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheiro Mecânico.

Banca Examinadora

Prof. Jorge Luiz de A. Ferreira, UnB/ENM (Orientador)

Profa. Aida Alves Fadel, UnB/ ENM

Prof. Thiago de Carvalho R. Doca, UnB/ ENM

Brasília, 17 de dezembro de 2014

Dedicatória

*Dedico este trabalho em especial a minha mãe
que sempre acreditou e lutou para que esse
sonho se tornasse realidade.*

“Sonhos determinam o que você quer. Ação
determina o que você conquista” - Aldo Novak

Antônio Julien Bertin Robert Koffi N'Guessan

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus que está acima de tudo e de todos e que sem Ele nada disso seria possível, juntamente com minha mãe do céu Maria que sempre está ao meu lado vigiando meus passos.

Agradeço à minha mãe, Maria de Jesus, pela presença em todas as etapas da minha vida, me apoiando e incentivando de todas as formas possíveis para que esse dia chegasse, e sem ela este projeto não seria possível, sendo para mim exemplo de pessoa honesta, gentil, educada, prestativa, e vários outros adjetivos que não caberiam aqui. Também a todos os meus familiares pelo apoio.

Agradeço a meu avô que não está mais ao meu lado, mas que foi como um pai durante minha vida inteira e ficaria honrado em presenciar esse momento.

Agradeço aos professores e técnicos da UnB por terem contribuído de maneira significativa na minha formação profissional e moral, dedicando seu tempo e esforço, de forma especial ao professor Jorge, pois como orientador e amigo estive sempre presente em todos os momentos em que precisei.

Agradeço a minha linda namorada Elisa Raquel e seus familiares pelo apoio e orações e todos os meus amigos que de alguma forma tornaram esse sonho possível, em especial quero citar (Raoni, Lúcio, Daniel, Rafaga, Débora, Mauro, Marcos, Alexandre, Thamise, Bráulio) que me acompanharam nesse curso e na minha vida acadêmica, sei que todos eles foram essenciais para que eu chegasse até aqui.

Antônio Julien Bertin Robert Koffi N'Guessan

RESUMO

O presente projeto consiste em medições experimentais do comprimento da trinca em corpos de prova do tipo CT fabricados em aço ASTM A743 CA6NM. Este estudo foi feito implementando uma técnica ainda não normatizada quando submetidos a ensaios segundo a norma ASTM E647. A técnica conhecida como monitoração das deformações na face traseira (MDFT) analisa as deformações na face oposta à abertura do entalhe do corpo de prova, através de extensômetros, e serve para prover um método de medição da trinca quando a força é conhecida ou de medição da força quando o comprimento da trinca é conhecido. A validação do método de deformação da face traseira é feita comparando-se com os resultados do método de deslocamento da abertura da trinca (COD). Pretende-se utilizar os resultados obtidos através de ensaios para estabelecer um conjunto de procedimentos experimentais a serem utilizados no Laboratório de Ensaios Mecânicos da UnB.

Palavras Chave: *face traseira, abertura da trinca, extensômetro.*

ABSTRACT

This project consists of experimental measuring of the crack length on CT type specimens fabricated in ASTM A743 CA6NM steel, implementing a technique still not standardized when subjected to tests in accordance with ASTM E647. The technique known as back face strain (BFS) analyzes the strain on the opposite side of the specimen notch opening, by strain gauges, and has the objective to provide a crack measuring method when the force is known or force measurement when the crack length is known. The validation of the back face method is done by comparing with the results obtained with the crack-opening displacement (COD) method. The aim is to use the results obtained from tests to establish a set of experimental procedures to be used in the Mechanical Testing Laboratory of UnB.

Keywords: *back face, crack opening, strain gage.*

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 17 |
| 1.1 | TEMA | 17 |
| 1.2 | MOTIVAÇÃO | 18 |
| 1.3 | OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS | 18 |
| 1.4 | ESTRUTURA DO TRABALHO | 19 |
| 2 | MECÂNICA DA FRATURA | 20 |
| 2.1 | O PROCESSO DE FADIGA | 20 |
| 2.2 | PROBLEMAS E FALHAS RESULTANTES DO PROCESSO DE FADIGA | 21 |
| 2.3 | ASPECTOS HISTÓRICOS DA MECÂNICA DA FRATURA | 24 |
| 2.4 | CONCENTRADORES DE TENSÃO | 25 |
| 2.5 | MODOS DE ABERTURA DE TRINCA | 27 |
| 2.6 | FATOR DE INTENSIDADE DE TENSÃO | 27 |
| 2.7 | TENACIDADE À FRATURA | 29 |
| 2.8 | PROPAGAÇÃO DE TRINCAS POR FADIGA | 30 |
| 2.8.1 | Diagrama de crescimento de trinca por fadiga | 31 |
| 2.8.2 | Influência da razão de carregamento sobre a curva da/dN versus ΔK | 33 |
| 2.9 | MÉTODO CTOD (MÉTODO DE MEDIÇÃO DO DESLOCAMENTO DA ABERTURA DA TRINCA) | 34 |
| 2.10 | MÉTODO CMOD (CRACK MOUTH OPENING DISPLACEMENT) | 36 |
| 2.11 | MÉTODO DE DEFORMAÇÃO DA FACE TRASEIRA (<i>BACK FACE STRAIN</i>) | 36 |
| 2.11.1 | O método | 36 |
| 2.11.2 | Evolução histórica | 37 |
| 2.11.3 | Normas | 38 |
| 2.11.4 | Vantagens do método | 38 |
| 2.11.5 | Modelos propostos pela literatura e dados de <i>Compliance</i> | 40 |
| 3 | METODOLOGIA DOS ENSAIOS DE PROPAGAÇÃO DE TRINCAS | 47 |
| 3.1 | INFORMAÇÕES GERAIS SOBRE A NORMA E647 | 47 |
| 3.1.1 | Corpo de Prova | 47 |
| 3.1.2 | Entalhe e pré-trinca | 48 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3.2 | APARATOS EXPERIMENTAIS | 49 |
| 3.2.1 | Variáveis do ensaio..... | 50 |
| 3.2.2 | Critérios de validação..... | 51 |
| 3.2.3 | Análise dos dados observados | 52 |
| 3.2.4 | Limiar de propagação | 53 |
| 3.2.5 | Técnicas de redução de dados | 53 |
| 4 | METODOLOGIA | 54 |
| 4.1 | INTRODUÇÃO | 54 |
| 4.2 | MATERIAIS E MÉTODOS | 54 |
| 4.2.1 | Características do Material..... | 54 |
| 4.2.2 | Corpo de prova | 55 |
| 4.2.2.1 | Lixamento | 56 |
| 4.2.2.2 | Polimento | 57 |
| 4.2.2.3 | Marcação..... | 59 |
| 4.2.3 | MTS (Material Testing System) | 59 |
| 4.2.3.1 | Ensaio de Propagação de Trincas por Fadiga – ASTM E647 | 62 |
| 4.2.4 | Extensômetros..... | 63 |
| 4.2.4.1 | Tipo | 63 |
| 4.2.4.2 | Teste | 64 |
| 4.2.4.3 | Colagem, Balanceamento e Soldagem dos Extensômetros | 64 |
| 4.2.4.4 | Sistema de Aquisição de Dados..... | 64 |
| 5 | METODOLOGIA DE MONITORAÇÃO | 65 |
| 5.1 | INTRODUÇÃO | 65 |
| 5.2 | MONITORAMENTO DOS DADOS GERADOS..... | 65 |
| 5.2.1 | Critérios | 65 |
| 5.2.2 | Método Ótico | 67 |
| 5.2.3 | Fatigue Crack Growth Template da MTS..... | 69 |
| 5.2.4 | Monitoramento do Crescimento da Trinca pelo BFS e avaliação da sua Consistência | 69 |
| 6 | RESULTADOS | 71 |
| 6.1 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 71 |
| 6.1.1 | Primeiro Ensaio | 71 |
| 6.1.2 | Segundo Ensaio | 72 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 6.2 | ANÁLISE DOS RESULTADOS | 73 |
| 6.3 | CONCLUSÃO | 76 |
| 6.4 | RECOMENDAÇÃO PARA TRABALHOS FUTUROS | 76 |
| 7 | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 77 |
| | APÊNDICE A - EXTENSOMETRIA | 80 |
| | Extensômetro | 80 |
| | Funcionamento do Extensômetro..... | 82 |
| | Colagem dos Extensômetros..... | 84 |
| | Calibração Dos Extensômetros | 87 |
| | APÊNDICE B – ENSAIO DE PROPAGAÇÃO DE TRINCAS | 92 |
| | ANEXO 1 | 103 |
| | DADOS COMPARATIVOS ENTRE O COD E O BFS PARA OS ENSAIOS REALIZADOS | 103 |
| | ANEXO 2..... | 109 |
| | ROTINA UTILIZADA (MATLAB 2013) | 109 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Fases do processo de fadiga. | 20 |
| Figura 2 - Fratura frágil ocorrida em um navio de carga Liberty que separou o navio em duas partes em 1941. Fonte: (ANDERSON, 2005) | 22 |
| Figura 3 - a) Programa de testes mecânicos de larga escala em um avião real. b) Fratura detectada ao final de milhares de ciclos de carregamento e descarregamento na quina de uma das janelas. Fonte: (ANDERSON, 2005) | 23 |
| Figura 4- Trincas em aeronaves. (NDT CABIN, 2006) | 24 |
| Figura 5 - Furo elíptico em placa sob tensão remota uniforme. (b) Distribuição de tensão ao longo do eixo x nas proximidades de furo. Fonte: (Apud (PEREIRA, 2014)) | 26 |
| Figura 6 - Frentes de trincas em diferentes tipos materiais. Fonte: (Apud (PEREIRA, 2014)) | 27 |
| Figura 7 - Diferentes modos de abertura em uma trinca. Fonte: (Apud (PEREIRA, 2014)) | 27 |
| Figura 8 - Coordenadas na ponta da trinca. Fonte: (Apud (PEREIRA, 2014)) | 28 |
| Figura 9 - Crescimento de trincas por fadiga. Fonte: (MANDAI, 2010) | 30 |
| Figura 10 - Curva da/dN esquemática. Fonte: (MANDAI, 2010) | 32 |
| Figura 11 - Distribuição dos pontos correlatos para o cálculo de CTOD. Fonte: (FORTES, 2011) | 35 |
| Figura 12 - Corpo de ensaio do tipo C(T) com o clip gage fixado na boca do entalhe. | 36 |
| Figura 13- Corpo de prova do tipo CT com CMOD e BFS. (Fonte: (NEWMAN, YAMADA e JAMES, 2011) | 37 |
| Figura 14 - Variação de BFS por unidade de carga por a/w para um corpo de prova de 25mm. (DEANS e RICHARDS, 1979) | 41 |
| Figura 15 - Compliance do BFS analítico pela razão a/W. (MAXWELL, 1987)..... | 42 |
| Figura 16 - Análise da malha de elementos finitos para o corpo de prova C(T) com a/w=0.5 (RIDDELL e PIASCIK, 1998)..... | 43 |
| Figura 17 - Parâmetro de deformação traseira(A*) versus a/W. (RIDDELL e PIASCIK, 1998) | 43 |
| Figura 18 - Comparação de resultados do parâmetro A* para Deans, Shaw e Riddell. (RIDDELL e PIASCIK, 1998)..... | 44 |
| Figura 19 - Resultados de BFS normalizados da literatura para corpos de prova do tipo C(T). (NEWMAN, YAMADA e JAMES, 2011) | 45 |
| Figura 20 - BFS normalizado versus razão de comprimento para C(T). (NEWMAN, YAMADA e JAMES, 2011)..... | 45 |
| Figura 21 - Percentual de diferença na determinação do tamanho da trinca a partir da equação de Newman-Johnston. (NEWMAN, YAMADA e JAMES, 2011)..... | 46 |

| | |
|---|----|
| Figura 22 - Corpo de prova Compacto de Tração – C(T) – para ensaios de taxa de propagação de trinca. Fonte: (ASTM E647, 2011)..... | 48 |
| Figura 23 - Detalhes de entalhe e pré-trinca para diversas configurações de entalhe em C(T). Fonte: (ASTM E647, 2011) | 49 |
| Figura 24 - Manilha e pinos para a configuração de ensaio com C(T). Fonte: (ASTM E647, 2011) | 50 |
| Figura 25 - Limites para validação do ensaio. Fonte: (ASTM E647, 2011) | 52 |
| Figura 26 - Corpo de prova utilizado nos ensaios. Tipo C(T). Fonte: (RIDDELL e PIASCIK, 1998) | 54 |
| Figura 27 - Dimensões características para o corpo de prova do tipo C(T). Fonte: (ASTM E647, 2011) | 55 |
| Figura 28 - Dimensões do corpo de prova utilizado nos ensaios. Cotas em mm | 56 |
| Figura 29 - Representação esquemática do método de lixamento com trabalho em sentidos alternados. Fonte: (ROHDE, 2010)..... | 56 |
| Figura 30 – a) Equipamento para o processo de lixamento. b) Corpo de prova sendo lixado. | 57 |
| Figura 31 – a) Processo de Polimento do corpo de prova. b) Corpo de prova polido (esquerda). Corpo de prova não-polido (direita)..... | 59 |
| Figura 32 - a) Riscador padrão para marcação no corpo de prova. b) Corpo de prova marcado..... | 59 |
| Figura 33 - MTS (Material Testing System) | 60 |
| Figura 34 - Alinhamento do conjunto (garra, corpo de prova e pinos). | 61 |
| Figura 35 - Representação esquemática do encaixe do clip gauge no corpo de prova. ... | 61 |
| Figura 36 - Modelo de extensômetro utilizado nos ensaios. Fonte: (KIOWA)..... | 63 |
| Figura 37 –(a) Extensômetro unidirecional (Strain Gage), (b) Multímetro digital para realização de teste da resistência elétrica do extensômetro. (Leitura esperada de 120Ω)..... | 64 |
| Figura 38 - Sistema de Aquisição de Dados ADS-2000 -Lynx Tecnologia..... | 64 |
| Figura 39 - Tamanho de trinca normalizado como função do compliance do plano de trabalho elástico para corpos de prova do tipo C(T). (ASTM E647, 2011)..... | 66 |
| Figura 40 - Acompanhamento do crescimento da trinca pelo método ótico..... | 68 |
| Figura 41 – Saída do AqDados. | 69 |
| Figura 42 – a) Ligação do Cabo RGB no controlador da MTS, b) Junção de saída do cabo RGB..... | 70 |
| Figura 43 - Tipo de sensor do cabo RGB Coaxial..... | 70 |
| Figura 44- Gráfico dos resultados em um determinado instante do ensaio 1..... | 71 |
| Figura 45 - Valores aferidos por COD para um determinado instante do Ensaio 1. | 72 |
| Figura 46 - Gráfico dos resultados em um determinado instante do ensaio 2..... | 72 |
| Figura 47 - Valores aferidos por COD para um determinado instante do Ensaio 2. | 73 |
| Figura 48 - Pontos comparando as diferenças de aferições entre COD e BFS | 73 |

| | |
|--|-----|
| Figura 49 - Gráficos comparativos entre COD e BFS..... | 74 |
| Figura 50 - Gráfico das Diferenças percentuais, com linha de média evidenciada. | 75 |
| Figura 51- Equação linearizada da reta que ajusta o tamanho da trinca pelo BFS..... | 75 |
| Figura 52 - Composição de um extensômetro. (KYOWA, 2004)..... | 81 |
| Figura 53 - Ponte de Wheatstone. (KYOWA, 2004)..... | 81 |
| Figura 54 - Extensômetro conectado a uma Ponte de Wheatstone. (KYOWA, 2004) | 82 |
| Figura 55 - Arranjos de Ponte de Wheatstone com 2 extensômetros. (KYOWA, 2004) ... | 82 |
| Figura 56 - Extensômetro de resistência elétrica. (CAMPOS e VILELA, 2011)..... | 83 |
| Figura 57 - Principais tipos de extensômetro. (CAMPOS e VILELA, 2011) | 84 |
| Figura 58- Materiais utilizados para colagem dos extensômetros no CP. | 84 |
| Figura 59 - Limpeza da superfície, previa à colagem do extensômetro. (KYOWA, 2004). | 85 |
| Figura 60 - Posicionamento do extensômetro na amostra. (KYOWA, 2004) | 85 |
| Figura 61 - Colocação de cola (super bonder® de secagem rápida) no extensômetro. (KYOWA, 2004)..... | 86 |
| Figura 62 - Colagem do extensômetro na amostra. (KYOWA, 2004) | 86 |
| Figura 63 - Extensômetros e fiação colados no corpo de prova. | 87 |
| Figura 64 - Indicação das resistências para Shunt na placa 1 do ADS..... | 87 |
| Figura 65 - Valores e Fórmula para o Cálculo do ShuntCal. | 88 |
| Figura 66 - Configuração das entradas analógicas no AQDados. | 88 |
| Figura 67 - Tela de calibração dos extensômetros..... | 89 |
| Figura 68 - Configuração dos extensômetros de 120Ω no ADS 2000. (Fonte: LYNX)..... | 90 |
| Figura 69 - Relatório de calibração com ShuntCal. | 91 |
| Figura 70 - Ícone do Station Manager. | 92 |
| Figura 71 - Janela inicial do Station Manager. | 93 |
| Figura 72 - Atalho para o MTS Fatigue Crack Growth Testware. | 93 |
| Figura 73 - Janela inicial do MTS Fatigue Crack Growth Testware. | 94 |
| Figura 74 - Escolha do tipo de Template do MTS FCGT. | 94 |
| Figura 77 - Batch do corpo de prova em questão..... | 94 |
| Figura 76 - Definição do tipo de geometria do espécime. | 95 |
| Figura 79 - Definição do espécime para o corpo de prova do experimento. | 95 |
| Figura 80 - Janela do Procedure do MTS FCGT..... | 96 |
| Figura 79 - Definição dos parâmetros da pré-trinca no Procedure. | 97 |
| Figura 82 - Definição dos parâmetros de ensaio p/ Constant Load Amplitude. | 97 |
| Figura 83 - Definição dos parâmetros de ensaio para Delta-K Control - ensaio 1..... | 98 |
| Figura 82 - Janela de Data Storage. | 98 |
| Figura 83 - Definição dos Interlocks. | 99 |
| Figura 86 - . Janela inicial do Execute no MTS FCGT..... | 99 |
| Figura 85 - Atalho para o Crack Length Check. | 100 |
| Figura 86 - Janela do Crack Length Check. | 100 |
| Figura 87 - Atalho para o Assign Modulus. | 101 |

| | |
|--|-----|
| Figura 88 - Janela do Assign Modulus..... | 101 |
| Figura 89 - Atalho para o Precrack Data Table para a pré-trinca. | 102 |
| Figura 92 - Gráfico dos resultados em um determinado instante do ensaio 1 - 24out - 15h40. | 103 |
| Figura 93 - Valores aferidos por COD para um determinado instante do Ensaio 1 - 24out - 15h40..... | 103 |
| Figura 94 - Valores aferidos por COD para um determinado instante do Ensaio 1 - 26out - 16h30..... | 104 |
| Figura 95 - Gráfico dos resultados em um determinado instante do ensaio 1 - 26out - 16h30..... | 104 |
| Figura 96 - Valores aferidos por COD para um determinado instante do Ensaio 1 - 24out - 16h30..... | 105 |
| Figura 97 - Gráfico dos resultados em um determinado instante do ensaio 1 - 24out - 16h30..... | 105 |
| Figura 98 - Valores aferidos por COD para um determinado instante do Ensaio 2 - 21nov - 10h50..... | 106 |
| Figura 99 - Gráfico dos resultados em um determinado instante do ensaio 2 - 21nov - 10h50..... | 106 |
| Figura 100 - Valores aferidos por COD para um determinado instante do Ensaio 2 - 21nov - 11h20..... | 107 |
| Figura 101 - Gráfico dos resultados em um determinado instante do ensaio 2 - 21nov - 11h20..... | 107 |
| Figura 102 - Valores aferidos por COD para um determinado instante do Ensaio 2 - 21nov - 11h50..... | 108 |
| Figura 103 - Gráfico dos resultados em um determinado instante do ensaio 2 - 21nov - 11h50..... | 108 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| Tabela 1 - Composição química em % de peso da liga de aço A743. Fonte: (MATWEB, 2000) | 55 |
| Tabela 2 - Propriedades Mecânicas para o Aço ASTM A743 CA6NM. Fonte: (MATWEB, 2000) | 55 |
| Tabela 3 - Tabela de dados do AQDados - Ensaio 1..... | 68 |
| Tabela 4 - Tabela de dados do AQDados - Ensaio 2..... | 68 |
| Tabela 5 - Dados de comparação entre os resultados obtidos por COD e BFS para um determinado instante do Ensaio 1..... | 71 |
| Tabela 6 - Dados de comparação entre os resultados obtidos por COD e BFS para um determinado instante do Ensaio 2..... | 72 |
| Tabela 7 - Dados comparativos dos ensaios. | 74 |
| Tabela 8 - Valores aferidos por COD para um determinado instante do Ensaio 1 - 24out - 15h40..... | 103 |
| Tabela 9 - Valores aferidos por COD para um determinado instante do Ensaio 1 - 26out - 16h30..... | 104 |
| Tabela 10 - Valores aferidos por COD para um determinado instante do Ensaio 1 - 24out - 16h30..... | 105 |
| Tabela 11 - Valores aferidos por COD para um determinado instante do Ensaio 2 - 21nov - 10h50..... | 106 |
| Tabela 12 - Valores aferidos por COD para um determinado instante do Ensaio 2 - 21nov - 11h20..... | 107 |
| Tabela 13 - Valores aferidos por COD para um determinado instante do Ensaio 2 - 21nov - 11h50..... | 108 |

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

| | |
|-----------|---|
| a | Tamanho de trinca superficial |
| a_i | Tamanho inicial da trinca |
| a_f | Tamanho final da trinca |
| B | Espessura do espécime |
| C | Constante da equação de Paris |
| E | Módulo de elasticidade |
| F | Fator de forma |
| $f(a/W)$ | Função adimensional de a/W |
| G | Taxa de liberação de energia |
| h | Altura do entalhe do espécime |
| J | Integral J |
| m | Expoente da equação de Paris |
| n | Vetor unitário normal ao longo de Γ |
| K | Fator intensidade de tensões |
| K_c | Fator de intensidade de tensão crítico |
| K_I | Fator intensidade de tensões no modo I |
| K_{II} | Fator intensidade de tensões no modo II |
| K_{III} | Fator intensidade de tensões no modo III |
| K_{IC} | Tenacidade a fratura sob estado plano de deformação |
| K_T | Fator de concentrador de tensões |
| K_{th} | <i>K threshold</i> |
| K_Q | Valor provisório de tenacidade a fratura |
| P | Carga aplicada |
| R | Razão de carregamento |
| r | Raio de curvatura na ponta da trinca |
| r_p | Raio da zona plástica |

| | |
|------------|---|
| s | Distância ao longo do caminho Γ |
| T | Trabalho realizado por forças externas |
| t_x | Vetor tração ao longo do eixo x |
| t_y | Vetor tração ao longo do eixo y |
| u | Vetor deslocamento |
| U | Energia total |
| U_0 | Energia elástica |
| U_a | Varição de energia elástica |
| U_γ | Varição de energia elástica superficial |
| V_m | Abertura da boca da trinca |
| W | Largura do espécime |

Símbolos Gregos

| | |
|------------------|--|
| Δ | Varição entre duas grandezas similares |
| σ_1 | Tensão principal na direção 1 |
| σ_2 | Tensão principal na direção 2 |
| σ_3 | Tensão principal na direção 3 |
| σ_{esc} | Tensão de escoamento |
| σ_n | Tensão nominal |
| $\sigma_{máx}$ | Tensão máxima |
| σ_u | Tensão de ruptura |
| σ_{mises} | Tensão de von Mises |
| σ_x | Tensão na direção x |
| σ_y | Tensão na direção y |
| σ_z | Tensão na direção z |
| ν | Poisson |
| Γ | Caminho qualquer ao redor da trinca |
| ε | Deformação |

Siglas

| | |
|------|--|
| ASTM | <i>American Society for Testing and Materials</i> |
| BFS | <i>Back Face Strain</i> |
| CP | Corpo de Prova |
| COD | <i>Crack Opening Displacement</i> |
| CMOD | <i>Crack Mouth Opening Displacement</i> |
| CTS | <i>Compact Tension Specimen</i> |
| CTOD | <i>Crack Tip Opening Displacement</i> |
| EPT | Estado Plano de Tensão |
| EPD | Estado Plano de Deformação |
| HSLA | <i>High strength low alloy</i> |
| MDFT | Método de Monitoramento da Deformação da Face Traseira |
| MFLE | Mecânica da Fratura Linear Elástica |
| MFEP | Mecânica da Fratura Elasto-Plástica |
| MTS | <i>Material Testing System</i> |
| SENB | <i>Single Edge Notched Bend</i> |

1 INTRODUÇÃO

1.1 TEMA

Um dos principais objetivos da Mecânica da Fratura é prever se um elemento irá falhar na presença de um determinado defeito. A partir de uma tensão nele aplicada, a fratura ocorre quando o objeto se separa em dois ou mais pedaços impossibilitando assim a utilização de tal elemento conforme projetado. A análise em questão toma por base o campo de tensões existentes na extremidade de uma fissura, sendo, assim, quantificado pelo fator de intensidade de tensão K . Dessa forma, ao comparar K com o valor de tenacidade à fratura de um determinado material pode-se avaliar quão severo é o defeito e se a peça irá falhar ou não mediante alguma solicitação (ANDERSON, 2005).

De um modo geral, as falhas ocorrem em estruturas aparentemente sem defeitos, quando solicitadas ciclicamente. Este fenômeno está relacionado à micro falhas nas estruturas, onde há a nucleação de uma trinca e sua conseqüente propagação podendo, inclusive, levar ao seu colapso. A presença de uma trinca não necessariamente compromete a integridade estrutural de um elemento. Nessa perspectiva, a Mecânica da Fratura avalia o tempo necessário para uma trinca se propagar de modo a atingir um tamanho crítico que represente risco a segurança.

As técnicas da mecânica da fratura baseiam-se no:

- Comportamento linear-elástico (MFLE), parâmetro representativo do campo de tensões na ponta de um defeito.
- Comportamento elasto-plástico (MFEP), capacidade de deformação localizada na região ao redor do defeito.

A primeira normalmente é utilizada em situações em que a fratura ocorre ainda no regime linear-elástico. Isto pode ocorrer para ligas de altíssima resistência mecânica ou mesmo em ligas com resistência moderada desde que empregadas em uma espessura razoável. É a espessura que ditará se o regime é o estado plano de deformação (estado triaxial de tensões) em que a mecânica da fratura linear-elástica é aplicável ou o estado de tensão plana (biaxial de tensões) em que a mecânica da fratura elasto-plástica é aplicável.

O trabalho proposto tem como tema principal avaliar um método de se medir a propagação de tais trincas a partir de uma determinada força conhecida, ou determinar a força através de um tamanho de trinca. Além de demonstrar a eficácia desse método e de estudar os parâmetros necessários para que ensaios dessa natureza sejam realizados no laboratório de materiais da Universidade de Brasília.

1.2 MOTIVAÇÃO

Falhas em materiais de engenharia sempre esteve entre um dos temas mais relevantes em engenharia. Desastres decorrentes do processo de fadiga é um grande motivo de preocupação, o que ao longo do tempo requereu investimentos em estudos e análises dos processos de falhas, catástrofes e perda de vidas. Prever como essas trincas se propagam nos materiais de engenharia tem uma importância fundamental para assegurar a vida dos componentes.

O método de medição de trincas através da deformação da face traseira, tem se mostrado um método eficaz e barato de se prever o tamanho de trincas (NEWMAN, YAMADA e JAMES, 2011). Daí a motivação de tal estudo, através de ensaios para demonstrar a eficácia de tal método e suas vantagens em relação a métodos usuais, capacitar e gerar uma série de procedimentos para que tal ensaio seja realizado pelo laboratório de ensaios mecânicos da Universidade de Brasília, aumentando também assim, a gama de procedimentos experimentais possíveis neste laboratório para a identificação de falhas em estruturas.

O aço ASTM A743 CA6NM foi escolhido por ser um aço inoxidável martensítico de grande utilidade em turbinas hidráulicas devido a sua boa soldabilidade e resistência à cavitação, porém gera muita tensão residual em regiões recuperadas por soldagem (PUKASIEWICZ, 2012), logo o estudo de trincas nesse tipo de aço é de tamanha importância visto o custo efetivo para fabricação de estruturas com esse material e a confiança a qual necessita ter em equipamentos produzidos com ele.

1.3 OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS

O presente projeto é de natureza experimental, logo tem como objetivo principal comprovar através de ensaios a viabilidade e eficácia de um procedimento. Especificamente, o trabalho trata do método de medições de deformação da face traseira de um espécime do tipo CT ou *compact tension*. Este método propõe uma relação entre a deformação da face traseira do corpo de prova, ou seja, a face oposta à de abertura da trinca do entalhe e o tamanho da trinca “*a*”.

O objetivo específico desse trabalho é usar desse método através de *compliances* da literatura pertinente e verificar se o método introduzido inicialmente por (DEANS e RICHARDS, 1979) é apropriado e confiável, simples e econômico para ser utilizado como procedimento de medição de propagação de trincas no laboratório de ensaio mecânicos da UnB. Esses dados experimentais serão validados por comparações entre os dados obtidos no experimento para relações semelhantes e por verificação (utilizando o método CTOD) para medições de abertura, pela medição da abertura da boca da trinca CMOD que é gerada pelo *clip gage* acoplado ao equipamento de ensaio, a MTS 810.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em sete capítulos.

O capítulo 1 apresenta uma breve apresentação sobre o tema do projeto, juntamente com a motivação que determinou sua autoria, os objetivos como um todo e a sua relevância não só para um estudo acadêmico como para o desenvolvimento de tal tecnologia de análise para o país.

O capítulo 2 traz conceitos da Mecânica da Fratura, partindo de um breve histórico. Neste capítulo são explicados os conceitos básicos para melhor entendimento do tema, como o fator de concentração de tensões causados por entalhes, o fator de intensidade de tensões, bem como a zona plástica formada na ponta da trinca como os métodos de medição de trinca que serão utilizados neste projeto.

O capítulo 3 aborda a parte relativa à norma E647 que rege os ensaios de propagação de trincas por fadiga.

O capítulo 4 trata da metodologia de ensaio e de todos os procedimentos necessários para coleta de resultados bem como todas as medidas tomadas para análise dos mesmos.

O capítulo 5 mostra a metodologia de monitoração do ensaio, suas configurações e o porquê que tais medidas foram tomadas como critérios no processo de iniciação do ensaio.

O capítulo 6 trata dos dados obtidos e os resultados que foram obtidos com o projeto tentando mostrar ao final a sua eficácia, como estipulado nos objetivos.

O capítulo 7 traz todas as referências bibliográficas utilizadas no presente trabalho.

Além disso o trabalho é composto por dois apêndices com conteúdo essencial para a formulação dos ensaios e dois anexos que servem para acrescentar dados relativos ao trabalho.

2 MECÂNICA DA FRATURA

2.1 O PROCESSO DE FADIGA

As solicitações dinâmicas aplicadas numa peça podem provocar uma ruptura conhecida como fenômeno da *fadiga* que, segundo (WILLEMS, EASLEY e ROLFE, 1983) é a causa de 80 a 90% de todas as falhas nas peças ou estruturas metálicas submetidas a esforços mecânicos, e que trabalham a temperatura ambiente.

Muitas vezes uma estrutura rompe com um carregamento relativamente grande, porém, menor que o carregamento extremo para o qual a estrutura foi dimensionada e deveria resistir. Nestes casos, a estrutura não possui mais a seção transversal de cálculo inicial e para a qual ela foi dimensionada, porque, devido à fratura de fadiga, a seção transversal efetiva é menor que a seção de cálculo. Isto leva a estrutura ao colapso quando estiver solicitada por uma carga que, a princípio, ela deveria resistir.

Em situações onde as trincas são difíceis de serem evitadas, a metodologia da Mecânica da Fratura (MF) pode ser utilizada para auxiliar a seleção de materiais assim como o projeto de componentes, minimizando a possibilidade de falhas catastróficas por fratura. Na prática solicitações ocasionadas por vento, corrente, ondas dentre outras que ocorrem de forma cíclica, mesmo parecendo simples podem ocasionar grandes desastres.

Na verdade, a fadiga costumeiramente é, em muitos casos, um critério de projeto mais crítico do que qualquer outro para a segurança da estrutura e confiabilidade do maquinário ou componentes estruturais.

Define-se fadiga de um metal como “fenômeno de enfraquecimento progressivo quando este está submetido a cargas dinâmicas ou repetidas, num nível de tensões abaixo da tensão de escoamento”.

O processo de fadiga pode ser considerado dividido em quatro fases indicadas a seguir, na Figura 1.

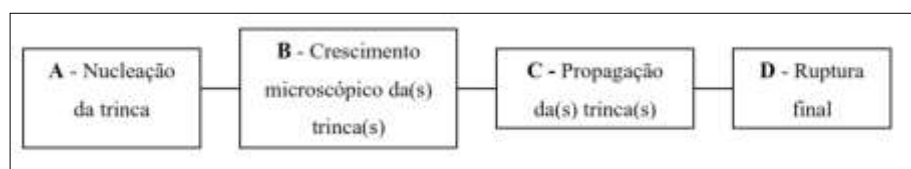


Figura 1 - Fases do processo de fadiga.

As duas primeiras fases constituem o período de iniciação da trinca. Quando se lida com material base, cerca de 90 % do tempo de vida útil da peça está relacionado com as fases A e B. Porém,

para estruturas soldadas, desconsideramos as fases A e B, ficando estas com 0 % do tempo de vida útil da estrutura.

É importante ressaltar que uma ruptura por fadiga é muitas vezes súbita e ocorre sem dar sinal porque a trinca não é visível a olho nu ou está inacessível.

2.2 PROBLEMAS E FALHAS RESULTANTES DO PROCESSO DE FADIGA

Na evolução da engenharia, aprende-se mais com as falhas do que com o sucesso. As primeiras rupturas por fadiga começaram a ser estudadas em meados do século XIX. Logicamente, antes desta época, já se haviam verificado muitas rupturas por fadiga, porém, os primeiros estudos conhecidos sobre fadiga são de autoria do engenheiro alemão (WOHLER, 1967) e foram realizados em eixos de locomotiva de estradas de ferro, cujas rupturas eram muito frequentes na indústria ferroviária alemã por volta de 1840. Antes desse período, o problema de fadiga não teve grande importância porque as máquinas eram de funcionamento rudimentar, essencialmente manual, com solicitações predominantemente estáticas.

Registros mostram que 200 pessoas morreram na Grã-Bretanha entre 1860 e 1889 devido a falhas em eixos de locomotivas e vagões ferroviários. Porém, falhas em eixos são problemas até hoje, visto que, em 1980 ocorreu uma falha no eixo de uma roda de trem de pouso de um L-1011 na Arábia Saudita.

Com o início da revolução industrial e criação das primeiras máquinas, o efeito de fadiga tornou-se relevante. Este fenômeno impôs grandes desafios tecnológicos aos engenheiros da época, pois estes nada sabiam sobre o comportamento mecânico dos materiais sujeitos a solicitações dinâmicas. A partir da metade do século XIX, o número de rupturas por fadiga começou a aparecer com uma frequência cada vez maior.

Kipling foi presumivelmente o primeiro a explorar as diversas possibilidades da fadiga, descrevendo em 1895 como o Grotkau perdeu a hélice devido à fratura por fadiga na haste do seu cabo. Depois disso, os estudos sobre fadiga despertaram atenção de Nevil Shute's que em 1948 publicou um livro sobre o desastre do avião Comet, que havia ocorrido 3 anos antes e foi iniciado por uma fratura de fadiga.

Os objetivos principais que se perseguem ainda hoje podem ser encarados segundo duas perspectivas:

- Desenvolvimento de materiais econômicos possuindo a máxima resistência à fadiga (que tem sido do âmbito dos metalurgistas e dos físicos dos metais);
- Desenvolvimento de métodos de concepção e cálculo de estruturas sujeitas à fadiga (que tem sido âmbito dos engenheiros de projeto).

A consideração da fadiga tem sido cada vez mais necessária, visto a necessidade de produzir peças e estruturas em condições cada vez mais eficientes e econômicas, o que obriga a utilizar tensões admissíveis mais elevadas (certas indústrias impõem dimensões mais reduzidas nas peças à custa de maiores tensões de serviço, o que, em termos de fadiga, significa geralmente menores durações).

Algumas rupturas têm causado danos materiais e humanos consideráveis de que se conhecem muitos exemplos em aviões, comboios (série de vagões puxados por uma locomotiva), pontes, automóveis, etc.

Como exemplo serão citados dois casos que foram tipicamente causados por fadiga e propagação de trinca como especificado através de perícias técnicas.

- **Acidentes com os Navios Liberty**

Segundo (SALGADO, s/ano), no início dos anos 40, durante a segunda guerra mundial, 4694 navios do tipo Liberty foram construídos nos Estados Unidos.

Técnica Construtiva: Seções do casco pré-fabricadas unidas umas às outras exclusivamente por meio de solda.

Dentre os navios construídos, 1289 navios (25% da frota) foram vítimas de fraturas no casco, sendo que 233 foram catastróficas, resultando na perda da embarcação. Alguns navios quebraram em dois em questão de segundos, sem aviso prévio (fratura frágil ao longo das juntas soldadas), como pode ser visto na Figura 2.

As principais causas dos acidentes foram:

- Projeto estrutural deficiente;
- Caminho estrutural contínuo devido à técnica de construção utilizada;
- Temperaturas baixas das águas do atlântico norte;
- Uso de materiais inadequados;
- Solda de má qualidade.



Figura 2 - Fratura frágil ocorrida em um navio de carga Liberty que separou o navio em duas partes em 1941. Fonte: (ANDERSON, 2005)

- **Acidentes com as Aeronaves Comet**

Em 10 de janeiro de 1954, uma aeronave tipo Comet I, conhecida como Yoke Peter (que foi a primeira aeronave a jato a entrar em serviço regular de transporte de passageiros) desintegrou-se no ar a 30 mil pés de altitude no mar Mediterrâneo perto de Elba. No momento do acidente, a aeronave tinha efetuado 1286 vôos pressurizados, num total de 3680 horas de voo. Em 11 de janeiro toda a frota de Comet foi removida de serviço. Alguns itens do projeto que são supostamente considerados responsáveis pelos acidentes são retificados e a frota volta a operar normalmente em 23 de março. Em 8 de abril, apenas 16 dias após o reinício dos serviços, outra aeronave Comet conhecida como Yoke Yoke desintegra-se no ar a 35 mil pés de altitude perto de Nápoles.

No momento do acidente, a aeronave tinha efetuado 903 vôos pressurizados, num total de 2703 horas. Logo após o acidente, toda a frota é removida de serviço. Decidiu-se efetuar um teste de pressurização repetida da fuselagem.

O teste foi na fuselagem da aeronave conhecida como Yoke Uncle que havia acumulado 1230 vôos pressurizados antes do teste. Após mais 1830 ciclos de pressurização perfazendo um total de 3060, ocorreu falha na fuselagem. A falha iniciou-se em furos de rebites localizados próximo ao canto de uma janela de passageiros.

Evidências indicando ocorrência de fadiga estrutural foram encontradas. Investigações adicionais na fuselagem de Yoke Peter, recuperada sob o mar próximo a Elba, confirmaram que a principal causa do acidente foi devida à fadiga estrutural. A causa dos acidentes foi fadiga estrutural devido aos altos esforços concentrados nos cantos das janelas de passageiros. Esta investigação resultou em um aumento considerável da atenção dada a detalhes de projeto e no reconhecimento da necessidade de efetuar testes de fadiga em escala real. Os acidentes da Comet introduziram o assunto fadiga de estruturas metálicas no dia a dia dos engenheiros aeronáuticos.

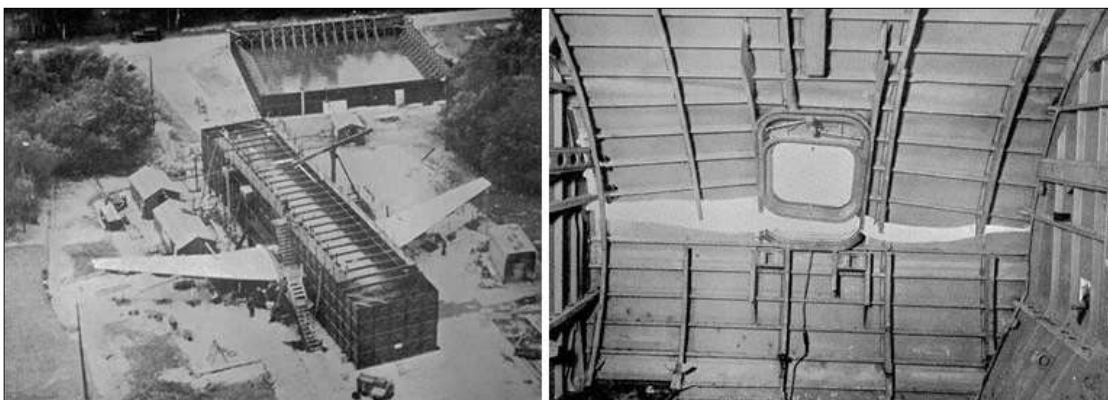


Figura 3 - a) Programa de testes mecânicos de larga escala em um avião real. b) Fratura detectada ao final de milhares de ciclos de carregamento e descarregamento na quina de uma das janelas.

Fonte: (ANDERSON, 2005)

Assim, o estudo e a aplicação da Mecânica da Fratura são de extrema importância ao passo que as trincas são mais frequentes do que se imagina. No ramo da aviação comercial, realizam-se inspeções periódicas para a detecção e reparo de trincas as quais também são frequentemente encontradas em estruturas de navios, pontes e instalações nucleares.

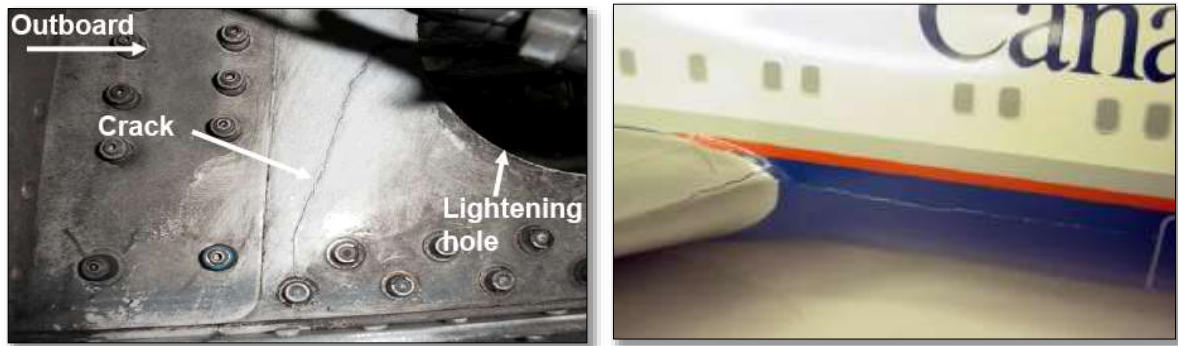


Figura 4- Trincas em aeronaves. (NDT CABIN, 2006)

A Mecânica da Fratura identifica propriedades do material que podem ser relacionadas ao seu comportamento mecânico, o que permite analisar a resistência e a vida de um componente com trincas de formas e tamanhos diferentes. Dessa forma, a Mecânica da Fratura fornece subsídios para a seleção de matérias e detalhes de projeto de modo a minimizar a possibilidade de falhas relacionadas a presença de trincas.

A operacionalização e uso da Mecânica da Fratura requerem inspeções periódicas no componentes. São utilizadas diversas metodologias como o ultrassom, os raios-X ou até mesmo uma simples inspeção visual por meio de lentes de aumento. (DOWLING, 2007).

2.3 ASPECTOS HISTÓRICOS DA MECÂNICA DA FRATURA

Acontecimentos históricos que contribuíram para o desenvolvimento da mecânica da fratura como ciência.

1. Em 1889, Kirsch mostrou que uma placa plana com furo circular submetida a uma tensão uniforme possuía uma concentração de tensão da ordem de três. (TIMOSHENKO e GOODIER, 1970)

2. Enquanto investigava falhas inesperadas em navios, Inglis (INGLIS, 1913) estendeu a solução do problema de concentração em uma placa plana com furo circular para o caso de um furo elíptico.

3. Os trabalhos de Inglis foram seguidos pelos estudos de Griffith. Enquanto pesquisava a resistência de barras de vidro para diferentes diâmetros e diferentes temperaturas (GORDON, 1988), Griffith sugeriu que pequenas falhas internas agiam como concentradores de tensões nos sólidos, afetando fortemente em suas resistências. Assim, Griffith determinou que a presença de pequenas falhas elípticas fosse responsável drasticamente na redução da resistência do vidro, do valor teórico para o valor real.

4. A segunda contribuição de Griffith derivou de um critério termodinâmico para fratura, considerando a variação total da energia durante o trincamento da estrutura. Durante a propagação da trinca a energia potencial é liberada e transferida para criar uma nova superfície de trinca.

5. Após o trabalho de Griffith, houve um período de abstinência de 20 anos, até que em 1939 Westergaard (WESTGAARD, 1939) formulou uma expressão para o campo de tensões próximo da zona da trinca.

6. Até aqui a MF era uma ciência “mágica”, sem grandes explicações palpáveis. Entretanto, mais do que qualquer outro fator, o grande número de acontecimentos repentinos e catastróficos de fratura ocorridos em navios durante e após a 2ª guerra mundial, deu o grande impulso para o desenvolvimento da mecânica da fratura. Após a guerra, George Irwin, um pesquisador da Marinha Americana, utilizando as ideias de Griffith, fez três grandes contribuições à mecânica da fratura:

i) Expandiu a teoria de Griffith para metais, considerando o escoamento na ponta da trinca. Resultado: Teoria Modificada de Griffith.

ii) Alterou a solução de Westergaard introduzindo o conceito do fator de intensidade de tensão.

iii) Introduziu o conceito de taxa de liberação de energia.

7. O crescimento subcrítico de trincas é mostrado pela aplicação de carregamento cíclico (fadiga) em uma trinca, ou pela presença de um ambiente corrosivo. Em ambos os casos o tamanho de trinca original e a condição de carregamento, tomados separadamente, estão abaixo do seu valor crítico. Paris, em 1961, propôs a primeira equação empírica relacionando a variação do fator de intensidade de tensão com a taxa de crescimento da trinca. (PARIS, 1962)

8. Considerações não lineares foram realizadas por Wells, que por volta de 1960 utilizou o COD (*crack opening displacement*) como um parâmetro para caracterizar a resistência de uma trinca em um sólido elasto-plástico (WELLS, 1961), e por Rice (RICE, 1968), que introduziu a integral J em 1968. Rice introduziu o conceito de uma integral de linha com caminho independente que é a taxa de variação da energia potencial para um sólido elástico não linear ao longo da extensão da trinca. Ainda nos anos 60, Erdogan e Shih introduziram o primeiro modelo para propagação de trinca em diferentes modos.

2.4 CONCENTRADORES DE TENSÃO

A Figura 5-a ilustra um furo elíptico numa placa. Aqui, assume-se que o furo é relativamente pequeno quando comparado ao comprimento da mesma. O campo de tensão uniforme é alterado nas vizinhanças do furo, conforme ilustrado neste caso particular.

O efeito do furo que mais se percebe é a tensão σ_y , paralela a S. Analisando ao longo do eixo x na Figura 5-b, o valor de S, aplicada externamente cresce rapidamente à medida que se aproxima do

furo, atingindo um valor máximo na borda do mesmo. Esse valor máximo depende das proporções da elipse e do raio, ρ , da raiz deste, de acordo com a expressão da Equação (1).

$$\sigma_y = S \left(1 + 2 \frac{c}{d} \right) = S \left(1 + 2 \sqrt{\frac{c}{d}} \right) \quad (1)$$

O fator de concentrador de tensão para uma elipse pode ser definido pela razão entre a tensão máxima sobre a tensão externa: $K_t = \sigma_y / S$. Dessa forma, uma elipse cujo semieixo secundário d tenda a zero, de modo que o raio do entalhe também tenda a zero, aproxima-se de uma trinca idealizada.

Obviamente, tensões infinitas não existem na engenharia. Se a carga aplicada não for muito elevada, o material pode se acomodar a presença de uma trinca, de modo que a tensão infinita prevista teoricamente se reduz a um valor finito. Isso é ilustrado na Figura 6. Em materiais dúcteis, tais como muitos metais, extensas deformações plásticas ocorrem nas proximidades da frente da trinca. As intensas deformações verificadas nesta região formam uma frente de trinca bem aguda, com um raio muito pequeno, mas diferente de zero. Dessa forma, a tensão na frente da trinca não terá valor infinito.

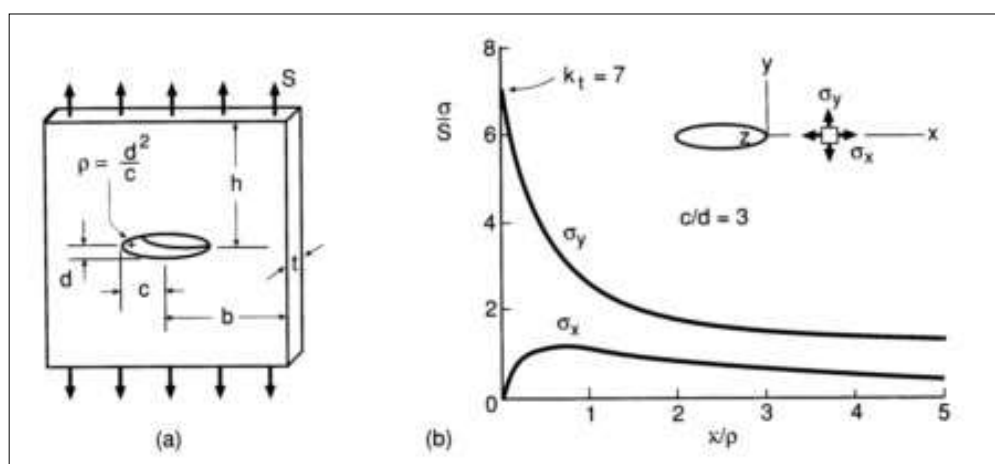


Figura 5 - Furo elíptico em placa sob tensão remota uniforme. (b) Distribuição de tensão ao longo do eixo x nas proximidades de furo. Fonte: (Apud (PEREIRA, 2014))

Em todos os casos, ocorrem intensas deformações na frente da trinca. As altas tensões que, teoricamente deveriam existir, são redistribuídas por uma extensa região material. Assim, verifica-se nesta região um valor finito de tensão que pode ser suportado pelo material.

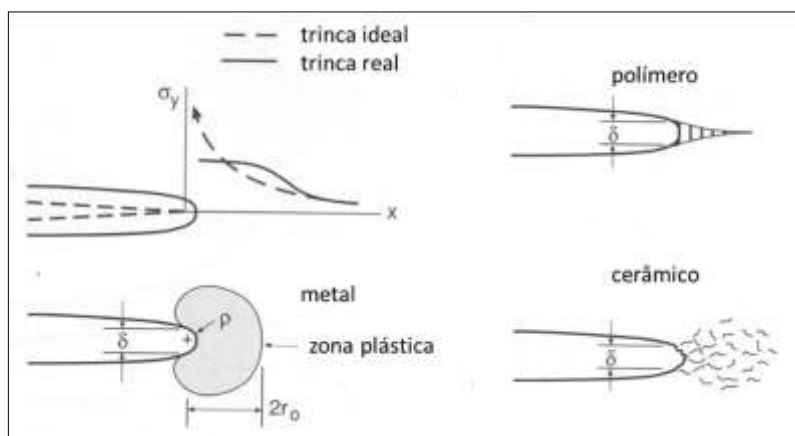


Figura 6 - Frentes de trinças em diferentes tipos materiais. Fonte: (Apud (PEREIRA, 2014))

2.5 MODOS DE ABERTURA DE TRINCA

Um membro trincado pode ser carregado por um modo, dois, ou por uma combinação dos modos de deslocamento ilustrados na Figura 7. O modo I é chamado de modo de abertura ou modo de tração, com deslocamentos das superfícies da trinca na direção do plano ortogonal ao sentido de propagação da trinca. Já no modo II, também chamado de modo de deslizamento, ocorre um carregamento em cisalhamento, com deslocamentos das superfícies da trinca no plano que a contém. No modo III, carregamento em cisalhamento (rasgamento), ocorre deslocamento das superfícies das trinças no plano da trinca, promovendo um empenamento relativo entre as duas partes divididas pela trinca. A maior parte dos problemas de engenharia relacionados a propagação de trinças envolve o Modo I. Para cada modo de carregamento existe um fator de intensidade de tensão associado, de tal forma que os fatores de intensidade de tensão K_I , K_{II} e K_{III} estão associados aos modos I, II e III.

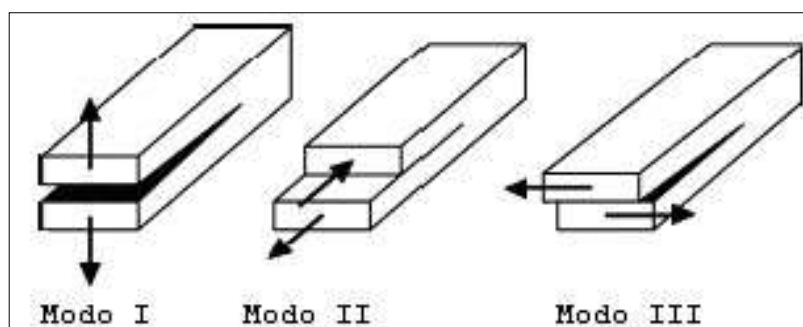


Figura 7 - Diferentes modos de abertura em uma trinca. Fonte: (Apud (PEREIRA, 2014))

2.6 FATOR DE INTENSIDADE DE TENSÃO

O fator de intensidade de tensão K constitui uma medida fundamental para a determinação da estabilidade de uma trinca à fratura, para estimar a propagação de trinças solicitadas ciclicamente, pois

é um parâmetro que serve para quantificar o campo de tensões atuantes na ponta de uma trinca ou fissura. Esta quantidade é de fundamental importância na análise da integridade estrutural. Por isso, em diversas situações têm sido compiladas em diversos manuais. Entretanto, em muitas situações a geometria é tão complexa que uma expressão para K pode não ser encontrada em tais referências. Neste contexto, os métodos numéricos surgem como uma ferramenta poderosa que se caracteriza pela facilidade na descrição de geometrias e das condições de contorno.

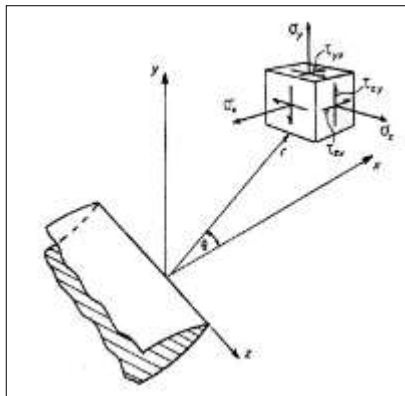


Figura 8 - Coordenadas na ponta da trinca. Fonte: (Apud (PEREIRA, 2014))

Um sistema de coordenadas para descrever as tensões na vizinhança da trinca é mostrado na Figura 8. Esse sistema de coordenadas polar r e θ é usado no plano x - y , que é normal ao plano da trinca, e a direção z é paralela à direção da extremidade da trinca. Para qualquer caso de carregamento em tração (modo I), as tensões próximas a ponta da trinca são funções tanto da distância radial r como do ângulo θ , de acordo como se segue:

$$\sigma_x = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) - \frac{K_I}{\sqrt{2\pi}} \left(\frac{\rho}{2r} \right) \cos \frac{3\theta}{2} \quad (2)$$

$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) + \frac{K_I}{\sqrt{2\pi}} \left(\frac{\rho}{2r} \right) \cos \frac{3\theta}{2} \quad (3)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} - \frac{K_I}{\sqrt{2\pi}} \left(\frac{\rho}{2r} \right) \sin \frac{3\theta}{2} \quad (4)$$

$$\sigma_z = 0 \quad \text{Estado Plano de Tensões} \quad (5)$$

$$\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y) \quad \text{Estado Plano de Deformação} \quad (6)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zx} = 0 \quad (7)$$

Essas equações são baseadas na teoria da elasticidade linear, e elas descrevem o campo de tensões nas proximidades da ponta da trinca, tais soluções foram propostas por Westergaard (WESTGAARD, 1939). Essas equações predizem que as tensões aumentam rapidamente nas proximidades da trinca.

As componentes não-nulas na Equações (2b), (3) e (4) se aproximam de infinito na medida em que r se aproxima de zero. Isso é causado especificamente devido as tensões serem proporcionais ao inverso de \sqrt{r} . Portanto, existe uma singularidade matemática na ponta da trinca, assim nenhum valor de tensão na ponta da trinca pode ser dado. Todas as componentes não nulas das Equações (2) e (4) são proporcionais à quantidade K_I , e os fatores restantes meramente dão a variação com r e θ . Assim, a magnitude do campo de tensões próximo à ponta da trinca pode ser caracterizada pelo valor do fator K_I . O fator K_I é uma medida da severidade da trinca. Sua definição em um senso matemático formal é:

$$K_I = \lim_{r, \theta \rightarrow 0} (\sigma_y \sqrt{2\pi r}) \quad (8)$$

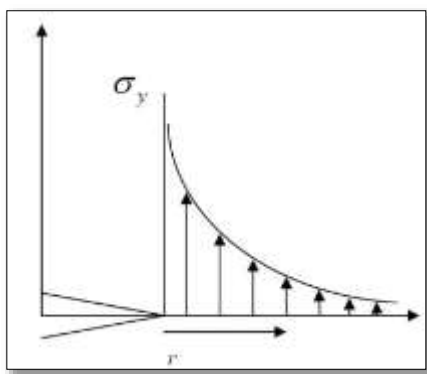


Figura 9. Distribuição elástica na região da trinca. Fonte: (MANDAI, 2010)

Porém, na prática os materiais (principalmente metais) possuem uma tensão de escoamento acima da qual eles se deformam plasticamente. Isso significa que sempre haverá uma região ao redor da ponta da trinca onde a deformação plástica ocorrerá, implicando que a singularidade no campo de tensões não ocorrerá.

2.7 TENACIDADE À FRATURA

A tenacidade à fratura, K_{IC} , de um material pode ser considerada como uma propriedade que caracteriza sua resistência ao crescimento de uma trinca. Esta propriedade é uma maneira quantitativa de expressar a resistência à fratura frágil de um material quando uma trinca está presente. Caso um material possua um alto valor de tenacidade à fratura este terá características de material dúctil. Um baixo valor de tenacidade à fratura caracteriza um material frágil.

O valor de K_{IC} também é conhecido como tenacidade à fratura sob estado plano de deformações. O mesmo valor de K_{IC} pode ser determinado testando corpos de prova do mesmo material, porém com diferentes geometrias e sob combinações críticas de tamanhos e formas de trinca.

2.8 PROPAGAÇÃO DE TRINCAS POR FADIGA

Componentes de engenharia geralmente operam sob condições de carregamentos alternados que podem ser suficientemente críticos a ponto do projeto de resistência à fadiga deve ser feito de modo a assegurar a vida à fadiga do componente.

A teoria da mecânica da fratura linear elástica fornece um bom modelo para descrever a propagação de trincas por fadiga. Tensões cíclicas de amplitude constante são definidas por três parâmetros, tensão média, σ_m , amplitude de tensão, σ_a , e a frequência ω . Onde apenas dois parâmetros são necessários para descrever as tensões em um carregamento cíclico de amplitude constante.

Um mecanismo para crescimento de trincas por fadiga, presente na Figura 9 onde mesmo sob carregamentos de baixa intensidade ainda há deformação plástica na ponta da trinca causada pelo concentrador de tensões. Essa deformação plástica é provocada pelo escorregamento dos planos cristalinos e o resultado do escorregamento desses planos complementares é uma ponta de trinca não pontiaguda. No momento do descarregamento (ou carregamento de compressão) a ponta da trinca se torna pontiaguda novamente. Esse processo é irreversível, sendo provocado pela oxidação e desordem do material recentemente exposto ao longo dos escorregamentos dos planos. Nos próximos ciclos de carregamento esse processo é repetido diversas vezes, causando um aumento de trinca da ordem de Δa para cada ciclo.

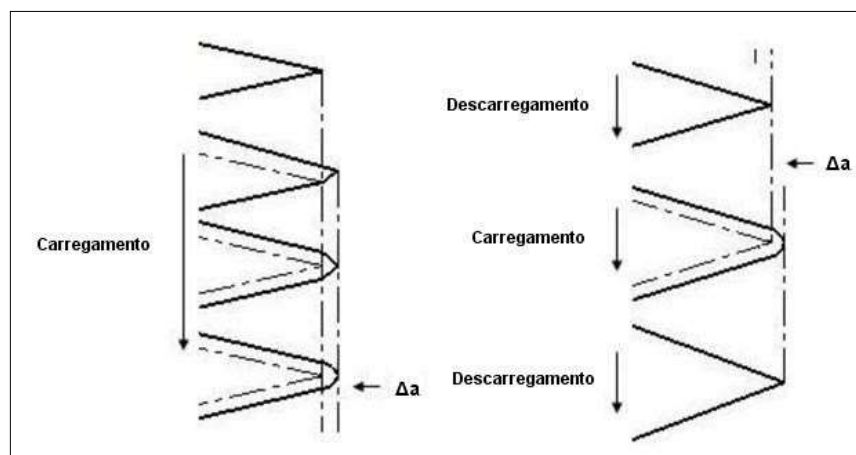


Figura 9 - Crescimento de trincas por fadiga. Fonte: (MANDAI, 2010)

Na Mecânica da Fratura Linear Elástica pode-se verificar que para um corpo de prova padrão, a distribuição de tensões é única para cada tamanho de trinca e condição de carregamento, resultando em um valor do fator de intensidade de tensões. Se duas diferentes trincas de mesmo material possuem o mesmo fator de intensidade de tensão, pode-se dizer que elas se comportarão da mesma maneira (BROEK, 1988). Consequentemente, se os fatores de intensidade de tensão são iguais, a resposta das

trincas será a mesma. Isso significa que a taxa de crescimento da trinca será a mesma para os dois casos, desde que ΔK seja o mesmo.

O que mais preocupa acerca da presença de uma trinca em uma peça é quanto tempo vai levar para a trinca crescer de um tamanho inicial a um tamanho de trinca onde seja possível garantir que a propagação não seja catastrófica e seja possível evitar as falhas.

Em geral, observações experimentais mostram que uma trinca se propaga a uma pequena quantidade a cada ciclo de carregamento e que o seu crescimento será tanto maior quanto maior for a amplitude do carregamento. Essa amplitude de carregamento pode ser relacionada com a taxa de carregamento, que é dada por $R = \sigma_{min}/\sigma_{max}$. Mesmo que a tensão nominal seja abaixo da tensão limite, em certas regiões a tensão pode estar acima da tensão de escoamento do material devido a concentradores de tensões. Outro fator que influencia a taxa de crescimento da trinca é o fator de intensidade de tensão K , e essa influência é diretamente proporcional ao crescimento da trinca. Assim, temos que a taxa de crescimento da trinca é uma função de ΔK e de a .

$$\frac{da}{dN} = f(\Delta K, a) \quad (9)$$

Paris e Erdogan (PARIS e ERDOGAN, 1963) relacionaram a taxa de propagação de uma trinca com o fator de intensidade de tensões, essa relação ficou conhecida como equação de Paris:

$$\frac{da}{dN} = C_p (\Delta K)^{m_p} \quad (10)$$

onde para a maioria dos materiais metálicos o valor de m_p varia entre 2 e 4. O valor de C_p é fortemente dependente do material, o que leva a diferentes valores. O valor de a é o comprimento da trinca e N o número de ciclos do processo.

2.8.1 Diagrama de crescimento de trinca por fadiga

Para diversos materiais existe um valor limite do fator de intensidade de tensão, conhecido como ΔK_{th} , para o qual não há propagação de trinca por fadiga. Um bom conhecimento de ΔK_{th} permite estimar um valor permissível de tamanho da trinca e/ou carregamento aplicado para se evitar o crescimento da trinca.

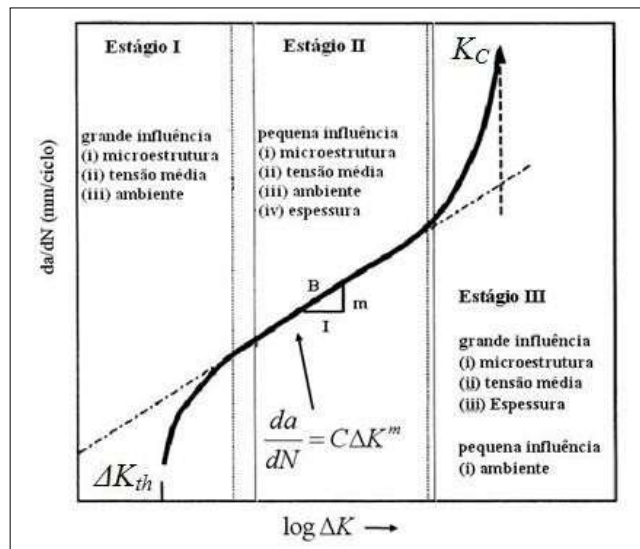


Figura 10 - Curva da/dN esquemática. Fonte: (MANDAI, 2010)

Na Figura 10 é possível ver o comportamento para o crescimento de trincas. Segue uma análise dos estágios do diagrama da/dN :

Estágio I: Esse é um processo onde o crescimento da trinca ocorre bem lentamente, onde a trinca passa a crescer depois que o fator de intensidade de tensões alcança o valor limiar ΔK_{th} . A taxa de crescimento fica na ordem de 10^{-7} mm/ciclo . No estágio I o crescimento da trinca é descontínuo, gerado por micro-mecanismos intragranulares que dependem fortemente de parâmetros micro-estruturais, das tensões médias e do dano superficial.

O limiar da trinca por fadiga é um valor que depende de diversos fatores: tipo de material, razão de carregamento R , e as condições do ambiente. Esse valor limiar, ΔK_{th} , é o valor assintótico de ΔK onde a taxa da/dN se aproxima de zero. No entanto esse valor da taxa da/dN pode ser considerado nulo quando a taxa de crescimento da trinca estiver próxima de 10^{-7} mm/ciclo . Tal taxa de crescimento de trinca é extremamente lenta.

Estágio II: Aqui a equação de Paris caracteriza a situação e depende pouco da microestrutura, da carga média, do meio ambiente e da espessura do espécime. Nessa fase ocorre a propagação estável da trinca, ou seja, é a região onde se pode fazer a previsão da vida do componente trincado. As estrias, que são parâmetros superficiais de fadiga vistos apenas em um microscópio de escaneamento eletrônico, representam sucessivamente o avanço de cada ciclo de carregamento. A estimativa de número de ciclos é dada pela Equação (9) que resultará na Equação (11).

$$N = \int_{a_i}^{a_f} \frac{da}{f(\Delta K, a)} \quad (11)$$

A partir dessa integral temos o número de ciclos necessários para a trinca crescer de um tamanho inicial a_i até um tamanho final a_f .

Estágio III: Esse estágio depende fortemente dos parâmetros micro estruturais do estágio I e da espessura do espécime. Quando a trinca atinge o estágio III ocorre seu crescimento instável, ou seja, a

trinca alcançou um determinado tamanho crítico. Ocorre quando o fator de intensidade de tensão atinge um valor máximo, $K_{máx}$, que coincide com a tenacidade à fratura do material em questão. O valor do tamanho de trinca crítica onde ocorre o $K_{máx}$ é dado pela seguinte equação:

$$a_c = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_c}{F \sigma_{máx}} \right)^2 \quad (12)$$

2.8.2 Influência da razão de carregamento sobre a curva da/dN versus ΔK

Inicialmente imaginava-se que curva da/dN era basicamente função de ΔK , porém, existem outros fatores que influenciam na curva e que por vezes são negligenciados. Experimentalmente foi constatado que a razão de carregamento, R , pode afetar o comportamento do crescimento da trinca para diversos tipos de materiais.

Um aumento em R causa um aumento na taxa de crescimento da trinca para um dado ΔK , tal efeito é mais evidente em materiais frágeis. Por outro lado, a variação de R para materiais dúcteis não apresenta grande influência na região intermediária da curva da/dN versus ΔK . (DOWLING, 1998)

Entretanto, o modelo de Paris, quando comparado com dados experimentais, não representa fielmente a realidade para diversos casos. Assim, foram propostos outros modelos que visam obter uma melhor aproximação para um caso real. Esses modelos são modificações realizadas em cima da equação original proposta por Paris e consideram alguns fatores que o modelo de Paris não leva em conta. Dentre as desvantagens do Modelo de Paris, incluem-se:

1. Não é sensível aos efeitos da carga média e de ΔK_{th} .
2. É muito conservativo para valores baixos de ΔK .
3. É não-conservativo para altos valores de ΔK .

O modelo de Elber (ELBER, 1971) é o mais simples, descreve bem os estágios I e II, mas gera resultados não-conservativos em ΔK baixos com R alto e em ΔK altos.

$$\frac{da}{dN} = A_e (\Delta K - \Delta K_{th})^{m_e} \quad (13)$$

O modelo de Forman (FORMAN, KEARNEY e ENGLE, 1967) embora não descreva bem o estágio I, é capaz de modelar o estágio III. Os valores de A_f e m_f são referentes às constantes da equação de Forman.

$$\frac{da}{dN} = \frac{A_f \Delta K^{m_f}}{(1-R) K_C - \Delta K} \quad (14)$$

O modelo de Priddle (PRIDDLE, 2007) é capaz de modelar bem os três estágios, no entanto não reconhece os efeitos da carga média em ΔK_{th} . Os valores de A_p e m_p são referentes às constantes da equação de Priddle (PRIDDLE, 2007).

$$\frac{da}{dN} = A_p \left(\frac{\Delta K - \Delta K_{th}}{K_C - K_{max}} \right)^{m_p} \quad (15)$$

O modelo proposto por Walker (WALKER, 1970) não modela bem os estágios I e III, mas é capaz de descrever bem o efeito da carga média no estágio II. Os valores de A_w e m_w são referentes às constantes da equação de Walker.

$$\frac{da}{dN} = A_w \Delta K^{m_w} K_{max}^{p_w} \quad (16)$$

E por último, o modelo proposto por Hall não modela a fase III, mas descreve a fase I e o efeito da carga média. Os valores de A_h e m_h são referentes às constantes da equação de Hall. Como foi visto, nenhum desses modelos ajusta por completo o comportamento da curva da/dN versus ΔK .

$$\frac{da}{dN} = A_h \Delta K^{m_h} (K_{max} - \Delta K_{th})^{p_h} \quad (17)$$

2.9 MÉTODO CTOD (MÉTODO DE MEDIÇÃO DO DESLOCAMENTO DA ABERTURA DA TRINCA)

Embora os conceitos básicos do método CTOD tenham sido desenvolvidos de forma independente por (WELLS, 1961) e Cottrell (1961), grande parte da literatura atribui apenas à Wells a elaboração da teoria deste método. O objetivo inicial era obter um critério de fratura para materiais que apresentassem uma capacidade maior de deformação plástica quando submetidos a um defeito. De acordo com este método, a ruptura de um componente que contém uma trinca acontecerá a partir de um valor crítico de abertura de trinca (δc). Tal valor crítico de abertura de trinca pode ser considerado a partir de características da região da trinca para determinado material testado sob um dado conjunto de condições.

Considerando a MFLE pode-se correlacionar para o modo I os valores de $CTOD_{IC}$ e K_{IC} da seguinte maneira (Janssen, 2006):

$$CTOD_{IC} = \frac{K_{IC}^2}{E\sigma_{esc}} \quad (18)$$

O valor de $CTOD_{IC}$ para uma região de plastificação circular é dado por:

$$CTOD_{IC} = \frac{4}{\pi} \frac{K_{IC}^2}{E\sigma_{esc}} \quad (19)$$

As equações (18) e (19) mostram que os conceitos de CTOD em regime elástico são compatíveis com a teoria da MFLE, porém, possuem maior relevância dentro do limite plástico, uma vez que a plasticidade na ponta da trinca é levada em conta. No começo estas aplicações foram restritas a análises bidimensionais, assumindo tanto estado plano de tensões quanto estado plano de deformações. Atualmente, o critério CTOD está sendo utilizado em análises tridimensionais para estudos de efeitos de restrição e do processo de fratura.

O CTOD é uma das técnicas mais simples e historicamente foi uma das primeiras a serem utilizadas para a obtenção do fator de intensidade de tensão a partir de resultados em elementos finitos (Chan, 1970). O deslocamento de um ponto de um nó em uma malha obtido por elementos finitos é substituído diretamente nas expressões analíticas para a ponta da trinca. Geralmente esse ponto é escolhido de tal forma que seja um nó na face da trinca onde o deslocamento será o maior, assim o erro do deslocamento relativo será menor. A Figura 11 ilustra o ponto b como o nó que terá o maior deslocamento, e o ponto a como a extremidade da trinca.

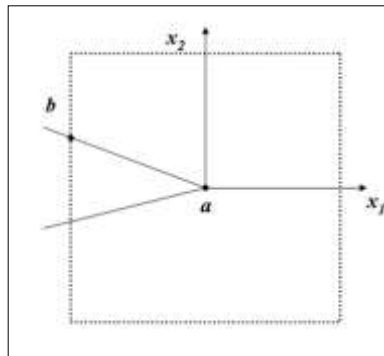


Figura 11 - Distribuição dos pontos correlatos para o cálculo de CTOD. Fonte: (FORTES, 2011)

As expressões analíticas para obtenção do fator de intensidade de tensão a partir da abertura da trinca são:

$$K_I = \frac{\mu\sqrt{2\pi}(v_b - v_a)}{\sqrt{r}(2-2\nu)} \quad (20)$$

$$K_{II} = \frac{\mu\sqrt{2\pi}(u_b - u_a)}{\sqrt{r}(2-2\nu)} \quad (21)$$

$$K_{III} = \frac{\mu\sqrt{2\pi}(w_b - w_a)}{\sqrt{r}(2-2\nu)} \quad (22)$$

onde μ é o módulo de cisalhamento, ν é o coeficiente de Poisson, r é a distância da ponta da trinca ao ponto de correlação, e u_i , v_i e w_i são os deslocamentos em x, y e z.

Essa relação tem a grande vantagem por sua simplicidade e pela fácil obtenção dos três fatores K. Porém, para obtenção de resultados com uma relativa precisão deve-se ter cuidado na escolha do ponto

de correlação, e uma malha refinada na região da trinca também é necessária. Uma abordagem utilizada é calcular fatores de intensidade de tensões para uma série de pontos nas proximidades da ponta da trinca, uma curva é então ajustada para esses valores e extrapolada para um valor de K_I onde o raio r é igual a zero. Os K_I 's calculados por esta abordagem podem ser melhorados se um elemento *quarter-point* for utilizado na ponta da trinca. (Shih 1976) e (Tracey 1977).

2.10 MÉTODO CMOD (CRACK MOUTH OPENING DISPLACEMENT)

O método *crack mouth opening displacement* (CMOD) nada mais é do que a medição da abertura da boca da trinca, através de um clip gage fixado na abertura do entalhe do corpo de prova. Baseado na teoria do CTOD, onde a medição do deslocamento de um nó na abertura do entalhe, pode ser relacionado diretamente com o tamanho da ponta da trinca. A leitura é feita e a variação desse deslocamento e que resulta em uma relação com o tamanho da trinca através de relação dada norma.

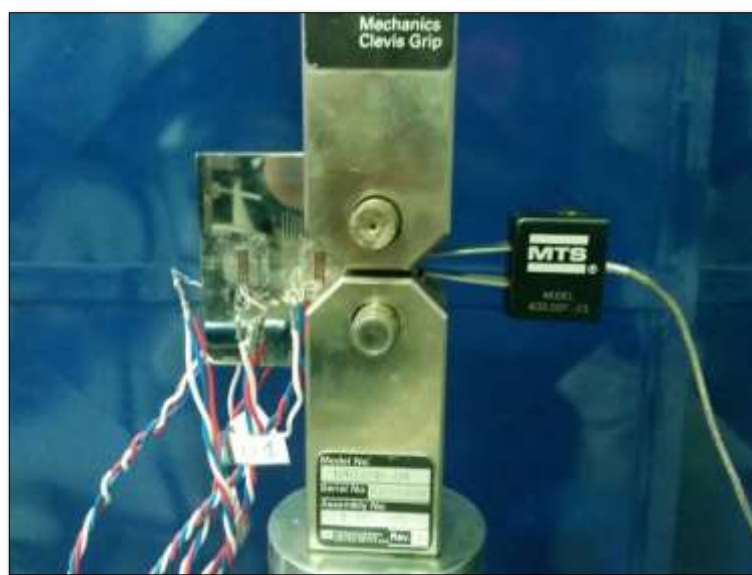


Figura 12 - Corpo de ensaio do tipo C(T) com o clip gage fixado na boca do entalhe.

2.11 MÉTODO DE DEFORMAÇÃO DA FACE TRASEIRA (BACK FACE STRAIN)

Tema principal do trabalho, o método de medição do tamanho da trinca através da deformação a face traseira será detalhado nesta seção. O contexto histórico suas vantagens e desvantagens além de dados da literatura que darão embasamento teórico para o projeto.

2.11.1 O método

A tensão calibrada na face traseira (a face contrária a qual a abertura é feita) de um corpo de tensão compacto CT nos fornece um método de crescimento de trinca quando a carga é conhecida ou para medir a carga quando o comprimento da trinca é conhecido. O método é simples, confiável, sensível e

barato. Foi descoberto também uma boa relação entre a medida da tensão no corpo de prova e valores computados em uma análise em elementos finitos de forma bidimensional. (DEANS e RICHARDS, 1979)

Nesse método as deformações são calculadas na face traseira do corpo de prova através de extensômetro ou “strain gage”. Assim é possível sua utilização para medições em tensões de um único ponto ou em corpos de prova de três ou quatro pontos curvos. Lembrando que todos os corpos de prova devem agir de uma maneira linear elástica. (DEANS e RICHARDS, 1979)

2.11.2 Evolução histórica

Corpo de prova compacto de tração C(T) são os espécimes mais utilizados para se realizar a medição de taxas de crescimento de trincas por fadiga em materiais metálicos. Dois métodos tem sido utilizado para medir automaticamente o tamanho da trinca nesses corpos de prova com o uso de *compliances*. São eles o fator de deslocamento da abertura da boca da trinca (CMOD) e o fator de deformação da face traseira (BFS).

Cerca de 35 anos atrás, esforços já eram realizados para desenvolver uma relação para corpos de prova padrão, como proposto por (DEANS e RICHARDS, 1979), para a realização de avaliação da taxa de propagação de trincas por meio de medições na face traseira do espécime. Essa deformação negativa por unidade de carga, negativa, foi calculada sobre a parte traseira do corpo de prova do tipo C(T) juntamente com um método de elementos finitos bidimensional, relacionando assim o comprimento-por-largura (a/W) com tensão na face traseira $(E(\epsilon W)B)/P$.

Essa técnica utiliza-se de um extensômetros colado na face traseira do corpo de prova para obtenção da deformação na face traseira e com isso, através do uso de definições da literatura é possível determinar o tamanho da trinca. Segue um esquemático da montagem experimental na Figura 13.

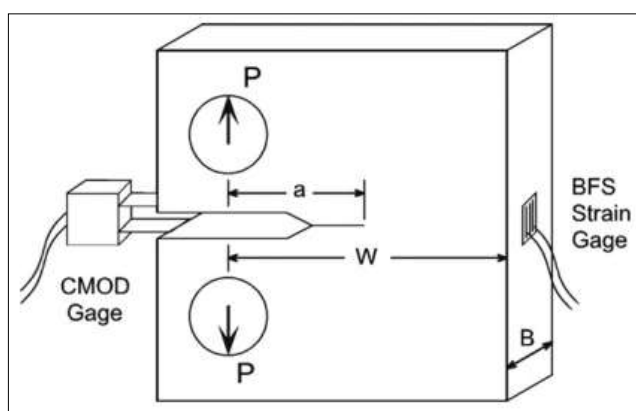


Figura 13- Corpo de prova do tipo CT com CMOD e BFS. (Fonte: (NEWMAN, YAMADA e JAMES, 2011))

Para os testes executados conforme o esquema acima, medições remotas são recomendadas por serem experimentalmente mais simples e tendem a ser mais constantes do que as medições feitas perto da ponta da trinca, comprovado por Deans e Richards (DEANS e RICHARDS, 1979).

Algum tempo depois, Maxwell (MAXWELL, 1987) usou o método de elementos finitos para determinar valores de deformação da face traseira para relações (a/W) com variação de 0,2-0,8 e desenvolveu uma expressão que relaciona o tamanho da trinca com a deformação na face traseira. Shaw e Zhao também determinaram dados adicionais a esta técnica usando o alumínio 2024-T351 em seus experimentos. Riddell e Piascik (RIDDELL e PIASCIK, 1998) usaram formulações adicionais usando um código de elementos finitos para a relação entre BFS e o tamanho da trinca tendo como intervalo de validade de $0,1 < a/W < 0,9$. Por fim, Newman e Johnston (NEWMAN e JOHNSTON, 2003) do centro de pesquisa NASA Langley, readaptaram os resultados de (RIDDELL e PIASCIK, 1998) utilizando a mesma equação CMOD (EVB/P) utilizada na norma ASTM E647 padrão (onde o tamanho de abertura da trinca é substituído por multiplicação da deformação(ϵ) e a largura (W), $|E(\epsilon W)B/P|$).

2.11.3 Normas

Não há uma norma específica para o método de deformação da face traseira. A norma E647 no anexo A1 que trata do corpo de prova do tipo C(T) traz uma equação com seus coeficientes para o método COD, mas ainda não consta com dados para o BFS. O experimento aqui mostrado é baseado em artigos científicos nos quais estudos foram feitos mostrando basicamente a influência da razão de carregamento, do fator de intensidade de tensão, da localização dos extensômetros ao longo da linha média traseira do espécime, do tipo de carga e do material do corpo de prova. O que na verdade existe são experiências na literatura de testes realizados com sucesso e que vem se aperfeiçoando nos últimos anos. A norma que é utilizada para os ensaios de propagação de trinca é a norma ASTM E647, visto que o método consiste em analisar como o tamanho da trinca caminha com a aplicação de uma força. O BFS baseia-se em um método alternativo, mas confiável, com suas vantagens, que serão explicadas na próxima seção, com a finalidade de que se consiga analisar uma trinca de fadiga e evitar acidentes e gastos desnecessários. Pois técnicas já fundamentadas e com igual eficácia as vezes se tornam difíceis de serem aplicadas em determinadas condições de contorno. A seguir em um histórico dos dados sobre esse método será mostrado também os dados fornecidos de *compliance* que servirão de base para os cálculos deste experimento.

2.11.4 Vantagens do método

Desde que Deans e Richards (DEANS e RICHARDS, 1979) propuseram esta técnica em meados do ano de 1979, já apontavam vantagens do método em relação aos outros que existiam como o método ótico, elétrico por extensômetro de filamento, elétrico por queda de potencial, ultrassônico, emissão acústica, dentre outros, mas principalmente o método COD através da medição da abertura da trinca

através de clip gages. Abaixo pode-se notar as vantagens que o método COD e o BFS apresentam sobre os demais no que se confere à medição de tamanho de trinca:

- Comparados com o método ótico, deixam de lado a subjetividade da aferição;
- Podem ser usados com propriedade em ambientes onde o método ótico não é possível. Extensômetros encapsulados e transdutores são capazes de resistir a altas temperaturas e pressões, além de ambientes agressivos. Neste caso, o BFS tem uma desvantagem no custo se extensômetros de alto custo não puderem ser reaproveitados ao final do teste. No entanto, é possível que se utilize transdutores ou *clip gages* para medir a face traseira, principalmente em peça de grande tamanho;
- Os sinais analógicos são facilmente adaptados para serem incorporados em testes computadorizados ou automatizados;
- São métodos que apresentam critérios superiores para aumento na precisão da medição do tamanho da trinca;
- Além do mais ambos os métodos podem ser facilmente calibrados para uma trinca na fase de iniciação e estudos de crescimento dos entalhes.

Porém serão apresentadas vantagens e desvantagens do método de deformação através da medição da mesma na face traseira em comparação ao método COD

Como vantagem o BFS tem a seu favor:

- Extensômetros possuem um valor muito menor do que transdutores (*clip gages*) para uso nas mesmas circunstâncias. Este fato pode não ter importância para testes individuais, mas em aplicações particulares de medições do tamanho da trinca, a , (ou medida de P quando a é conhecido a partir de outra técnica como a queda de potencial), com um número grande de corpos de prova.
- O BFS é simples, confiável, sensível e extremamente barato.
- *Clip gages* possuem desvantagens quando comparados aos extensômetros devido ao contato mecânico que deve haver entre as garras e o corpo de prova. Há sempre a possibilidade de ocorrer algum movimento e o sensor ser de forma não intencional deslocado, especialmente em testes de longa duração;
- Há espaço para acoplar vários extensômetros ao longo da espessura do corpo de prova. Eles podem ser acoplados de certa forma que se tenha além de uma precisão maior dos dados a certeza de obter-se os resultados mesmo que algum venha a falhar. A análise por extensômetro na face traseira é uma técnica mais sensível e confiável do que o CMOD;
- Para condições de K constante o BFS aumenta linearmente com a razão a/w , pelo menos durante a condição linear elástica, no plano de ação do mesmo. Essa característica pode e muito simplificar o controle do teste via computador. Em contrapartida o COD não é linear com a/w para condições de K constante, além disso, a calibração varia de acordo com o posicionamento do transdutor ou *clip gage* atrás da linha de carga;

- O decréscimo de K mantendo-se a deformação na face traseira constante poderia particularmente ser útil para obter-se ΔK_0 ou K_{IC} . Certamente que pode ocorrer em alguns casos de a taxa de decréscimo de K para BFS constante ser tão rápida que pode resultar em valores não válidos de ΔK_0 ou K_{IC} . No entanto, onde esses casos não ocorrem pode-se economizar tempo e material usando o BFS comparado com o COD. Além disso, testes com elementos finitos foram desenvolvidos com outras geometrias de corpo de prova, demonstrando que o método também pode ser aplicado nesses casos.

2.11.5 Modelos propostos pela literatura e dados de *Compliance*

A forma padrão para validar esse método de monitoração do tamanho da trinca é gerando novos coeficientes nas equações adimensionais que se relacionam com a/W , vale notar que a medição da deformação compressiva na face traseira necessariamente modifica a polaridade do extensômetro.

Uma característica útil segundo Deans e Richards, (DEANS e RICHARDS, 1979) é que a força cresce linearmente com a (ou a/W), apenas lembrando que a é o comprimento da trinca, e W o comprimento do corpo de prova, para um K (fator de intensidade da tensão), exceto em uma trinca profunda em um corpo do tipo C(T). Logo, se $A(a/W)$ é uma função de a/W e BFS (tensão na face traseira), então essa tensão pode ser expressa da forma:

$$(BFS) = A(a/W)P \quad (23)$$

Usando um parâmetro normalizado

$$P^* = P/BWE \quad (24)$$

Onde B é a espessura do corpo de prova, e E é o seu módulo de Elasticidade.

$$(BFS) = A^*(a/W)P^* \quad (25)$$

onde, $A^*(a/W)$ é uma função de a/W . Sendo assim.

$$A^*(a/W) = [(BFS)/P]BWE \quad (26)$$

Normalizando nesse caminho, $A^*(a/W)$ não depende do material e dimensões do corpo de prova (CT). A Figura 14 mostra a variação dessa relação adimensional com a razão de a/w .

Para o corpo de prova CT, o extensômetro de face traseira mostra menos histerese, é mais sensível e é menos influenciado por ruídos mecânicos de carregamento de pino, do que o sensor de medição da abertura da boca. E a medição da face traseira é também efetiva para corpos de prova que possuem o centro da parte frontal trincado.

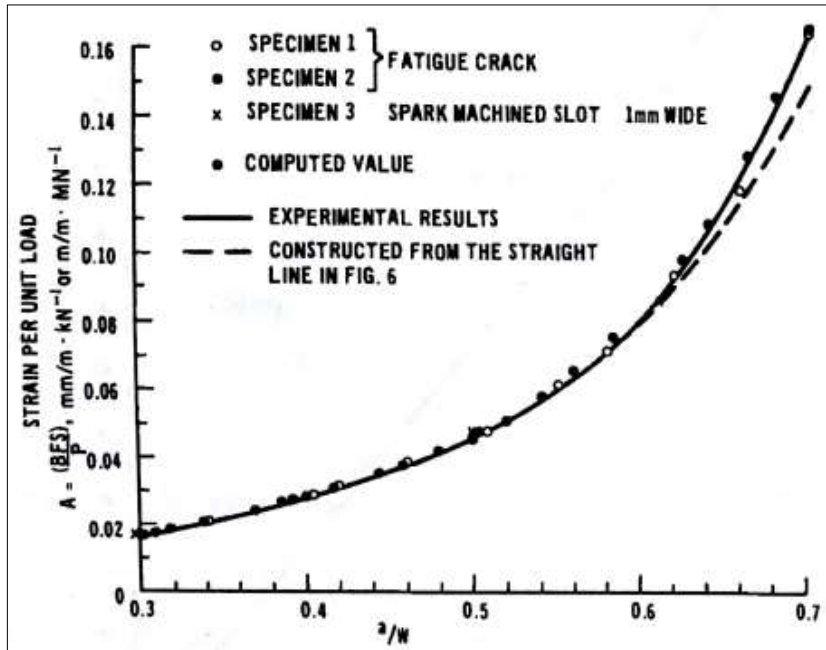


Figura 14 - Variação de BFS por unidade de carga por a/w para um corpo de prova de 25mm.
(DEANS e RICHARDS, 1979)

Em seguida aos estudos de Deans e Richards, Maxwell (MAXWELL, 1987) quase 10 anos depois fez uma análise em elementos finitos afim de determinar dados para cálculo da deformação em corpos de prova do tipo compacto de tração para razões a/w de 0.2 a 0.8. Através da mesma relação adimensional de Deans e Richards, desenvolveu a expressão analítica matemática:

$$-EBCW = 40.7730 - 673.330\alpha + 4648.77\alpha^2 - 16372.8\alpha^3 + 31712.6\alpha^4 - 31853\alpha^5 + 13172.9\alpha^6. \quad (27)$$

onde: $C = \varepsilon/P$ e $\alpha = a/W$ que é a razão de crescimento da trinca.

Plotando a razão $-EBCW$ versus a relação a/W e fazendo um ajuste polinomial a esses pontos teremos a equação (28) também representada na Figura 15:

$$\frac{a}{W} = 0.99999 - 2.00085U - 0.75959U^2 + 10.015650U^3 - 18.39149U^4 + 14.23767U^5 - 4.05333U^6 \quad (28)$$

onde $U = \frac{1}{\sqrt{-EBCW}}$ e que essa função foi utilizada baseada na calibração da expressão do CMOD.

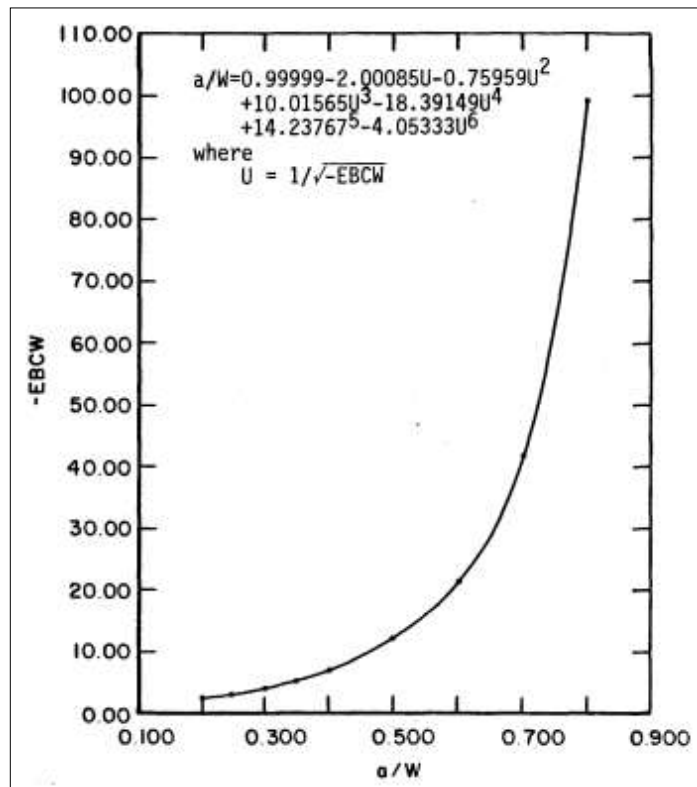


Figura 15 - Compliance do BFS analítico pela razão a/W. (MAXWELL, 1987)

Anos depois já em 1994, Shaw e Zhao (SHAW e ZHAO, 1994) também buscaram aperfeiçoar a técnica e através de ensaios também desenvolveram uma equação polinomial de grau 4 de fácil incorporação em programas de computador que é:

$$A\left(\frac{a}{W}\right) = 20.52 - 225.36\left(\frac{a}{W}\right) + 1001.14\left(\frac{a}{W}\right)^2 - 1830.93\left(\frac{a}{W}\right)^3 + 1347.23\left(\frac{a}{W}\right)^4 \quad (29)$$

Comparando-se esse método com o inicial de Deans e Richards diferenças de até 22% na razão a/W=0.7 podem ser encontradas.

Em seguida foi a vez de Riddell e Piascik (RIDDELL e PIASCIK, 1998) utilizarem também um código de elementos finitos para definirem novos dados de compliance para o corpo de prova C(T) utilizando o FRANC2D para razões de comprimento de 0.1 a 0.9.

Sua relação adimensional foi a mesma utilizada na literatura anterior: $A^* = \varepsilon EBW/P$

Na Figura 16, Piascik teve como resultado o campo de concentração da deformação e tensão no corpo de prova a fim de analisar a localização ideal para a localização do extensômetro.

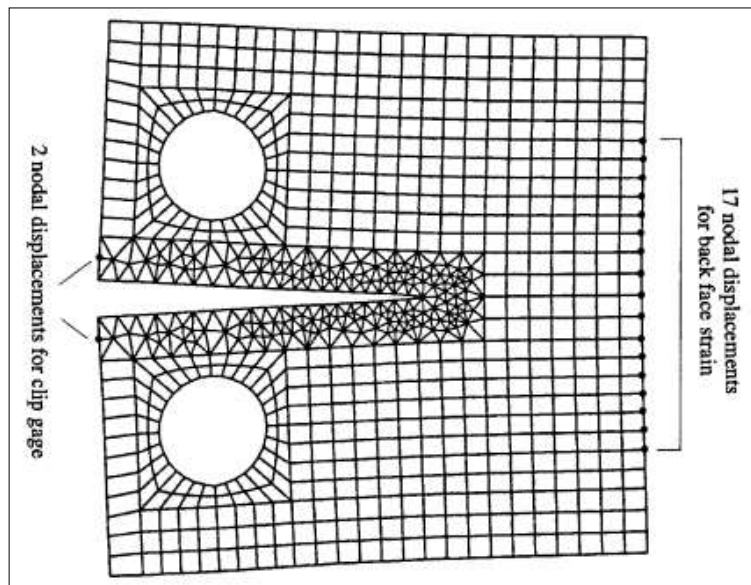


Figura 16 - Análise da malha de elementos finitos para o corpo de prova C(T) com $a/w=0.5$ (RIDDELL e PIASCIK, 1998)

Gerando a relação abaixo também demonstrada através de comparação na Figura 17 e Figura 18:

$$\frac{a}{W} = -0.07978 + 0.83982(\log A^*)^2 - 0.64978(\log A^*)^3 - 0.21704(\log A^*)^4 + 0.03154(\log A^*)^5 \quad (30)$$

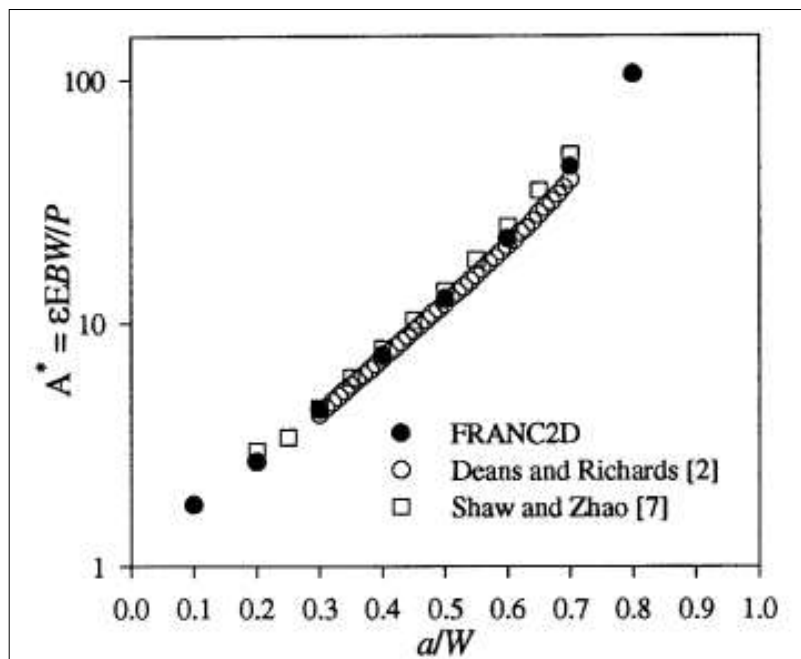


Figura 17 - Parâmetro de deformação traseira(A^*) versus a/W . (RIDDELL e PIASCIK, 1998)

| a/W | A* | | |
|------|---------|------------------------|-------------------|
| | FRANC2D | Deans and Richards [7] | Shaw and Zhao [8] |
| 0.10 | 1.803 | - | - |
| 0.15 | - | - | - |
| 0.20 | 2.710 | - | 3.002 |
| 0.25 | - | - | 3.405 |
| 0.30 | 4.436 | 4.26 | 4.492 |
| 0.35 | - | 5.56 | 5.999 |
| 0.40 | 7.422 | 7.17 | 7.868 |
| 0.45 | - | 9.31 | 10.240 |
| 0.50 | 12.581 | 12.0 | 13.461 |
| 0.55 | - | 15.6 | 18.076 |
| 0.60 | 22.197 | 20.6 | 24.834 |
| 0.65 | - | 27.8 | 34.687 |
| 0.70 | 43.003 | 38.3 | 48.787 |
| 0.75 | - | - | - |
| 0.80 | 100.076 | - | - |
| 0.85 | - | - | - |
| 0.90 | 420.500 | - | - |

Figura 18 - Comparação de resultados do parâmetro A* para Deans, Shaw e Riddell. (RIDDELL e PIASCIK, 1998)

Em 2003 Newman e Johnston (NEWMAN e JOHNSTON, 2003) refizeram os cálculos de Riddell e Piascik e encontram novos dados de ajuste do polinômio usando também o FRANC2D e a mesma forma de equação conforme apresentado na norma E647 porém como dito anteriormente mudando o deslocamento na equação pela deformação resultando em $|E(\epsilon W)B/P|$ logo a equação resultante de Newman e Johnston válida para razões $a/w = 0.2 - 0.8$ foi:

$$\frac{a}{W} = 1.0343 - 2.8098U + 4.1335U^2 - 23.694U^3 + 76.371U^4 - 83.25U^5 \quad (31)$$

onde $U = \frac{1}{\sqrt{A+1}}$ e $A = |E(\epsilon W)B/P|$

mostrando que eles trabalharam muito bem com razões até 0.8. No entanto, acima desses valores discrepâncias são encontradas o que fez com que em 2011 Newman Jr e Yamada, (NEWMAN, YAMADA e JAMES, 2011) aperfeiçoassem e desenvolvessem um novo *compliance* que pudesse ser utilizado usando o padrão ASTM para um grande espectro de razões de comprimento da trinca que neste caso variam de $0.2 < a/W < 0.95$.

$$\frac{a}{W} = 1.0033 - 2.35U + 1.3694U^2 - 15.294U^3 + 63.182U^4 - 74.42U^5 \quad (32)$$

que é a relação utilizada neste projeto. Resumindo assim o contexto histórico do método, desde a sua criação no fim dos anos 70 até a sua estabilização como um método confiável e barato sendo demonstrado resultados satisfatórios como se pode ver nas Figura 19, 20 e 21.

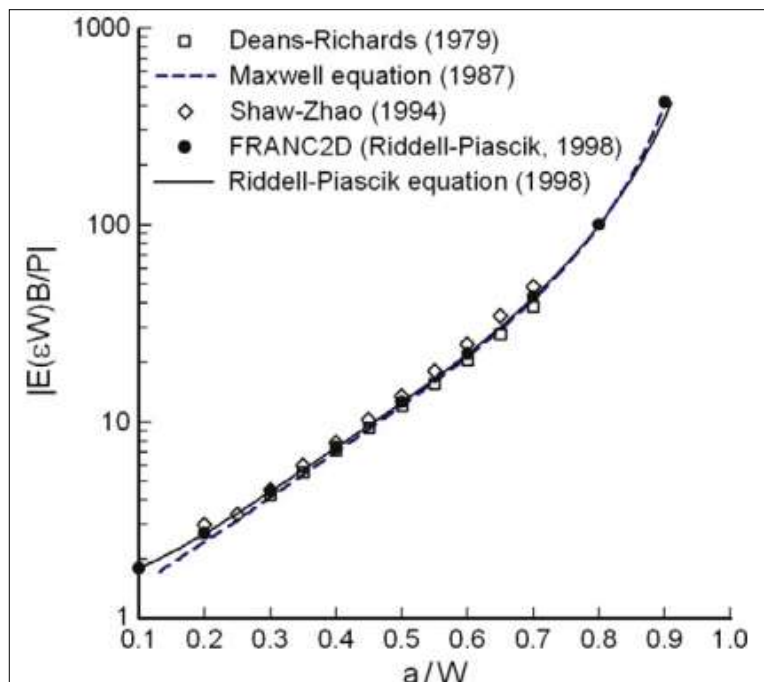


Figura 19 - Resultados de BFS normalizados da literatura para corpos de prova do tipo C(T). (NEWMAN, YAMADA e JAMES, 2011)

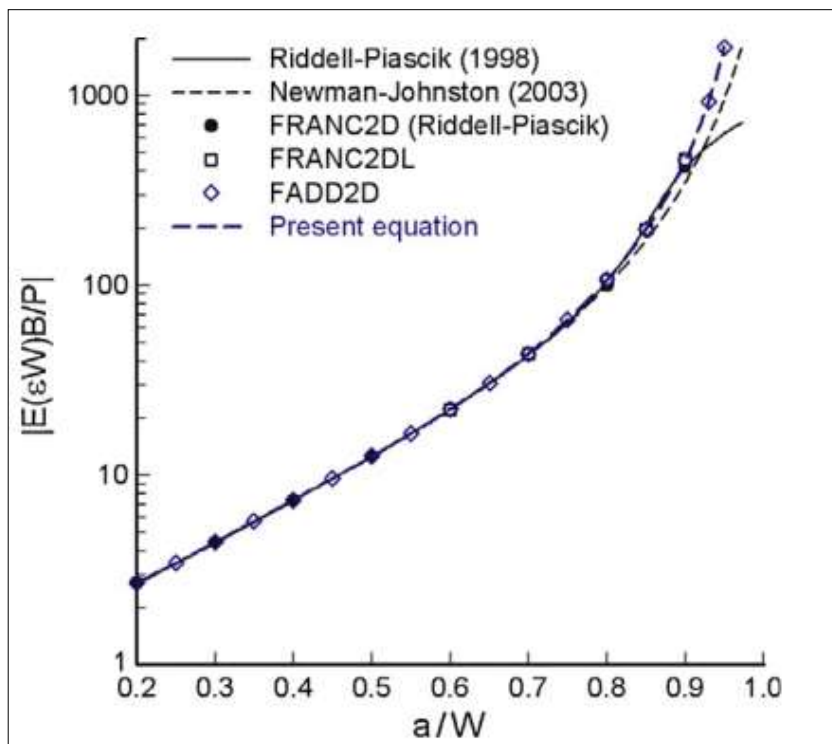


Figura 20 - BFS normalizado versus razão de comprimento para C(T). (NEWMAN, YAMADA e JAMES, 2011)

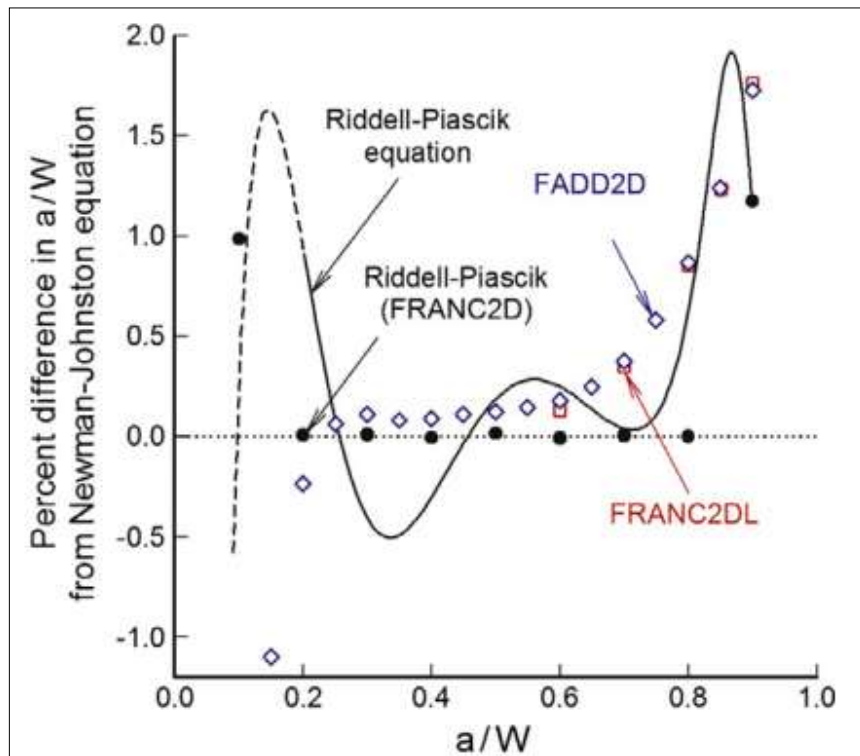


Figura 21 - Percentual de diferença na determinação do tamanho da trinca a partir da equação de Newman-Johnston. (NEWMAN, YAMADA e JAMES, 2011)

3 METODOLOGIA DOS ENSAIOS DE PROPAGAÇÃO DE TRINCAS

3.1 INFORMAÇÕES GERAIS SOBRE A NORMA E647

A norma E647 da *American Society for Testing and Materials* (ASTM), regeu os métodos, corpos de provas, aparatos, sugestão de análise de dados para ensaios de obtenção da taxa de propagação de trinca (da/dN) e limiar de taxa de propagação (ΔK).

A norma E647, como toda norma, serve para padronizar os métodos experimentais utilizados em testes de obtenção de taxas de propagação de trincas em regime permanente de fadiga. Permite a seleção de materiais e parâmetros de inspeção para projetos baseados em tolerância ao dano. A norma considera toda a faixa do diagrama de da/dN x ΔK desde o limiar inferior de propagação no estágio I, ΔK_{th} , até o limite de ruptura do material no estágio III.

Diversos procedimentos de teste são propostos pela norma, para três tipos de corpos de prova (CPs). É possível a adaptação da norma aos três tipos, lembrando-se sempre de que haverá necessidade de calibração para cada tipo.

3.1.1 Corpo de Prova

Os CPs padronizados são os do tipo *Compact-Tension* – C(T). Este é o mais utilizado para ensaios experimentais, seu formato pode ser observado na Figura 22.

As faces identificadas com a letra “A” devem estar perpendiculares e paralelas, quando aplicável, com uma tolerância de até $\pm 0,002 W$. A ponta do entalhe deve estar igualmente distante das faces superior e inferior do CP com uma tolerância de até $0,005 W$. Acabamentos superficiais e dos furos devem ser de 0,8 ou mais fino (ASTM E647, 2011)

A norma E647, não oferece nenhuma indicação específica para a escolha do valor W , apenas um valor mínimo sugerido. Portanto, restrições do material ou da aparelhagem experimental podem ser consideradas para definir as medidas do CP. É apenas sugerido um valor mínimo para a_n , e o valor definitivo deve ser escolhido com bom senso e conhecimento sobre MF.

Diferentemente dos corpos de prova utilizados para ensaios de obtenção de K_{Ic} , não há uma restrição tão forte sobre a espessura mínima do CP de propagação. A recomendação da ASTM é que a espessura seja, b , dentro dos limites $(W/20) \leq b \leq (W/4)$. Esta recomendação é baseada em considerações da MFLE. A escolha da espessura também deve considerar os aparatos de fixação da máquina de ensaio. Adicionalmente, ao escolher uma razão pequena b/W , efeitos de tensões residuais sobre a trinca e a propagação podem ser minimizados (ASTM E647, 2011).

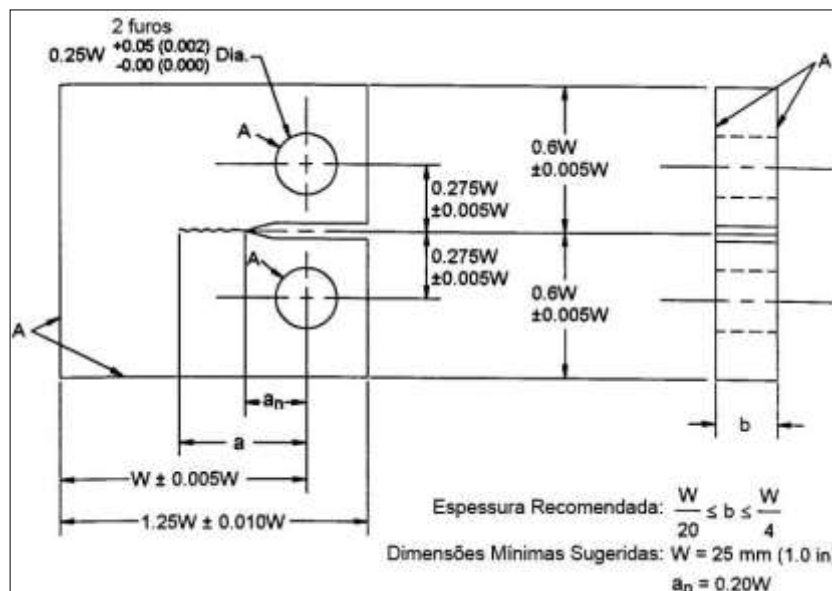


Figura 22 - Corpo de prova Compacto de Tração – C(T) – para ensaios de taxa de propagação de trinca. Fonte: (ASTM E647, 2011)

3.1.2 Entalhe e pré-trinca

O preparo do entalhe no CP pode ser feito por diversos métodos de usinagem. A escolha de um tipo de método (eletroerosão, serra, brochamento, etc.) depende do tipo de material trabalhado, da geometria do entalhe e do acabamento desejado. Diversas geometrias possíveis de entalhe, assim como algumas recomendações, estão apresentadas na Figura 23.

O comprimento do entalhe deve ser de pelo menos $a_n=0,2 W$ para que a calibração de K não seja influenciada por pequenas variações de localização e dimensões dos furos de encaixe para os pinos de carregamento. Caso se suspeite da presença de tensões residuais, medições locais de deslocamento podem ser feitas antes e após a usinagem, para dar uma ideia da magnitude do efeito (ASTM, 2011).

Deverá ser feita uma pré-trinca antes do início dos ensaios, a fim de fugir da região do material onde se encontram tensões residuais, a pré-trinca tem também as funções de aproximar o comportamento inicial dos ensaios àquele de um trinca ideal (trinca aguda), evitar os efeitos de transição (do entalhe para a trinca), satisfazer as limitações de tamanho mínimo de trinca e permitir a conformidade do comportamento do material com o esperado.

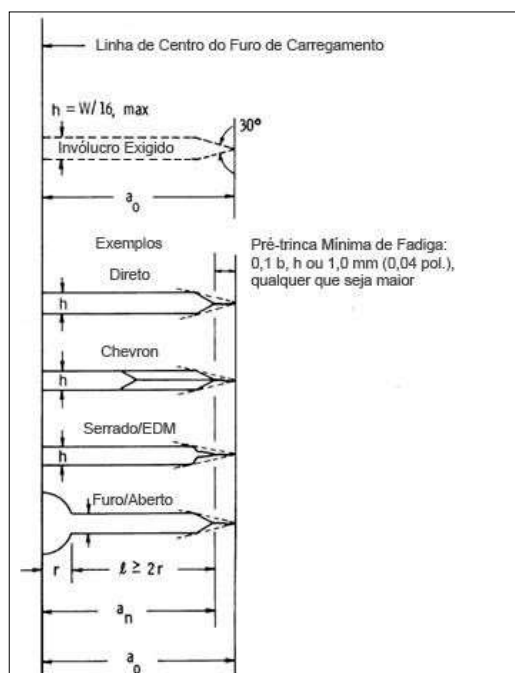


Figura 23 - Detalhes de entalhe e pré-trinca para diversas configurações de entalhe em C(T).

Fonte: (ASTM E647, 2011)

A pré-trinca deve ser feita com o material já nas condições de ensaio. Os dispositivos devem estar configurados de tal modo que a distribuição de carga seja simétrica em relação ao entalhe no CP e o K_{max} não tenha uma variação maior que 5 %, sendo o comprimento da pré-trinca igual ou superior ao maior dentre: $0,10b$, h ou $1,0$ mm. (ASTM E647, 2011)

O K_{max} final durante a formação da pré-trinca não deve exceder o K_{max} que será utilizado durante o ensaio de propagação, porém, se necessário, um K_{max} maior pode ser utilizado para iniciar a pré-trinca no entalhe, contanto que seja reduzido gradualmente para satisfazer tal restrição. Uma redução de P_{max} a cada etapa não seja superior a 20 %, e que ocorra algum incremento mensurável no comprimento da trinca antes de seguir ao próximo passo. Para evitar efeitos de transição em cada passo, tal incremento de deslocamento deve ser de pelo menos $(3/\pi)(K'_{max}/\sigma_0)^2$, onde K'_{max} é o valor terminal de K_{max} para dada etapa. (ASTM E647, 2011)

3.2 APARATOS EXPERIMENTAIS

Na realização dos ensaios experimentais de taxa de propagação de trinca é necessária uma máquina que realize ensaios mecânicos com a maior precisão possível e menor interferência sobre os resultados. Juntamente com a máquina, são necessários aparelhos para leitura e controle do ensaio.

A norma define os aparatos para fixação do CP na máquina de ensaio. Para o caso do C(T), uma montagem de pino e manilha deve ser utilizada em ambos os furos, permitindo a rotação do CP no plano normal aos furos quando carregado. As dimensões da manilha e do pino são baseadas nas dimensões W e b do C(T) ensaiado, suas referências de medidas podem ser observados na Figura 24.

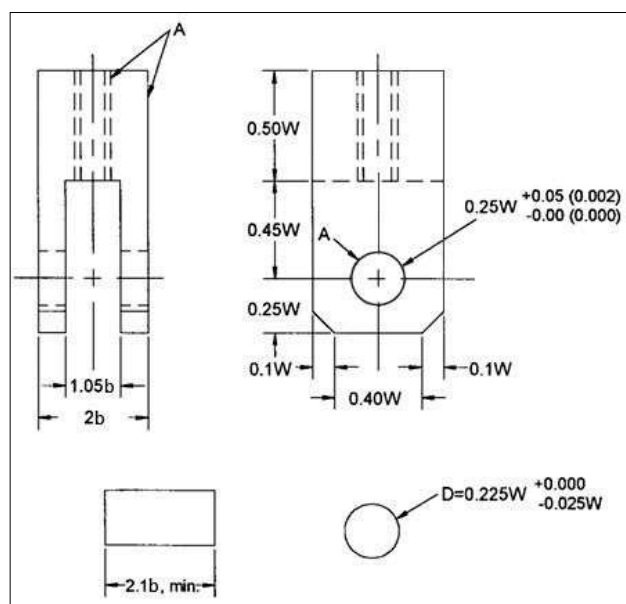


Figura 24 - Manilha e pinos para a configuração de ensaio com C(T). Fonte: (ASTM E647, 2011)

Todas as dimensões do desenho estão em milímetros, sendo o valor entre parênteses a medida em polegadas. As faces identificadas com a letra “A” devem estar perpendiculares ou paralelas, quando aplicável, com uma tolerância de até $\pm 0,05$ mm. Acabamentos superficiais, dos furos e dos pinos devem ser de 0,8 ou mais fino. (ASTM E647, 2011)

O bom alinhamento entre as garras também é importante para reduzir o efeito de carregamentos excêntricos. Um desalinhamento pode causar crescimento assimétrico da trinca especialmente em regiões próximas ao limiar de propagação, invalidando os resultados.

3.2.1 Variáveis do ensaio

O crescimento de trinca por fadiga é definido como uma função de R e ΔK . ΔK por sua vez pode ser definido pelas relações entre R e K_{max} das Equações:

$$\Delta K = (1 - R)K_{max} \quad \text{se } R \geq 0 \quad (33)$$

$$\Delta K = K_{max} \quad \text{se } R \leq 0 \quad (34)$$

Expressar da/dN como uma função de ΔK provê resultados que não dependem da geometria, permitindo a comparação de dados obtidos através de diferentes combinações de corpos de prova e carregamentos, para a aplicação destes conhecimentos em projetos de engenharia. Considera-se que trincas de diferentes comprimentos submetidas a um mesmo ΔK nominal vão se propagar em proporções iguais a cada ciclo. (ASTM E647, 2011)

Um dos métodos mais simples de observação do tamanho de trinca é a inspeção visual, que pode ser auxiliada por marcas feitas previamente (como uma régua), instrumentos de ampliação ótica e

outras técnicas, como uso de iluminação indireta. A norma considera apropriados quaisquer métodos que possam detectar um crescimento de até 0,10 mm ou 0,002 W . Medições devem ser feitas em ambas as faces do CP (frontal e traseira) para verificar a simetria da trinca, podendo ser feitas em apenas uma das faces caso ensaios anteriores na mesma configuração tenham demonstrado uma consistência de simetria.

Um método não visual utilizado na medição da propagação de trincas em fadiga utiliza o CTOD *gages e gages na face traseira*. Um grande problema encontrado na condição de CMOD é o alto custo do equipamento chegando a mais de R\$25.000,00 quando comparado ao preço de um extensômetro convencional de 100,00 reais.

3.2.2 Critérios de validação

Alguns critérios devem ser cumpridos para o ensaio ser considerado válido. Um dos critérios exige que o material do CP esteja em regime predominantemente elástico para todos os valores de carga aplicada. Para o C(T) isso pode ser cumprido obedecendo à relação da Equação 35:

$$(W - a) \geq \frac{4}{\pi} \left(\frac{K_{max}}{\sigma_0} \right)^2 \quad (35)$$

onde $(W-a)$ é o comprimento do trecho ainda íntegro do CP, e a tensão de escoamento σ_0 deve ser obtida nas mesmas condições do ensaio.

Seguindo a recomendação da norma para verificar a simetria da trinca, alguns parâmetros devem ser estabelecidos para uma trinca ser considerada simétrica ou não. De maneira semelhante à condição de validação para a pré-trinca, caso a diferença entre os comprimentos medidos da trinca em ambos os lados do CP seja maior do que $0,25b$ o ensaio é invalidado. Outro parâmetro é a inclinação da trinca como pode ser visto na Figura 25. Se esta se propagar por um plano com $\pm 20^\circ$ do plano de simetria por uma distância de $0,1 W$ ou maior o ensaio é invalidado pelos critérios da norma E647. Caso o desvio do plano seja entre $\pm 10^\circ$ e $\pm 20^\circ$ ele deve ser relatado, mas não invalida o ensaio. (ASTM E647, 2011)

Caso métodos não visuais sejam utilizados para medição do comprimento da trinca e assimetria ou angulação da trinca sejam observadas, métodos de medição visual devem ser utilizados para garantir que os requisitos de validação foram satisfeitos (ASTM, 2011).

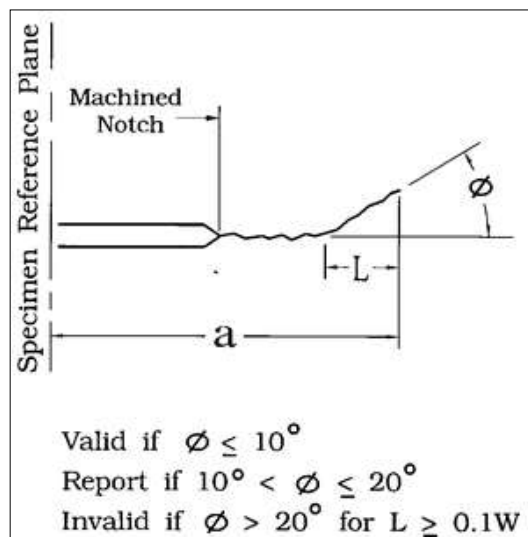


Figura 25 - Limites para validação do ensaio. Fonte: (ASTM E647, 2011)

3.2.3 Análise dos dados observados

Ao término de um ensaio, a superfície de fratura deve ser inspecionada em pelo menos dois locais para determinar a curvatura da trinca ao longo da espessura. Se o contorno da trinca for visível, o comprimento de trinca deve ser medido em três posições: o centro da trinca e as posições intermediárias entre o centro e as faces do CP, como de acordo com a norma E399 (ASTM E399, 2012)

Caso o fator de intensidade de tensões calculado com a correção de curvatura resulte numa diferença maior que 5% com o fator encontrado no ensaio, a correção de curvatura deve ser considerada durante a análise dos dados. Para o caso de uma curvatura variável ao longo da trinca, interpolação deve ser utilizada para determinar a correção (ASTM E647, 2011).

A taxa de propagação de trinca deve ser determinada através de técnicas de redução de dados. Os métodos recomendados pela norma para ensaios de K crescente são os métodos da secante e o polinomial incremental. Para ensaios de K decrescente recomenda-se o método da secante caso a redução seja em etapas. Caso a redução seja contínua, o método polinomial pode ser aplicado. (ASTM E647, 2011)

A norma propõe que a precisão dos ensaios é uma função inerente à variabilidade do material. A precisão requerida no carregamento de $\pm 2\%$ é facilmente encontrada nas máquinas eletro-hidráulicas de ensaio modernas. Esta precisão resulta na variabilidade de $\pm 2\%$ em ΔK e de $\pm 4\%$ a $\pm 10\%$ em da/dN para taxas acima do limiar. Estima-se, no entanto, que o erro na medição do comprimento de trinca contribua de maneira bem mais significativa sobre a variação em da/dN . Este erro é bem mais difícil de ser isolado já que está acoplado ao procedimento de análise para converter $a \times N$ em da/dN . (ASTM E647, 2011)

3.2.4 Limiar de propagação

A norma E647 define como limiar de propagação de trinca em fadiga “o valor assintótico de ΔK no qual da/dN se aproxima de zero” (ASTM E647, 2011). O limiar é definido operacionalmente como o valor de ΔK correspondente a uma taxa de propagação de 10^{-7} mm/ciclo, esse é o ΔK_{th} (*threshold*).

Para a determinação do limiar, a melhor reta de ajuste deve ser encontrada através de uma regressão linear do logaritmo dos pontos ou outro método mais adequado, para um conjunto de pelo menos cinco pontos ($da/dN-\Delta K$) com espaçamento aproximadamente igual para taxas entre 10^{-6} e 10^{-7} mm/ciclo. Estabelecer o ajuste para da/dN requer que a variável dependente seja $\log \Delta K$ (ASTM E647, 2011)

3.2.5 Técnicas de redução de dados

Para a obtenção dos valores da/dN a ASTM recomenda duas diferentes técnicas de redução de dados, o método da secante e o método polinomial incremental.

O primeiro método, da secante, se baseia em técnicas de diferenças finitas progressivas. Ele é aplicado ponto a ponto sobre os dados obtidos e envolve o simples cálculo da inclinação da curva entre dois pontos adjacentes na curva $a \times N$ (ASTM E647, 2011), através da equação:

$$\left(\frac{da}{dN}\right)_{\bar{a}} = \frac{a_{i+1} - a_i}{N_{i+1} - N_i} \quad (36)$$

A partir do valor de da/dN calculado como a média da taxa sobre o incremento de tamanho de trinca, um valor médio de tamanho de trinca, $\bar{a} = \frac{a_{i+1} + a_i}{2}$ pode ser utilizado para o cálculo de ΔK (ASTM E647, 2011).

O método polinomial, que por ser mais sofisticado ajusta melhor os dados, se baseia no ajuste de um polinômio de segunda ordem a conjuntos de $2n+1$ pontos consecutivos de dados, centrados no i -ésimo ponto. O valor de n é de 1, 2, 3 ou 4 (ASTM E647, 2011). Sua equação é dada por:

$$\hat{a}_i = b_0 + b_1 \left(\frac{N_i - C_1}{C_2}\right) + b_2 \left(\frac{N_i - C_1}{C_2}\right)^2 \quad (37)$$

onde os termos entre parênteses devem ter o valor entre -1 e 1 e b_0 , b_1 e b_2 são os parâmetros de regressão determinados pelo método dos mínimos quadrados na faixa $a_{i-n} \leq a \leq a_{i+n}$. O valor \hat{a}_i é o tamanho de trinca ajustado em N_i . Os valores $C_1 = \frac{N_{i-n} + N_{i+n}}{2}$ e $C_2 = \frac{N_{i+n} - N_{i-n}}{2}$ são utilizados para normalizar os dados (ASTM E647, 2011). A taxa de propagação é obtida por:

$$\left(\frac{da}{dN}\right)_{\hat{a}_i} = \frac{b_1}{C_2} + \frac{2b_2}{C_2^2} (N_i - C_1) \quad (38)$$

4 METODOLOGIA

4.1 INTRODUÇÃO

Os corpos de prova do tipo C(T), Figura 26, são largamente utilizados nos estudos de propagação de trinca em materiais metálicos. Dois métodos têm sido utilizados para a medição do tamanho da trinca e sua propagação ao longo do material: o crack-mouth opening displacement (CMOD) gage e o extensômetro da face traseira *back-face strain gage (BFS)*. Utilizou-se a técnica BFS neste trabalho.

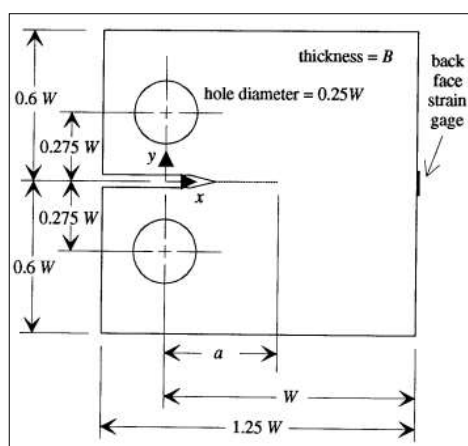


Figura 26 - Corpo de prova utilizado nos ensaios. Tipo C(T). Fonte: (RIDDELL e PIASCIK, 1998)

Através da obtenção da deformação ε foi possível se obter o tamanho da trinca a e com esta obter as curvas de Fator de forma (F_p), este responsável por compensar efeitos de geometria e de carregamento, e $\alpha = (a/w)$ o que possibilita achar as outras propriedades do material como o fator de intensidade de tensões (K) ou também $(E \cdot e \cdot w \cdot B)/P = U$; onde E é o módulo de elasticidade, W é a medida da largura mostrada na figura abaixo, B é a espessura e P é à força do carregamento.

4.2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais, equipamentos e métodos utilizados neste trabalho serão devidamente explicados neste capítulo desde a sua função até os procedimentos utilizados no processo de ensaio de propagação de trincas de fadiga.

4.2.1 Características do Material

A liga fundida de ferro ASTM A743 CA6NM contém em sua composição química os elementos ferro, cromo, níquel e molibdênio, sendo endurecida por meio de um tratamento térmico. A adição de níquel e molibdênio confere a liga uma melhora na resistência à corrosão em ambientes marítimos. Sendo assim, essa liga possui uma grande aplicabilidade em situações que envolvem ambientes corrosivos, como nas indústrias químicas, petrolíferas e em usinas hidrelétricas. Seu maior uso atual é

em componentes de turbinas hidráulicas. As Tabelas (1) e (2) reúnem informações referentes a sua composição química bem como de suas propriedades mecânicas, respectivamente:

Tabela 1 - Composição química em % de peso da liga de aço A743. Fonte: (MATWEB, 2000)

| ELEMENTO QUÍMICO | % EM PESO | ELEMENTO QUÍMICO | % EM PESO |
|------------------|----------------|------------------|----------------|
| Carbono, C | $\leq 0,060\%$ | Molibdênio, Mo | 0,40 – 1,0% |
| Cromo, Cr | 11,5 – 14,0 % | Fósforo, P | $\leq 0,040\%$ |
| Ferro, Fe | 82,9 – 88,1% | Silício, Si | $\leq 1,0\%$ |
| Manganês, Mn | $\leq 1,0\%$ | Enxofre, S | $\leq 0,030\%$ |
| Níquel, Ni | 3,5 – 4,5% | | |

Tabela 2 - Propriedades Mecânicas para o Aço ASTM A743 CA6NM. Fonte: (MATWEB, 2000)

| | |
|----------------------------|---------|
| Módulo de Elasticidade | 201 GPa |
| Tensão de Escoamento, min. | 550 Mpa |
| Tensão de Ruptura, min | 755 Mpa |
| Dureza Brinell, max. | 285 HB |

4.2.2 Corpo de prova

Os corpos de prova utilizados do tipo C(T) foram adquiridos de acordo com as recomendações da norma ASTM E647, seguindo as proporções e tolerâncias representadas na norma. As dimensões estão apresentadas na Figura 27 e na Figura 28:

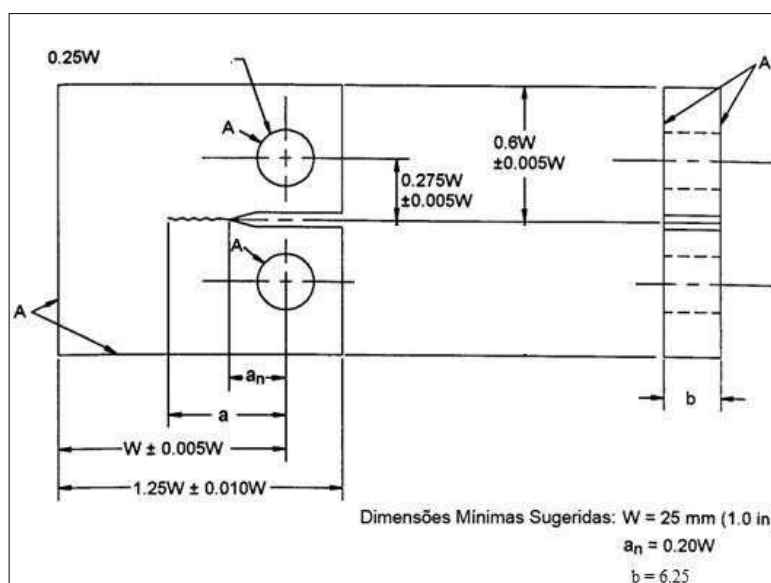


Figura 27 - Dimensões características para o corpo de prova do tipo C(T).

Fonte: (ASTM E647, 2011)

As dimensões do corpo de prova utilizados neste experimento são apresentadas na Figura 28.

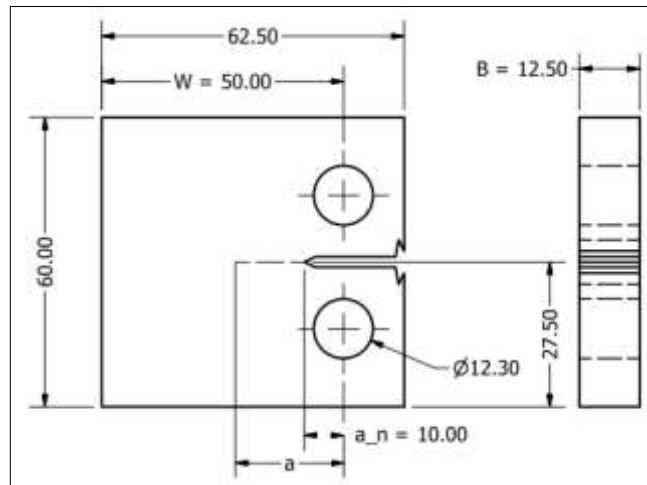


Figura 28 - Dimensões do corpo de prova utilizado nos ensaios. Cotas em mm

4.2.2.1 Lixamento

Devido ao grau de perfeição requerida no acabamento de uma amostra metalográfica idealmente preparada, é essencial que cada etapa da preparação seja executada cautelosamente, e o lixamento é um dos processos mais demorados da preparação de amostras metalográficas.

Essa operação que tem por objetivo eliminar riscos e marcas mais profundas da superfície dando um acabamento inicial e preparando-a para receber o polimento. Existem dois processos de lixamento: manual (úmido ou seco) e automático.

A técnica de lixamento manual consiste em se lixar a amostra sucessivamente com lixas de granulometria cada vez menor, mudando-se de direção (90°), conforme a Figura 29, em cada lixa subsequente até desaparecerem os traços da lixa anterior.

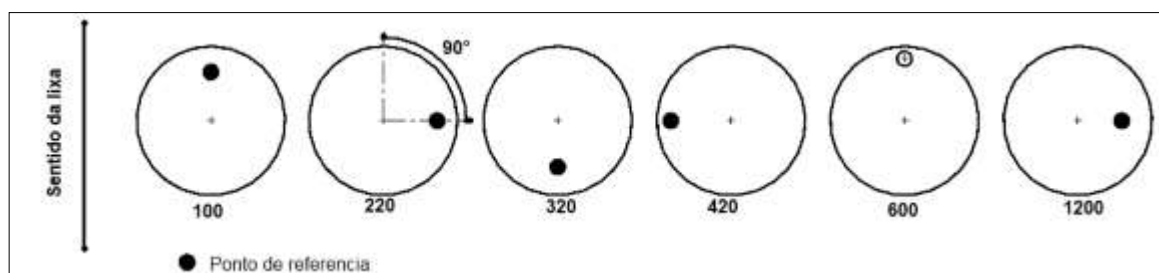


Figura 29 - Representação esquemática do método de lixamento com trabalho em sentidos alternados. Fonte: (ROHDE, 2010)

A sequência mais adequada de lixas para o trabalho metalográficas com aços é 100, 220, 320, 400, 600 e 1200, porém esses dados podem variar, por exemplo, iniciando com a de maior tamanho de grão. Para se conseguir uma eficiência nessa etapa é necessário o uso adequado da técnica de lixamento, pois dependendo da finalidade da amostra, caso não seja feito com a devida precaução e destreza, pode haver um dano no corpo de prova ou amostra chegando a até mesmo à opção de inutilizá-lo devido a excessos

na realização do lixamento. Essas complicações, podem dar uma imagem falseada da amostra, em uma análise por microscópio, por exemplo, por isso devem-se ter os seguintes cuidados:

- Escolha adequada do material de lixamento em relação à amostra e ao tipo de exame final (o que se quer analisar);
- A superfície deve estar rigorosamente limpa, isenta de líquidos e graxas que possam provocar reações químicas na superfície;
- Riscos profundos que surgirem durante o lixamento devem ser eliminados por novo lixamento;
- CPs diferentes não devem ser lixados com a utilização da mesma lixa; reaproveitamento.

Procedimento para o lixamento, de acordo com a Figura 30.

- 1- Verificar se há todas as lixas necessárias para a preparação da amostra mecanográfica;
- 2- Verificar se há água escoando sobre a lixa;
- 3- Fazer um ponto de referência na amostra;
- 4- Começar o lixamento de desbaste, a lixa fica em rotação e o CP parado sobre ela;
- 5- Lixar até que só restem os riscos da última lixa utilizada;
- 6- Gire 90° e vá para a próxima lixa, sempre sem exercer pressão excessiva sobre a lixa;
- 7- Repetir passos 5 e 6 até chegar à lixa de granulometria 1200.



Figura 30 – a) Equipamento para o processo de lixamento. b) Corpo de prova sendo lixado.

4.2.2.2 Polimento

O polimento é uma operação pós lixamento que visa um acabamento superficial polido isento de marcas, utilizando para este fim abrasivos como pasta de diamante ou alumina.

Antes de realizar o polimento deve-se fazer uma limpeza na superfície da amostra, de modo a deixá-la isentam de traços abrasivos, solventes, poeiras e outros.

A operação de limpeza pode ser feita simplesmente por lavagem com água, porém, aconselha-se usar líquidos de baixo ponto de ebulição (álcool etílico, fréon líquido, etc.) para que a secagem seja rápida.

Existem cinco processos para a obtenção de uma superfície polida isenta de riscos. São eles:

- Processo mecânico;
- Processo semiautomático em sequência;
- Processo eletrolítico;
- Processo mecânico-eletrolítico;
- Polimento químico.

Neste experimento foi utilizado o polimento mecânico realizado através de Politriz. O processo foi manual com a amostra sendo trabalhada no disco de polimento. O agente polidor utilizado foi a pasta de diamante devido as suas características de granulometria, dureza, forma dos grãos e poder de desbaste e pelo fato do material, o aço, ser homogêneo e comum. A alumina também é um ótimo agente polidor.

Alguns cuidados foram tomados antes do polimento como:

- Limpeza rigorosa da superfície;
- Escolha do material do polimento;
- Tempo do polimento, evitando polimentos demorados;
- Precaução quanto a fricção excessiva e também a pressão excessiva sobre a amostra.

Já no processo de polimento as principais especificações são:

1 - Verificar se o pano da Politriz é adequado para o tipo de abrangente e se encontra em condições de uso.

2- Verificar se o pano de polimento está limpo

3- Verificar se o motor está funcionando corretamente

4- Polindo com pasta de diamante espalhe a mesma sobre o pano e lubrifique com álcool.

6- Segurar a amostra levemente em cima do pano de polimento, movimentando a amostra no sentido inverso ao do movimento do pano ou apenas segurar a amostra em cima do pano para não riscar, conforme a Figura 31^a. Já a Figura 31b mostra o resultado final de uma amostra polida e uma não polida. O processo total dura em média 20 minutos.



(a)



(b)

Figura 31 – a) Processo de Polimento do corpo de prova. b) Corpo de prova polido (esquerda).
Corpo de prova não-polido (direita).

4.2.2.3 Marcação

Durante o crescimento da pré-trinca por fadiga é importante que a trinca cresça de maneira simétrica ao longo do ensaio. Para facilitar o acompanhamento desse crescimento da trinca é recomendável que sejam feitas marcações ao longo do eixo de crescimento da trinca no CTS. Foram feitas 20 marcações de cada lado do espécime com distância de 1 mm entre elas, resultado retratado na Figura 32 juntamente com o riscador padrão do laboratório de metrologia.



Figura 32 - a) Riscador padrão para marcação no corpo de prova. b) Corpo de prova marcado.

4.2.3 MTS (Material Testing System)

O equipamento utilizado para os ensaios de fadiga é a máquina de ensaio universal MTS 810, apresentada na Figura 33. Por meio dela, podem ser feitos ensaios de tração, de fadiga com qualquer

tipo de carregamento, seja ele alternado, flutuante ou pulsante. Há também a possibilidade de realizar ensaios de fadiga com controle de deslocamento, característica importante para o levantamento da curva $\epsilon - N$ do material. Seu funcionamento é controlado por um computador central, que liga a bomba principal, a qual provê a ‘força’ aplicada pelo atuador hidráulico e o deslocamento. Além disso, é nele que se acompanha, por meio do aquisitor de dados, o ensaio desejado.



Figura 33 - MTS (Material Testing System)

Existem também comandos que são realizados manualmente por intermédio do reservatório hidráulico, tais como: a elevação da travessa para o encaixe do CP, a abertura e o fechamento das garras e a escolha de sua pressão de agarramento. A célula de carga envia para o computador informações sobre a força que está sendo exercida no corpo de prova.

O atuador hidráulico desta máquina possui um sensor de deslocamento que envia tais informações ao computador. A MTS 810 é muito versátil, podendo realizar ensaios com controle de carga, força, deslocamento, amplitude e frequência de ciclagem.

O carregamento é transmitido ao corpo de prova através de garras que são presas ao mesmo através de pinos. As garras são acopladas à máquina servo-hidráulica MTS 810. Essas garras são descritas na norma ASTM E399 como Tension Testing Clevis. Elas foram desenvolvidas de tal forma a permitir uma rotação do CTS durante o carregamento e para garantir um bom alinhamento, como ilustrado na Figura 34.

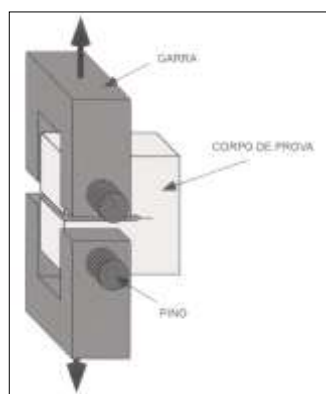


Figura 34 - Alinhamento do conjunto (garra, corpo de prova e pinos).

Fonte: Apud (MANDAI, 2010)

Um cuidado essencial do ensaio está associado à precisão da medida do deslocamento da abertura da boca da trinca (CMOD – crack mouth open displacement) como uma função do carregamento aplicado e da rigidez do sistema. Esse deslocamento é medido com o clip gauge que é posicionado no encaixe conhecido como “rabo de andorinha” como ilustrado na Figura 35, esse encaixe para o clip gauge pode também ser usinado no corpo de prova. O clipe gauge consiste de quatro extensômetros ligados a um par de vigas em balanço, a deflexão das vigas resulta em uma mudança da voltagem dos strain gauges que variam linearmente com o deslocamento.

A medida do deslocamento da boca da trinca é um parâmetro importante a ser controlado durante o ensaio, pois este se relaciona com o comprimento da trinca, a . Portanto, para medir corretamente o valor do comprimento da trinca, a , é necessário garantir que os valores de abertura da boca da trinca, CMOD, e do carregamento sejam medidos com precisão. Assim é possível realizar o ensaio fazendo um controle adequado do crescimento de trinca.

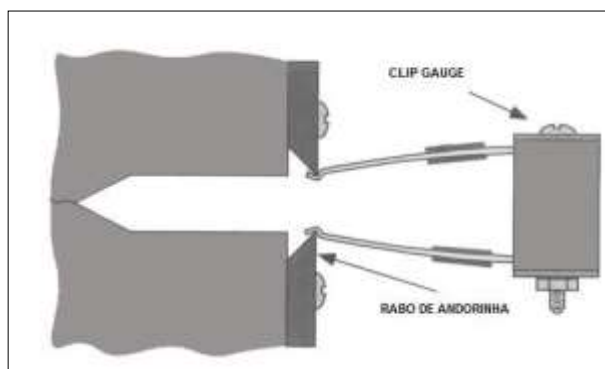


Figura 35 - Representação esquemática do encaixe do clip gauge no corpo de prova.

Fonte: Apud (MANDAI, 2010)

Os dados de *compliance* utilizados são definidos pela norma E647 nos tópicos A3.5.2.1 para o front face ou CMOD conforme a equação normalizada (39)

$$\frac{EBV_0}{P} = \left[15.52 \frac{a}{W} - 26.38 \left(\frac{a}{W} \right)^2 + 49.7 \left(\frac{a}{W} \right)^3 - 40.74 \left(\frac{a}{W} \right)^4 + 14.44 \left(\frac{a}{W} \right)^5 \right] / \left[1 - \frac{a}{W} \right]^2 \quad (39)$$

4.2.3.1 Ensaio de Propagação de Trincas por Fadiga – ASTM E647

A norma *ASTM E647* foi desenvolvida com o intuito de se estabelecer um procedimento para o ensaio de propagação de trincas por fadiga. A partir desse ensaio é possível obter parâmetros importantes tais como: ΔK_{th} e a curva da/dN versus ΔK para o material em questão. O crescimento da trinca ocorre por meio de carregamento cíclico, onde os valores de K_{min} , $K_{máx}$ e comprimento da trinca são monitorados durante o ensaio.

O tipo de espécime e a garra utilizada no teste são os descritos anteriormente. Entretanto, para o ensaio de propagação de trinca o corpo de prova deve ter uma espessura entre $W/20$ e $W/4$, portanto pode ser utilizado um espécime de espessura menor de maneira a economizar material. A norma *ASTM E647* requer apenas que o comportamento do espécime seja predominantemente elástico durante o teste. Antes de se iniciar o teste o espécime deve ser submetido a uma pré-trinca por fadiga, onde o $K_{máx}$ final durante a pré-trinca não deve ser superior ao $K_{máx}$ utilizado no ensaio em si (no intuito de evitar o efeito de retardo no crescimento da trinca). Pela norma *ASTM E647* o tamanho da pré-trinca por fadiga para o ensaio de propagação de trinca deve ter um valor mínimo, que não deve ser menor que $0,1B$, h , ou 1 mm, o que for maior, onde B é a espessura do espécime e h é a medida da altura do entalhe do espécime.

O ensaio de propagação é em sua essência um ensaio de fadiga, pois, basicamente consiste em aplicar um carregamento cíclico no espécime. A norma *ASTM E647* descreve duas maneiras para conduzir esse ensaio:

- Teste de Amplitude de Carregamento Constante onde o K é crescente: esse é um teste adequado para taxas de crescimento de trinca superiores a 10^{-5} mm/ciclo, mas pode ser de difícil aplicação a baixas taxas de crescimento devido a considerações de pré-trinca por fadiga.
- Teste de K decrescente: nesse caso a amplitude de carregamento decresce durante o teste para alcançar um gradiente de K negativo. Esse tipo de teste é utilizado quando se quer obter o valor de ΔK_{th} , onde é definido um valor de $K_{máx}$ e a partir dele o ΔK vai diminuindo até o valor desejado. A determinação do ΔK_{th} é feita utilizando uma regressão linear do logaritmo de da/dN versus o logaritmo de ΔK usando no mínimo cinco pontos entre 10^{-6} e 10^{-7} mm/ciclo igualmente espaçados.

Para um efetivo controle de ΔK ao longo do ensaio para determinação de ΔK_{th} , o gradiente K normalizado, que é a variação fracionária do K com o aumento do tamanho da trinca, é necessário para monitorar o comportamento da trinca enquanto o K varia. Esse gradiente é dado pela seguinte equação:

$$G = \frac{1}{K} \cdot \frac{dK}{da} = \frac{1}{K_{máx}} \cdot \frac{dK_{máx}}{da} = \frac{1}{K_{mín}} \cdot \frac{dK_{mín}}{da} = \frac{1}{\Delta K} \cdot \frac{d\Delta K}{da} \quad (40)$$

O monitoramento do valor de G é importante para o teste de K decrescente, pois ciclos prévios resultam em zonas plásticas maiores, o que pode causar retardo da trinca. O retardo da trinca não é um problema significativo para o teste de K crescente, já que o tamanho da zona plástica em um dado ciclo é menor do que no ciclo anterior. O valor algébrico de G deve ser maior que $-0,08 \text{ mm}^{-1}$ no teste de K decrescente, como recomendação da norma *ASTM E647*. No teste de K decrescente o carregamento deve diminuir até que a taxa de crescimento de trinca desejada seja alcançada, lembrando que a coleta de dados de da/dN abaixo de 10^{-7} mm/ciclo não é proveitosa, pois a taxa de crescimento é considerada desprezível.

4.2.4 Extensômetros

Diferentes métodos de inspeção não destrutivos para medidas de tensões têm sido explorados e desenvolvidos, mas nenhum outro dispositivo tem uma utilização mais ampla do que os extensômetros com relação à sua aplicabilidade. Isto devido à precisão das medidas, facilidade de manipulação e da capacidade do mesmo de monitorar as deformações até as cargas últimas em ensaios destrutivos.

4.2.4.1 Tipo

Nos ensaios realizados foram empregados extensômetros (*strain gages*) de resistência elétrica (ERE) coláveis que são próprios para aço inoxidável, de modelo unidirecional simples e forma tradicional. Eles são da marca *Kyowa Strain Gages*, tem um fator de sensibilidade (*gage factor*) de 2,1, e são do tipo KFG-5-120-C1-16, seguindo a classificação ilustrada na Figura 36. A ponte extensométrica utilizada foi configurada como $\frac{1}{4}$ de ponte no aquisitor ADS 2000, em um arranjo a três fios e uma compensação interna em 120Ω . (Ver Apêndice A)

Como usam resinas de poliamida de excelente resistência ao calor em sua base, este extensômetro tem utilização em temperaturas de $-50 \text{ }^\circ\text{C}$ a $+200 \text{ }^\circ\text{C}$, utilizando as colas adequadas. São apropriados para medidas em ensaios de longa duração.

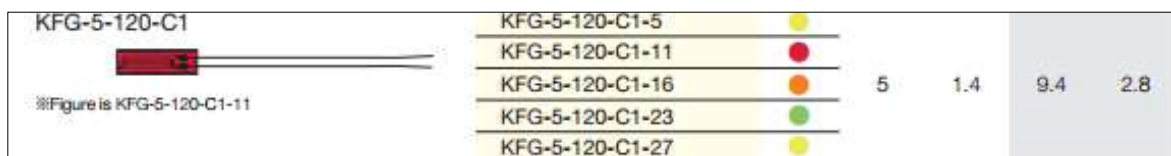


Figura 36 - Modelo de extensômetro utilizado nos ensaios. Fonte: (KIOWA)

4.2.4.2 Teste

Os extensômetros, Figura 37a devem ser verificados a respeito da sua resistência antes de serem calibrados e colados. Após a colagem dos extensômetros antes de conectá-los ao aquisitor de dados ADS, é necessário verificar, medindo novamente com o multímetro, Figura 37b, se o extensômetro foi danificado no procedimento de colagem ou se a solda não foi corretamente executada.

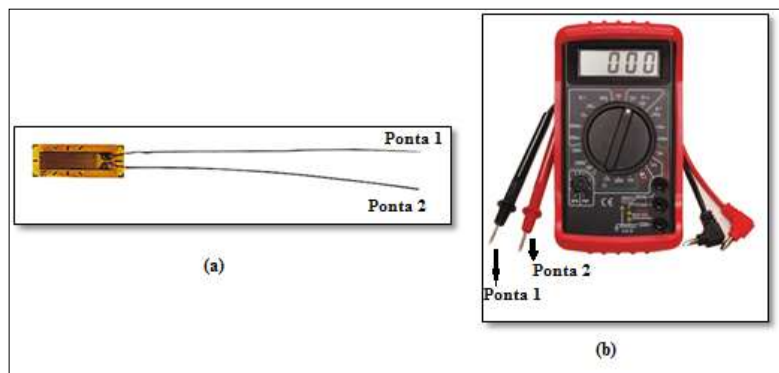


Figura 37 –(a) Extensômetro unidirecional (Strain Gage), (b) Multímetro digital para realização de teste da resistência elétrica do extensômetro. (Leitura esperada de 120Ω).

4.2.4.3 Colagem, Balanceamento e Soldagem dos Extensômetros

A colagem, o balanceamento, além de como foi feita a soldagem dos fios do extensômetro na peça e no aquisitor de dados, estão ao final desse relatório como apêndice A.

4.2.4.4 Sistema de Aquisição de Dados

Foi utilizado um sistema de aquisição de dados fabricado pela Lynx Tecnologia, modelo ADS2000. Este equipamento, o software de aquisição de dados e o software de controle da MTS, que transmitir os dados de força e deslocamento, acoplado a um microcomputador serão os responsáveis pela aquisição dos dados de todo o sistema de instrumentação utilizado na bancada de testes. O ADS-2000 consiste de dois módulos de aquisição de 16 canais cada, acondicionados de um único gabinete de poliuretano, e opera ligado ao computador de controle através de interface Ethernet para captar sinais digitais e analógicos (de controle e monitoramento).



Figura 38 - Sistema de Aquisição de Dados ADS-2000 -Lynx Tecnologia. Fonte: (FADEL, 2010)

5 METODOLOGIA DE MONITORAÇÃO

5.1 INTRODUÇÃO

O ensaio de propagação de trincas que é a base do projeto, tem como objetivo avaliar a taxa de crescimento da trinca pelos métodos do BFS, CMOD e ótico, utilizado nos ensaios para posterior comparações.

A montagem e configuração da MTS 810 para o ensaio de propagação de trincas de fadiga está especificada no Apêndice B.

5.2 MONITORAMENTO DOS DADOS GERADOS

Os dados obtidos do ensaio de propagação de trincas serão analisados pelo programa *Fatigue Crack Growth Template da MTS*, com número de registro KRW 93472 da versão 2002B, porém os dados da deformação medida pelos extensômetros assim como a força do atuador hidráulico e deslocamento do clip-cage serão analisados através do software AQ-Dados do aquisitor de dados ADS-2000.

5.2.1 Critérios

Várias decisões foram tomadas no que tange o ensaio de propagação de fadiga:

- Corpo de prova: foi escolhido o corpo de prova do tipo C(T) porque o mesmo possui uma vantagem sobre os outros corpos de prova, pois apresenta menos histerese, é mais sensível, menos influenciável pelo ruído mecânico do pino da carga e necessita do menor número de testes com o material para que se determine o comportamento do caminhar da trinca, segundo a ASTM E647 no tópico A1.1.2.
- Os dados de *compliance* utilizados são definidos pela norma E647 para o front face ou CMOD conforme Figura 39, que é o anexo A1.5.2.1 da norma ASTM E647.

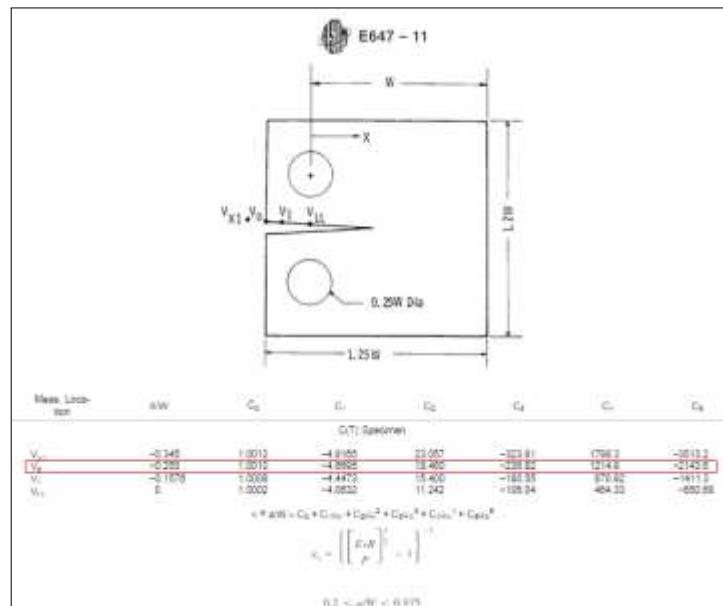


Figura 39 - Tamanho de trinca normalizado como função do compliance do plano de trabalho elástico para corpos de prova do tipo C(T). (ASTM E647, 2011)

- A razão de carregamento, Load Ratio R, é uma variável do ensaio, sendo que para os ensaios realizados neste trabalho o R adotado foi de 0,33, por não se ver influencia do mesmo nos parâmetros analisados neste ensaio.
- Foi demonstrado também por Riddell e Piascik e também por Simha que o tamanho do extensômetro pode afetar na ordem de 0.1W o valor da deformação, por isso foi escolhido conforme o tópico 4.2.4.1 deste relatório, o menor extensômetro para a necessidade de aferição e precisão deste relatório, levando em conta custo e disponibilidade.
- O valor do tamanho final da trinca, *Final Crack Length*, é definido por norma (ASTM E647) e deve ser o maior valor dentre 0,1B, h, ou 1,0 mm. No presente caso o maior valor é de h, que deve ser somado ao valor inicial do entalhe a para compor o valor de *Final Crack Length*, que foi de 11,5 mm.
- Estudos de Deans e Richards, mostraram que a posição ideal para localização do extensômetro na face traseira do corpo de prova é na região de centro da linha de espessura do mesmo, conforme foi utilizado nos ensaios.
- Para a definição do parâmetro *Final Kmax* é necessário ter algum conhecimento acerca do material que será ensaiado, pois este valor (de acordo com a norma ASTM E399) deve ser 60% do valor de K_{IC} . Esse valor para o não era conhecido para o Aço CA6NM, então foi estimado um valor de acordo com o conhecimento da curva da/dN versus K para este material com isso foi utilizado o valor de K de $10MPa\sqrt{m}$, pois segundo os estudos de Shaw (SHAW e ZHAO, 1994), essa técnica não demonstrou diferenças quando

avaliada com diferentes valores de ΔK . O que mudava com essa alteração era o fechamento da trinca, porém este dado não está sendo analisado no experimento.

- Por estar em um estado adimensional os dados de ratificação não irão mudar com o material e com a espessura do corpo de prova, motivo pelo qual também justifica a escolha dos mesmos.
- Para o tipo de ensaio foi escolhido o de Constant Load Amplitude com valores de força de 10kN e 3.3kN, e uma frequência de 10Hz, para o ensaio 2. Neste ensaio o valor da força é mantida constante e o valor de K aumenta à medida que a trinca se propaga. O valor de carregamento Endlevel 2 é definido a partir do valor da razão de carregamento R. O valor de Endlevel 1 é a carga máxima, P_{max} . Devido ao fato da deformação estar sendo medida em uma relação adimensional esses valores de força não geram diferenças na relação obtida ao final, segundo (SHAW e ZHAO, 1994) e se mostraram condizentes com o ensaio. Já no primeiro ensaio foi utilizado o método de controle de ΔK , porém os resultados irão julgar se houve ou não diferença entre um método e outro, devido ao fato da literatura não demonstrar uma diferença entre ambos.

5.2.2 Método Ótico

Realizado em microscópio (escala 10^{-6}), geralmente auxiliado por marcações gravadas ou descritas no corpo de prova, podendo ser realizado em quase todos os formatos de geometria de corpo de prova disponíveis, a Figura 40 mostra uma observação da trinca com uma lente de aumento desse experimento, porém o mesmo não é suficiente para aferir com precisão o tamanho da trinca.

Tem como vantagem o fato de ser um método barato, que não requer calibrações ou que o corpo de prova se comporta de uma maneira linear elástica.

As desvantagens são que só representa ou fornece leituras superficiais e geralmente subestima o comprimento da trinca média devido a curvatura da trinca. Adicionalmente, não tem como ser automatizado, logo consome tempo e necessita de superfícies acessíveis e em condições de perfeito polimento.



Figura 40 - Acompanhamento do crescimento da trinca pelo método ótico.

AQ Dados

O aquisitor AQDados permite que os dados sejam monitorados em tempo real por uma tabela do programa ou por informação gráfica dos sinais emitidos pelos extensômetros e canais de força na célula de carga da MTS e deslocamento do clip Gage, conforme as Tabela 3 e Tabela 4.

Tabela 3 - Tabela de dados do AQDados - Ensaio 1.

| Canal | Nome do Sinal | Valor do A/D | Valor de Eng | Unidade | Descrição | Módulo | CN Mod |
|-------|-------------------|--------------|--------------|---------|-----------|-------------------------|--------|
| 4 | Extens. Side Face | 0.3806V | 79,0 | mStrain | | 0:AI-2161 - - Unidade A | 4 |
| 5 | Extens. Back Face | -0.4800V | -89,4 | mStrain | | 0:AI-2161 - - Unidade A | 5 |
| 14 | Cel. Carga MTS | 0.8923V | 1.819 | kN | | 0:AI-2161 - - Unidade A | 14 |
| 15 | Clip Gage - Desl | 0.8035V | 0.3205 | mm | | 0:AI-2161 - - Unidade A | 15 |

Tabela 4 - Tabela de dados do AQDados - Ensaio 2.

| Canal | Nome do Sinal | Valor do A/D | Valor de Eng | Unidade | Descrição | Módulo | CN Mod |
|-------|---------------------|--------------|--------------|---------|-----------|-------------------------|--------|
| 4 | Extens. Side Face 2 | -0.0885 V | -18.2 | mStrain | | 0:AI-2161 - - Unidade A | 4 |
| 5 | Extens. Back Face | -1.6547 V | -312.4 | mStrain | | 0:AI-2161 - - Unidade A | 5 |
| 6 | Extens. Side Face 5 | 9.9997 V | 2073 | mStrain | | 0:AI-2161 - - Unidade A | 6 |
| 7 | Extens. Side Face 3 | -0.7089 V | -146.8 | mStrain | | 0:AI-2161 - - Unidade A | 7 |
| 8 | Extens. Side Face 4 | -10.0000 V | -2072.8 | mStrain | | 0:AI-2161 - - Unidade A | 8 |
| 14 | Cel. Carga MTS | 2.5247 V | 5.099 | kN | | 0:AI-2161 - - Unidade A | 14 |
| 15 | Clip Gage - Desl | 0.7681 V | 0.3072 | mm | | 0:AI-2161 - - Unidade A | 15 |

5.2.2.1 AQ Dados – Gravação

O aquisitor AQDados possui uma plataforma para monitoramento das amostras que visa gravar todos os dados registrados pelos canais habilitados. Nesse experimento para os dois ensaios realizados foram utilizadas uma frequência de amostragem de 200hz, utilizando o modo de aquisição múltiplo programado, que iniciada a aquisição, os dados são armazenados em um arquivo .dat na pasta selecionada pelo usuário. A periodização foi de 30 segundos a cada 30 minutos.

5.2.3 Fatigue Crack Growth Template da MTS

A MTS possui também um sistema de monitoramento dos dados por ela colhidos. Neste ensaio por se tratar da análise de crescimento de trincas por fadiga, o método utilizado será o MTS Fatigue Crack Growth TestWare (FCGTW), existem outros como o MTS Compliance Crack Monitor, o Basic TestWare e o MTS Fracture Toughness TestWare, dentre outros, cada um com suas especificações que variam com o propósito do ensaio. Ver Apêndice B.

O software interno da MTS, o FCGTW, é capaz de controlar o ensaio e a taxa de crescimento da trinca e ao final do ensaio fornecer curvas essenciais para o processo de propagação de trincas como:

- Gráficos ΔK_{max} por carga;
- Gráficos de deslocamento do clip gage por carga;
- Curvas da/dN por ΔK aplicado ou por ΔK real;
- Carga de fechamento por número de ciclos;
- Comprimento da trinca versus ΔK ;
- Informações em tempo real do experimento como por exemplo, tamanho da trinca, delta K máximo, delta K mínimo, número de ciclos, K de fechamento, Força máxima, força mínima além dos dados medidos pelo clip gage.

5.2.4 Monitoramento do Crescimento da Trinca pelo BFS e avaliação da sua Consistência

O método da medição da deformação da face traseira precisa ser monitorado a fim de que não haja discrepâncias significativas entre o valor medido e o real valor que a deformação assume. Esses dados são analisados a partir do sinal enviado pelo extensômetro até o aqisitor, através da ligação por três fios nas entradas (E,+ e o terra) no canal que será utilizado, como mostra a Figura 41. O monitoramento é feito simultaneamente às deformações na peça, porém a gravação dos dados é feita de acordo com o tempo que o usuário programa o aqisitor. É possível acompanhar os dados de deformação em cada canal que foi ajustado e devidamente calibrado para extensometria, ainda que estes não estejam sendo registrados na tela do software.



Figura 41 – Saída do AqDados.

Já os dados de força e deslocamento que vem da MTS podem ser lidos pelo aquisitor AQD dados para que o programa faça as correlações entre as forças que estão sendo aplicadas e a deformação que o extensômetro está lendo. A transmissão se dá por um cabo RGB Coaxial conforme ilustrado na Figura 42a, nas saídas J71 e J72 do controlador da MTS. A outra ponta é ligada a um conector fêmea que permite a saída de dois fios para a ligação no AQD dados, como mostra a Figura 42b.



Figura 42 – a) Ligação do Cabo RGB no controlador da MTS, b) Junção de saída do cabo RGB.

Após a ligação o cabo deve ser ligado ao aquisitor da mesma forma que o extensômetro, porém em saídas diferentes, o *jumper* deve ser alterado dentro do aquisitor para a configuração de tensão não-diferencial como destacado na Figura 43, com um *jumper* sendo feito com um fio entre a saída (- e terra).

A avaliação da consistência desses dados pode ser obtida com a comparação dos dados que a MTS fornece pela leitura da boca da trinca, CMOD, e através do monitoramento simultâneo com dados numéricos.

| Tipo de Sensor | Conexão | Configuração de Entrada | Observação |
|------------------------|---------|-------------------------|--|
| Tensão não diferencial | | | Impedância de entrada: 100k Ω (SWAn 5 e 6 ON) > 20M Ω (SWAn 5 e 6 OFF) |
| Tensão diferencial | | | Impedância de entrada: 100k Ω (SWAn 5 e 6 ON) > 20M Ω (SWAn 5 e 6 OFF) |

Figura 43 - Tipo de sensor do cabo RGB Coaxial.

6 RESULTADOS

6.1 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Abaixo encontram-se todos os resultados obtidos após a análise dos dados referentes ao ensaio do projeto, o tratamento que foi dado aos dados assim como a conclusão sobre as vantagens do método utilizado.

6.1.1 Primeiro Ensaio

Devido a semelhança dos resultados e dos gráficos será registrado o melhor resultado para o ensaio 1, na Tabela 5 na Figura 44 e na Figura 45, outros dados que comprovam tal afirmação podem ser acompanhados no Anexo 1.

Tabela 5 - Dados de comparação entre os resultados obtidos por COD e BFS para um determinado instante do Ensaio 1.

| Ensaio 1 - 21 de outubro de 2014 - 10:45h | | | | | | |
|---|-------------------------|----------------------|-----------|--------------------------------------|--------------------------|-------------------------|
| Primeiro ensaio. 21out – 10h45 | Valor da força média | Tamanho da trinca | Dispersão | Média da trinca pelo Back Face | Valor medido pelo COD | Diferença percentual |
| Força Máxima | 3.8603 N | 17.4671 mm | 0.0847 | 18.1322 mm | 18.4790 mm | 1.91% |
| Força Mínima | 1.3198 N | 18.7973 mm | 0.2133 | | | |

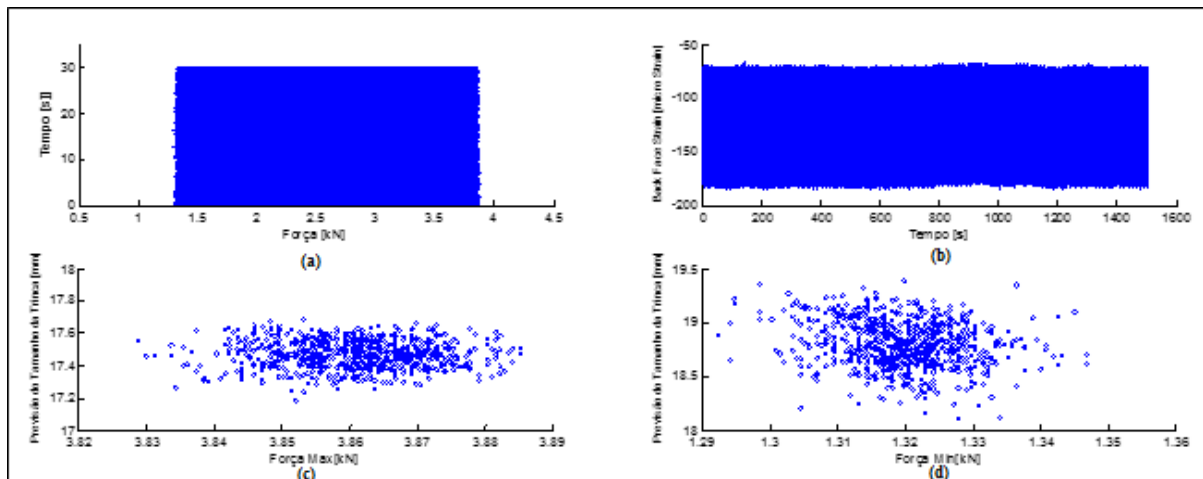


Figura 44- Gráfico dos resultados em um determinado instante do ensaio 1.

| Cycles | Crack Length (mm) | Maximum K (MPa·m ^{0.5}) | Minimum K (MPa·m ^{0.5}) | K Closure (MPa·m ^{0.5}) | Closure Load (MPa·m ^{0.5}) | Maximum Ch 1 Force (N) | Minimum Ch 1 Force (N) | Maximum Ch 1 Extensometer (mm) | Minimum Ch 1 Extensometer (mm) |
|---------|-------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|------------------------|------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 3984404 | 18.4127 | 9.37894 | 3.11929 | 3.19204 | 42.1127 | 3912.90 | 1301.37 | 0.337561 | 0.304676 |
| 3987989 | 18.4234 | 9.33153 | 3.09823 | 3.31249 | 43.6777 | 3890.57 | 1291.87 | 0.337520 | 0.304610 |
| 4025158 | 18.4380 | 9.31305 | 3.06590 | 3.12564 | 41.1811 | 3880.17 | 1285.71 | 0.338160 | 0.305324 |
| 4047357 | 18.4493 | 9.35278 | 3.08675 | 3.26309 | 42.9687 | 3894.61 | 1285.36 | 0.338436 | 0.305406 |
| 4073945 | 18.4609 | 9.30683 | 3.08399 | 3.24835 | 42.7489 | 3873.15 | 1283.44 | 0.338458 | 0.305610 |
| 4102759 | 18.4790 | 9.28738 | 3.03298 | 3.12683 | 41.1112 | 3861.44 | 1260.78 | 0.338486 | 0.305711 |

Figura 45 - Valores aferidos por COD para um determinado instante do Ensaio 1.

6.1.2 Segundo Ensaio

Devido a semelhança dos resultados e dos gráficos será registrado o melhor resultado para o ensaio 2, na Tabela 6 e na Figura 46 e Figura 47, outros dados que comprovam tal afirmação podem ser acompanhados no Anexo 1.

Tabela 6 - Dados de comparação entre os resultados obtidos por COD e BFS para um determinado instante do Ensaio 2.

| Ensaio 2- 21 de novembro de 2014 - 15:50h | | | | | | |
|---|-------------------------|----------------------|-----------|--------------------------------------|--------------------------|-------------------------|
| Primeiro ensaio. 21nov – 15h50 | Valor da força média | Tamanho da trinca | Dispersão | Média da trinca pelo Back Face | Valor medido pelo COD | Diferença percentual |
| Força Máxima | 9.9971 N | 29.8552 mm | 0.0206 | 30.5518 mm | 29.4518 mm | 3.60% |
| Força Mínima | 3.3178 N | 31.2484 mm | 0.0417 | | | |

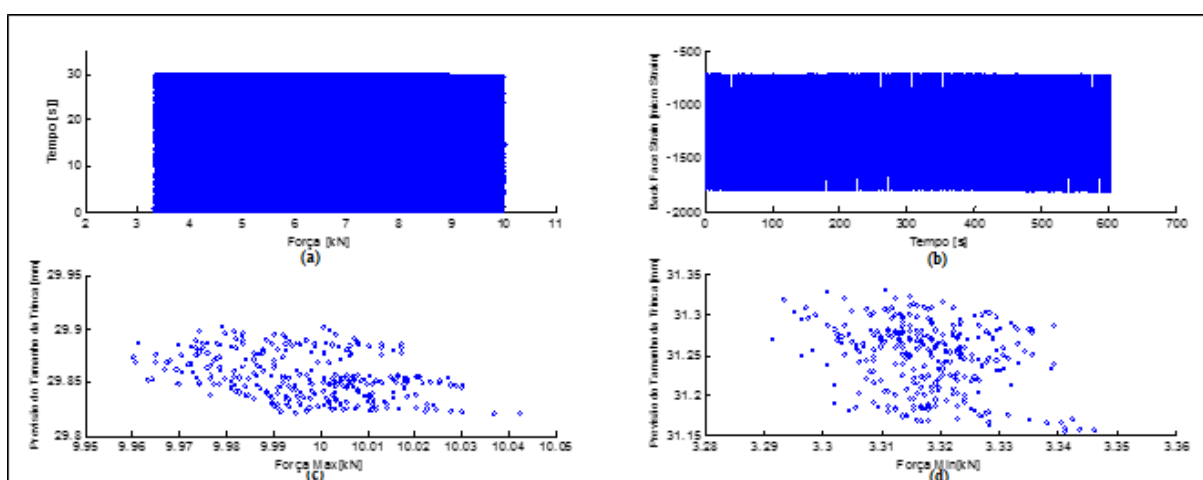


Figura 46 - Gráfico dos resultados em um determinado instante do ensaio 2.

| Cycles | Crack Length (mm) | da/dN (mm/cycle) | Max Load (N) | Min Load (N) | Closure Load (N) | Max Stress Intensity (MPa $\sqrt{m}^{0.5}$) | Delta K Applied (MPa $\sqrt{m}^{0.5}$) | Delta K Effective (MPa $\sqrt{m}^{0.5}$) |
|--------|-------------------|------------------|--------------|--------------|------------------|--|---|---|
| 865363 | 29.2279 | 0.000122601 | 10004.0 | 3301.56 | 3530.70 | 46.0571 | 30.8570 | 29.6021 |
| 865564 | 29.2475 | 9.83861e-005 | 9996.61 | 3294.11 | 3631.21 | 46.0912 | 30.9031 | 29.3489 |
| 865762 | 29.2780 | 8.88111e-005 | 10008.9 | 3316.19 | 6912.30 | 46.2541 | 30.9290 | 14.3104 |
| 865962 | 29.3056 | 0.000103338 | 9996.70 | 3296.32 | 3307.27 | 46.2939 | 31.0261 | 30.9782 |
| 866070 | 29.3185 | 8.62194e-005 | 10004.9 | 3305.84 | 6536.09 | 46.3770 | 31.0530 | 16.0795 |
| 866164 | 29.3292 | 8.62194e-005 | 10002.9 | 3315.06 | 3524.96 | 46.4055 | 31.0262 | 30.0525 |
| 866364 | 29.3585 | 0.000189230 | 9992.94 | 3306.60 | 3550.29 | 46.4620 | 31.0880 | 29.9550 |
| 866564 | 29.3815 | 0.000154854 | 9991.38 | 3298.36 | 3381.02 | 46.5358 | 31.1734 | 30.7884 |
| 866762 | 29.4242 | 0.000127368 | 10009.8 | 3324.33 | 3439.15 | 46.7730 | 31.2394 | 30.7028 |
| 866891 | 29.4352 | 0.000239640 | 9987.86 | 3309.94 | 3325.69 | 46.7094 | 31.2301 | 31.1565 |
| 866964 | 29.4518 | 0.000239640 | 10008.4 | 3301.19 | 7268.51 | 46.8645 | 31.4066 | 12.8296 |

Figura 47 - Valores aferidos por COD para um determinado instante do Ensaio 2.

6.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com os resultados em questão pode-se concluir que o experimento obteve sucesso no que procurava demonstrar. A diferença percentual entre os dados adquiridos entre o BFS e o valor real medido pelo COD foi relativamente pequeno. Entre o experimento 1 e o experimento 2 houve uma diferença entre os valores observados, lembrando que o experimento 1 foi feito com controle de ΔK e o experimento 2 com amplitude de carga constante. A Figura 48 mostra uma plotagem de uma determinada quantidade de pontos adquirida nos dois ensaio e os compara, mostrando a diferença de medição entre os instantes dados com a medição aferida pela MTS por CMOD e por meio do extensômetro na face traseira por BFS.

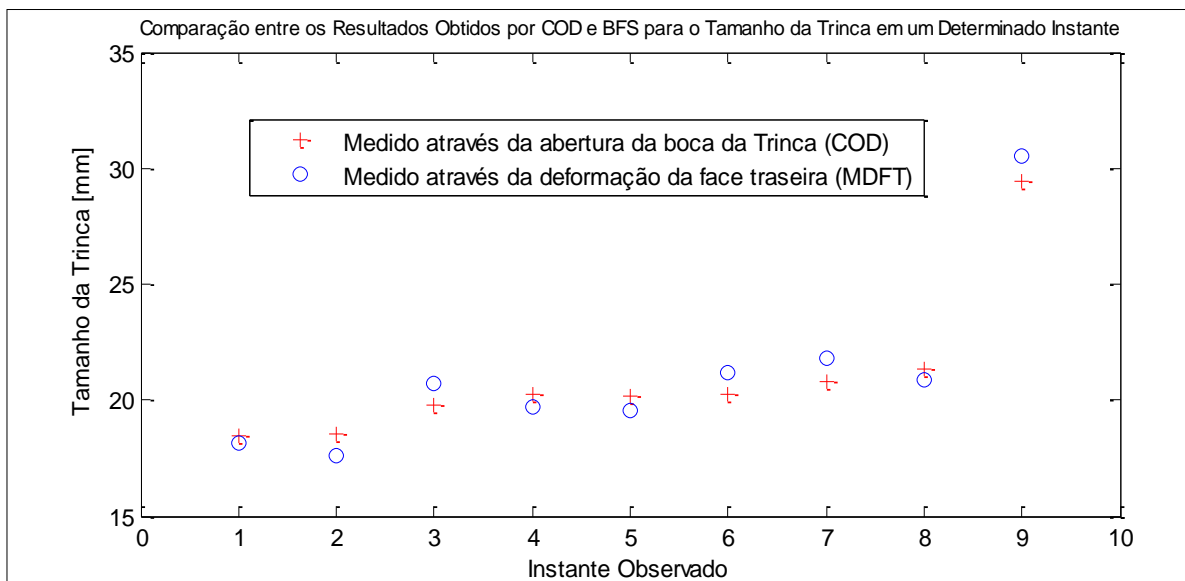


Figura 48 - Pontos comparando as diferenças de aferições entre COD e BFS

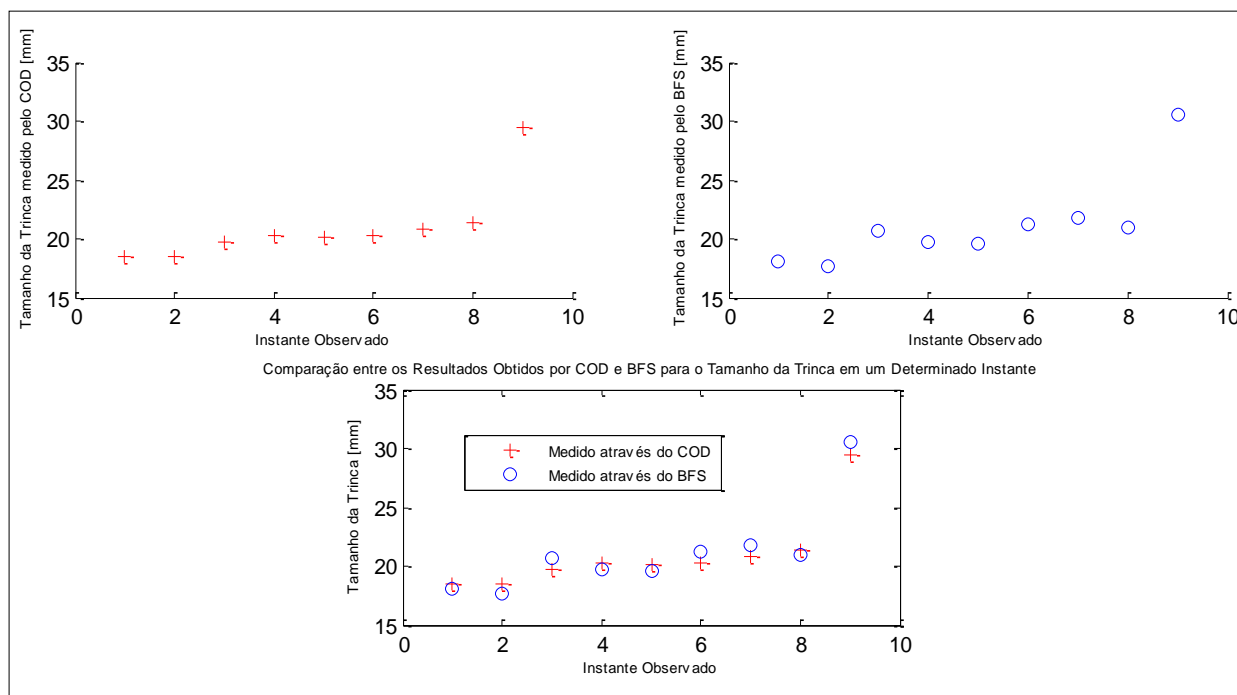


Figura 49 - Gráficos comparativos entre COD e BFS

Dentro dos instantes observados, como mostra a Figura 49 a forma mais conveniente de se avaliar seria através das diferenças percentuais do ensaio em geral que foi feito com a média de diferença percentual entre os dados colhidos dos dois experimentos e que resultou em 4.37% para o segundo ensaio e de 2.42% para o primeiro ensaio. A média total dos ensaios está representado no gráfico da Figura 50, baseado nos dados da Tabela 7.

Tabela 7 - Dados comparativos dos ensaios.

| Ensaio | Inst. | COD (mm) | BF _{Fmax} | BF _{Fmin} | BF méd (mm) | Diferença % | Diferença | Diferença Rel Abs | |
|--------|-------|----------|--------------------|--------------------|-------------|-------------|-----------|-------------------|-------|
| 1 | 1 | 18.48 | 17.47 | 18.80 | 18.13 | -1.877 | -0.019 | 0.019 | 0.034 |
| 2 | 2 | 19.76 | 20.13 | 21.30 | 20.71 | 4.845 | 0.048 | 0.048 | 0.034 |
| 1 | 3 | 20.17 | 19.38 | 19.73 | 19.56 | -3.042 | -0.030 | 0.030 | 0.034 |
| 1 | 4 | 20.24 | 19.13 | 20.22 | 19.68 | -2.789 | -0.028 | 0.028 | 0.034 |
| 2 | 5 | 20.29 | 20.63 | 21.79 | 21.21 | 4.544 | 0.045 | 0.045 | 0.034 |
| 2 | 6 | 20.83 | 21.17 | 22.39 | 21.78 | 4.547 | 0.045 | 0.045 | 0.034 |
| 1 | 7 | 21.31 | 20.41 | 21.37 | 20.89 | -1.950 | -0.020 | 0.020 | 0.034 |
| 2 | 8 | 29.45 | 29.86 | 31.25 | 30.55 | 3.735 | 0.037 | 0.037 | 0.034 |
| | | | | | | Média | 0.034 | 3.40% | |
| | | | | | | Máximo | 0.04845 | 4.85% | |
| | | | | | | Mínimo | 0.01877 | 1.88% | |

Os dados da Tabela 5 e da Tabela 6 foram obtidos confrontando os valores da força, medidos exatamente no mesmo instante de tempo, nesse dado momento existe uma deformação ϵ , conjunto com uma força que é medida de forma concomitante pelo aquisitor e pela MTS. Esses dados confrontados geram um tamanho de trinca pelo COD automaticamente pela MTS e através do *compliance* de Newman (NEWMAN, YAMADA e JAMES, 2011) pode ser gerado também um valor para tamanho de trinca para a deformação da face traseira. Os gráficos de estimativa de tamanho de trinca das Figura 44 e da

Figura 46 mostram o intervalo de pontos que representam o tamanho da trinca para a força aplicada no corpo de prova no instante observado.

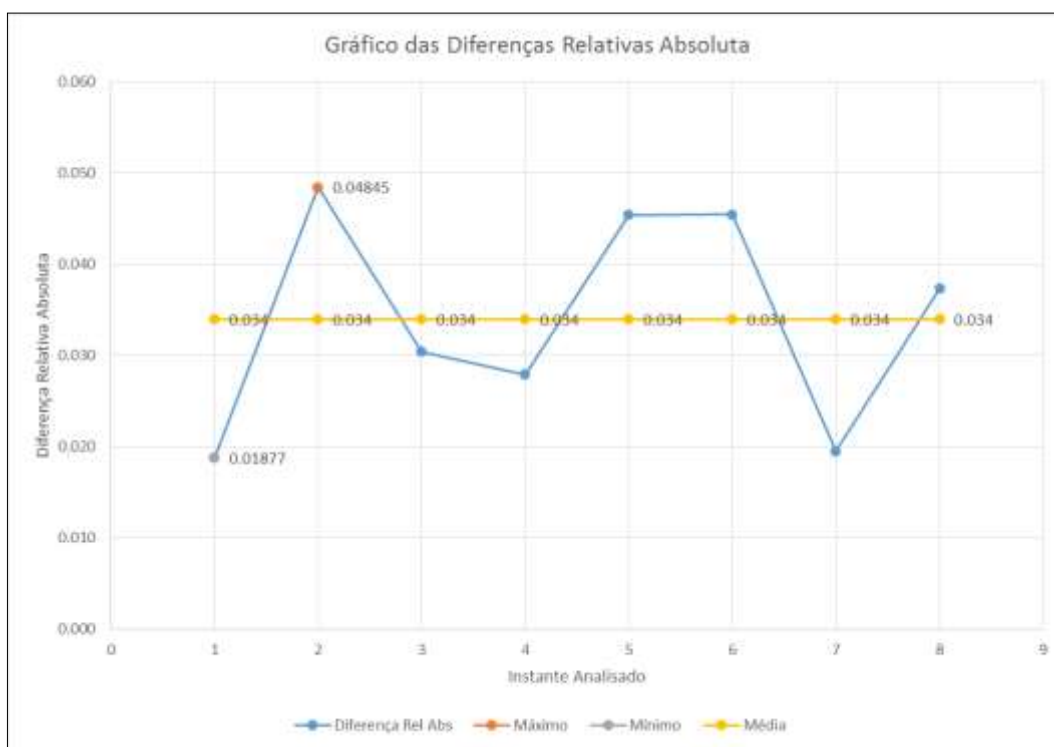


Figura 50 - Gráfico das Diferenças percentuais, com linha de média evidenciada.

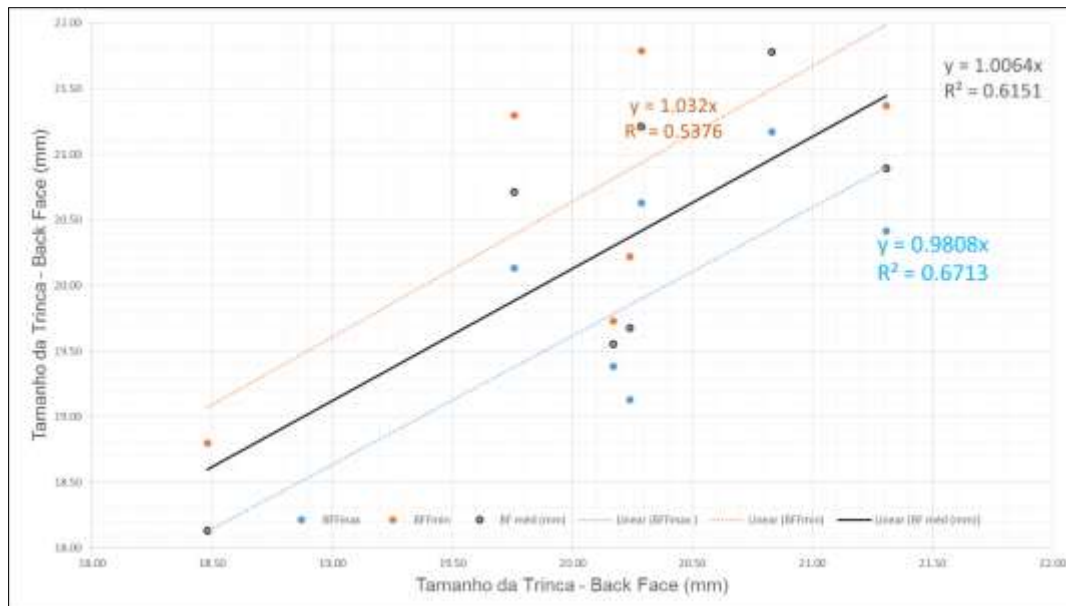


Figura 51- Equação linearizada da reta que ajusta o tamanho da trinca pelo BFS.

O gráfico descrito na Figura 51 faz uma análise dos pontos obtidos de tamanho de trinca por *back face* em mm, agregados anteriormente na Tabela 7, gerando a equação da reta por regressão linear e o coeficiente de determinação de cada uma. Que é uma forma de avaliar a qualidade do ajuste do modelo. Pois esse coeficiente indica o quanto o modelo foi capaz de explicar dos dados coletados, sendo ele a quantidade que os dados variam para esse modelo de regressão ajustado.

Tendo essa análise como resultado poderíamos observar dados menos explicativos obtidos pelos ensaios gerados, pois segundo essa análise a reta média, caso seja tomada por análise mostraria que apenas aproximadamente 39% da amostra não poderia ser explicada pelo método.

6.3 CONCLUSÃO

Por fim, fica evidente, porém necessitando de um maior número de ensaios para comprovação, que a medição do tamanho da trinca por meio da medição da deformação na face traseira é uma técnica eficiente, e que por vezes pode gerar melhores resultados do que aqueles feitos pela medição direta na boca da trinca. É fácil notar que se trata de um procedimento barato, principalmente ao compará-lo com o de utilização do Clip Gage, onde a diferença de preço fica em torno de cem a cento e cinquenta vezes menor que a técnica tradicional. Isso mostra que o aperfeiçoamento da técnica do BFS é extremamente atraente no que concerne à execução de muitos ensaios, gerando resultados precisos a um baixo custo associado, condições perfeitas para a utilização na indústria. Este método pode ser utilizado em situações que seria impossível utilizar a medição por *clip gage* e além disso fica evidenciada no trabalho a possibilidade do laboratório de ensaios mecânicos da UnB realizar esse tipo de procedimento. A diferença encontrada entre os resultados pode-se dar por fatores como: a não-precisão na aferição dos dados pela MTS, paradas durante o processo do ensaio, erro associado ao aquisitor, como o tempo de resposta da leitura, o qual não foi aferido, porém com os resultados obtidos criou-se a possibilidade de novas pesquisas nessa área e aprimoramento das técnicas usadas.

6.4 RECOMENDAÇÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Ao final dos trabalhos desenvolvidos nesse projeto de graduação vieram à tona outras possibilidades de trabalho a serem desenvolvidos. A seguir serão listadas algumas dessas possibilidades.

- Realizar um estudo numérico/experimental para a medição da deformação da face frontal do espécime para diferentes tipos de corpo de prova e verificar se os resultados são favoráveis para estimar o tamanho da trinca assim como na face traseira, utilizando C(T).
- Realizar estudo numérico em programa de elementos finitos para determinar outros valores de *compliance* que visem cada vez mais aproximar os valores teóricos do experimental.
- Alterar a localização dos extensômetros em relação a face do C(T), ou usar uma série dos mesmos, ou rosetas e verificar a influência deste posicionamento na determinação do tamanho da trinca, de acordo com a sua localização na face do corpo de prova.
- Utilizar diferentes razões (a/W) para verificar até que ponto os dados da literatura são válidos na comparação com os valores experimentais e mensurar a viabilidade da realização deste tipo de ensaio no laboratório de materiais da UnB.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDERSON, L. T. **Fracture Mechanics - Fundamentals and Applications**. 3. ed. [S.l.]: [s.n.], 2005.
- ANDOLFATO, R. P.; CAMACHO, J. S.; BRITO, G. A. **Extensometria Básica**. Unesp. Ilha Solteira, p. 46. 2004.
- ASTM E399. Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness K_{Ic} of Metallic Materials, 2012.
- ASTM E647. **Standard Test Method for Measurement of fatigue Crack Growth Rates**. [S.l.]: [s.n.], 2011.
- BROEK, D. Elementary Engineering Fracture Mechanics. **Matinus Nijhoff Publishers**, 1982.
- BROEK, D. The Practical Use of Fracture Mechanics. **Ta409.B773**, 1988.
- CAMPOS, E. R. F.; VILELA, S. **Elaboração de Modelo Numérico representativo da Região de Montagem de Grampos de Suspensão/Cabos Condutores de Energia e Levantamento Experimental de Variáveis de Ajuste**. UnB - Projeto de Graduação. [S.l.], p. 169. 2011.
- DEANS, F. W.; RICHARDS, E. C. A Simple and Sensitive Method of Monitoring Crack Load in Compact Fracture Mechanics Specimens Using Strain Gages. **Journal of Testing and Evaluation, JTEVA**, Vol. 7, May 1979. 147-154.
- DOWLING, N. E. **Mechanical Behavior of Materials: Engineering Methods for Deformation, Fracture and Fatigue**. 2. ed. [S.l.]: [s.n.], 1998.
- DOWLING, N. E. Engineering Methods for Deformation, Fracture and Fatigue. **Mechanical Behavior of Materials**, 2007.
- ELBER, W. The Significance of Fatigue Crack Closure, Damage Tolerance in Aircrafts Structures. **ASTM STP 486**, 1971. pp 230-247.
- FADEL, A. A. **Avaliação do Efeito de Tracionamento em Elevados Níveis EDS Sobre a Resistência em Fadiga do Condutor IBIS**. UNB. DF, p. pp 185. 2010.
- FLECK, A. N. The Use of Compliance and Electrical Resistance Techniques to Characterise Fatigue Testing and Design. **Cambridge University Engineering Department** , Janeiro 1982. 89.
- FORMAN, R. G.; KEARNEY, V. E.; ENGLE, R. M. Numerical Analysis of Crack Propagation in Cyclic-Loaded Structure. **ASME Trans. J. Basic Eng.**, 1967. pp 459.
- FORTES, C. **Mecânica da Fratura**. ESAB BR. [S.l.]. 2011.
- GOOGLE. Google Imagens, 2014. Disponível em: <https://www.google.com/imghp?hl=pt-BR&gws_rd=ssl>. Acesso em: Novembro 2014.

GOOGLE. Fratura dos Metais. **Ebah**. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAABb5YAF/fratura-dos-metais>>. Acesso em: 2014.

GORDON, J. **The Science of Structures and Materials**. [S.l.]: Scientific American Library, 1988.

INGLIS, C. Stresses in a Plate Due to the Presence of Cracks and Sharp Corners. In: _____ **Trans. Inst. Naval Architects**. 55. ed. [S.l.]: [s.n.], 1913. p. 219-241.

KIOWA. Strain Gages - Uso geral - Série KFG. **Panambra**. Disponível em: <[http://www.panambra.com/fw-uploads/2013-04-24-03-04-01_kfg_engy\(8\).pdf](http://www.panambra.com/fw-uploads/2013-04-24-03-04-01_kfg_engy(8).pdf)>. Acesso em: 2014.

KYOWA. **Strain Gage Assessoria em Extensometria Ltda**, 2004. Disponível em: <<http://www.straingage-ltda.com.br/>>. Acesso em: Novembro 2014.

LESSONS LEARNED HOME. History of Flights. **Federal Aviation Administration**, 2014. Disponível em: <http://lessonslearned.faa.gov/Comet1/Tank_FwdEscapeHatch.jpg>. Acesso em: Novembro 2014.

MANDAI, J. T. **Determinação dos Parâmetros para Crescimento de Trincas em Ligas Metálicas: Modelagem e Experimentação**. UnB. Brasília, p. pp 158. 2010.

MARSH, J. K.; SMITH, A. R.; RITCHIE, O. R.. Compliance Methods for Measurement of Crack Length. In: _____ **Fatigue Crack Measurement: Techniques and Applications**. [S.l.]: EMAS, 1991. Cap. 4, p. 69- 92.

MAXWELL, C. D. Strain Based Compliance Method for Determining Crack Length for a C(T) Specimen. **AFWAL-TR-87-4046**, 1987.

NDT CABIN. Cracks in aircraft could cause wings, 2006. Disponível em: <<http://www.ndtcabin.com/articles/aero/0609001.php>>. Acesso em: Novembro 2014.

NEWMAN, D. J. A.; JOHNSTON, W. **Private Communication with Dr John Newman**. Nasa Langley Research Center. Hampton: [s.n.]. 2003.

NEWMAN, J. C.; YAMADA, Y.; JAMES, M. A. Back-Face Strain Compliance Relation for Compact Specimens for Wide Range in Crack Lengths. **NASA Publications**, 2011. Paper 72.

PARIS, P. C. **The Growth of Fatigue Cracks Due to Variations in Load**. Lehigh University. [S.l.]. 1962. (Ph.D. Tese).

PARIS, P. C.; ERDOGAN, F. A Critical Analysis of Crack Propagation Laws. **Journal of Basic Engineering**, 1963.

PEREIRA, C. **Implementação e Análise da Técnica BFS Compliance e Avaliação da Taxa de Propagação de Trinca em Corpos de Prova Não-Padronizados**. UNB. [S.l.]. 2014.

PRIDDLE, E. K. The Influence of Test Variables on the Fatigue Crack Growth Threshold. **Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures**, 2007. pp 333-345.

PUKASIEWICZ, A. G. M. Influência da Refusão por Plasma na Microestrutura de um revestimento Fe-Mn-Cr-Si Depositado por Aspersão Térmica Arco Elétrico sobre Aço Inoxidável ASTM A743-CA6NM. **Soldagem e Inspeção**, São Paulo, Marco 2012.

RICE, J. R. A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks. **Journal of Applied Mechanics**, 1968. pp. 379-386.

RIDDELL, W. T.; PIASCIK, R. S. A Back Face Strain Compliance Expression for the Compact Tension Specimen. **NASA TM-208453**, Outubro 1998.

ROHDE, R. A. **Metalografia - Preparação de Amostras**. [S.l.]. 2010.

ROSENDO, T. Apostila Curso de Ensaio Metalográfico, 2010. Disponível em: <<http://www.urisan.tche.br/~tonilson/Ciencia%20dos%20Materiais/Ciencia-7.pdf>>.

SALGADO, N. K. **Apostila de Fadiga em Estruturas Metálicas**. [S.l.]: [s.n.], s/ano.

SHAW, W. J. D.; ZHAO, W. Back Face Strain Calibration for Crack Length Measurements. **Journal of Testing and Evaluation, JTEVA**, Novembro 1994. 512-516.

SIMHA, K. R. Y.; HANDE, H. S. S.; ARORA, P. R. Monitoring Fatigue Crack Propagation in Compact Tension Specimens via Remote Sensing of Back Face Strain. **Journal of Testing and Evaluation, JTEVA**, Janeiro 1993. 3-8.

TIMOSHENKO, S.; GOODIER, J. **Theory of Elasticity**. [S.l.]: McGraw-Hill, 1970.

WALKER, A. A. Effects of Environments and Complex Load History on Fatigue Life. **ASTM STP 462**, 1970. pp 1-14.

WELLS, A. A. Unstable Crack Propagation in Metals - Cleavage and Fast Fracture. **Crack Propagation Symposium Proc.**, 1961. P. 210.

WESTGAARD, H. Bearing Pressures and Cracks. **Journal of Applied Mechanics**, 1939.

WILLEMS; EASLEY; ROLFE. **Resistência dos Materiais**. [S.l.]: Mc. Graw-Hill, 1983. Capítulo 14 p.

WOHLER, A. Experiments on the Strength Metals. **Engineering**, 1967. 160.

WORLDWIDE GUIDE TO EQUIVALENT IRONS AND STEELS. Cast Stainless Steel CA6NM, ASTM A743. **ASM Material Data Series**, n. 4, 2000.

APÊNDICE A - EXTENSOMETRIA

Este apêndice tem o objetivo de servir como um guia passo a passo para o processo de colagem e calibração dos extensômetros, bem como uma introdução teórica sobre o tema. Esse processo é essencial para o experimento, pois erros associados à leitura podem facilmente modificar e até mesmo induzir a resultados que não condizem com o estado real da peça ensaiada.

A harmonia entre segurança e economia é um dos fatores mais importantes a serem considerados durante o projeto de uma nova estrutura. Para o desenvolvimento de um componente seguro, do ponto de vista de falhas, é necessário que se conheçam os esforços presentes em cada parte do material. No entanto, não existe, atualmente, uma tecnologia capaz de medir diretamente esses esforços. Por tanto, utiliza-se da deformação como uma forma de medir indiretamente os esforços internos presentes na estrutura.

Extensômetros são usados para medir deformações em diferentes estruturas. A medida é realizada colando um extensômetro nestas estruturas, convertendo a deformação causada em uma quantidade elétrica (voltagem) e amplificando-a para leitura em um local remoto. Deformações em várias partes de uma estrutura real sob condições de serviço podem ser medidas com boa precisão sem que a estrutura seja destruída. Assim, isto leva a uma análise quantitativa da distribuição de deformação sob condições reais de operação. Os extensômetros fornecem um método excelente de converter deformações em quantidade elétrica. As características das medidas com extensômetros são resumidas abaixo:

- Alta precisão de medição;
- Pequeno tamanho e pouco peso;
- Excelentes respostas aos fenômenos dinâmicos;
- Fácil utilização desde que conhecida a boa técnica;
- Excelente linearidade;
- Medições possíveis dentro de uma ampla faixa de temperatura;
- Aplicáveis submersos em água ou em atmosfera de gás corrosivo desde que utilizado tratamento apropriado;
- Usados como elementos transdutores para medidas de várias quantidades físicas (força, pressão, torque, aceleração, deslocamento);
- Possibilita a medida em locais remotos;

Extensômetro

Uma forma de determinar a deformação de uma estrutura, e conseqüentemente conhecer os esforços aos quais ela está submetida, é a utilização de “Strain Gages” (Extensômetros). Existem muitos tipos de “Strain Gages”, e, de maneira geral, são compostos por um pequeno filamento metálico

resistivo (elemento sensor), cuja espessura varia de 3 a 6µm, colocado sobre um filme plástico (base) de 15 a 16µm de espessura, e coberto por uma camada de filme laminado. O elemento sensor é formado, geralmente, de uma liga metálica de cobre e níquel. A composição básica de um extensômetro pode ser observado na Figura 52.

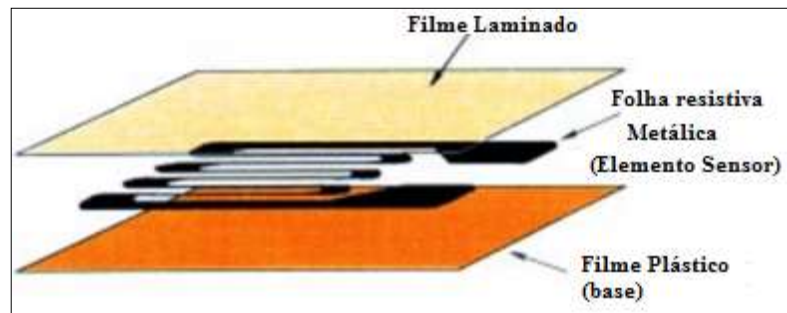


Figura 52 - Composição de um extensômetro. (KYOWA, 2004)

O “Strain Gage” é colado no objeto de medição e assim o elemento sensor sofre as mesmas deformações sofridas pela estrutura. Como muitos materiais metálicos ao serem deformados alteram a sua resistência elétrica é possível então relacionar essa variação de resistência elétrica com a sua deformação por meio de uma constante de proporcionalidade (gage factor), que depende do material do qual é feito o filamento resistivo. Essa relação pode ser observada na equação (41) seguinte:

$$\frac{\Delta R}{R} = K \cdot \varepsilon \quad (41)$$

Onde R é a resistência original do “Strain Gage”, Ω (ohm); ΔR a variação da resistência, Ω (ohm); e K a constante de proporcionalidade (Gage Factor); ε: Deformação.

Como a variação da resistência elétrica ocorrida no extensômetro é muito pequena, para que sua medição seja mais precisa utiliza-se um circuito elétrico amplificador capaz de detectar pequenas alterações de resistência elétrica chamado de Ponte de Wheatstone. Tal dispositivo é formado pela combinação de quatro resistores como ilustra a Figura 53.

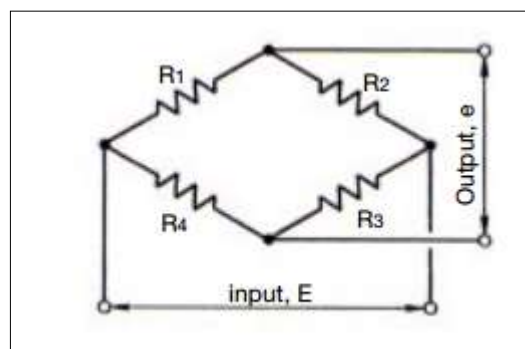


Figura 53 - Ponte de Wheatstone. (KYOWA, 2004)

Supondo $R_1=R_2=R_3=R_4$ ou $R_2 \times R_4=R_1 \times R_3$, qualquer voltagem aplicada na entrada (E), a saída (e) será zero. Diz-se então que se trata de uma ponte “equilibrada”. Por outro lado, quando a ponte perde tal

equilíbrio, obtém-se como resposta uma voltagem correspondente à mudança de resistência. A Figura 54 mostra um “Strain Gage” conectado no lugar da resistência R4.

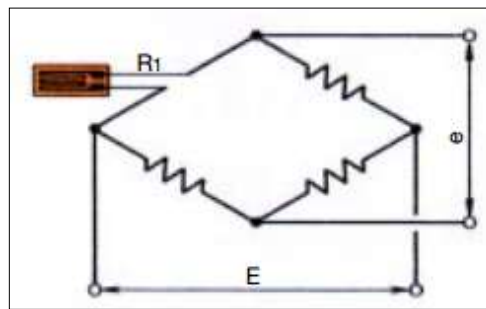


Figura 54 - Extensômetro conectado a uma Ponte de Wheatstone. (KYOWA, 2004)

Dessa maneira, quando o extensômetro sofre uma deformação (variação da resistência elétrica), a ponte de Wheatstone registra a voltagem correspondente, e . Conforme as equações 42 e 43.

$$e = \frac{1}{4} \cdot \frac{\Delta R}{R} \cdot E \quad (42)$$

$$e = \frac{1}{4} \cdot K \cdot \varepsilon \cdot E \quad (43)$$

O Sistema anteriormente descrito pode ter também 2 (dois) ou 4 (quatro) extensômetros associados a ele, Figura 55, podendo apresentar assim diversas configurações. A quantidade de sensores acoplados à ponte de Wheatstone depende do tipo de aplicação.

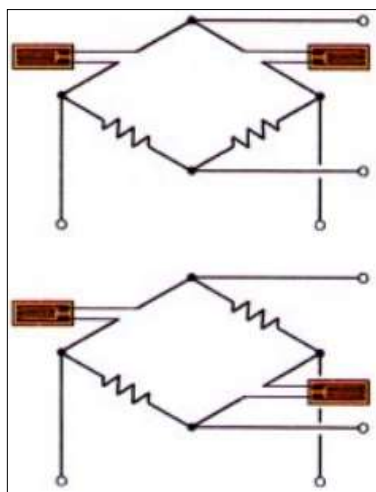


Figura 55 - Arranjos de Ponte de Wheatstone com 2 extensômetros. (KYOWA, 2004)

Funcionamento do Extensômetro

O ERE (Extensômetro de Resistência Elétrica) é um dispositivo de medição de deformações. Ele é basicamente constituída de uma resistência elétrica delgada, geralmente em forma de lâmina (*foil gauges*), aplicada a uma base isolante e flexível. A Figura 56 ilustra os vários componentes do ERE.

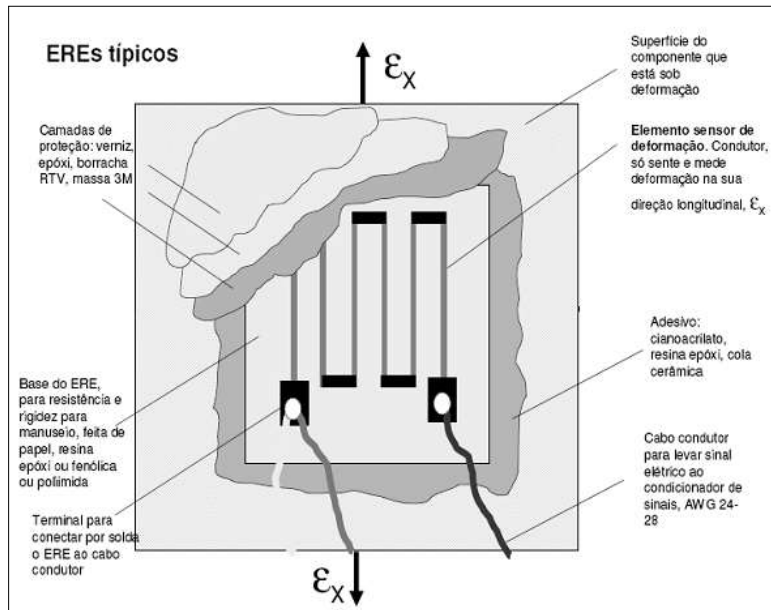


Figura 56 - Extensômetro de resistência elétrica. (CAMPOS e VILELA, 2011)

Esse conjunto quando devidamente colado a uma superfície metálica, por exemplo, transforma a deformação desta superfície em uma variação de resistência elétrica.

$$R = \rho \left(\frac{L}{A} \right) \quad (44)$$

sendo R a resistência elétrica do fio, em Ω e ρ é a resistividade elétrica do material, em $\Omega \cdot m$.

Esta variação de resistência é proporcional à deformação do cabo e o grau desta proporção é o fator de sensibilidade do extensômetro (Kou G. F. Gauge Factor).

$$K = \left(\frac{dR}{R} \right) \left(\frac{1}{\epsilon} \right) \quad (45)$$

onde K é o fator de sensibilidade do extensômetro e dR é a variação de resistência elétrica do fio, em Ω ;

O fator de sensibilidade do extensômetro é função do tipo de material do fio resistivo e é expresso pela seguinte equação:

$$K = \frac{d\rho}{\rho} + (1 + 2\nu) \quad (46)$$

Os ERE possuem vários formatos de acordo com a aplicação pretendida Figura 57. Os principais tipos são: (a) Unidirecional; (b) Roseta Tripla 120° (para medições em três direções); (B)

Diafragma (usado como transdutor de pressão); (d) Tensão Interna (medida de tensão residual); (e) Unidirecional longo (medição em concreto). O tipo utilizado nos testes no cabo foi o Unidirecional.

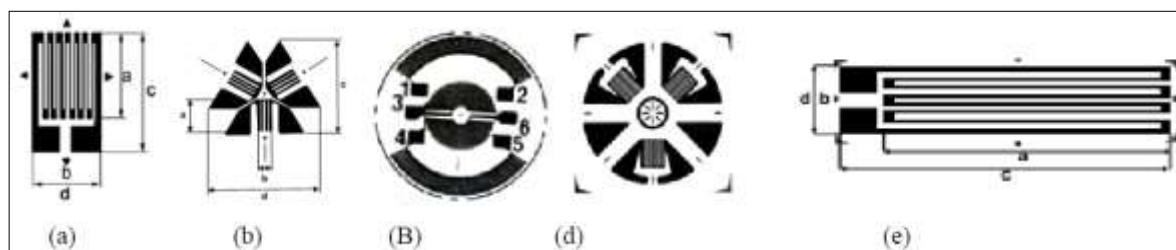


Figura 57 - Principais tipos de extensômetro. (CAMPOS e VILELA, 2011)

O processo de extensometria consiste em fixar o ERE à peça e ligá-lo a uma ponte de Wheatstone para calibrá-lo e fazer as medições. A seguir, são apresentados os procedimentos de preparo da amostra para a realização da extensometria e, em seguida a calibração para a realização dos ensaios.

Colagem dos Extensômetros

A colagem do ERE é dividida em 5 etapas: i)preparo da superfície; ii)limpeza da superfície; iii) posicionamento do ERE; iv) colagem do ERE; v) soldagem dos fios do ERE. Essas etapas serão listadas abaixo:



Figura 58- Materiais utilizados para colagem dos extensômetros no CP.

Preparo da superfície: A superfície, em que o extensômetro será colado, é lixada com lixas de granulação de 80 a 120 de modo a tornar-se livre de sujeiras e para aumentar a rugosidade superficial, permitindo uma melhor colagem Figura 59. Com isso, a peça e o extensômetro formam uma estrutura única e para tal a adesão deve ser completa.

No uso das lixas é indicado iniciar o processo da menor para a maior e lixando em direções perpendiculares. E não deve aplicar força no procedimento de lixar para não reduzir a superfície do corpo de prova.

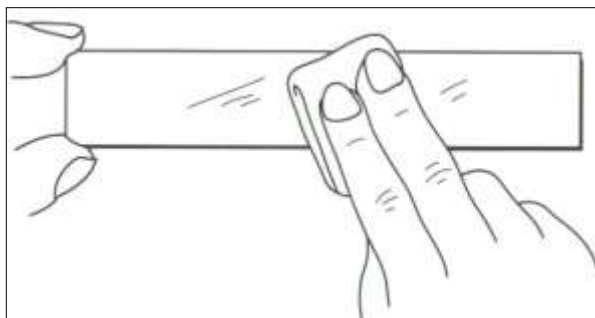


Figura 59 - Limpeza da superfície, previa à colagem do extensômetro. (KYOWA, 2004)

Limpeza da superfície: A superfície onde extensômetro for colado deve ser limpada com álcool isopropílico e algodão para evitar que impurezas ou resíduos oriundos do processo de lixar a área de colagem.

Posicionamento do ERE: O local de colagem do extensômetro é marcado na amostra. No entanto, antes de colar, a resistência descrita na embalagem do ERE deve ser checada com uma tolerância de $\pm 5\%$ com o uso de um multímetro. O extensômetro é, inicialmente, colado a uma fita adesiva (*durex* especial para extensometria) que é usada para posicioná-lo na posição desejada. (Figura 60)

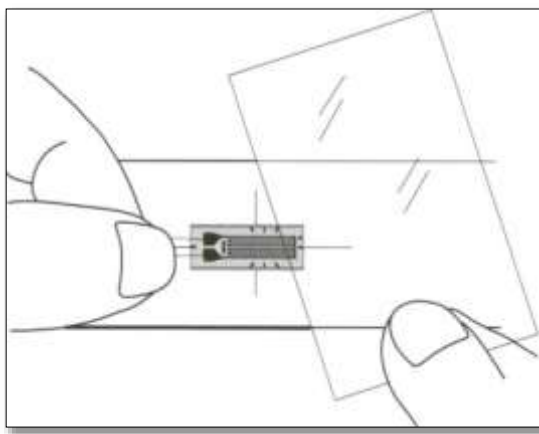


Figura 60 - Posicionamento do extensômetro na amostra. (KYOWA, 2004)

Colagem do ERE: Após o uso da fita adesiva, o extensômetro é descolado parcialmente (a borda da fita continua em contato com o cabo para conservar a posição do extensômetro) e aplica-se uma cola especial (*super bonder®*) sob a base do ERE, antes de reposicioná-lo com o auxílio da fita adesiva. (Figura 61)

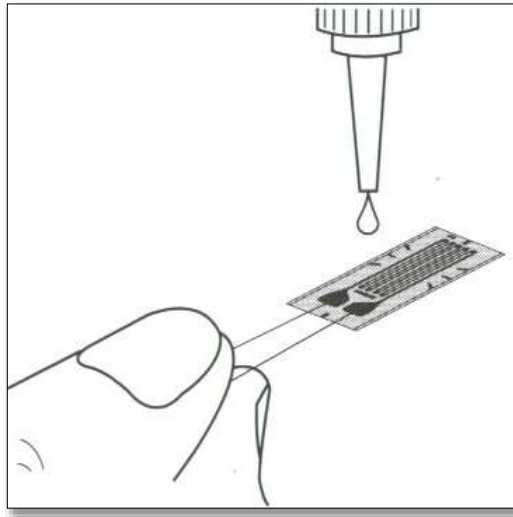


Figura 61 - Colocação de cola (super bonder® de secagem rápida) no extensômetro. (KYOWA, 2004)

Com uma almofada de silicone, o ERE é mantido pressionado contra corpo de prova por aproximadamente 1 minuto. (Figura 62)

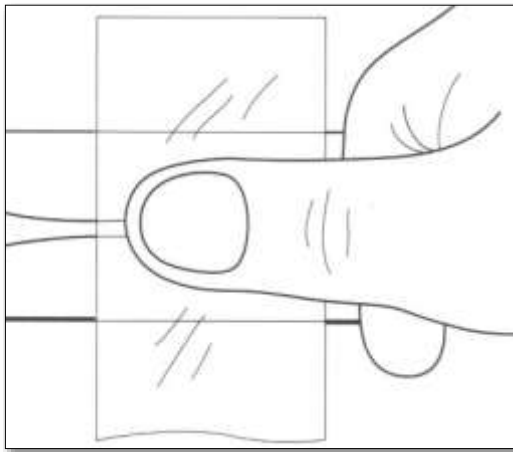


Figura 62 - Colagem do extensômetro na amostra. (KYOWA, 2004)

Em seguida a fita adesiva é retirada e é verificado se o extensômetro está bem colado ao corpo de prova a ser ensaiado. Para proteger o ERE de impactos mecânicos e de corrosão ou umidade adiciona-se uma camada de silicone (resina protetora) sobre ele.

Soldagem dos fios do ERE: Para finalizar o procedimento, os fios do ERE são soldados a um cabo que é conectado ao aquisitor de dados. Antes da conexão do cabo ao aquisitor é necessário verificar se o valor da resistência elétrica do circuito é compatível ao valor esperado. (Figura 63)



Figura 63 - Extensômetros e fiação colados no corpo de prova.

Calibração Dos Extensômetros

O procedimento de calibração dos extensômetro será descrito a seguir. É essencial que os mesmos estejam calibrados para que as leituras sejam feitas corretamente. Primeiramente define-se a faixa de leitura esperada em μS (micro Strains). O ADS possui 3 faixas de ajuste: 1000 μS , 300 μS e 100 μS , Figura 64, para as quais faz o procedimento de ajuste das resistências internamente por meio de seu *software* (AQDados). Uma vez definida a faixa o *jumper* deve ser posicionado na placa de modo a ativar a resistência da faixa desejada, conforme mostrado no detalhe da Figura 64. Neste experimento ele foi ajustado na faixa de medição de 100 μS .



Figura 64 - Indicação das resistências para Shunt na placa 1 do ADS.

O passo seguinte é calcular o valor do *ShuntCal*, por meio da aplicação da expressão:

$$ShuntEng = \left[-\frac{1}{k} \left(\frac{R_g}{R_{cal} + R_g} \right) \right] \cdot 10^6 \quad (47)$$

Onde, k e R_G são dados fornecidos pelo fabricante do extensômetro, sendo k o *gage factor* e R_G o valor da resistência do extensômetro em Ohms. R_{cal} é o valor de ajuste relativo aos resistores da placa1 do ADS, cujos valores para cada faixa são dados na Figura 65.

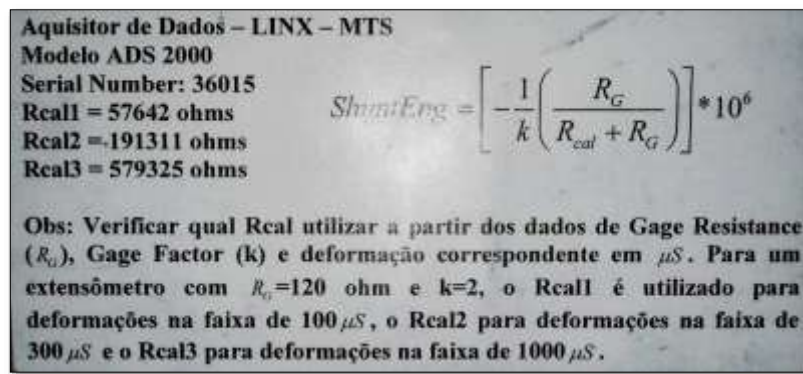


Figura 65 - Valores e Fórmula para o Cálculo do ShuntCal.

Uma vez calculado o valor do *ShuntCal* referente à faixa de medição desejada, é necessário aplicá-lo no *software* AQDados antes de balancear a ponte no módulo de configuração dos canais de aquisição. Para tal é necessário colocar o sistema de aquisição no modo de comunicação direta com o ADS2000 através da função entradas analógicas.

Ao abrir o módulo de configuração das entradas é necessário selecionar a placa em que se está trabalhando e a opção Avançado, a qual abre a tela mostrada na Figura 66.

| Canal | CH Mod | Nome do Sinal | Unidade | Faixa do A/D | Ganho | Chaves de Ganho | Filtro Passa Baixas | Balanço | Precisão | Resolução E/16 | Shunt Cal | Shunt Eng |
|-------|--------|---------------|---------|--------------|--------|----------------------|---------------------|----------|----------|----------------|-----------|------------|
| 0 | 0 | | | | | 2310 5mV OFF 5mV OFF | | 0,0720 V | 0,0720 V | | 10,0000 V | |
| 1 | 1 | | | | | 2311 5mV OFF 5mV OFF | | 0,0600 V | 0,0600 V | | 10,0000 V | |
| 2 | 2 | | | | | 2312 5mV OFF 5mV OFF | | 0,0750 V | 0,0750 V | | 10,0000 V | |
| 3 | 3 | | | | | 2313 5mV OFF 5mV OFF | | 0,0200 V | 0,0200 V | | 10,0000 V | |
| 4 | 4 | | | | x 2000 | 2314 5mV OFF 5mV OFF | 100 Hz | 0,0020 V | 0,0020 V | 0 | 0,0000 V | 988,2840 V |
| 5 | 5 | | | | x 2000 | 2315 5mV OFF 5mV OFF | 100 Hz | 0,0050 V | 0,0050 V | 0 | 0,0000 V | 884,2810 V |
| 6 | 6 | | | | x 2000 | 2316 5mV OFF 5mV OFF | 100 Hz | 0,0095 V | 0,0095 V | 0 | 0,0000 V | 309,2810 V |
| 7 | 7 | | | | x 2000 | 2317 5mV OFF 5mV OFF | 100 Hz | 0,0135 V | 0,0135 V | 0 | 0,0000 V | 898,2810 V |
| 8 | 8 | | | | x 2000 | 2318 5mV OFF 5mV OFF | 100 Hz | 0,0025 V | 0,0025 V | 0 | 0,0000 V | 988,2810 V |
| 9 | 9 | | | | | 2319 5mV OFF 5mV OFF | | 0,0700 V | 0,0700 V | | 10,0000 V | |
| 10 | 10 | | | | | 2320 5mV OFF 5mV OFF | | 0,0000 V | 0,0000 V | | 10,0000 V | |
| 11 | 11 | | | | | 2321 5mV OFF 5mV OFF | | 0,0010 V | 0,0010 V | | 10,0000 V | |
| 12 | 12 | | | | | 2322 5mV OFF 5mV OFF | | 0,0000 V | 0,0000 V | | 10,0000 V | |
| 13 | 13 | | | | | 2323 5mV OFF 5mV OFF | | 0,0000 V | 0,0000 V | | 10,0000 V | |
| 14 | 14 | | | | x 1 | 2324 5mV OFF 5mV OFF | 100 Hz | 0,0000 V | 0,0000 V | 0 | 0,0000 V | 1000 |
| 15 | 15 | | | | x 1 | 2325 5mV OFF 5mV OFF | 100 Hz | 0,0000 V | 0,0000 V | 0 | 0,0000 V | 1000 |

Figura 66 - Configuração das entradas analógicas no AQDados.

| Canal | Ch Mod | Nome do Sinal | Unidade | Faixa de A/D | Ganho | Chaves de Ganho | Filtro Passa Baixas | Balance | Resolção | Valor no A/D | Valor Eng | Unidade |
|-------|--------|---------------|---------|--------------|--------|-----------------------|---------------------|----------|----------|--------------|-----------|---------|
| 0 | 0 | | | | | 05H0 Sw7 OFF Sw8 OFF | | 0.0025 V | 0.073 | 0.0000 V | 0 mV | |
| 1 | 1 | | | | | 05H1 Sw7 OFF Sw8 ON | | 0.0030 V | 0.093 | 0.0000 V | 0 mV | |
| 2 | 2 | | | | | 05H2 Sw7 OFF Sw8 ON | | 0.0035 V | 0.103 | 0.0000 V | 0 mV | |
| 3 | 3 | | | | | 05H3 Sw7 OFF Sw8 ON | | 0.0040 V | 0.113 | 0.0000 V | 0 mV | |
| 4 | 4 | | | | x 2000 | 05H4 Sw7 OFF Sw8 ON | 100 Hz | 0.0025 V | 0.073 | 0.0000 V | 0 mV | |
| 5 | 5 | | | | x 2000 | 05H5 Sw7 OFF Sw8 ON | 100 Hz | 0.0025 V | 0.073 | 0.0000 V | 0 mV | |
| 6 | 6 | | | | x 2000 | 05H6 Sw7 OFF Sw8 ON | 100 Hz | 0.0025 V | 0.073 | 0.0000 V | 0 mV | |
| 7 | 7 | | | | x 2000 | 05H7 Sw7 OFF Sw8 ON | 100 Hz | 0.0025 V | 0.073 | 0.0000 V | 0 mV | |
| 8 | 8 | | | | x 2000 | 05H8 Sw7 OFF Sw8 ON | 100 Hz | 0.0025 V | 0.073 | 0.0000 V | 0 mV | |
| 9 | 9 | | | | x 2000 | 05H9 Sw7 OFF Sw8 ON | 100 Hz | 0.0025 V | 0.073 | 0.0000 V | 0 mV | |
| 10 | 10 | | | | x 2000 | 05H10 Sw7 OFF Sw8 ON | 100 Hz | 0.0025 V | 0.073 | 0.0000 V | 0 mV | |
| 11 | 11 | | | | x 2000 | 05H11 Sw7 OFF Sw8 ON | 100 Hz | 0.0025 V | 0.073 | 0.0000 V | 0 mV | |
| 12 | 12 | | | | x 2000 | 05H12 Sw7 OFF Sw8 ON | 100 Hz | 0.0025 V | 0.073 | 0.0000 V | 0 mV | |
| 13 | 13 | | | | x 2000 | 05H13 Sw7 OFF Sw8 ON | 100 Hz | 0.0025 V | 0.073 | 0.0000 V | 0 mV | |
| 14 | 14 | | | | x 1 | 05H14 Sw7 OFF Sw8 OFF | 100 Hz | 0.0025 V | 0.073 | 0.0000 V | 0 mV | |
| 15 | 15 | | | | x 1 | 05H15 Sw7 OFF Sw8 OFF | 100 Hz | 0.0025 V | 0.073 | 0.0000 V | 0 mV | |

Figura 67 - Tela de calibração dos extensômetros.

Nesta tela do programa serão feitos todos os procedimentos de ajuste, como descrito a seguir:

- i) Desmarque todos os canais no ícone
- ii) Selecione então apenas os canais referentes aos extensômetros (Canal 5);
- iii) Insira o valor calculado do *ShuntCal* na célula correspondente (se os extensômetros operarem em faixas distintas cada qual deve ter seu valor de *Shunt*);
- iv) Ajuste o valor do ganho (para a conexão ¼ de ponte o AQDados recomenda ganho >1000);
- v) Abra o ícone *display* , para acompanhar a operação de balanceamento;
- vi) Inicie o processo de calibração selecionando para zerar a ponte;
- vii) Após o sinal mostrado no *display* atingir o valor zero, inicie o balanceamento selecionando o ícone , o qual deve encerrar mostrando leituras próximas de zero no *display*;
- viii) O display deverá mostrar uma faixa de operação e um relatório de calibração será instantaneamente aberto na tela conforme a Figura 69;
- ix) Confira se o procedimento foi considerado correto para cada extensômetro e as faixas de leitura que o programa atribuiu a cada extensômetro;
- x) Se houver erro repita a operação, verificando antes com o multímetro a continuidade dos extensômetros em que houve falha e também o valor do *Shunt* atribuído;
- xi) Repita o procedimento se necessário até que o relatório não aponte erros;

Porém antes mesmo do processo de calibração algumas medidas importantes devem ser tomadas para a configuração do hardware do AQDados.

- Fazer checagem da resistência de cada extensômetro utilizando um multímetro;

- Conectar os fios de cada extensômetro ao ADS, mapeando as entradas e identificando cada extensômetro e cada canal correspondente;
- Para o extensômetro de 120Ω a alimentação de 5V é suficiente. O ajuste da alimentação é feito na placa, colocando o jumper no conjunto equivalente à tensão de alimentação conforme indica a Figura 68.



Figura 68 - Configuração dos extensômetros de 120Ω no ADS 2000. (Fonte: LYNX)

- Verificar se a placa selecionada no software corresponde à placa física usada;


Deve-se também verificar o mapeamento do módulo com alguns passos:

- Em entradas analógicas, verificar se a placa em uso é a placa correspondente a tal módulo;
- Nomear os canais, as unidades e selecionar a faixa A/D que melhor se adapta as necessidades desse ensaio. (Extensômetro Back face/ mStrain/ +/-10V);
- Definir o valor do *ShuntCal* de acordo com a equação (47). Usando o resultado de $R_{call} = -989.28 \Omega$, como *ShuntEng*.

Em seguida manter a estrutura que possui os extensômetros em repouso até o término do balanceamento. Preenchendo a coluna de *RepusoEng* com o valor zero, que é o valor da condição inicial;

Salvar o valor de calibração em um arquivo de configuração para ser reutilizado todas as vezes que o programa perder o valor correto de *ShuntCal*.

Após os procedimentos listados é necessário efetuar o balanceamento automático dos extensômetros, isto serve para se obter a melhor posição dos controles de ajuste de balanço de modo a equilibrar o sensor em ponte. Ou seja, determinar a melhor posição de ajuste de modo a minimizar a tensão lida pelo A/D. Para isso, segue os passos:

- Habilitar os canais a serem balanceados (extensômetros), marcando as caixas de opção correspondentes a esses canais na coluna CN Mod;
- Para iniciar o balanceamento dos canais habilitados, clique sobre o botão  do menu e acompanhe até que na coluna os valores se aproximem de zero, pois o programa inicia o balanceamento e apresenta, durante o balanceamento, um display com a leitura dos canais que estão sendo balanceados.

O processo de balanceamento é encerrado com o shunt.

Aguarde a emissão de um relatório como segue. O relatório deve ser lido de modo que se confira que não há erro em qualquer extensômetro e que as faixas de leitura estão adequadas. Leia a resposta de todos os extensômetros.



Figura 69 - Relatório de calibração com ShuntCal.

APÊNDICE B – ENSAIO DE PROPAGAÇÃO DE TRINCAS

O ensaio de propagação de trincas é a base do projeto, pois ele é o responsável por criar condições controladas para o crescimento da trinca através do corpo de prova que é a fonte de estudo. É o tamanho dessa trinca que se deve determinar e conseqüentemente usar dos meios cabíveis como o método ótico, o BFS e o CMOD para verificação e comparação dos dados por ele fornecidos. Por isso é essencial que o ensaio seja perfeitamente adequado e configurado para os dados que se deseja obter.

Este anexo tem o objetivo de servir como um guia passo a passo para o ensaio de propagação de trincas por fadiga regido pela norma *ASTM E647*. O *software* utilizado é o *Standard Fatigue Crack Growth Template* da MTS, com o número de registro KRW 93472 da versão 2002B.

O ensaio de propagação de trincas poder servir para os seguintes propósitos:

- Determinar a influência que o crescimento de trinca por fadiga tem na vida de componentes submetidos a carregamentos cíclicos.
- Determinar um critério de seleção de materiais e requisitos de inspeção para aplicações de tolerância ao dano.
- Determinar em termos quantitativos os seguintes efeitos individuais e combinados no crescimento da trinca: tipo de fabricação, condições do ambiente, variáveis de carregamento e características metalúrgicas.

OBS: Caso a garra *Clevis* não esteja colocada na MTS e seja necessário trocar pela garra hidráulica.

Ensaio de Propagação de Trincas

(i) Acessar o *Station Manager* na área de trabalho;



Figura 70 - Ícone do Station Manager.

(ii) Em *Open Station*, selecionar *Teste03Ago.cfg* (ou qualquer outro que esteja funcionando) e em *Parameter Sets* selecionar *default*. Em seguida, abrir a configuração clicando em *Open*;

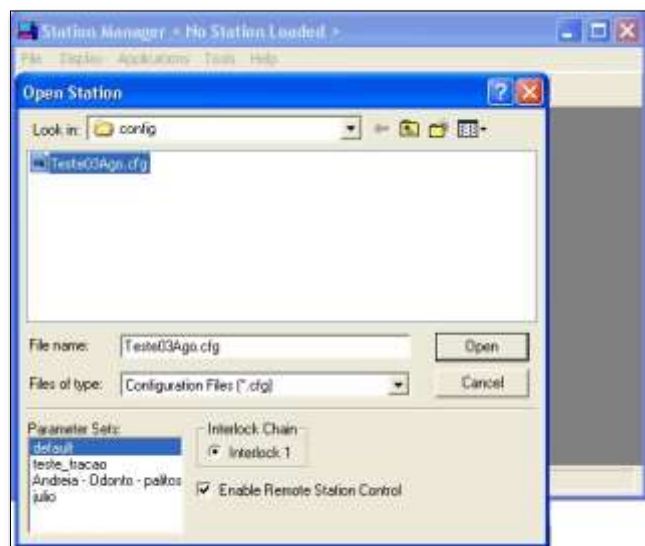


Figura 71 - Janela inicial do Station Manager.

(iii) Em *Applications*, clicar em *MTS Fatigue Crack Growth Testware*;

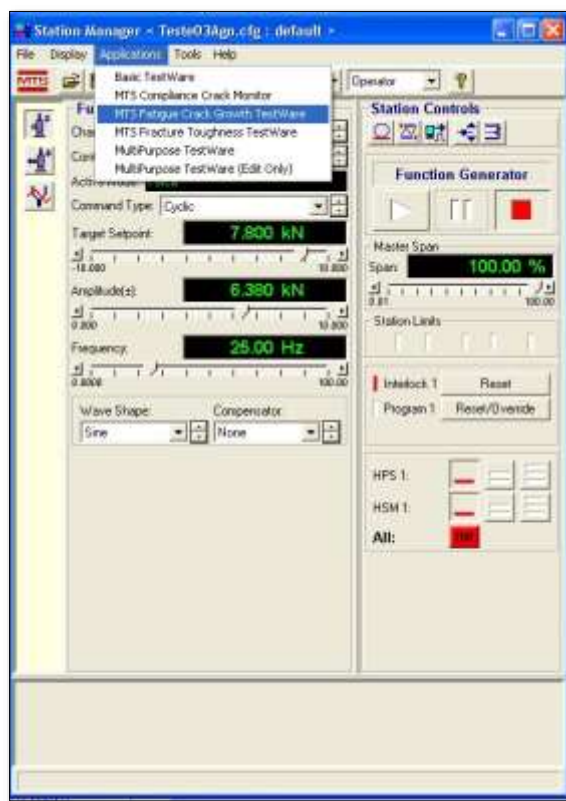


Figura 72 - Atalho para o MTS Fatigue Crack Growth Testware.

(iv) Em *MTS Fatigue Crack Growth Testware*, clicar em *Define Specimen*;

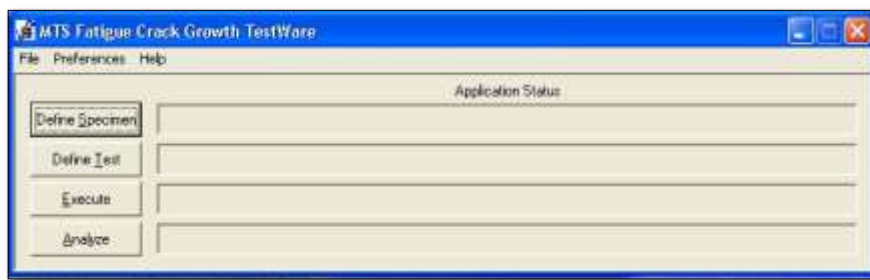


Figura 73 - Janela inicial do MTS Fatigue Crack Growth Testware.

(v) Em *Choose a Batch to Edit*, selecionar *Fatigue Crack Growth* em *Template* e selecionar *CTS_743CA6NM* em *Batch ou New Batch* para criar um novo; O modo *Fatigue Crack Growth* faz o controle do crescimento da trinca por meio do *Clip Gauge* colocado no corpo de prova.

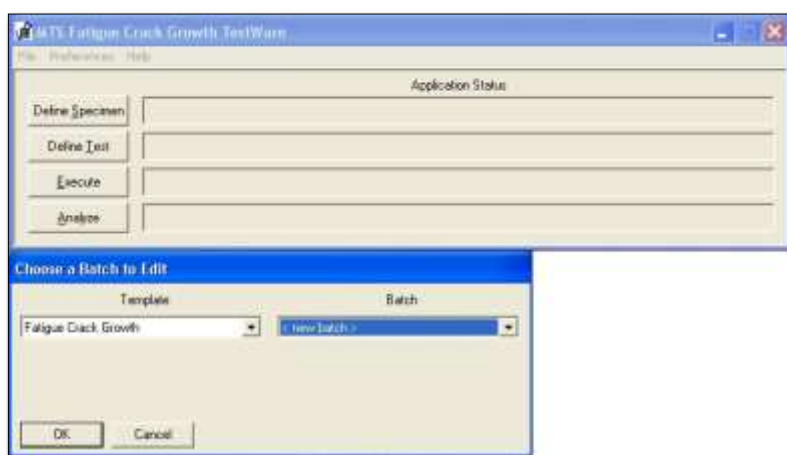


Figura 74 - Escolha do tipo de Template do MTS FCGT.

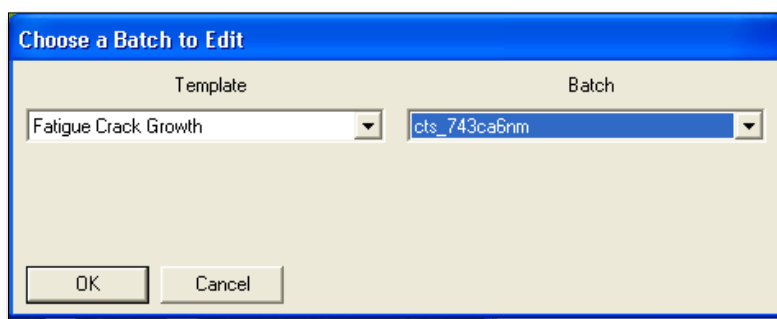


Figura 75 - Batch do corpo de prova em questão

(vi) Selecionar o tipo de corpo de prova em *Specimen Geometry*;

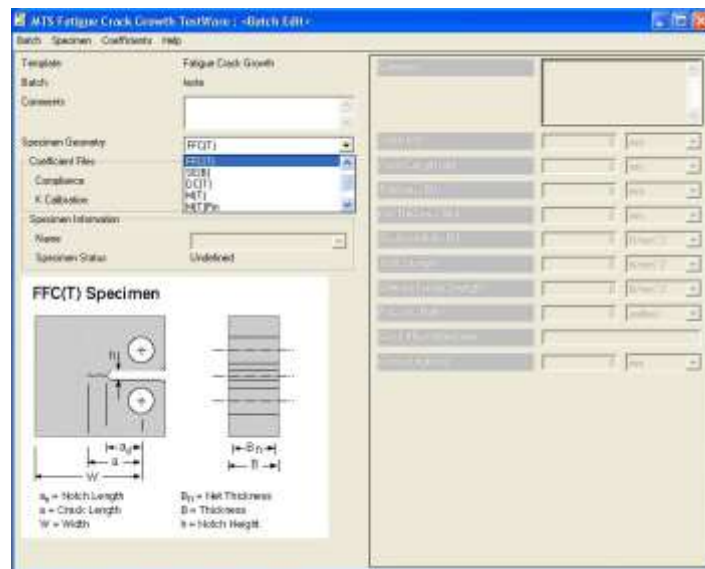


Figura 76 - Definição do tipo de geometria do espécime.

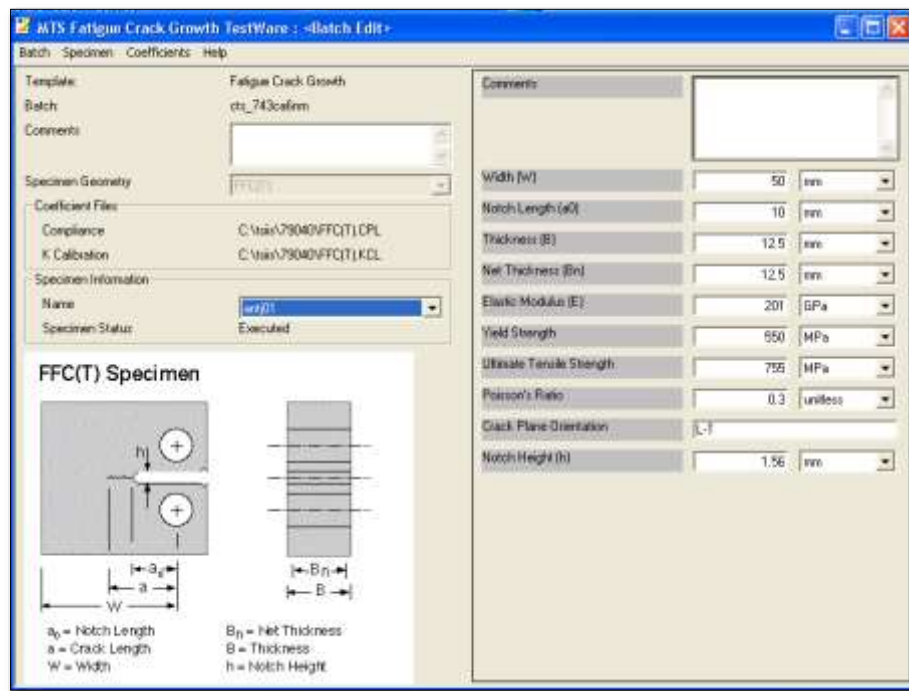


Figura 77 - Definição do espécime para o corpo de prova do experimento.

- Lembrando que é possível editar tanto os dados de *Compliance* quanto todas as dimensões do corpo de prova em análise através da aba *Specimen* e *Coefficients*.

(x) Em *MTS Fatigue Crack Growth Testware*, clicar em *Define Test*; Em seguida abrirá uma janela, que é *Choose a Procedure for Define*, selecionar *Fatigue Crack Growth* em *Template* e em *Procedure* selecionar o procedimento desejado, neste ensaio será o procedimento f;

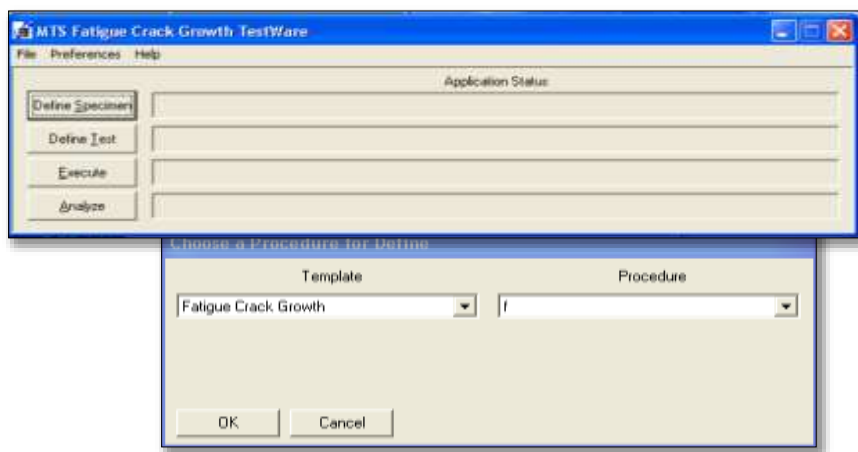


Figura 78 - Janela do Procedure do MTS FCGT.

(xi) Em **Definition – Precrack** são definidos os parâmetros para realizar a pré-trinca por fadiga;

- Para a definição do parâmetro **Final Kmax** é necessário ter algum conhecimento a cerca do material que será ensaiado.
- A razão de carregamento **R, Load Ratio R**, é uma variável do ensaio, sendo que para os ensaios realizados nesse experimento o R foi de 0,33 nos dois ensaios.
- O valor da frequência, **Test Frequency**, de ensaio foi de 25 Hz no ensaio 1 e 10 Hz no ensaio 2..
- O valor do tamanho final da trinca, **Final Crack Length**, é definido por norma (*ASTM E647*) e deve ser o maior valor entre $0,1B, h$, ou $1,0 mm$. No presente caso o maior valor é de h , que deve ser somado ao valor inicial do entalhe a para compor o valor de **Final Crack Length**, que foi de $11,5 mm$.
- Os outros parâmetros podem ser mantidos como mostra na figura a seguir:

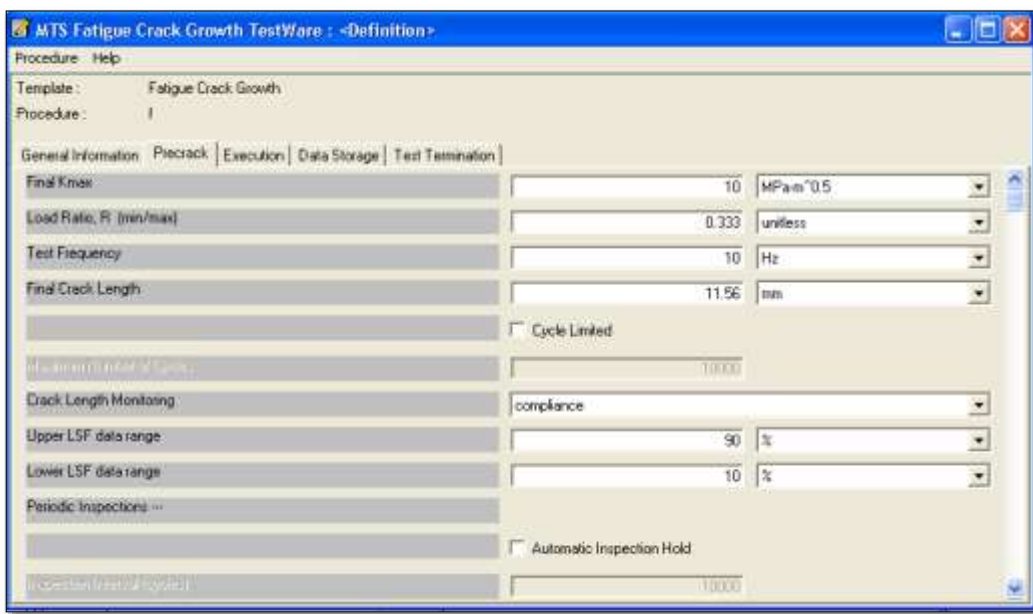


Figura 79 - Definição dos parâmetros da pré-trinca no Procedure.

(xii) Em *Definition – Execution*, o *Test Method* define o tipo de ensaio a ser realizado, onde foi utilizado o *Constant Load Amplitude* para o ensaio normal de propagação de trincas para obter a curva da/dN versus K ; e o *Delta-K Control* é utilizado para o ensaio de K_{th} .

- No ensaio *Constant Load Amplitude* a força é mantida constante e o valor de K aumenta à medida que a trinca se propaga. O valor do carregamento *Endlevel 2* é definido a partir do valor da razão de carregamento R . O valor de *Endlevel 1* é a carga máxima, $P_{máx}$. Para o Aço CA6NM foi utilizado um $P_{máx}$ de 10 KN com um K de $10 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$. (Ensaio 2)

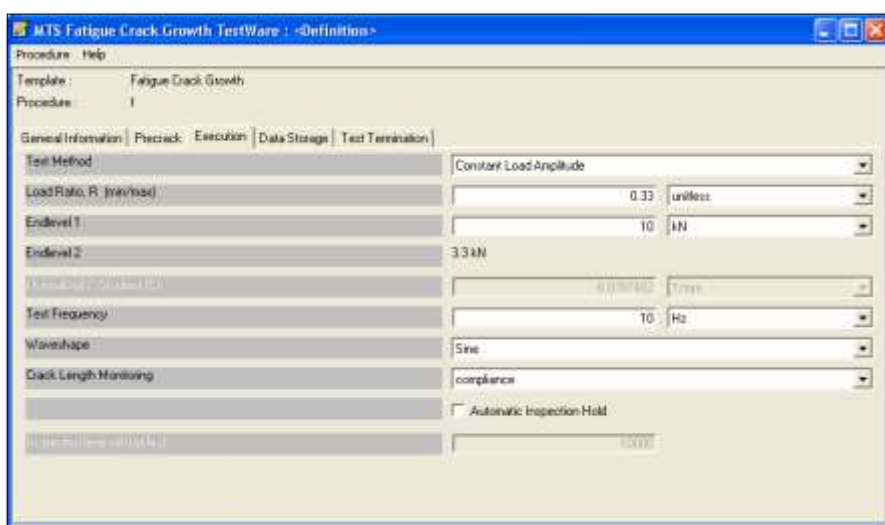


Figura 80 - Definição dos parâmetros de ensaio p/ Constant Load Amplitude.

No ensaio de *Delta-K Control* é escolhido um valor superior de K , *Endlevel 1*, e um valor inferior, *Endlevel 2*, que depende da razão R . Esse valor superior de K vai decrescendo até o

valor inferior por meio do Gradiente C , *Normalized K Gradient* (C), o qual a norma *ASTM E647* exige que seja maior que $0,08 \text{ mm}^{-1}$. Trate-se de um tipo de ensaio bastante demorado, podendo levar até alguns dias para ser realizado.

Para o Aço CA6NM foi escolhido um valor de *Endlevel 1* de $16\text{MPa}\sqrt{m}$ (*ensaio 1*).

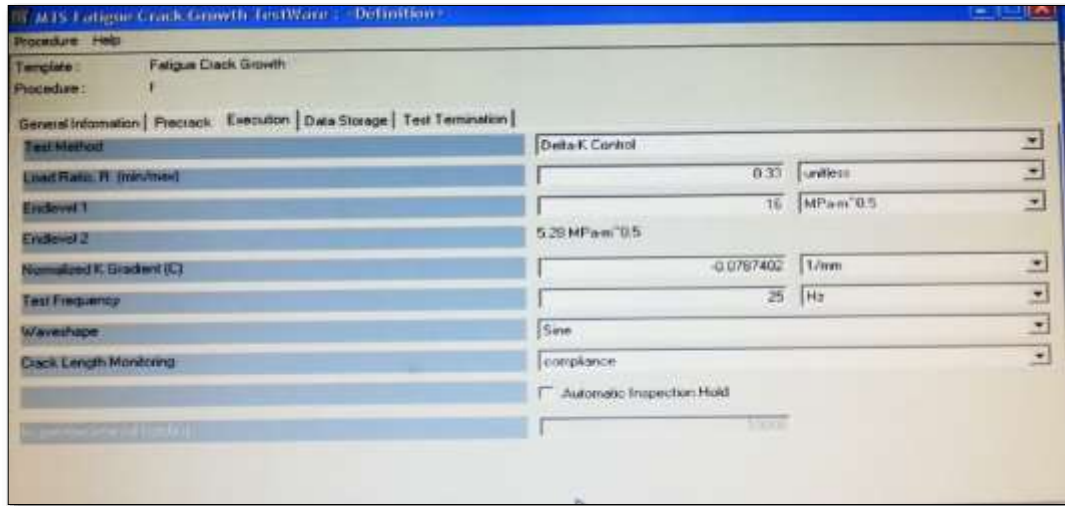


Figura 81 - Definição dos parâmetros de ensaio para Delta-K Control - ensaio 1

(xiii) Em **Definition – Data Storage**, selecionar **Crack length update interval – 0,01mm**, **Crack Length Data – Compliance**, **Upper LSF data range – 90%**, **Lower LSF data range – 10%**;

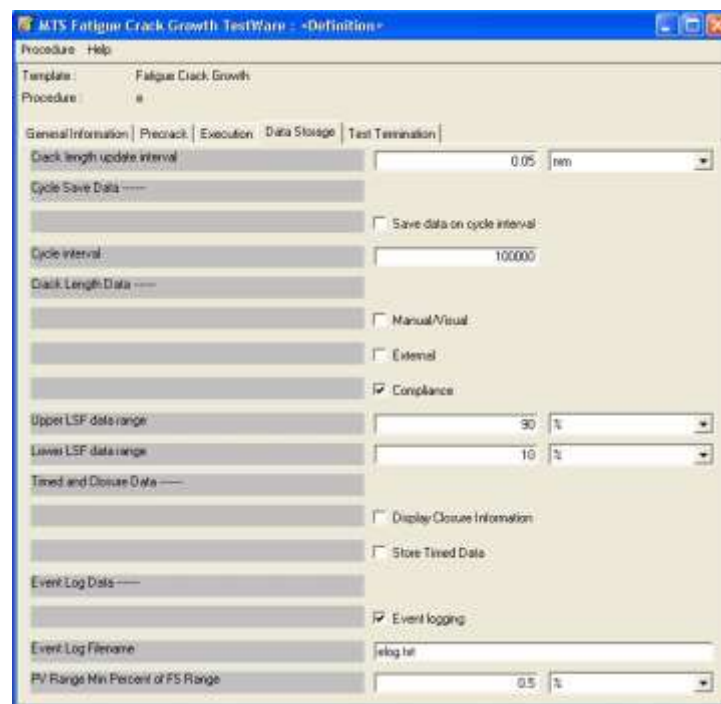


Figura 82 - Janela de Data Storage.

(xiv) Em **Test Termination**, selecionar **Crack Length Limited** e em **Final Crack Length** inserir um valor acima do tamanho de trinca crítico, nesse caso foi utilizado 45 mm;

(xv) No **Station Manager – Detectors**, habilitar os **Interlocks**. Obs: em **Axial Load**, inserir uma força um pouco maior que P_{max} para não ocorrer o travamento da MTS antes do momento apropriado;



Figura 83 - Definição dos Interlocks.

(xvi) Voltando para o **MTS Fatigue Crack Growth**, clicar em **Execute** e selecionar **Template**, **Procedure**, **Batch** e **Specimen** de acordo com o que foi criado;

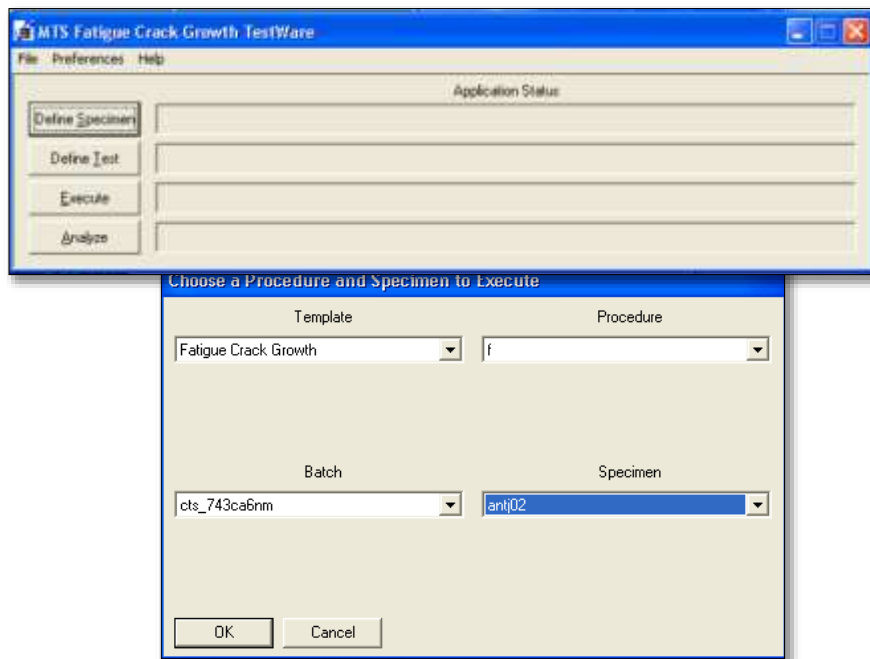


Figura 84 - . Janela inicial do Execute no MTS FCGT.

(xvii) Antes de iniciar o procedimento da pré-trinca por fadiga deve ser feita a checagem de leitura do tamanho da trinca. Isso deve ser feito em **Actions – Crack Length Check**;

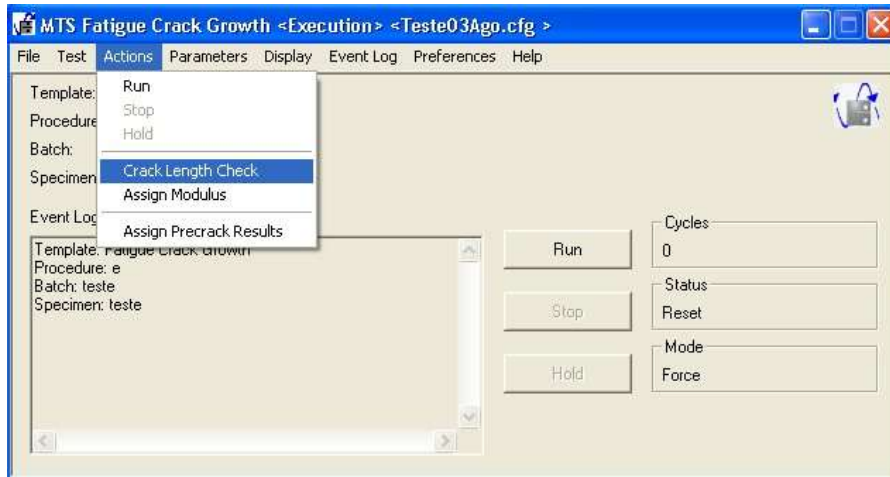


Figura 85 - Atalho para o Crack Length Check.

- Para medida do tamanho da trinca, que é feita por meio do *Compliance*, deve-se clicar em **Ramp** e esperar o resultado da leitura.

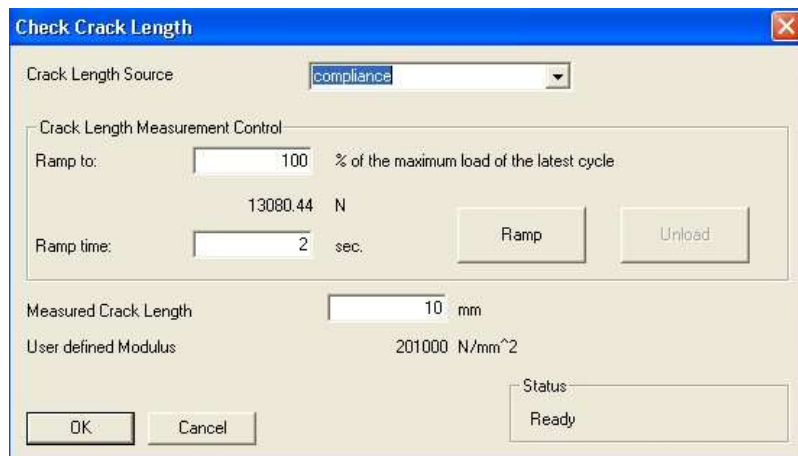


Figura 86 - Janela do Crack Length Check.

(xviii) Na maioria dos casos o tamanho lido durante o **Check Crack Length** não é aquele especificado pelo usuário durante a definição das dimensões do espécime. Nesses casos deve ser feita uma correção no módulo de elasticidade do espécime (e na rigidez do sistema como um todo) por meio do **Actions – Assign Modulus**;

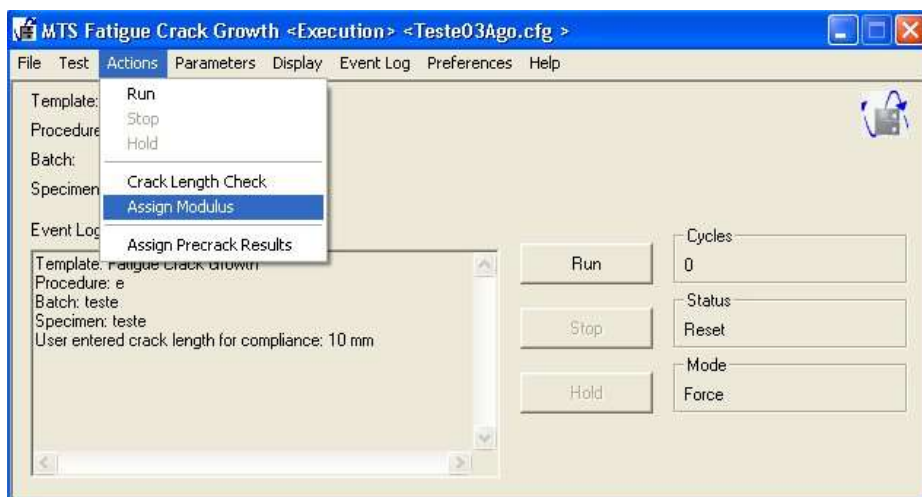


Figura 87 - Atalho para o Assign Modulus.

- A correção da rigidez do sistema é feita modificando o valor em **Enter Modulus** e clicando logo em seguida em **Ramp** para fazer a verificação. Esse procedimento deve ser repetido até o valor de **Crack length calculated from entered Modulus** ficar bem próximo do valor de **Enter Crack Length**;

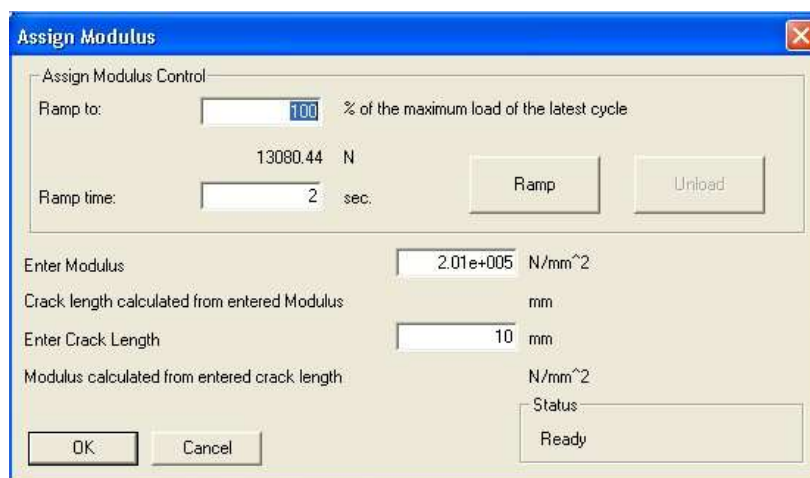


Figura 88 - Janela do Assign Modulus.

(xix) Com a verificação da leitura do tamanho de trinca realizada e corrigida, o procedimento para a criação da pré-trinca por fadiga está pronto para começar. Em **Display** estão disponíveis as opções para visualizar o gráfico de **Load vs COD** e para visualizar a tabela **Precrack Data Table**, que são importantes parâmetros para acompanhamento do ensaio. Para começar a pré-trinca por fadiga basta clicar em **Run**.

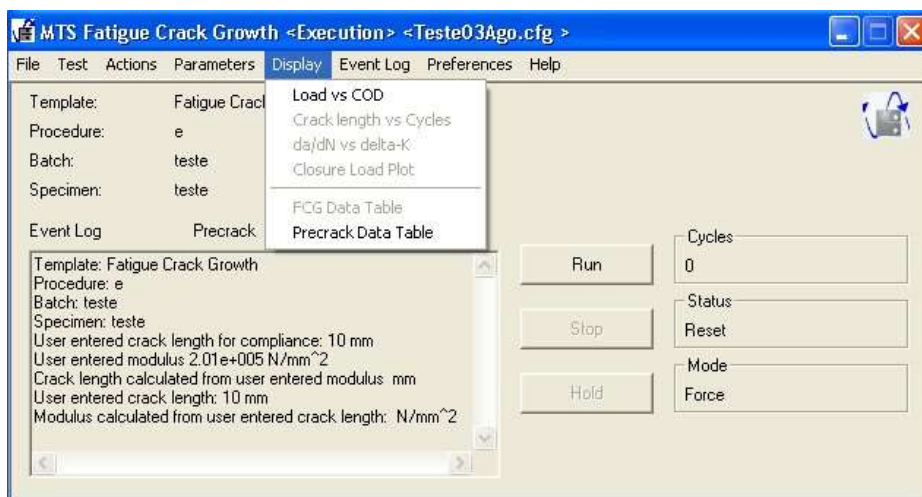


Figura 89 - Atalho para o Precrack Data Table para a pré-trinca.

(xx) Com a pré-trinca finalizada o ensaio de propagação de trinca está pronto para começar. Em *Display* pode-se visualizar os importantes parâmetros de acompanhamento do ensaio: *Load vs COD*, *Crack length vs Cycles*, *da/dN vs delta-k* e *FCG Data Table*. Para iniciar o ensaio basta clicar em *Run*.

DADOS COMPARATIVOS ENTRE O COD E O BFS PARA OS ENSAIOS REALIZADOS.

ENSAIO 1

• INSTANTE 1

| Primeiro ensaio – 24out - 15h40 | Valor da força | Tamanho da trinca | Dispersão (Desvio-Padrão) | Média da trinca pelo Back Face | Valor medido pelo COD | Diferença percentual |
|---------------------------------|----------------|-------------------|---------------------------|--------------------------------|-----------------------|----------------------|
| Força Máxima | 3.0722 N | 19.1323 mm | 0.0877 | 19.6757 mm | 20.2403 mm | 2.87% |
| Força Mínima | 1.0323 N | 20.2192 mm | 0.2541 | | | |

Tabela 8 - Valores aferidos por COD para um determinado instante do Ensaio 1 - 24out - 15h40

| Crack Length, Min/Max K, Load by Cycles : <antj01> | | | | | | | | | |
|--|-------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|------------------------|------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| File Edit Help | | | | | | | | | |
| Template: Fatigue Crack Growth Procedure: I | | | | | | | | | |
| Batch: cts_743ca6mm Specimen: anj01 | | | | | | | | | |
| Cycles | Crack Length (mm) | Maximum K (MPa·m ^{0.5}) | Minimum K (MPa·m ^{0.5}) | K Closure (MPa·m ^{0.5}) | Closure Load (MPa·m ^{0.5}) | Maximum Ch 1 Force (N) | Minimum Ch 1 Force (N) | Maximum Ch 1 Extensômetro (mm) | Minimum Ch 1 Extensômetro (mm) |
| 8185368 | 20.1536 | 8.14020 | 2.70462 | 3.55485 | 42.8182 | 3100.57 | 1030.18 | 0.335498 | 0.306138 |
| 8222601 | 20.1695 | 8.14018 | 2.66836 | 3.47637 | 41.8376 | 3097.95 | 1015.51 | 0.335489 | 0.305988 |
| 8272686 | 20.1843 | 8.13001 | 2.69704 | 3.11942 | 37.5122 | 3091.65 | 1025.62 | 0.335467 | 0.306054 |
| 8302313 | 20.1966 | 8.11235 | 2.66454 | 3.09511 | 37.2077 | 3082.92 | 1012.60 | 0.335519 | 0.306143 |
| 8344625 | 20.2066 | 8.09649 | 2.67617 | 3.55984 | 42.7578 | 3075.26 | 1016.48 | 0.335356 | 0.306033 |
| 8366447 | 20.2171 | 8.13852 | 2.70593 | 3.20572 | 38.4830 | 3088.74 | 1027.21 | 0.335648 | 0.306163 |
| 8404129 | 20.2272 | 8.08232 | 2.67696 | 3.26398 | 39.1613 | 3066.52 | 1015.67 | 0.335661 | 0.306138 |
| 8436372 | 20.2403 | 8.10443 | 2.68350 | 3.51463 | 42.1392 | 3072.77 | 1017.44 | 0.335443 | 0.306146 |

Figura 91 - Valores aferidos por COD para um determinado instante do Ensaio 1 - 24out - 15h40

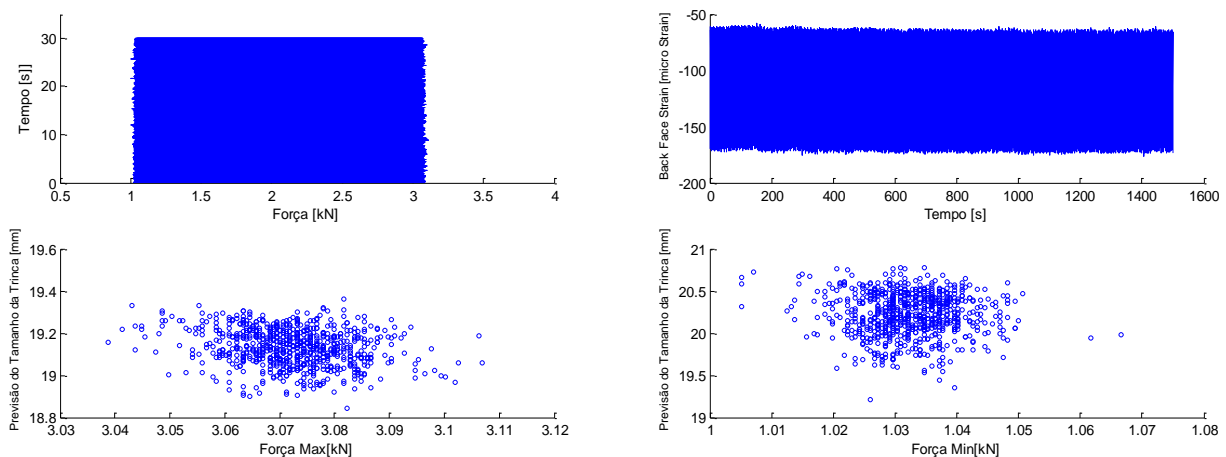


Figura 90 - Gráfico dos resultados em um determinado instante do ensaio 1 - 24out - 15h40.

• INSTANTE 2

| Primeiro ensaio – 26out – 16h30 | Valor da força | Tamanho da trinca | Dispersão (Desvio-Padrão) | Média da trinca pelo Back Face | Valor medido pelo COD | Diferença percentual |
|---------------------------------|----------------|-------------------|---------------------------|--------------------------------|-----------------------|----------------------|
| Força Máxima | 2.6766 N | 20.4149 mm | 0.0762 | 20.8933 mm | 21.3089 mm | 1.99% |
| Força Mínima | 0.8685 N | 21.3717 mm | 0.2067 | | | |

Tabela 9 - Valores aferidos por COD para um determinado instante do Ensaio 1 - 26out - 16h30.

| Cycles | Crack Length (mm) | Maximum K (MPa·m ^{0.5}) | Minimum K (MPa·m ^{0.5}) | K Closure (MPa·m ^{0.5}) | Closure Load (MPa·m ^{0.5}) | Maximum Ch 1 Force (N) | Minimum Ch 1 Force (N) | Maximum Ch 1 Extensometer (mm) | Minimum Ch 1 Extensometer (mm) |
|----------|-------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|------------------------|------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 12264712 | 21.1850 | 7.52060 | 2.48656 | 3.42057 | 38.9839 | 2710.44 | 896.162 | 0.332143 | 0.304450 |
| 12317059 | 21.1956 | 7.51487 | 2.47711 | 3.07078 | 34.9773 | 2706.82 | 892.242 | 0.332626 | 0.304936 |
| 12392223 | 21.2074 | 7.54049 | 2.51530 | 3.39325 | 38.6256 | 2714.31 | 905.420 | 0.332910 | 0.305105 |
| 12440416 | 21.2242 | 7.57084 | 2.53542 | 3.36924 | 38.3173 | 2722.75 | 911.690 | 0.332901 | 0.305221 |
| 12533753 | 21.2346 | 7.45196 | 2.49393 | 3.29043 | 37.3999 | 2678.48 | 896.402 | 0.332092 | 0.304837 |
| 12580972 | 21.2483 | 7.46466 | 2.47629 | 3.43421 | 39.0051 | 2681.05 | 899.397 | 0.332256 | 0.304663 |
| 12653325 | 21.2618 | 7.48950 | 2.46432 | 3.32308 | 37.7152 | 2688.00 | 894.449 | 0.332605 | 0.305022 |
| 12719709 | 21.2722 | 7.47110 | 2.46957 | 3.28219 | 37.2301 | 2679.88 | 894.400 | 0.332272 | 0.304746 |
| 12808363 | 21.2841 | 7.50105 | 2.50235 | 3.27073 | 37.0761 | 2688.88 | 897.012 | 0.332298 | 0.304778 |
| 12870793 | 21.2946 | 7.44937 | 2.48271 | 2.98002 | 33.7614 | 2668.83 | 899.462 | 0.332350 | 0.304767 |
| 12930192 | 21.3089 | 7.47173 | 2.47168 | 3.52066 | 39.8994 | 2674.76 | 884.823 | 0.332026 | 0.304602 |

Figura 92 - Valores aferidos por COD para um determinado instante do Ensaio 1 - 26out - 16h30.

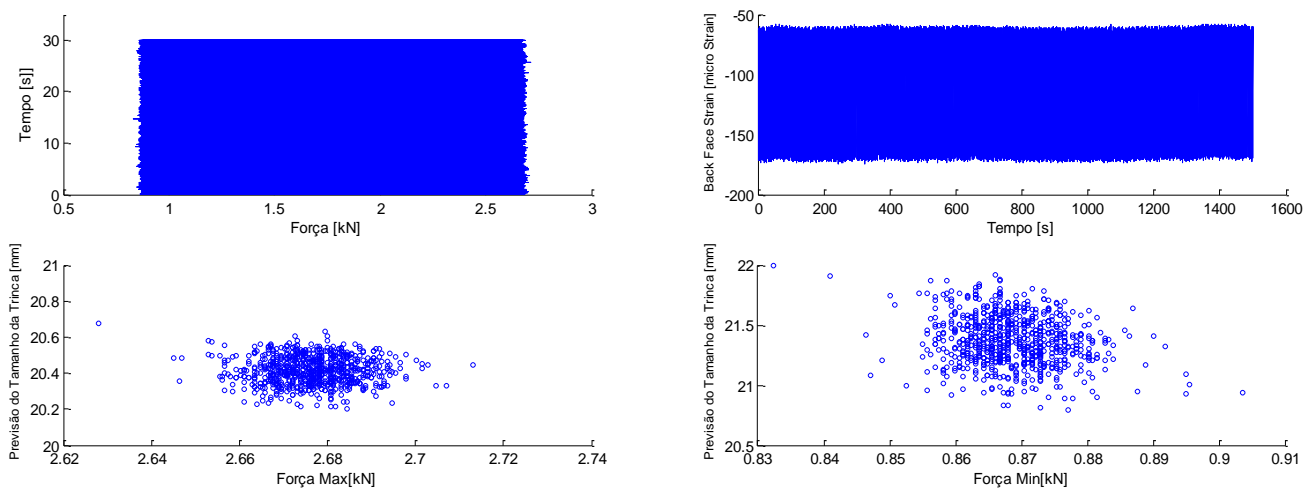


Figura 93 - Gráfico dos resultados em um determinado instante do ensaio 1 - 26out - 16h30.

- INSTANTE 3

| Primeiro ensaio – 24out – 16h30 | Valor da força | Tamanho da trinca | Dispersão (Desvio-Padrão) | Média da trinca pelo Back Face | Valor medido pelo COD | Diferença percentual |
|---------------------------------|----------------|-------------------|---------------------------|--------------------------------|-----------------------|----------------------|
| Força Máxima | 3.0963 N | 19.3840 mm | 0.0722 | 19.556 mm | 20.1695 mm | 3.14% |
| Força Mínima | 1.0085 N | 19.7280 mm | 0.2117 | | | |

Tabela 10 - Valores aferidos por COD para um determinado instante do Ensaio 1 - 24out - 16h30

| Cycles | Crack Length (mm) | Maximum K (MPa·m ^{0.5}) | Minimum K (MPa·m ^{0.5}) | K Closure (MPa·m ^{0.5}) | Closure Load (MPa·m ^{0.5}) | Maximum Ch 1 Force (N) | Minimum Ch 1 Force (N) | Maximum Ch 1 Extensometer (mm) | Minimum Ch 1 Extensometer (mm) |
|---------|-------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|------------------------|------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 8080884 | 20.1187 | 8.23306 | 2.70520 | 3.38984 | 40.9063 | 3141.75 | 1032.31 | 0.336076 | 0.306346 |
| 8128591 | 20.1289 | 8.28202 | 2.69566 | 3.37972 | 40.7621 | 3128.21 | 1028.11 | 0.336073 | 0.306406 |
| 8158633 | 20.1333 | 8.17133 | 2.69670 | 3.32468 | 40.0762 | 3114.79 | 1027.94 | 0.335760 | 0.306227 |
| 8186368 | 20.1536 | 8.14020 | 2.70462 | 3.45486 | 42.8182 | 3100.57 | 1030.18 | 0.335498 | 0.306138 |
| 8222601 | 20.1696 | 8.14018 | 2.66836 | 3.47637 | 41.8376 | 3087.96 | 1015.51 | 0.335489 | 0.305988 |

Figura 94 - Valores aferidos por COD para um determinado instante do Ensaio 1 - 24out - 16h30.

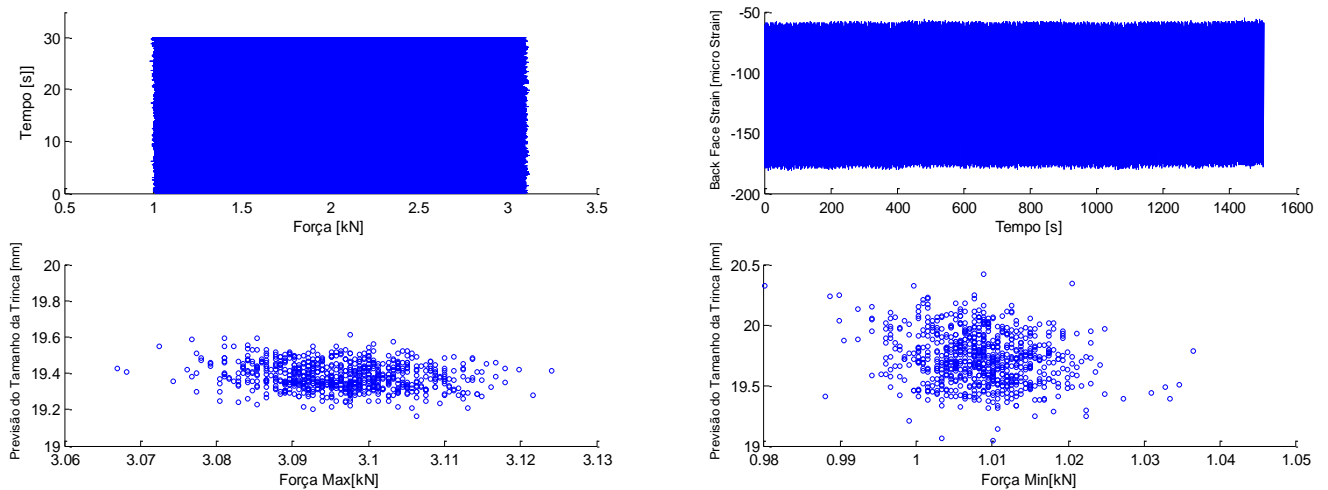


Figura 95 - Gráfico dos resultados em um determinado instante do ensaio 1 - 24out - 16h30.

ENSAIO 2

- INSTANTE 1

| Segundo ensaio – 10h50 | Valor da força | Tamanho da trinca | Dispersão (Desvio-Padrão) | Média da trinca pelo Back Face | Valor medido pelo COD | Diferença percentual |
|------------------------|----------------|-------------------|---------------------------|--------------------------------|-----------------------|----------------------|
| Força Máxima | 10.0024 N | 20.1311 mm | 0.0303 | 20.7143 mm | 19.7571 mm | 4.28% |
| Força Mínima | 3.3211 N | 21.2976 mm | 0.0842 | | | |

Tabela 11 - Valores aferidos por COD para um determinado instante do Ensaio 2 - 21nov - 10h50.

| Cycles | Crack Length (mm) | Maximum K (MPa·m ^{0.5}) | Minimum K (MPa·m ^{0.5}) | K Closure (MPa·m ^{0.5}) | Closure Load (MPa·m ^{0.5}) | Maximum Ch 1 Force (N) | Minimum Ch 1 Force (N) | Maximum Ch 1 Extensometro (mm) | Minimum Ch 1 Extensometro (mm) |
|--------|-------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|------------------------|------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 684413 | 19.7060 | 25.6003 | 8.48210 | 22.5667 | 278.318 | 9984.33 | 3008.09 | 0.370829 | 0.277383 |
| 684583 | 19.7189 | 25.6887 | 8.50140 | 8.88776 | 109.540 | 10012.0 | 3313.37 | 0.371781 | 0.277836 |
| 684588 | 19.7332 | 25.6849 | 8.51996 | 8.66043 | 106.658 | 10003.0 | 3318.11 | 0.371673 | 0.277932 |
| 685053 | 19.7464 | 25.6936 | 8.45760 | 12.1633 | 149.694 | 9999.42 | 3291.53 | 0.371909 | 0.277897 |
| 685607 | 19.7571 | 25.7193 | 8.47954 | 9.53849 | 117.324 | 10003.8 | 3298.21 | 0.372178 | 0.278620 |

Figura 96 - Valores aferidos por COD para um determinado instante do Ensaio 2 - 21nov - 10h50.

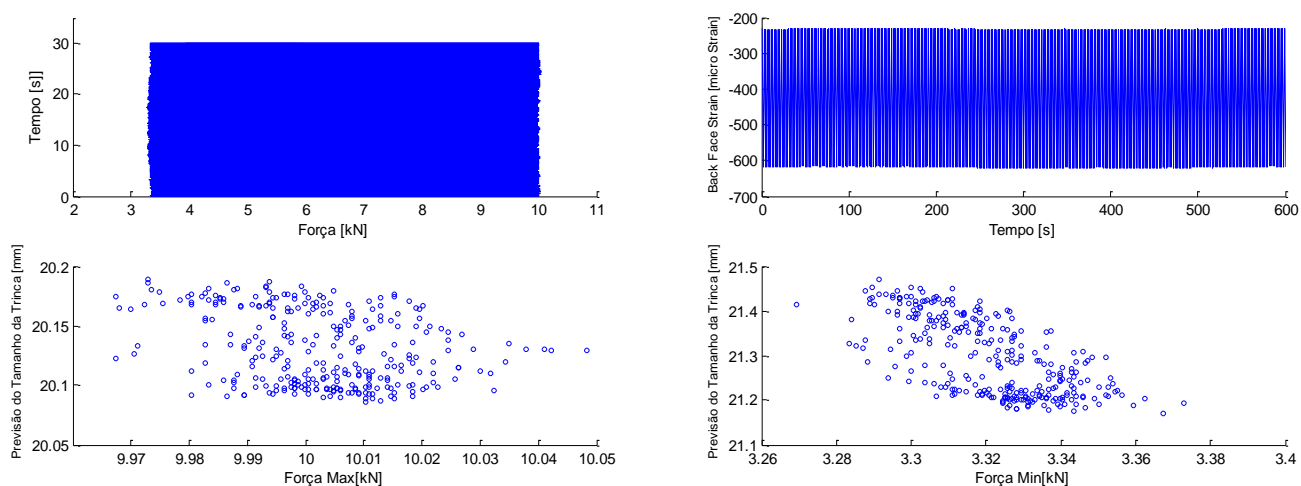


Figura 97 - Gráfico dos resultados em um determinado instante do ensaio 2 - 21nov - 10h50.

- INSTANTE 2

| Segundo ensaio – 11h20 | Valor da força | Tamanho da trinca | Dispersão (Desvio-Padrão) | Média da trinca pelo Back Face | Valor medido pelo COD | Diferença percentual |
|------------------------|----------------|-------------------|---------------------------|--------------------------------|-----------------------|----------------------|
| Força Máxima | 9.9887 N | 20.6324 mm | 0.0179 | 21.2101 mm | 20.2882 mm | 4.34% |
| Força Mínima | 3.3144 N | 21.7878 mm | 0.0685 | | | |

Tabela 12 - Valores aferidos por COD para um determinado instante do Ensaio 2 - 21nov - 11h20.

| Cycles | Crack Length (mm) | da/dN (mm/cycle) | Max Load (N) | Min Load (N) | Closure Load (N) | Max Stress Intensity (MPa·m ^{0.5}) | Delta K Applied (MPa·m ^{0.5}) | Delta K Effective (MPa·m ^{0.5}) |
|--------|-------------------|------------------|--------------|--------------|------------------|--|---|---|
| 703766 | 20.2488 | 2.76319e-005 | 9992.09 | 3307.69 | 4668.34 | 26.3661 | 17.6381 | 14.0477 |
| 703967 | 20.2518 | 2.76319e-005 | 9999.75 | 3292.04 | 3402.92 | 26.3305 | 17.7024 | 17.4098 |
| 704166 | 20.2585 | 2.76319e-005 | 9993.87 | 3288.88 | 3469.82 | 26.3843 | 17.7015 | 17.2236 |
| 704366 | 20.2584 | 2.76319e-005 | 10003.4 | 3287.78 | 3837.27 | 26.4095 | 17.7296 | 16.2789 |
| 704566 | 20.2796 | 2.95237e-005 | 10000.0 | 3295.57 | 3507.97 | 26.4259 | 17.7171 | 17.1598 |
| 704764 | 20.2717 | 2.95237e-005 | 9986.50 | 3308.94 | 3498.75 | 26.3833 | 17.6414 | 17.1374 |
| 704966 | 20.2828 | 2.95237e-005 | 9999.82 | 3304.25 | 3593.67 | 26.4341 | 17.6995 | 16.9344 |
| 705162 | 20.2830 | 2.95237e-005 | 9996.87 | 3319.29 | 3459.92 | 26.4246 | 17.6501 | 17.2783 |
| 705345 | 20.2924 | 2.95237e-005 | 10006.6 | 3297.32 | 3309.04 | 26.4656 | 17.7449 | 17.7139 |
| 705366 | 20.2917 | 2.95237e-005 | 9991.59 | 3300.74 | 3336.51 | 26.4249 | 17.6954 | 17.6008 |
| 705442 | 20.2882 | 3.13521e-005 | 10000.5 | 3302.66 | 3492.86 | 26.4436 | 17.7106 | 17.2077 |

Figura 98 - Valores aferidos por COD para um determinado instante do Ensaio 2 - 21nov - 11h20.

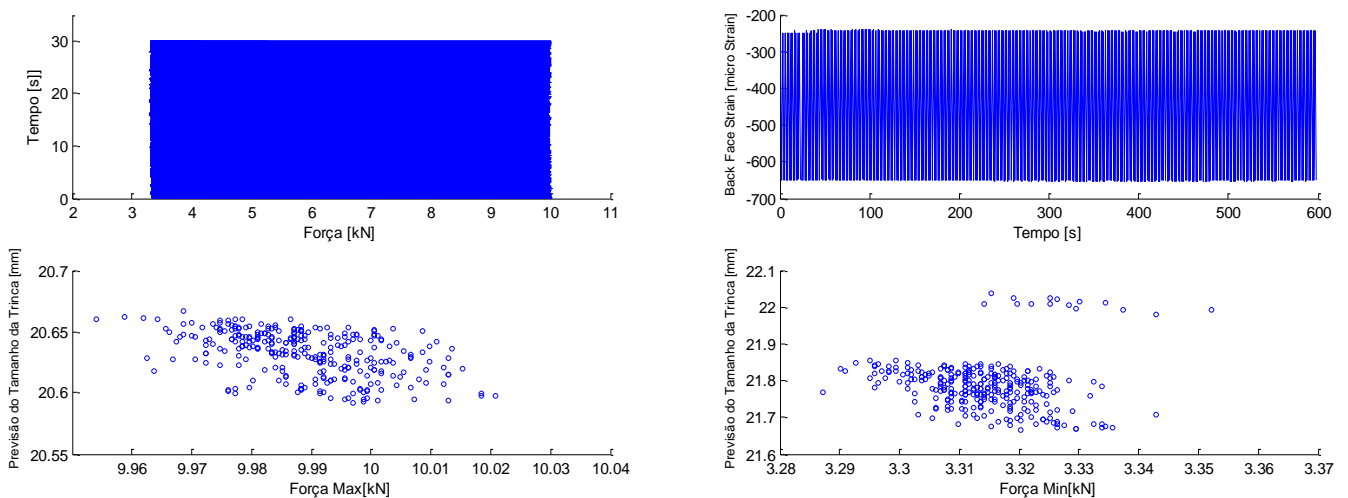


Figura 99 - Gráfico dos resultados em um determinado instante do ensaio 2 - 21nov - 11h20.

• INSTANTE 3

| Segundo ensaio – 11h50 | Valor da força | Tamanho da trinca | Dispersão (Desvio-Padrão) | Média da trinca pelo Back Face | Valor medido pelo COD | Diferença percentual |
|------------------------|----------------|-------------------|---------------------------|--------------------------------|-----------------------|----------------------|
| Força Máxima | 9.9795 N | 21.1726 mm | 0.0471 | 21.7796 mm | 20.8324 mm | 4.34% |
| Força Mínima | 3.3070 N | 22.3866 mm | 0.0513 | | | |

Tabela 13 - Valores aferidos por COD para um determinado instante do Ensaio 2 - 21nov - 11h50.

| Cycles | Crack Length (mm) | da/dN (mm/cycle) | Max Load (N) | Min Load (N) | Closure Load (N) | Max Stress Intensity (MPa·m ^{0.5}) | Delta K Applied (MPa·m ^{0.5}) | Delta K Effective (MPa·m ^{0.5}) |
|--------|-------------------|------------------|--------------|--------------|------------------|--|---|---|
| 721967 | 20.7842 | 2.92509e-005 | 10003.7 | 3311.04 | 3437.59 | 27.1627 | 18.1723 | 17.8287 |
| 722164 | 20.7808 | 2.92509e-005 | 10002.6 | 3310.46 | 3419.76 | 27.1549 | 18.1677 | 17.8710 |
| 722364 | 20.7869 | 2.92509e-005 | 9992.02 | 3308.82 | 3358.47 | 27.1349 | 18.1493 | 18.0144 |
| 722566 | 20.7972 | 2.92509e-005 | 10003.9 | 3296.21 | 3352.84 | 27.1823 | 18.2260 | 18.0721 |
| 722765 | 20.8089 | 2.86291e-005 | 10004.4 | 3304.29 | 3831.88 | 27.2006 | 18.2167 | 16.7822 |
| 722965 | 20.8050 | 2.86291e-005 | 10006.7 | 3298.50 | 3331.58 | 27.2015 | 18.2351 | 18.1452 |
| 723166 | 20.8064 | 2.86291e-005 | 9989.00 | 3299.88 | 3823.61 | 27.1553 | 18.1845 | 16.7607 |
| 723366 | 20.8182 | 2.86291e-005 | 10003.8 | 3308.09 | 8095.40 | 27.2126 | 18.2138 | 5.19116 |
| 723404 | 20.8139 | 2.86291e-005 | 10005.9 | 3301.53 | 3365.73 | 27.2122 | 18.2333 | 18.0587 |
| 723567 | 20.8312 | 2.86291e-005 | 9990.57 | 3287.61 | 3401.71 | 27.1957 | 18.2464 | 17.9358 |
| 723766 | 20.8324 | 2.86291e-005 | 10001.9 | 3305.99 | 3311.43 | 27.2285 | 18.2285 | 18.2137 |

Figura 100 - Valores aferidos por COD para um determinado instante do Ensaio 2 - 21nov - 11h50

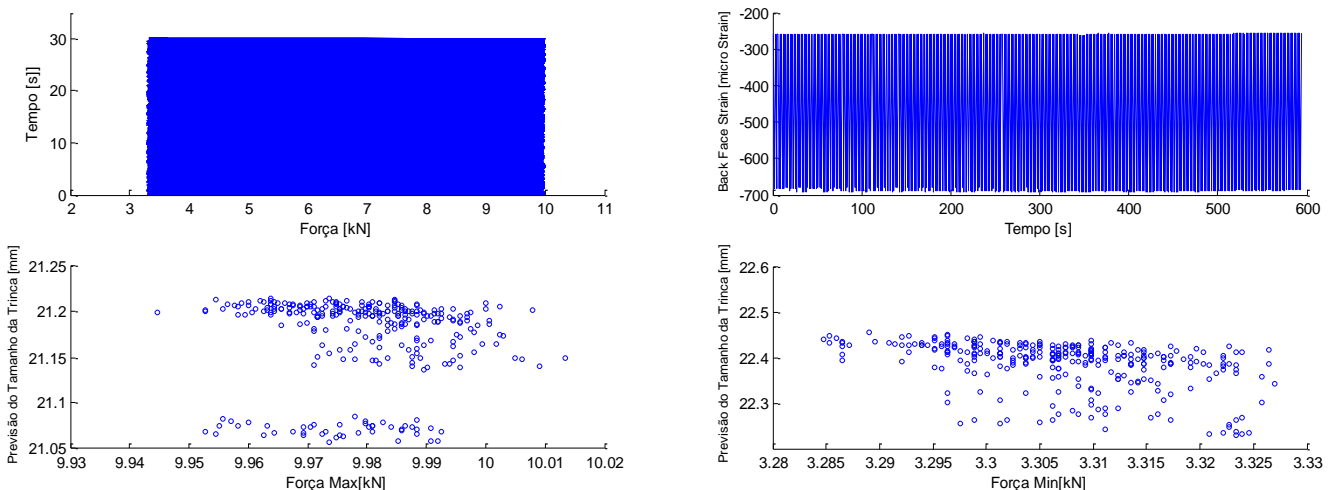


Figura 101 - Gráfico dos resultados em um determinado instante do ensaio 2 – 21nov – 11h50.

ROTINA UTILIZADA (Matlab 2013)

```

• clc
• clear
• close all
•
• DIR = strcat('C:\Users\Antonio Julien\Desktop\CT\');
• NOME_ARQ = '10h50';
•
• %for ler = INICIO:FINAL
•
•     %num = ler;
•     %NUM_S =int2str(num);
•     NOME = strcat(DIR,NOME_ARQ, '.LTD');
•
•     [SAMPLING, pos, nr, hdst, t_sampling] = lynxgeng(NOME);
•
•     %[SAMPLING, pos, nr, hdst, t_sampling] = lynxgeng(NOME,
2,1,2^19);
•
•
• %end
•
• E = 195e9; Módulo de Elasticidade
• W = 50e-3; Distancia útil de propagação
• B = 12.5E-3; Espessura do Corpo de Prova
•
• A = [1.0033 -2.35 1.3694 -15.294 63.182 -74.42];
• C = [1.001 -4.6695 18.460 -236.82 1214.9 -2143.619];
•
• K = E*W*B;
• Kc = E*B;
•
• FACE_FRONT_1 = SAMPLING(:,1);
• BACK_FACE = SAMPLING(:,2);
• FACE_FRONT_4 = SAMPLING(:,3);
•
• FORCE = SAMPLING(:,6);
• COD = SAMPLING(:,7);
•
• tam = length(FORCE);
•
• l = 1;
• m = 1;
•
• k = 1;

```

```

•
• for i = 3:tam-1
•   if FORCE(i) > FORCE(i-1)
•     if FORCE(i) > FORCE(i+1)
•       POS(k) = i;
•       POS_1(k) = i;
•       F(k) = FORCE(i);
•       Cod(k) = COD(i);
•       BF(k) = BACK_FACE(i);
•       %A(k) = (K/(1000*F(k))) * (abs(BF(k)) * 1E-6);
•       U1(k) = 1 / (1 + ((K / (1000 * F(k))) * (abs(BF(k)) * 1E-6)) ^ 0.5);
•       Abf(k) = A(1) + A(2) * U1(k) + A(3) * U1(k) ^ 2 + A(4) * U1(k) ^ 3 +
A(5) * U1(k) ^ 4 + A(6) * U1(k) ^ 5;
•       abf(k) = Abf(k) * W * 1000;
•       abf_1(1) = abf(k);
•       F_1(1) = F(k);
•       BF_1(1) = BF(k);
•
•
•
•       Ux1(k) = 1 / (1 + (Kc * (Cod(k) / 1000) / (1000 * F(k))) ^ 0.5);
•       Acd(k) = C(1) + C(2) * Ux1(k) + C(3) * Ux1(k) ^ 2 + C(4) * Ux1(k) ^ 3 +
C(5) * Ux1(k) ^ 4 + C(6) * Ux1(k) ^ 5;
•       acd(k) = Acd(k) * W * 1000;
•       acd_1(k) = acd(k);
•       k = k + 1;
•       l = l + 1;
•       end
•     end
•
•   if FORCE(i) < FORCE(i-1)
•     if FORCE(i) < FORCE(i+1)
•       POS(k) = i;
•       POS_2(k) = i;
•       F(k) = FORCE(i);
•       Cod(k) = COD(i);
•       BF(k) = BACK_FACE(i);
•       U2(k) = 1 / (1 + ((K / (1000 * F(k))) * (abs(BF(k)) * 1E-6)) ^ 0.5);
•       Abf(k) = A(1) + A(2) * U2(k) + A(3) * U2(k) ^ 2 + A(4) * U2(k) ^ 3 +
A(5) * U2(k) ^ 4 + A(6) * U2(k) ^ 5;
•       abf(k) = Abf(k) * W * 1000;
•       abf_2(m) = abf(k);
•       F_2(m) = F(k);
•       BF_2(m) = BF(k);
•
•
•       Ux2(k) = 1 / (1 + (Kc * (Cod(k) / 1000) / (1000 * F(k))) ^ 0.5);
•       Acd(k) = C(1) + C(2) * Ux2(k) + C(3) * Ux2(k) ^ 2 + C(4) * Ux2(k) ^ 3 +
C(5) * Ux2(k) ^ 4 + C(6) * Ux2(k) ^ 5;
•       acd(k) = Acd(k) * W * 1000;
•

```

```

•         k = k+1;
•         m = m+1;
•         end
•     end
•
•
•
•     end
•
•
•     %plot(F,abf,F,acd)
•
•
•     H = figure;
•     hold on
•     plot(FORCE,t_sampling);
•     xlabel('Tempo [s]')
•     ylabel('Força [kN]')
•     hold off
•
•
•     H = figure;
•     hold on
•     plot(BF);
•     xlabel('Tempo [s]')
•     ylabel('Back Face Strain [micro Strain]')
•     hold off
•
•
•     H = figure;
•     hold on
•     plot(F_1,abf_1,'bo',...
•         'MarkerSize',7)
•     xlabel('Força [kN]')
•     ylabel('Previsão do Tamanho da Trinca [mm]')
•     hold off
•
•
•     H = figure;
•     hold on
•     plot(F_2,abf_2,'bo',...
•         'MarkerSize',7)
•     xlabel('Força [kN]')
•     ylabel('Previsão do Tamanho da Trinca [mm]')
•     hold off
•
•
•
•
•     mean(F_1)
•     mean(abf_1)
•     std(abf_1)
•
•
•     mean(F_2)
•     mean(abf_2)

```

- `std(abf_2)`
-
- `figure(5)`
- `subplot(2,2,1)`
- `hold on`
- `plot(FORCE,t_sampling);`
- `%axis([2 11 0 35])`
- `xlabel('Tempo [s]')`
- `ylabel('Força [kN]')`
- `subplot(2,2,2)`
- `hold on`
- `plot(BF);`
- `xlabel('Tempo [s]')`
- `ylabel('Back Face Strain [micro Strain]')`
- `subplot(2,2,3)`
- `hold on`
- `plot(F_1,abf_1,'bo',...`
- `'MarkerSize',7)`
- `xlabel('Força [kN]')`
- `ylabel('Previsão do Tamanho da Trinca [mm]')`
- `subplot(2,2,4)`
- `hold on`
- `plot(F_2,abf_2,'bo',...`
- `'MarkerSize',7)`
- `xlabel('Força [kN]')`
- `ylabel('Previsão do Tamanho da Trinca [mm]')`
-
- `dados=0;`
- `figure(6)`
- `dados(1:9,1)=[18.4790,18.5048,19.7571,20.2403,20.1695,20.2882,20.8324`
- `,21.3089,29.4518];`
- `dados(1:9,2)=[18.1322,17.6174,20.7143,19.6757,19.5560,21.2101,21.7796`
- `,20.8933,30.5518];`
- `plot(dados(:,1),dados(:,2))`
- `plot(dados(:,1),'r')`
- `hold on`
- `plot(dados(:,2),'bo')`
- `axis([0 10 15 35]);`
- `title('Comparação entre os Resultados Obtidos por COD e BFS para o`
- `Tamanho da Trinca em um Determinado Instante');`
- `xlabel('Instante Observado')`
- `ylabel('Tamanho da Trinca [mm]')`
- `legend('Medido através da abertura da boca da Trinca (COD)', 'Medido`
- `através da deformação da face traseira (MDFT)');`
-
- `figure(7)`
- `subplot(2,2,1)`
- `hold on`
- `plot(dados(:,1),'r');`

- `axis([0 10 15 35]);`
- `xlabel('Instante Observado')`
- `ylabel('Tamanho da Trinca medido pelo COD [mm]')`
- `subplot(2,2,2)`
- `hold on`
- `plot(dados(:,2), 'o');`
- `xlabel('Instante Observado')`
- `ylabel('Tamanho da Trinca medido pelo BFS [mm]')`
- `subplot(2,2,3.5)`
- `plot(dados(:,1), dados(:,2))`
- `plot(dados(:,1), '+r')`
- `hold on`
- `plot(dados(:,2), 'ob')`
- `xlabel('Instante Observado')`
- `ylabel('Tamanho da Trinca [mm]')`
- `legend('Medido através da abertura da boca da Trinca (COD)', 'Medido através da deformação da face traseira (MDFT)');`
- `title('Comparação entre os Resultados Obtidos por COD e BFS para o Tamanho da Trinca em um Determinado Instante');`
-
- `mean(dados(:,1))`
- `mean(dados(:,2))`