

PROJETO DE GRADUAÇÃO

**ESTUDO DE IDENTIFICAÇÃO DE FECHAMENTO
DE TRINCA EM CORPOS DE PROVA DO TIPO CT(S)
UTILIZANDO TÉCNICA DE DEFORMAÇÃO DA FACE
TRASEIRA.**

Por,

Tácito Carneiro Picanço

Wallace Alves Emiliano

Brasília, 20 de outubro de 2015

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica

PROJETO DE GRADUAÇÃO
ESTUDO DE IDENTIFICAÇÃO DE FECHAMENTO
DE TRINCA EM CORPOS DE PROVA DO TIPO CT(S)
UTILIZANDO TÉCNICA DE DEFORMAÇÃO DA FACE
TRASEIRA.

POR,

Tácito Carneiro Picanço

Wallace Alves Emiliano

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

Banca Examinadora

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

Prof. Fábio Comes de Castro, UnB/ ENM

Prof. José Alexander Araújo, UnB/ ENM

Brasília, 20 de outubro de 2015

RESUMO

O presente trabalho abordará um estudo experimental sobre a identificação do fenômeno de fechamento de trinca em corpos de prova do tipo CT fabricados em aço ASTM A743 CA6NM, implementando a técnica de deformação da face traseira, técnica. Técnica essa, 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 medição da força quando o comprimento da trinca é conhecido. A validação ocorrerá através da comparação entre o MDFT e o método de deslocamento da abertura da trinca (COD).

Palavras Chave: *fechamento de trinca, deformação da face traseira, extensometria .*

ABSTRACT

This paper will discuss an experimental study on the identification of crack closure phenomenon in CT type specimens made in steel ASTM A743 CA6NM by implementing deformation technique the back face technique. This technique, known as back face strain analyzes the strain on the opposite side to the mouth of the specimen via strain gauges, and serves to provide a crack measuring method when the force is known or force measurement when the crack length is known. Validation occurs by comparing the MDTF displacement method and the opening of the crack (COD).

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

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	ASPECTOS GERAIS.....	16
1.2	MOTIVAÇÃO.....	17
1.3	OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS.....	17
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	18
2	MECÂNICA DA FRATURA.....	19
2.1	ASPECTOS HISTÓRICOS DA MECÂNICA DA FRATURA.....	19
2.2	O PROCESSO DE FADIGA.....	20
2.3	CONCENTRADORES DE TENSÃO.....	21
2.4	MODOS DE ABERTURA DE TRINCA.....	23
2.5	FATOR DE INTENSIDADE DE TENSÃO.....	23
2.6	TENACIDADE À FRATURA.....	25
2.7	PROPAGAÇÃO DE TRINCAS POR FADIGA.....	26
2.7.1	<i>DIAGRAMA DE CRESCIMENTO DE TRINCA POR FADIGA.....</i>	<i>27</i>
2.7.2	<i>INFLUÊNCIA DA RAZÃO DE CARREGAMENTO SOBRE A CURVA DA/DN VERSUS ΔK.....</i>	<i>29</i>
2.8	MÉTODO CTOD (CRACK TIP OPENING DISPLACEMENT).....	31
2.9	MÉTODO CMOD (CRACK MOUTH OPENING DISPLACEMENT).....	32
2.10	EXTENSOMETRIA.....	36
2.10.1	<i>EXTENSÔMETRO.....</i>	<i>37</i>
2.10.2	<i>FUNCIONAMENTO DO EXTENSÔMETRO.....</i>	<i>39</i>
2.11	MÉTODO DE DEFORMAÇÃO DA FACE TRASEIRA (<i>BACK FACE STRAIN</i>).....	41
2.11.1	<i>O MÉTODO.....</i>	<i>41</i>
2.11.2	<i>EVOLUÇÃO HISTÓRICA.....</i>	<i>41</i>
2.11.3	<i>NORMAS.....</i>	<i>42</i>
2.11.4	<i>VANTAGENS DO MÉTODO.....</i>	<i>43</i>
2.11.5	<i>MODELOS PROPOSTOS PELA LITERATURA E DADOS DE COMPLIANCE.....</i>	<i>44</i>
3	METODOLOGIA DOS ENSAIOS DE PROPAGAÇÃO DE TRINCAS.....	51
3.1	METODOLOGIA.....	51

3.2	INFORMAÇÕES GERAIS SOBRE A NORMA E647.....	51
3.2.1	CORPO DE PROVA.....	52
3.2.2	ENTALHE E PRÉ-TRINCA.....	53
3.3	APARATOS EXPERIMENTAIS.....	54
3.3.1	VARIÁVEIS DO ENSAIO.....	55
3.3.2	CRITÉRIOS DE VALIDAÇÃO.....	56
3.3.3	TÉCNICAS DE REDUÇÃO DE DADOS.....	57
3.3.4	ANÁLISE DOS DADOS OBSERVADOS.....	58
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	58
4.5	MARCAÇÃO NO CORPO DE PROVA.....	65
4.6	MTS (MATERIAL TESTING SYSTEM).....	65
5	METODOLOGIA DE MONITORAÇÃO.....	82
5.1	INTRODUÇÃO.....	82
5.2	CONFIGURAÇÃO DO ENSAIO DE PROPAGAÇÃO DE TRINCAS.....	82
5.3	MONITORAMENTO DOS DADOS GERADOS.....	82
6	TRATAMENTO DOS DADOS.....	89
6.1	COVERSÃO DOS DADOS .LTD PARA .MAT.....	89
6.2	PROGRAMAS E FUNÇÕES UTILIZADAS.....	89
7	RESULTADOS.....	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
7.1	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
7.1.1	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
7.2	CONCLUSÃO.....	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
7.3	RECOMENDAÇÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	97
	APÊNDICE A.....	100
	PROCEDIMENTO PARA COLAGEM E CALIBRAÇÃO DOS EXTENSÔMETROS.....	100
	COLAGEM DOS EXTENSÔMETROS.....	100
	CALIBRAÇÃO DOS EXTENSÔMETROS.....	103
	APÊNDICE B.....	107
	PROCEDIMENTO PARA O ENSAIO DE PROPAGAÇÃO DE TRINCAS POR FADIGA.....	107
	ANEXO 2.....	108

PROGRAMAS E FUNÇÕES EM MATLAB	108
PROGRAMA BACK	108

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1- FASES DO PROCESSO DE FADIGA	21
FIGURA 2- FURO ELÍPTICO EM PLACA SOB TENSÃO REMOTA UNIFORME. (B) DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO AO LONGO DO EIXO X NAS PROXIMIDADES DE FURO. FONTE: (PEREIRA, 2014)	22
FIGURA 3- DIFERENTES MODOS DE ABERTURA EM UMA TRINCA. FONTE: (PEREIRA,2014)	23
FIGURA 4 - COORDENADAS NA PONTA DA TRINCA. FONTE:(PEREIRA, 2014)	24
FIGURA 5 - DISTRIBUIÇÃO ELÁSTICA NA REGIÃO DA TRINCA. FONTE: (MANDAI, 2010)	25
FIGURA 6 - CRESCIMENTO DE TRINCAS POR FADIGA. FONTE: (MANDAI, 2010)	26
FIGURA 7 - CURVA DA/DN ESQUEMÁTICA. FONTE: (MANDAI, 2010)	28
FIGURA 8-CURVA DO TAMANHO DA TRINCA, A EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE CICLOS, N. RUCKERT ET A	30
FIGURA 9 - DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS CORRELATOS PARA O CÁLCULO DE CTOD. FONTE: (FORTES, 2011)	32
FIGURA 10 - CORPO DE ENSAIO DO TIPO C(T) COM O CLIP GAGE FIXADO NA BOCA DO ENTALHE	33
FIGURA 11 - FONTE(RUCHERT 2010)	34
FIGURA 12 - COMPORTAMENTO MECÂNICO DA PONTA DA TRINCA FONTE:(RUCHERT,2010)	35
FIGURA 13 - COMPOSIÇÃO DE UM EXTENSÔMETRO. (KYOWA, 2004)	37
FIGURA 14 - PONTE DE WHEATSTONE. (KYOWA, 2004)	38
FIGURA 15- EXTENSÔMETRO CONECTADO A UMA PONTE DE WHEATSTONE. (KYOWA, 2004)	38
FIGURA 16 - ARRANJOS DE PONTE DE WHEATSTONE COM 2 EXTENSÔMETROS. (KYOWA, 2004)	39
FIGURA 17 - EXTENSÔMETRO DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA. (CAMPOS E VILELA, 2011)	39
FIGURA 18 - PRINCIPAIS TIPOS DE EXTENSÔMETRO. (CAMPOS E VILELA, 2011)	40
FIGURA 19 - CORPO DE PROVA DO TIPO CT COM CMOD E BFS. (FONTE: (NEWMAN, YAMADA E JAMES, 2011)	42
FIGURA 20 - VARIAÇÃO DE BFS POR UNIDADE DE CARGA POR A/W PARA UM CORPO DE PROVA DE 25MM. (DEANS E RICHARDS, 1979)	45
FIGURA 21 - COMPLIANCE DO BFS ANALÍTICO PELA RAZÃO A/W. (MAXWELL, 1987)	46
FIGURA 22 - ANÁLISE DA MALHA DE ELEMENTOS FINITOS PARA O CORPO DE PROVA C(T) COM A/W=0.5 (RIDDELL E PIASCIK, 1998)	47
FIGURA 23 - PARÂMETRO DE DEFORMAÇÃO TRASEIRA(A*) VERSUS A/W. (RIDDELL E PIASCIK, 1998)	48
FIGURA 24 - COMPARAÇÃO DE RESULTADOS DO PARÂMETRO A* PARA DEANS, SHAW E RIDDELL. (RIDDELL E PIASCIK, 1998)	48
FIGURA 25 - RESULTADOS DE BFS NORMALIZADOS DA LITERATURA PARA CORPOS DE PROVA DO TIPO C(T). (NEWMAN, YAMADA E JAMES, 2011)	49
FIGURA 26 - BFS NORMALIZADO VERSUS RAZÃO DE COMPRIMENTO PARA C(T). (NEWMAN, YAMADA E JAMES, 2011)	50
FIGURA 27 - PERCENTUAL DE DIFERENÇA NA DETERMINAÇÃO DO TAMANHO DA TRINCA A PARTIR DA EQUAÇÃO DE NEWMAN-JOHNSTON. (NEWMAN, YAMADA E JAMES, 2011)	50
FIGURA 28 - CORPO DE PROVA COMPACTO DE TRAÇÃO – C(T) – PARA ENSAIOS DE TAXA DE PROPAGAÇÃO DE TRINCA. FONTE: (ASTM E647, 2011)	52
FIGURA 29 - DETALHES DE ENTALHE E PRÉ-TRINCA PARA DIVERSAS CONFIGURAÇÕES DE ENTALHE EM C(T). FONTE: (ASTM E647, 2011)	54
FIGURA 30 - MANILHA E PINOS PARA A CONFIGURAÇÃO DE ENSAIO COM C(T). FONTE: (ASTM E647, 2011)	55

FIGURA 31- LIMITES PARA VALIDAÇÃO DO ENSAIO. FONTE: (ASTM E647, 2011)	57
FIGURA 32 - CORPO DE PROVA UTILIZADO NOS ENSAIOS. TIPO C(T). FONTE: (RIDDELL E PIASCIK, 1998)	59
FIGURA 33 - DIMENSÕES CARACTERÍSTICAS PARA O CORPO DE PROVA DO TIPO C(T). FONTE: (ASTM E647, 2011)	59
FIGURA 34 - DIMENSÕES DO CORPO DE PROVA UTILIZADO NOS ENSAIOS. COTAS EM MM.	60
FIGURA 35- REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO MÉTODO DE LIXAMENTO COM TRABALHO EM SENTIDOS ALTERNADOS. FONTE: (ROHDE, 2010)	61
FIGURA 36- DIFERENTES NUMERAÇÕES DE LIXA.	62
FIGURA 37- A) EQUIPAMENTO PARA O PROCESSO DE LIXAMENTO. B) CORPO DE PROVA SENDO LIXADO.....	63
FIGURA 38-- PROCESSO DE POLIMENTO DO CORPO DE PROVA	64
FIGURA 39 - A) CORPO DE PROVA POLIDO. B) CORPO DE PROVA NÃO-POLIDO.	64
FIGURA 40- A) RISCADOR PADRÃO PARA MARCAÇÃO NO CORPO DE PROVA. B) CORPO DE PROVA MARCADO.....	65
FIGURA 41-MTS (MATERIAL TESTING SYSTEM).....	66
FIGURA 42- ALINHAMENTO DO CONJUNTO (GARRA, CORPO DE PROVA E PINOS). FONTE: (MANDAI, 2010)	68
FIGURA 43- REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO ENCAIXE DO CLIP GAUGE NO CORPO DE PROVA. FONTE: (MANDAI, 2010).....	68
FIGURA 44- MODELO DE EXTENSÔMETRO UTILIZADO NOS ENSAIOS. FONTE: (KIOWA)	70
FIGURA 45- EXTENSÔMETRO UNIDIRECIONAL (STRAIN GAGE).....	71
FIGURA 46- MULTÍMETRO DIGITAL PARA REALIZAÇÃO DE TESTE DA RESISTÊNCIA ELÉTRICA DO EXTENSÔMETRO.	71
FIGURA 47-AQUISIÇÃO DE DADOS DE UM PROCESSO BIOFÍSICO. FONTE:(LYNX).	72
FIGURA 48-UTILIZAÇÃO DE MICROCOMPUTADOR	72
FIGURA 49 PROBLEMA DE INTERFERÊNCIA NO CLIPGAGE	73
FIGURA 50-CONFIGURAÇÃO DAS ENTRADAS ANALÓGICAS	74
FIGURA 51-TELA DE AFERIÇÃO DOS CANAIS. FONTE:(LYNX).....	76
FIGURA 52- PASTA DE INFORMAÇÕES DO ENSAIO	78
FIGURA 53 – VIZUALIZAÇÃO DOS CANAIS.....	79
FIGURA 54 – MONITORAÇÃO DA AQUISIÇÃO	80
FIGURA 55 - PASTA DE INFORMAÇÕES	81
FIGURA 56 - TAMANHO DE TRINCA NORMALIZADO COMO FUNÇÃO DO COMPLIANCE DO PLANO DE TRABALHO ELÁSTICO PARA CORPOS DE PROVA DO TIPO C(T). (ASTM E647, 2011).....	83
FIGURA 57 GRÁFICO GERADO PELO PROGRAMA BACK, FORÇA X TEMPO	93
FIGURA 58 - GRÁFICO GERADO PELO PROGRAMA BACK, DOFORMAÇÃO X FORÇA	94
FIGURA 59- MATERIAIS UTILIZADOS PARA COLAGEM DOS EXTENSÔMETROS NO CP.	100
FIGURA 60 - LIMPEZA DA SUPERFÍCIE, PREVIA À COLAGEM DO EXTENSÔMETRO. (KYOWA, 2004)	101
FIGURA 61 - POSICIONAMENTO DO EXTENSÔMETRO NA AMOSTRA. (KYOWA, 2004)	101
FIGURA 62 - COLOCAÇÃO DE COLA (SUPER BONDER®) NO EXTENSÔMETRO. (KYOWA, 2004)	102
FIGURA 63 - COLAGEM DO EXTENSÔMETRO NA AMOSTRA. (KYOWA, 2004)	102
FIGURA 64- CORPO DE PROVA PRONTO	103
FIGURA 65 - INDICAÇÃO DAS RESISTÊNCIAS PARA SHUNT NA PLACA 1 DO ADS.....	103
FIGURA 66 - VALORES E FÓRMULA PARA O CÁLCULO DO SHUNTCAL	104
FIGURA 67 - ABA AVANÇADO DA CONFIGURAÇÃO DO AQDADOS.....	104

FIGURA 68 - CONFIGURAÇÃO DAS ENTRADAS ANALÓGICAS NO AQDADOS.	104
FIGURA 69 - TELA DE CALIBRAÇÃO DOS EXTENSÔMETROS.....	105
FIGURA 70 - CONFIGURAÇÃO DOS EXTENSÔMETROS DE 120Ω NO ADS 2000. (FONTE: LYNX)	106
FIGURA 71 - RELATÓRIO DE CALIBRAÇÃO COM SHUNT CAL.	107
FIGURA 72 - DIMENSÕES DO CTS DE PROPAGAÇÃO DE TRINCAS.	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 ASPECTOS GERAIS

A mecânica da fratura tem como objeto o estudo de previsão de falhas em um dado elemento em engenharia cujos defeitos, vindos da própria característica do material ou até mesmo decorrente de eventos decorrentes de sua solicitação, são capazes de levar o componente à fratura catastrófica em tensões normais de serviço. A fratura é consequência direta de tensões aplicadas em um dado elemento, causando assim a impossibilidades da utilização desse dado corpo. O estudo em questão tem por base o campo de tensões existentes a extremidade da trinca, sendo, quantificado por um fator de intensidade de tensão K , Fazendo assim a comparação de 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.

Em estruturas aparentemente sem defeitos as falhas ocorrem, em geral, quando solicitadas ciclicamente, pois, essas falhas se correlacionam com defeitos micro estruturais. Onde há a nucleação de uma trinca e conseguinte sua propagação, podendo até levar ao colapso estrutural. Porém só a presença da trinca não necessariamente compromete a integridade estrutural de um elemento, sendo possível até mesmo a utilização desse componente. Nesse sentido, é necessário o devido acompanhamento da trinca, e também, a sua previsão de estágio crítico, que nessa perspectiva é vista por duas técnicas da mecânica da fratura, sendo eles:

- Comportamento linear-elástico (MFLE), parâmetro do campo de tensões a frente da trinca.
- Comportamento elasto-plástico (MFEP), capacidade de deformação localizada a frente do defeito.

A primeira é, normalmente, utilizada quando a fratura ocorre em um regime linear-elástico, ou seja, para ligas de altíssima resistência mecânica ou até mesmo em ligas com resistência moderada desde que usadas com uma espessura razoável. Em geral, é a espessura que dita o campo de aplicação da mecânica da fratura, estado plano de deformação (campo triaxial de tensões) a qual a mecânica linear-elástica é aplicada ou estado plano de tensão a qual a mecânica elasto-plástica é aplicada.

O presente trabalho tem como tema principal avaliar o fechamento de trincas, usando a mecânica da fratura linear-elástica e a partir uma determinada força conhecida. Para tal determinação será utiliza uma técnica chamada MDFT ou “back face strain” em inglês, que ajudará na captação de dados de um determinado corpo de prova.

1.2 MOTIVAÇÃO

Falhas de componentes sempre perdurou entre os temas mais importantes entre engenheiros do mundo. Na História há vários desastres decorrentes do processo de fadiga, os quais geram profunda preocupação nos engenheiros projetistas. No decorrer do tempo, essas falhas geraram insegurança e assim várias técnicas e estudos veem sendo desenvolvidos até os dias atuais. Prever a propagação de trincas nos materiais de engenharia tem uma importância essencial para a prevenção de acidentes e diminuição com gastos de manutenção, porém a somente prevenção não é necessária para os dias atuais pois prevendo-se e aumentando-se a vida de um componente estrutural fará com que os gastos decorrentes da utilização ou possíveis trocas deste componente diminuam ainda mais.

O fenômeno de fechamento de trinca gera uma sobrevida no componente e mostra-se ao longo do tempo um fenômeno promissor embora contestado e pouco estudado. Daí a motivação de tal estudo, através de ensaios, demonstrar a importância de tal fenômeno e suas vantagens. Fazendo assim com que o laboratório de ensaios mecânicos da Universidade de Brasília, aumente também, o leque de técnicas experimentais.

Foi escolhido o aço ASTM A743 CA6NM por ser um material de grande utilidade em turbinas hidráulicas devido a sua boa soldabilidade e resistência à cavitação, no entanto gera demasiada tensão residual em regiões recuperadas por soldagem (PUKASIEWICZ,2012), logo o estudo de fechamento de trincas nesse tipo de material é de extrema importância.

1.3 OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS

O presente trabalho é de natureza experimental, logo tem como objetivo comprovar através de ensaios o fenômeno de fechamento de trinca. Fenômeno esse que será estudado através da utilização da técnica de MDFT (back face strain), que já mostrou ser eficiente e eficaz, em um espécime do tipo CT(compact tension). Essa técnica propõe uma relação entre a deformação da face traseira do corpo de prova e o tamanho da trinca.

O objetivo específico desse trabalho é de identificar o fenômeno através da obtenção de dados no laboratório de ensaios mecânicos e apartir daí a confecção de gráficos comprobatórios em uma rotina matlab.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em oito 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 metodologia de ensaio que será usado relativo a norma E647 que rege os ensaios de propagação de trincas por fadiga.

O capítulo 4 trata da apresentação dos materiais e dos métodos usados nos experimento, bem como todas as medidas tomadas para que o ensaio fosse bem sucedido.

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.

Já o capítulo 6 trata da metodologia de tratamento dos dados colhidos em laboratório

No capítulo 7 se encontram todos os resultados experimentais obtidos.

O capítulo 8 é exclusivo das referencias bibliográficas usadas para confecção deste projeto de graduação

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 ASPECTOS HISTÓRICOS DA MECÂNICA DA FRATURA

O termo “fadiga” é originado do latim “fatigare” e significa “cansaço”. A definição de fadiga foi encontrada no relatório intitulado por “General Principles for Fatigue Testing of Metals”, publicado em 1964 pela Organização Internacional para Normalização, em Gênova. Neste relatório, fadiga é definida como um termo que se aplica às mudanças nas propriedades que podem ocorrer em um material metálico devido à aplicação repetida de forças (ou tensões), embora geralmente este termo se aplique especialmente para aquelas mudanças que conduzem à rachadura ou falha. Esta descrição também é válida para a fadiga dos materiais não-metálicos.

Desde a metade do século XIX, uma classificação de cientistas e engenheiros tem feito pioneiras contribuições para entender a fadiga numa ampla variedade de materiais metálicos e não-metálicos, frágeis e dúcteis, monolíticos e compostos, e naturais e sintéticos.

O interesse em estudar a fadiga começou a expandir com o aumento do uso do aço em estruturas, particularmente pontes em sistemas ferroviários. A primeira pesquisa detalhada do esforço da fadiga nos metais foi iniciada em 1842 com um acidente ferroviário perto de Versailles na França que resultou em muitas mortes. A causa deste acidente foi traçada por uma falha de fadiga originada no eixo frontal da locomotiva. Em 1843, W. J. M. Rankine, um engenheiro ferroviário britânico que ficou famoso pela sua contribuição na engenharia mecânica, reconheceu características de ruptura por fadiga e notou o perigo das concentrações das tensões nos componentes das máquinas. O Instituto dos Engenheiros Mecânicos na Inglaterra começou a explorar a tão falada “Teoria de Cristalização” da fadiga. Esta foi pressuposta que o enfraquecimento dos principais materiais da falha por fadiga era causado pela cristalização da microestrutura subjacente (fundamental). Em 1849, o governo britânico convocou E. A. Hodgkinson para estudar a fadiga dos ferros fundidos usados nas pontes ferroviárias. O comunicado desta comissão (Hodgkinson, 1849) descreve experimentos de curvatura alternada na longarina cujo ponto central era inclinado pela repetição de carga de roda. Neste período, pesquisas sobre fratura por fadiga foram documentadas num trabalho de Braithwaite (1854) que empregou o termo fadiga exclusivamente para denotar o fendilhamento de metais sob repetição de carga.

Um pesquisador chamado Wohler conduziu investigações sistemáticas da falha por fadiga durante o período de 1852 a 1869 em Berlim, onde ele estabeleceu uma estação de ensaio (ou experimento). Ele observou que a força no eixo da ferrovia de aço sujeita a cargas cíclicas era menos perceptível (visível) que as forças estáticas. Os estudos de Wohler envolviam cargas axiais de flexão e de torção compreendendo testes de fadiga nos eixos das ferrovias em escala real para o “Prussian Railway

Service” e na variedade dos componentes estruturais usados em pequenas máquinas (ou aparatos). Seu trabalho leva à caracterização do comportamento da fadiga em termos das curvas de tensão da vida de amplitude (S-N) e ao conceito de “limite de resistência” à fadiga. A máquina de flexão rotativa usada hoje para forças cíclicas é conceitualmente a mesma que projetada por Wohler. Embora seu aparato de flexão rotativo tenha velocidade máxima de apenas 72 revoluções por minuto, um de seus corpos-de-prova do teste de fadiga esteve sujeito a 132.250.000 forças cíclicas sem a ocorrência de fratura.

Outro grande pesquisador sobre fadiga foi W. Fairbairn que realizou testes em ferro de vigas rebitado para a “Junta de Comércio Britânico”; em vários casos, 3.100.000 cargas cíclicas foram aplicadas. De acordo com esse experimento, Fairbairn (1864) concluiu que ferro de vigas rebitado sujeito a forças cíclicas com máximo de 1/3 da última resistência irá falhar. Em 1874, o engenheiro alemão H. Gerger começou a desenvolver métodos para o projeto de fadiga; sua contribuição incluiu o desenvolvimento de métodos para calcular a vida de fadiga para diferentes níveis médios de forças cíclicas.

Em 1910, O. H. Basquin propôs leis empíricas para caracterizar a curva S-N dos metais. Ele mostrou que log do número de repetições de carga pelos níveis de tensão resultaria em uma relação linear sobre um amplo limite de tensão.

2.2 O PROCESSO DE FADIGA

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

Diversas vezes um componente de engenharia rompe com um carregamento relativamente grande, porém, em geral, rompe como um carregamento muito menor que o carregamento crítico para o qual foi projetado estaticamente. Nesses casos a estrutura sofre uma gradativa diminuição de secção transversal calculada inicialmente, pois, devido a propagação de trinca, a secção efetiva tende a ser cada vez menor, causando o colapso estrutural antes mesmo de atingir uma carga crítica de projeto.

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.

Infelizmente há situações nas quais as trincas são impossíveis de ser evitada, razão pela qual a mecânica da fratura pode ser utilizada no auxílio de projetos, minimizando a possibilidade de uma

falha não esperada. Em geral variadas solicitações em engenharia mecânica produzem um carregamento cíclico e ocasionado fadiga, seja elas: turbulência, temperatura, ondas.

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

O processo de fadiga pode ser considerado dividido em quatro fases indicadas a seguir, na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

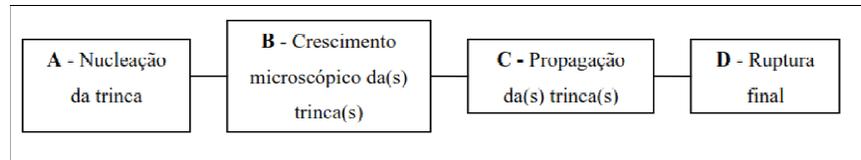


Figura 1- Fases do processo de fadiga

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 ou está inacessível.

2.3 CONCENTRADORES DE TENSÃO

A validade de uma análise de tensões tradicional é tida apenas em regiões afastadas de descontinuidades geométricas, ou seja, longe das transições geométricas bruscas e dos pontos de aplicação de carga. Nessas regiões só é possível fazer o cálculo das tensões nominais σ_n . Porém, em componentes de engenharia mecânica existem furos, entalhes, rasgos ou detalhes similares para fixação e operação, os quais residem as concentrações das tensões nominais. Espera-se que durante a fase de projeto o engenheiro siga boas recomendações práticas mantendo os raios desses entalhes os maiores possíveis reduzindo ,então, as concentrações de tensões. As falhas de um componentes mecânicos geralmente estão associadas a concentradores de tensão. Assim, é importante conhecer as grandezas e distribuições dessas tensões e deformações.

Considerando uma placa contendo um furo central elíptico sujeita a uma tensão uniforme de tração σ , como mostrado na Figura 2, esta tensão sendo transmitida de uma extremidade da placa a outra por meio de linhas de força, que indicam qualitativamente o caminho dos esforços. Nas extremidades tracionadas uniformemente, o espaçamento das linhas é uniforme (tensão = força/ área = força/ espaçamento x espessura da placa).

As linhas na região central são severamente distorcidas pela presença do furo, isto é, o campo de tensões é perturbado. As linhas de força estão sujeitas a agir como linhas elásticas tentando minimizar seus comprimentos, e por isso elas se agrupam próximo às extremidades do furo e causam um decréscimo no espaçamento local e, portanto, um aumento da tensão local (existência de mais linhas de força na mesma área).

O efeito da amplificação da tensão depende da orientação e da geometria do entalhe. A magnitude da tensão localizada na ponta da trinca diminui em função da distância para a extremidade da trinca. Em posições mais distantes da ponta da trinca, a tensão será igual ou próxima à tensão nominal σ_n , ou ainda, à carga aplicada dividida pela área da seção reta do corpo. Caso seja admitida uma trinca de formato elíptico (ou um formato circular) orientada de acordo com a direção perpendicular à tensão aplicada, a tensão máxima, $\sigma_{m\acute{a}x}$, na raiz do entalhe é igual a:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \sigma_n \left(1 + 2 \sqrt{\frac{a}{r}} \right) \quad (1)$$

Onde a e r representam o comprimento e o raio do entalhe, respectivamente. Assim, o valor da tensão máxima, $\sigma_{m\acute{a}x}$, pode ser muitas vezes maior do que o valor da tensão nominal, σ_n . O valor do fator de concentração de tensões é visto na maioria das vezes na seguinte maneira:

$$K_t = \sigma_{m\acute{a}x} / \sigma_n \quad (2)$$

É válido dizer que o efeito de concentração de tensões não é válido apenas para furos, rasgos ou outros entalhes de dimensões macroscópicas, esse efeito é claramente evidenciado também em defeitos microscópicos presentes em qualquer componente. Além disso, o efeito de concentração de tensões é mais evidenciado em materiais frágeis, pois em materiais dúcteis ocorre uma distribuição de tensões mais uniforme na região da trinca já que a deformação plástica ocorrerá quando a tensão máxima exceder o limite de escoamento do material.

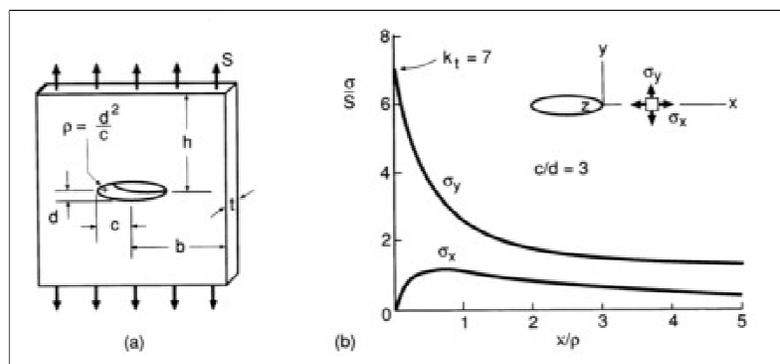


Figura 2- Furo elíptico em placa sob tensão remota uniforme. (b) Distribuição de tensão ao longo do eixo x nas proximidades de furo. Fonte: (PEREIRA, 2014)

2.4 MODOS DE ABERTURA DE TRINCA

O campo de tensões na ponta da uma trinca é de grande interesse para a MFLE. A superposição da ação das cargas estáticas permite considerar os campos de tensão e de deformação de uma trinca 3D, sob um carregamento qualquer, como uma função linear dos campos, correspondentes aos modos básicos de carregamento. A aplicação deste princípio, em problemas da mecânica da fratura, permite reduzi-los a três problemas nos chamados Modos I, II e III de crescimento de trincas (Pastoukhov e Voorwald, 1995). A Figura 3 mostra esquematicamente os três modos possíveis de carregamento de uma trinca sob a ação de forças.

- Modo I: carregamento em tração, com deslocamentos das superfícies da trinca perpendicularmente a si mesmas.
- Modo II: carregamento em cisalhamento (escorregamento) com deslocamentos das superfícies da trinca paralelamente a si mesmas e perpendicularmente à frente de propagação.
- Modo III: carregamento em cisalhamento (rasgamento) com deslocamento das superfícies das trincas paralelamente a si mesmas e à frente de propagação.

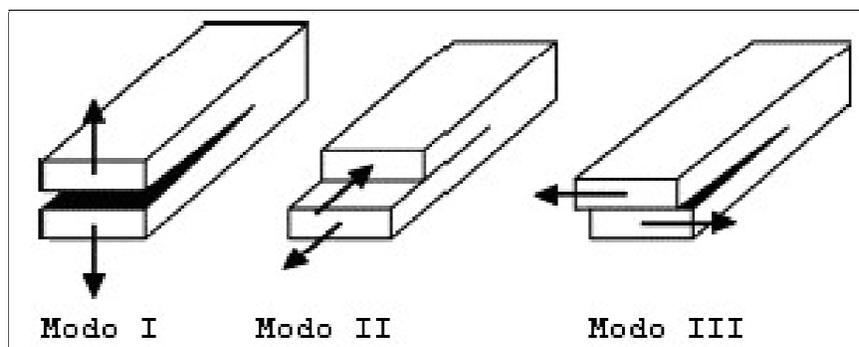


Figura 3- Diferentes modos de abertura em uma trinca. Fonte: (PEREIRA,2014)

2.5 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 trincas 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 podem surgir como uma ferramenta poderosa que se caracteriza pela facilidade na descrição de geometrias e das condições de contorno.

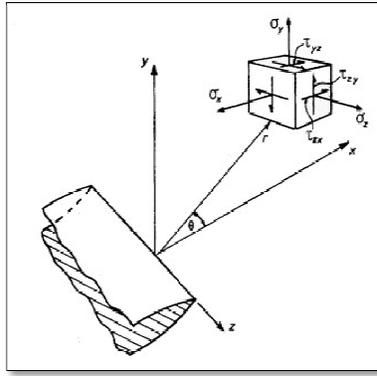


Figura 4 - Coordenadas na ponta da trinca. Fonte:(PEREIRA, 2014)

Um sistema de coordenadas para descrever as tensões na vizinhança da trinca é mostrado na figura 4. 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:

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

$$\sigma_x = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \operatorname{sen} \frac{\theta}{2} - \operatorname{sen} \frac{3\theta}{2} \right) + \frac{K_I}{\sqrt{2\pi}} \left(\frac{\rho}{2r} \right) \cos \frac{3\theta}{2} \quad (4)$$

$$T_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi}} \operatorname{sen} \frac{\theta}{2} - \cos \frac{\theta}{2} - \cos \frac{3\theta}{2} - \frac{K_I}{\sqrt{2\pi}} \left(\frac{\rho}{2r} \right) \operatorname{sen} \frac{3\theta}{2} \quad (5)$$

$$\sigma_z = 0 \quad \text{EPT} \quad (6)$$

$$\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y) \quad \text{EPD} \quad (7)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zx} = 0 \quad (8)$$

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 (3),(4) e (5) se aproximam de infinito na medida em que r se aproxima de zero. Isso é causado especificamente devido às 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 (3) e (5) 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:

$$K_I = \lim (\sigma_y \sqrt{2\pi r}) \quad (9)$$

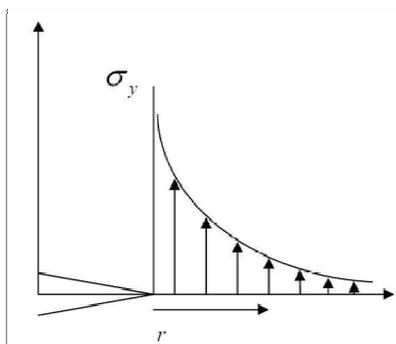


Figura 5 - Distribuição elástica na região da trinca. Fonte: (MANDAI, 2010)

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.

2.6 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.

2.7 PROPAGAÇÃO DE TRINCAS POR FADIGA

Componentes de engenharia mecânica geralmente operam sob condições de carregamentos alternados que podem ser suficientemente críticos a ponto de o projeto de resistência à fadiga deva 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 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**6 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.

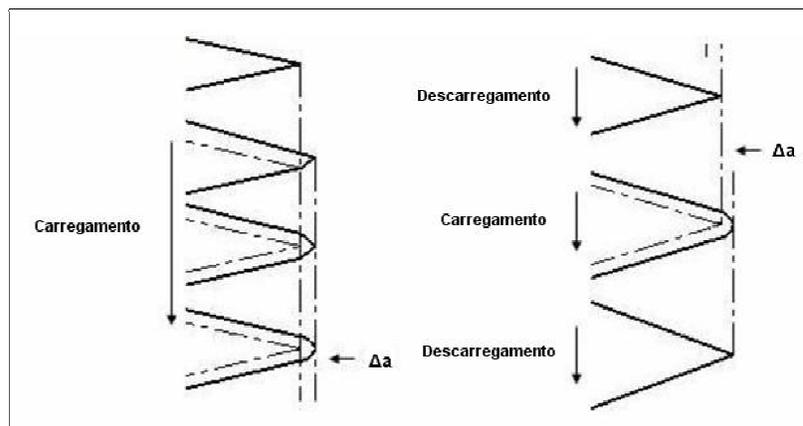


Figura 6 - Crescimento de trincas por fadiga. Fonte: (MANDAI, 2010)

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 $R = \sigma_{min}/\sigma_{máx}$. 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 .

$$\frac{da}{dN} = f(\Delta K, a) \quad (10)$$

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:

$$\frac{da}{dN} = C_p (\Delta K)^{m_p} \quad (11)$$

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.

2.7.1 DIAGRAMA DE CRESCIMENTO DE TRINCA POR FADIGA

Abaixo, é possível ver o comportamento para o crescimento de trincas.

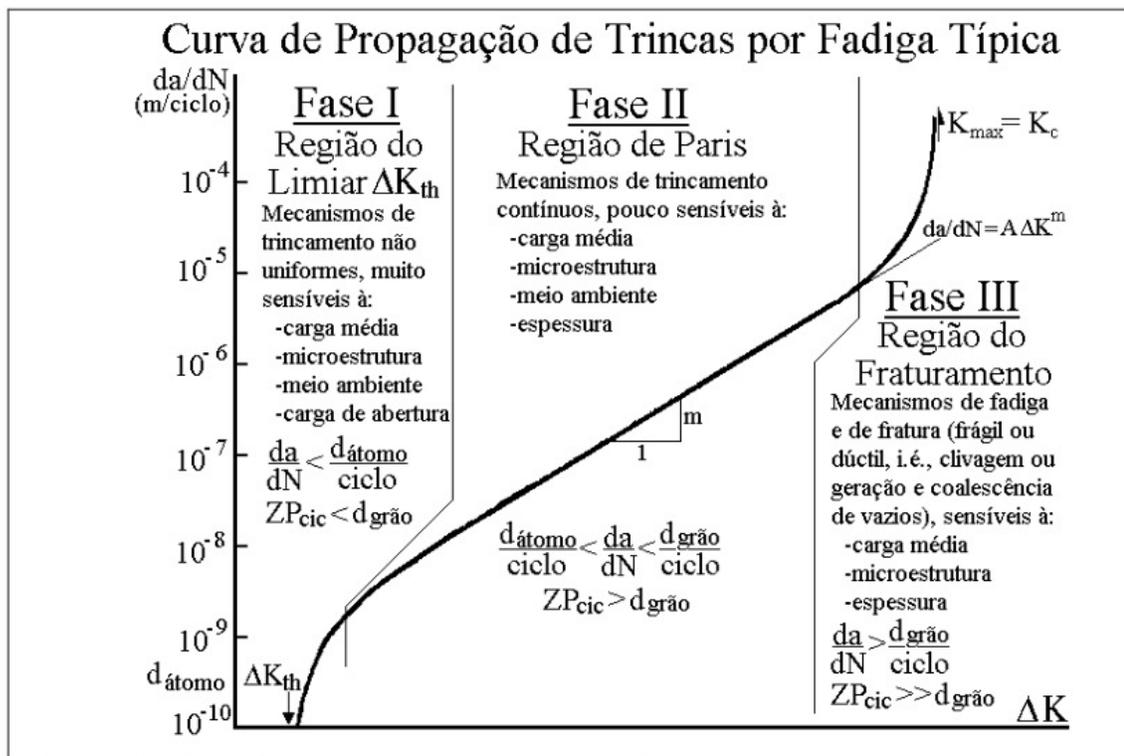


Figura 7 - Curva da/dN esquemática. Fonte: (MANDAI, 2010)

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. Abaixo está 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).

$$N = \int_{a_i}^{a_f} \frac{da}{f(\Delta K, a)} \quad (12)$$

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 crítico onde ocorre o $K_{máx}$ é dado pela seguinte equação:

$$a_c = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_c}{F \sigma_{máx}} \right)^2 \quad (13)$$

2.7.2 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.

$$\frac{da}{dN} = A_e (\Delta K - \Delta K_{th})^{m_e} \quad (14)$$

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.

$$\frac{da}{dN} = \frac{A_f \Delta K^{m_f}}{(1-R) K_C - \Delta K} \quad (15)$$

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).

$$\frac{da}{dN} = A_p \left(\frac{\Delta K - \Delta K_{th}}{K_C - K_{max}} \right)^{m_p} \quad (16)$$

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.

$$\frac{da}{dN} = A_w \Delta K^{m_w} K_{max}^{p_w} \quad (17)$$

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 .

$$\frac{da}{dN} = A_h \Delta K^{m_h} (K_{max} - \Delta K_{th})^{p_h} \quad (18)$$

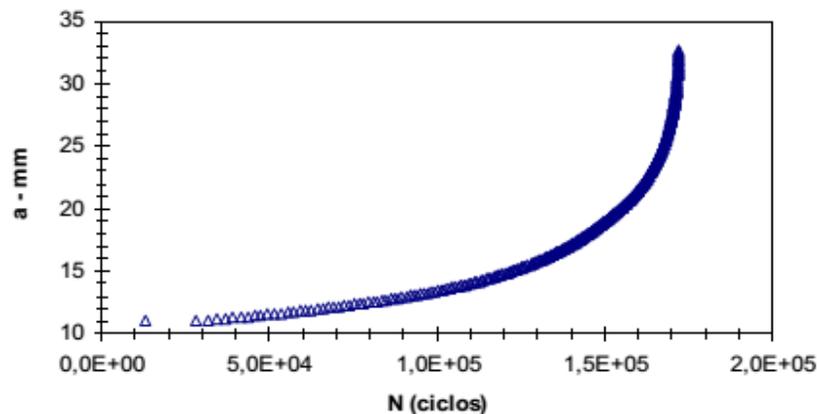


Figura 8-Curva do tamanho da trinca, a em função do número de ciclos, N . Ruckert et al

2.8 MÉTODO CTOD (CRACK TIP OPENING DISPLACEMENT)

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 (δ_c). 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):

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

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

$$CTOD_{IC} = \frac{4}{\pi} \frac{K_{IC}^2}{E\sigma_{esc}} \quad (20)$$

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 Erro! Fonte de referência não encontrada.**9 ilustra o ponto b como o nó que terá o maior deslocamento, e o ponto a como a extremidade da trinca.

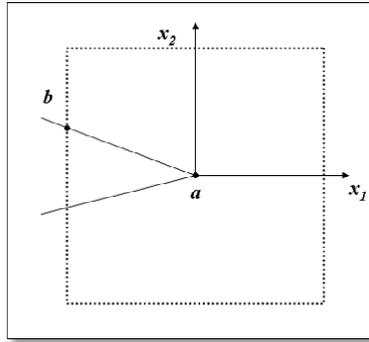


Figura 9 - Distribuição dos pontos correlatos para o cálculo de CTOD. Fonte: (FORTES, 2011)

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

$$K_I = \frac{\mu\sqrt{2\pi}(v_b - v_a)}{\sqrt{r}(2-2\nu)} \quad (21)$$

$$K_{II} = \frac{\mu\sqrt{2\pi}(u_b - u_a)}{\sqrt{r}(2-2\nu)} \quad (22)$$

$$K_{III} = \frac{\mu\sqrt{2\pi}(w_b - w_a)}{\sqrt{r}(2-2\nu)} \quad (23)$$

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).

2.9 MÉTODO CMOD (CRACK MOUTH OPENING DISPLACEMENT)

O método *crack mouth opening displacement* (CMOD) nada mais é do que a medição do *crack opening displacement*, COD, através de um clip gage fixado na abertura 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 *compliance* da norma.



Figura 10 - Corpo de ensaio do tipo C(T) com o clip gage fixado na boca do entalhe.

2.11 FECHAMENTO DE TRINCA

Elber observou um importante e controverso fenômeno presente na compreensão da propagação de trincas por fadiga no início da década de 70. Ele constatou que durante o descarregamento do ciclo de fadiga, a trinca fechava-se antes de a carga aplicada ser anulada. Esse fenômeno foi denominado de “Crack Closure”, fechamento de trinca por fadiga.

Elber propôs, em sua obra, que a ponta da trinca não age como um concentrador de tensão até que o fator de intensidade de tensão atinja um valor teórico, K_{op} , em que as faces da trinca estejam totalmente abertas.

A importância do fenômeno de fechamento na ponta da trinca está relacionada à diminuição da taxa de crescimento ou mesmo à sua parada sob um histórico de carregamentos em serviço. A finalidade dos modelos de estimativas de ΔK é chegar a resultados quantitativos na propagação de trincas por fadiga em termos de milímetros por ano mesmo em outros períodos de medição, por exemplo, para estruturas de aeronaves, vasos de pressão, componentes de engenharia e força, e assim por diante. Algumas vezes o carregamento em serviço é similar aos carregamentos com amplitudes constantes, enquanto que em outros casos, a história de carregamentos com amplitudes variáveis é predominante. Em ambos os casos, o conhecimento do nível de tensão de abertura da trinca, σ_{op} é geralmente aceito como essencial para estimativas de propagação, pois o conhecimento do valor de σ_{op} é necessário para definir qual a variação do efetivo fator de intensidade de tensão atuando na ponta da trinca:

$$\Delta K = (K_{m\acute{a}x} - K_{op}) \quad (25)$$

Segundo Schijve (1988), a variação do fator de intensidade de tensão efetiva, ΔK_{eff} é suposto ser um parâmetro de campo apropriado para correlacionar a taxa de propagação de trinca sob diferentes condições de carregamento cíclico.

A curva da/dN vs. ΔK é uma sigmoideal e exibe uma dependência com R , particularmente nos limites extremos.

Na região III da curva, esta influência é explicada em termos da interação entre a fadiga e quando $K_{m\acute{a}x}$ se aproxima de K_{IC} .

Na primeira parte da curva, Élber (1971) notou uma anormalidade na flexibilidade de vários corpos de prova de fadiga. Quando a carga era alta, a flexibilidade elástica concordava com as teorias existentes, conforme Anderson (1995).

Entretanto, para baixas cargas, a flexibilidade medida foi próxima à de um corpo de prova sem trinca. Elber, W. (1971) acreditou que este fenômeno era devido ao contato entre as superfícies da trinca. Ele postulou que o fechamento da trinca diminui a taxa de crescimento da trinca, reduzindo o valor de ΔK . Este fenômeno está esquematizado na **Figura 11**.

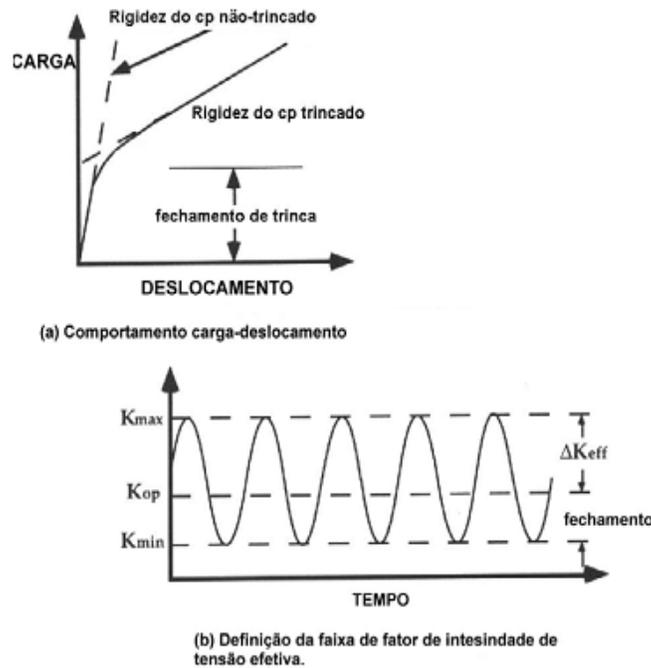


Figura 11 - Fonte(RUCHERT 2010)

onde, k_{op} é o valor no qual a trinca efetivamente abre e a parte de fechamento não contribui para a propagação da trinca. Desta forma a equação de Paris pode ser reescrita como:

$$da/dN = C(\Delta K_{eff})^n \quad (26)$$

Segundo Élber (1970), o conceito de fechamento de trinca considera que a trinca de fadiga do material é deformado plasticamente durante a sua propagação. Durante o descarregamento de um ciclo de tensão, acontecerá algum contato entre as superfícies da trinca devido à contração elástica do material ao redor, e a trinca permanecerá fechada durante algum tempo durante o ciclo.

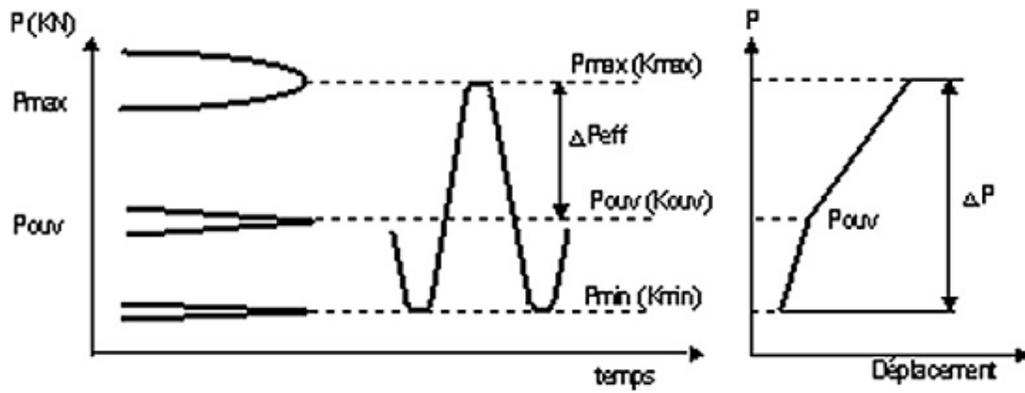


Figura 12 - Comportamento mecânico da ponta da trinca Fonte:(RUCHERT,2010)

Élber (1970) define a faixa de intensidade de tensão efetiva como:

$$\Delta K_{efe} = U \Delta K \quad (26)$$

$$U = \frac{(K_{m\acute{a}x} - K_{op})}{(K_{m\acute{a}x} - K_{m\acute{i}n})} \quad (27)$$

onde K_{op} é o fator de tensão de mínima intensidade que exigiu para reabrir a trinca. Para um dado ciclo de tensão $K_{m\acute{a}x}$ é definido como:

$$K_{m\acute{a}x} = \frac{\Delta K}{(1-R)} \quad (28)$$

Elber introduziu a seguinte equação geral:

$$U = \frac{\Delta K_{efe}}{\Delta K} \quad (29)$$

$$U = \frac{K_{m\acute{a}x} - K_{op}}{(1-R)K_{m\acute{a}x}} \quad (30)$$

Modernos modelos de predições de crescimento de trinca empregam o conceito do fechamento da trinca. Elber (1971) propôs uma expressão experimental, Equação 46, com base nos ensaios de propagação de trinca por fadiga de uma liga de AL 2024-T3 e medidas dos deslocamentos da abertura da trinca em amplitude constante de carregamento.

$$U = \frac{(\Delta K_{efe})}{\Delta K} = 0.5 + 0.4R \quad (31)$$

Posteriormente a equação de Elber (1971) ser proposta muitos pesquisadores como, por exemplo, Newman, (1976/1981) Führung, (1977), Zhang & Schijve et al (1987) propuseram equações similares para outras ligas aeronáuticas, mas utilizando também a técnica de elementos finitos mais que estava mais desenvolvida. Zhang & Schijve et al (1987), propuseram uma equação empírica de U, utilizando a técnica de fechamento, para a liga de alumínio aeronáutica SAE AMS 7475-T7351. Para isso fizeram ensaios de propagação de trinca por fadiga em amplitude constante variando R de -3,33 à 0,8 com medições do K_{op} resultando em um total de 13 curvas as quais foram colapsadas em uma única

curva finalmente obtendo a taxa de propagação da trinca em função da variação do fator de intensidade de tensão efetivo.

As Equações 36 e 37 são os resultados de U e da/dN vs. Δk_{efet} obtidos por Zhang & Schijve et al (1987), para a liga de alumínio SAE AMS 7475-T7351.

$$U = \frac{\Delta k_{efet}}{\Delta K} = 0.618 + 0.365R + 0.139R^2 \quad (32)$$

para $0 \leq R \leq 0,8$

$$\frac{da}{dN} = 0.467E - \Delta K_{efe}^{2.97} \quad (33)$$

É importante saber que o fechamento da trinca pode ser induzido pelos seguintes mecanismos: por plasticidade por fluido viscoso; rugosidade das superfícies de fratura; transformações de fase induzida por deformação ou tensão; por oxidação. O presente trabalho não tem como objetivo o aprofundamento nos mecanismos que levam ao fenômeno de fechamento de trinca, mas sim na identificação e constatação do fenômeno que ainda é um mistério entre os pesquisadores.

2.10 EXTENSOMETRIA

A extensometria é uma técnica utilizada para a análise experimental de tensões e deformações em estruturas mecânicas e de alvenaria. Estas estruturas apresentam deformações sob carregamento ou sob efeito da temperatura. É importante conhecer a extensão destas deformações e muitas vezes precisam ser monitoradas constantemente, o que pode ser feito de diversas formas. Algumas são o relógio comparador, o detector eletrônico de deslocamento, por camada frágil, por fotoelasticidade e por strain-gauge. Dentre todas, o strain-gauge, do inglês medidor de deformação, é um dos mais versáteis métodos.

Os extensômetros elétricos são largamente utilizados para medir deformações em estruturas como pontes, máquinas, locomotivas, navios e ainda associados a transdutores para medir pressão, tensão, força e aceleração. São ainda associados a outros instrumentos de medidas para uso desde análise experimental de tensão até investigação e práticas médicas e cirúrgicas. O extensômetro elétrico de resistência é um elemento que transforma pequenas variações de deslocamento em variações equivalentes de sua resistência elétrica. Sua utilização constitui um meio para medir e registrar fenômenos da deformação como sendo uma grandeza elétrica. O grande diferencial desse método de medição é o seu baixo valor em relação a sua alta precisão na medição.

É também fundamental a utilização desse componente nesse trabalho por com ele será possível fazer a medição da deformação da face traseira de maneira precisa e eficiente, dado o baixo custo supracitado

2.10.1 EXTENSÔMETRO

Uma das maneiras mais fáceis de conhecer a deformação de um dado elemento é usando um extensômetro, e conseqüentemente acha-se a força a qual está submetido esse dado elemento. Existem muitos tipos de extensômetros, 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 observada na **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

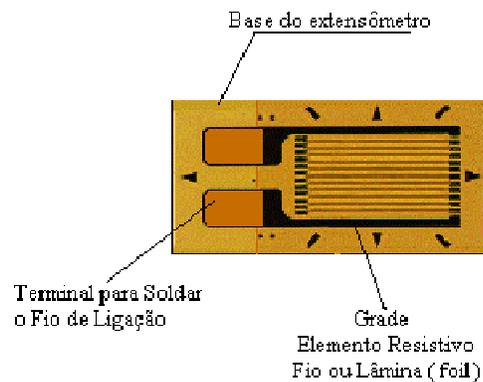


Figura 13 - Composição de um extensômetro. (KYOWA, 2004)

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 (34) seguinte:

$$\frac{\Delta R}{R} = K. \varepsilon \quad (34)$$

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 **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

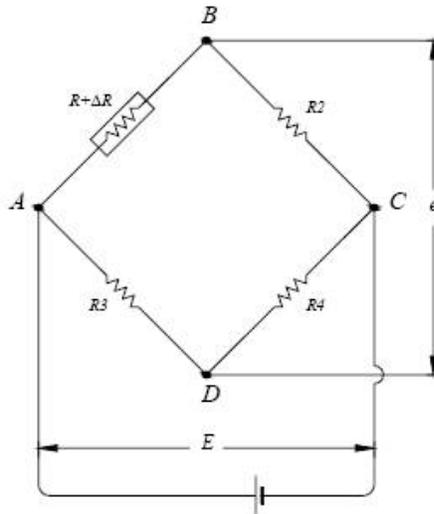


Figura 14 - Ponte de Wheatstone. (KYOWA, 2004)

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 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra um “Strain Gage” conectado no lugar da resistência R4.

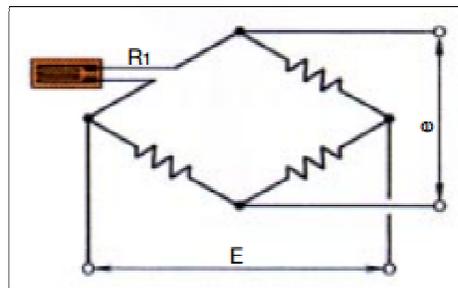


Figura 15- Extensômetro conectado a uma Ponte de Wheatstone. (KYOWA, 2004)

Dessa maneira, quando o extensômetro sofre uma deformação (variação da resistência elétrica), a ponte de Wheatstone registra a voltagem correspondente, e. Conforme as equações 35 e 36.

$$e = \frac{1}{4} \cdot \frac{\Delta R}{R} \cdot E \quad (35)$$

$$e = \frac{1}{4} \cdot K \cdot \epsilon \cdot E \quad (36)$$

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

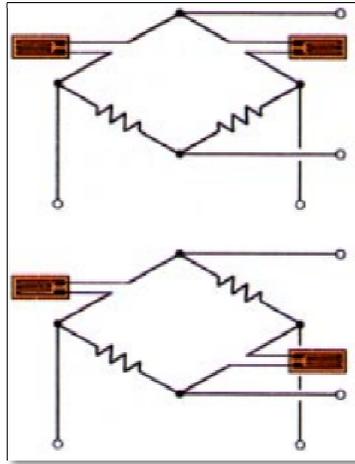


Figura 16 - Arranjos de Ponte de Wheatstone com 2 extensômetros. (KYOWA, 2004)

2.10.2 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 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** ilustra os vários componentes do ERE.

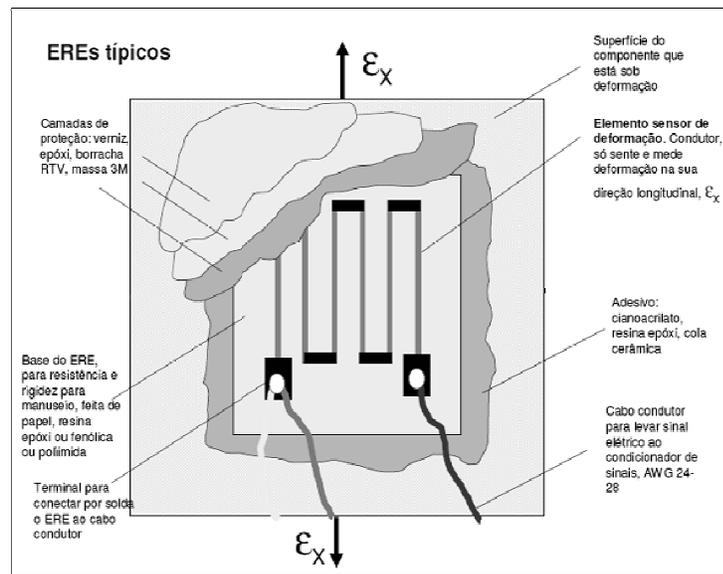


Figura 17 - Extensômetro de resistência elétrica. (CAMPOS e VILELA, 2011)

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

$$R = \rho \left(\frac{L}{A} \right) \quad (37)$$

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

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).

$$K = (dR/R)(1/\epsilon) \quad (38)$$

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:

$$K = \frac{d\rho}{\rho} + (1 + 2\nu) \quad (39)$$

Os ERE possuem vários formatos de acordo com a aplicação pretendida **Erro! Fonte de referência não encontrada.** 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.

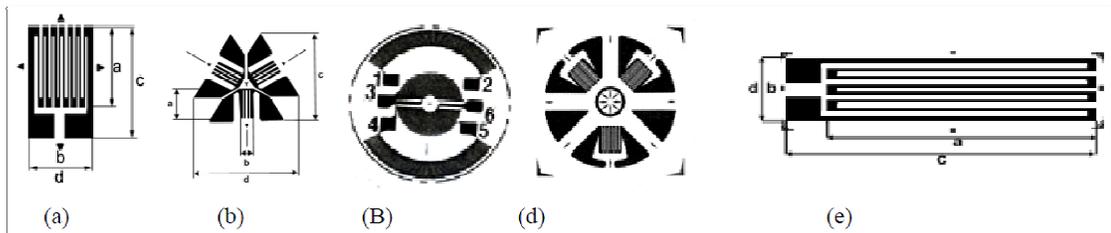


Figura 18 - Principais tipos de extensômetro. (CAMPOS e VILELA, 2011)

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

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 se 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 traseiro 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 $(E(\epsilon W)B)/P$.

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 *compliance* da literatura é possível determinar o tamanho da trinca. Segue a montagem experimental na **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

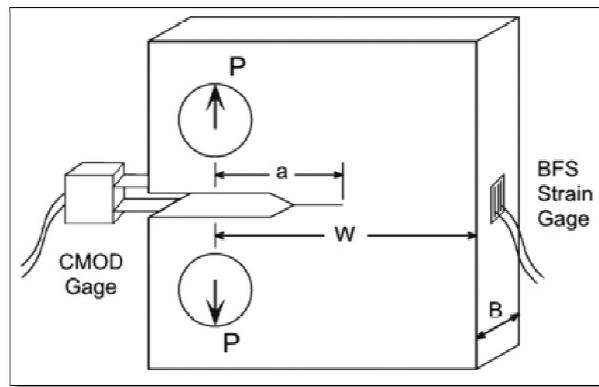


Figura 19 - Corpo de prova do tipo CT com CMOD e BFS. (Fonte: (NEWMAN, YAMADA e JAMES, 2011))

Para os testes desse tipo de montagem, 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), criadores da técnica de BFS, a qual consiste na medição da deformação na face oposta à do rasgo do entalhe da peça.

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 na em artigos científicos nos quais estudos foram feitos mostrando basicamente a influência da razão de carregamento, do fator de intensidade de tensão, da localização do 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

Deans e Richards (DEANS e RICHARDS, 1979) desde que propuseram esta técnica em meados do ano de 1979, já visavam algumas vantagens que esse método poderia apresentar 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. Ambos os métodos COD e BFS tem a seu favor:

- 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 reutilizados ao final do teste. No entanto, é possível que se utilize transdutores ou *clip gages* que possam ser utilizados 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 uma ótima escolha para aumentar a precisão na medição do tamanho da trinca;
- Além do mais ambos os métodos podem ser facilmente calibrados para uma trinca 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 da 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:

$$(BFS) = A(a/W)P \quad (40)$$

Usando um parâmetro normalizado

$$P^* = P/BWE \quad (41)$$

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

$$(BFS) = A^*(a/W)P^* \quad (42)$$

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

$$A^*(a/W) = [(BFS)/P]BWE \quad (43)$$

Normalizando nesse caminho, $A^*(a/W)$ não depende do material e dimensões do corpo de prova (CT). A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** 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.

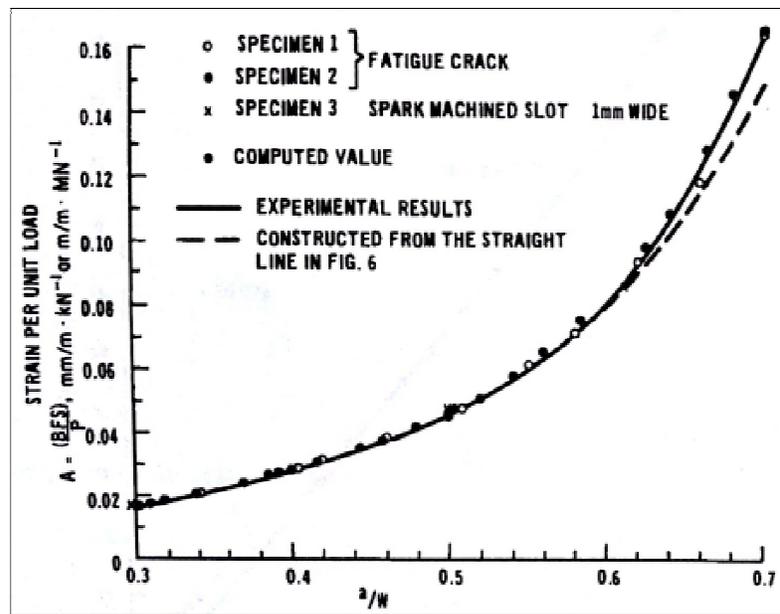


Figura 20 - Variação de BFS por unidade de carga por a/w para um corpo de prova de 25mm. (DEANS e RICHARDS, 1979)

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:

$$-EBCW = 40.7730 - 673.330\alpha + 4648.77\alpha^2 - 16372.8\alpha^3 + 31712.6\alpha^4 - 31853\alpha^5 + 13172.9\alpha^6. \quad (44)$$

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 (45) também representada na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**:

$$\frac{a}{W} = 0.99999 - 2.00085U - 0.75959U^2 + 10.015650U^3 - 18.39149U^4 + 14.23767U^5 - 4.05333U^6 \quad (45)$$

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

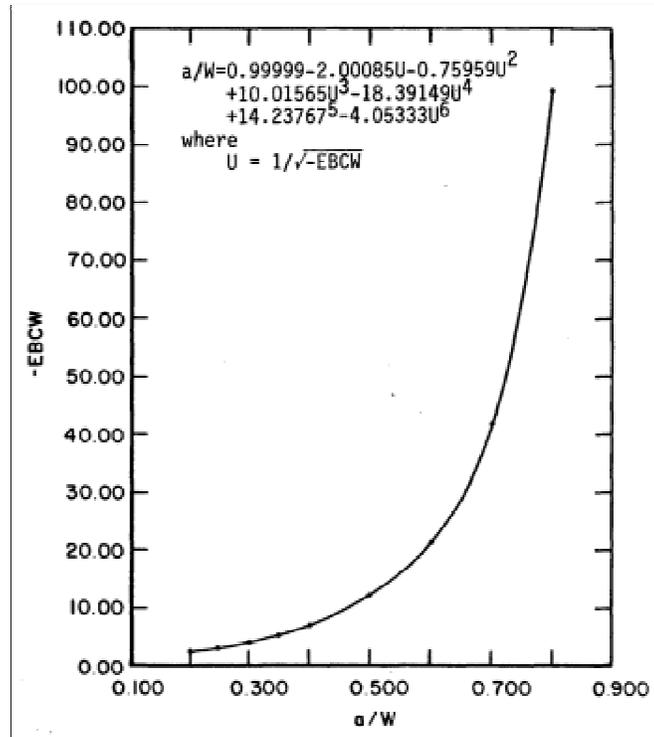


Figura 21 - Compliance do BFS analítico pela razão a/W . (MAXWELL, 1987)

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:

$$A\left(\frac{a}{W}\right) = 20.52 - 225.36\left(\frac{a}{W}\right) + 1001.14\left(\frac{a}{W}\right)^2 - 1830.93\left(\frac{a}{W}\right)^3 + 1347.23\left(\frac{a}{W}\right)^4 \quad (46)$$

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 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, 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.

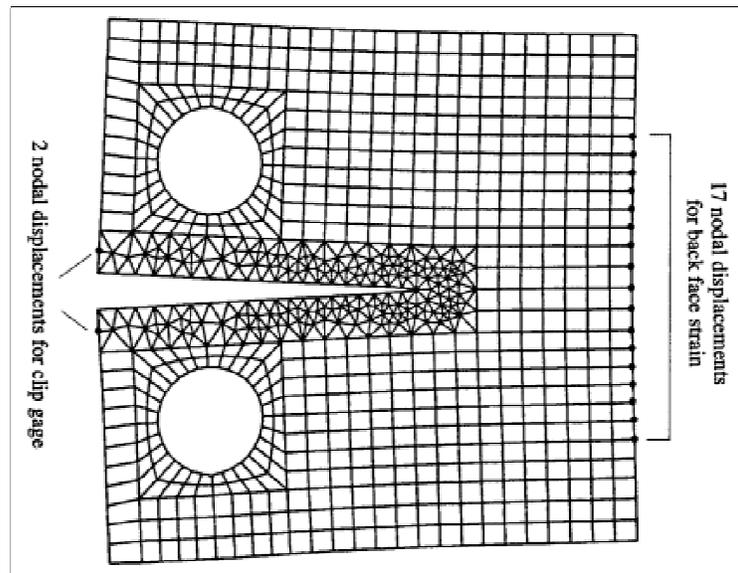


Figura 22 - Análise da malha de elementos finitos para o corpo de prova C(T) com $a/w=0.5$
(RIDDELL e PIASCIK, 1998)

Gerando a relação abaixo também demonstrada através de comparação na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e **Erro! Fonte de referência não encontrada.:**

$$\frac{a}{W} = -0.07978 + 0.83982(\log A^*)^2 - 0.64978(\log A^*)^3 - 0.21704(\log A^*)^4 + 0.03154(\log A^*)^5 \quad (47)$$

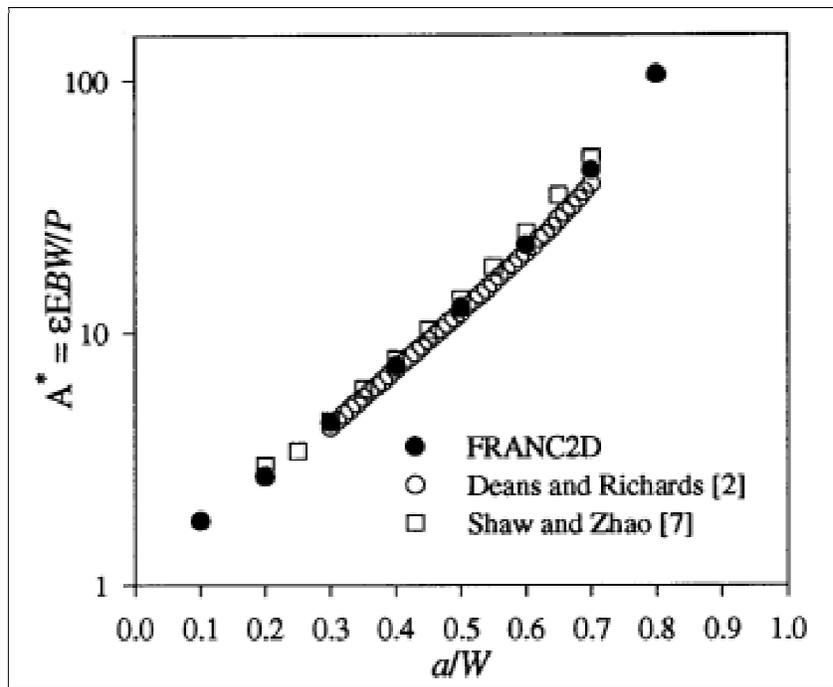


Figura 23 - Parâmetro de deformação traseira(A^*) versus a/W . (RIDDELL e PIASCIK, 1998)

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 24 - 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:

$$\frac{a}{W} = 1.0343 - 2.8098U + 4.1335U^2 - 23.694U^3 + 76.371U^4 - 83.25U^5 \quad (48)$$

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 $0.2 < a/W < 0.95$.

$$\frac{a}{W} = 1.0033 - 2.35U + 1.3694U^2 - 15.294U^3 + 63.182U^4 - 74.42U^5 \quad (49)$$

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 Figuras **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, 26 e 27.

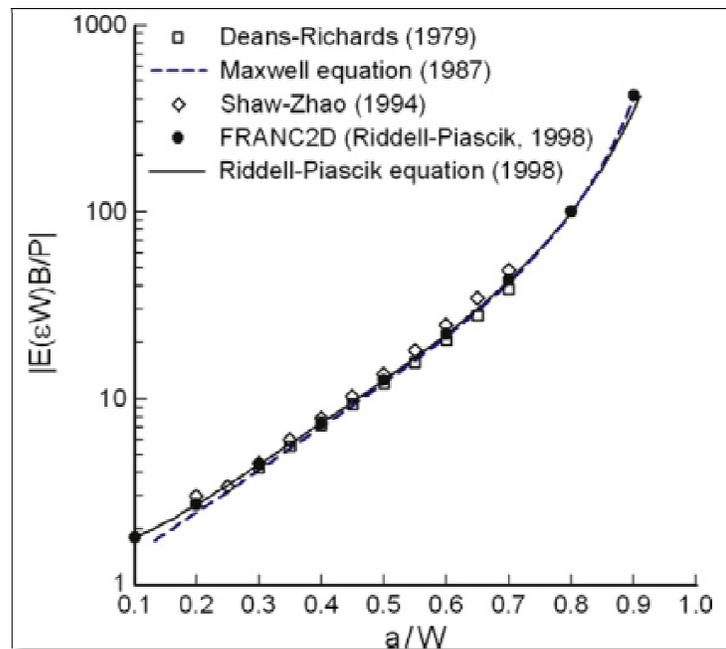


Figura 25 - Resultados de BFS normalizados da literatura para corpos de prova do tipo C(T).
(NEWMAN, YAMADA e JAMES, 2011)

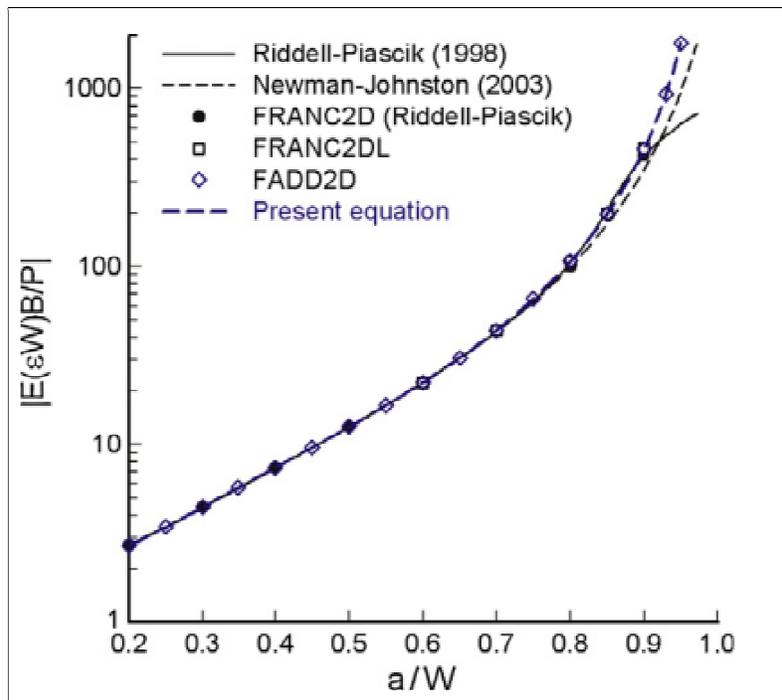


Figura 26 - BFS normalizado versus razão de comprimento para $C(T)$. (NEWMAN, YAMADA e JAMES, 2011)

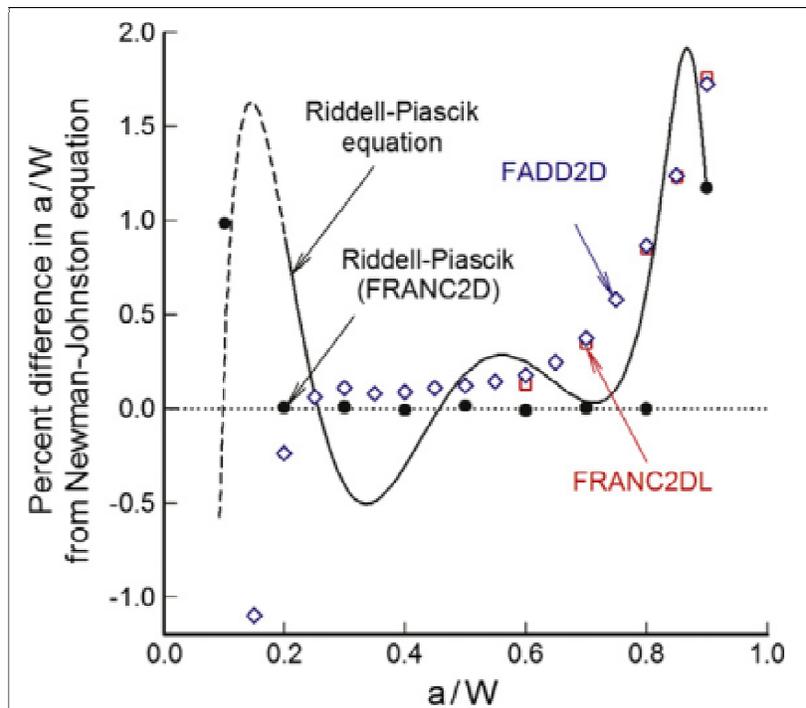


Figura 27 - Percentual de diferença na determinação do tamanho da trinca a partir da equação de Newman-Johnston. (NEWMAN, YAMADA e JAMES, 2011)

3 METODOLOGIA DOS ENSAIOS DE PROPAGAÇÃO DE TRINCAS

3.1 METODOLOGIA

A metodologia usada para a identificação do fenômeno de fechamento de trinca foi toda a metodologia de ensaios de propagação de trinca e foram feitas adaptações e discricioniedades onde tais normas não regiam sobre o método aqui apresentado.

3.2 INFORMAÇÕES GERAIS SOBRE A NORMA E647

A norma E647 da *American Society for Testing and Materials* (ASTM), rege 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.

3.2.1 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 **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

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).

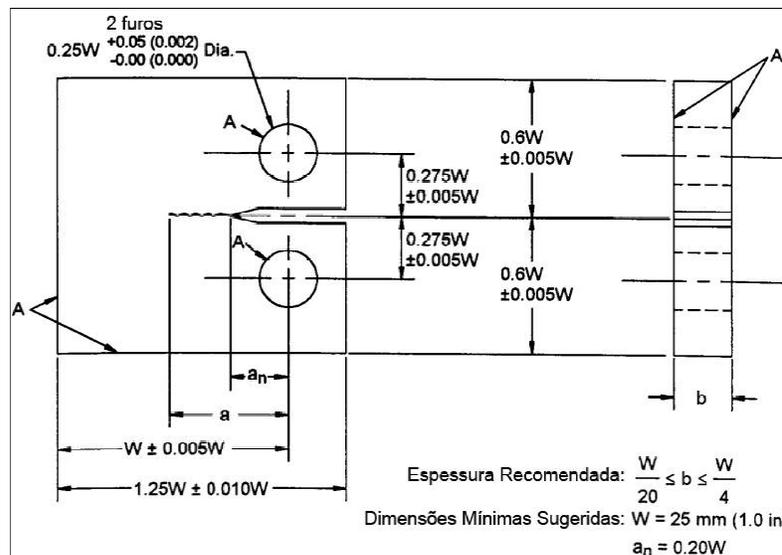


Figura 28 - Corpo de prova Compacto de Tração – C(T) – para ensaios de taxa de propagação de trinca. Fonte: (ASTM E647, 2011)

3.2.2 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 **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

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.

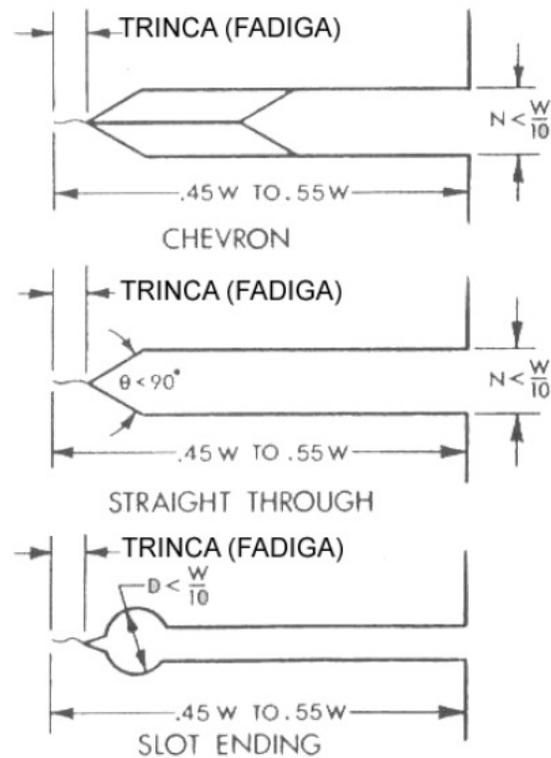


Figura 29 - Detalhes de entalhe e pré-trinca para diversas configurações de entalhe em C(T).

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 comprimento 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)

3.3 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 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

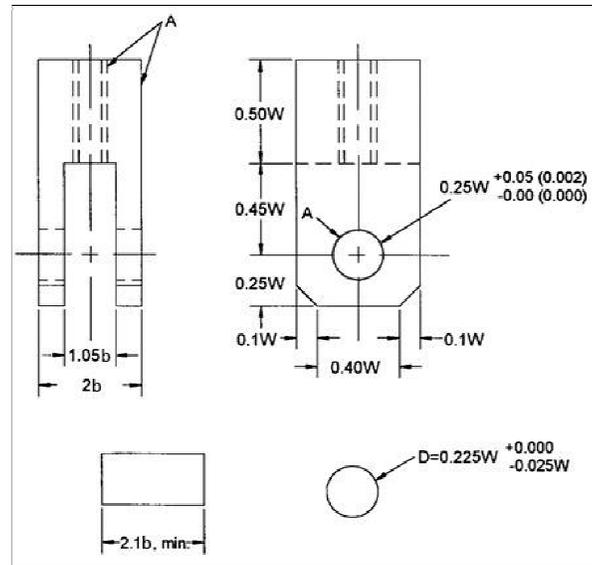


Figura 30 - Manilha e pinos para a configuração de ensaio com C(T). Fonte: (ASTM E647, 2011)

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.

3.3.1 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:

$$\Delta K = (1 - R)K_{max} \quad \text{se } R \geq 0 \quad (2)$$

$$\Delta K = K_{\max} \quad \text{se } R \leq 0 \quad (3)$$

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.

3.3.2 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 42:

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

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 de medições visuais 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 **Erro! Fonte de referência não encontrada..** 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).

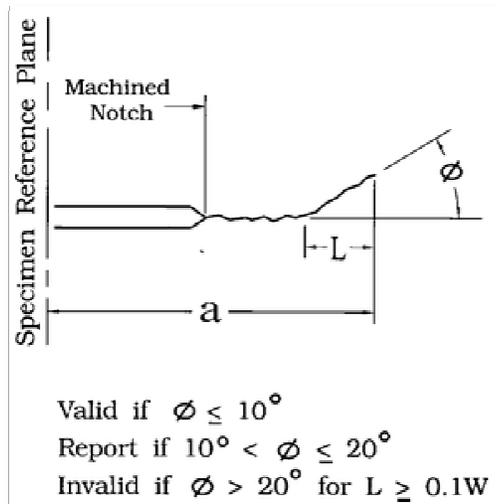


Figura 31- Limites para validação do ensaio. Fonte: (ASTM E647, 2011)

3.3.3 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:

$$\left(\frac{da}{dN}\right)_{\bar{a}} = \frac{a_{i+1} - a_i}{N_{i+1} - N_i} \quad (5)$$

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:

$$\hat{a}_i = b_0 + b_1 \left(\frac{N_i - C_1}{C_2}\right) + b_2 \left(\frac{N_i - C_1}{C_2}\right)^2 \quad (6)$$

onde os termos entre parênteses devem ter o valor entre $-l$ e l 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:

$$\left(\frac{da}{dN}\right)_{\hat{a}_i} = \frac{b_1}{C_2} + \frac{2b_2}{C_2^2} (N_i - C_1) \quad (7)$$

3.3.4 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)

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 CORPO DE PROVA

Os corpos de prova do tipo C(T), **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, é 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 (BFS) gage). Utilizou-se a técnica BFS neste trabalho.

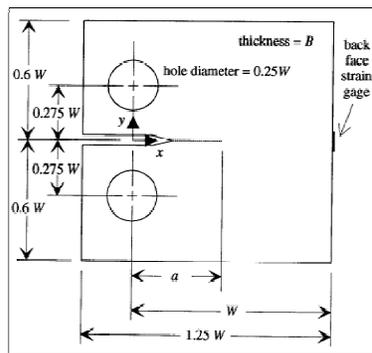


Figura 32 - Corpo de prova utilizado nos ensaios. Tipo C(T). Fonte: (RIDDELL e PIASCIK, 1998)

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 $(E \cdot \epsilon \cdot w \cdot B)/P = U$; 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.

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 nas figuras **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, que seguem abaixo:

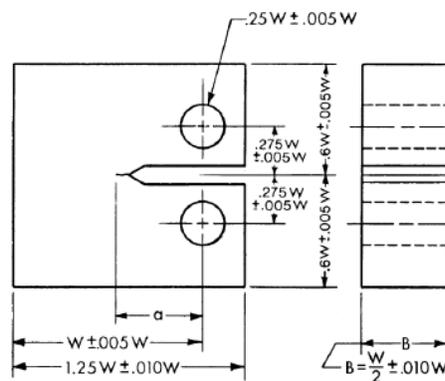


Figura 33 - Dimensões características para o corpo de prova do tipo C(T).

Fonte: (ASTM E647, 2011)

As dimensões do corpo de prova utilizados neste experimento seguem descritos na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

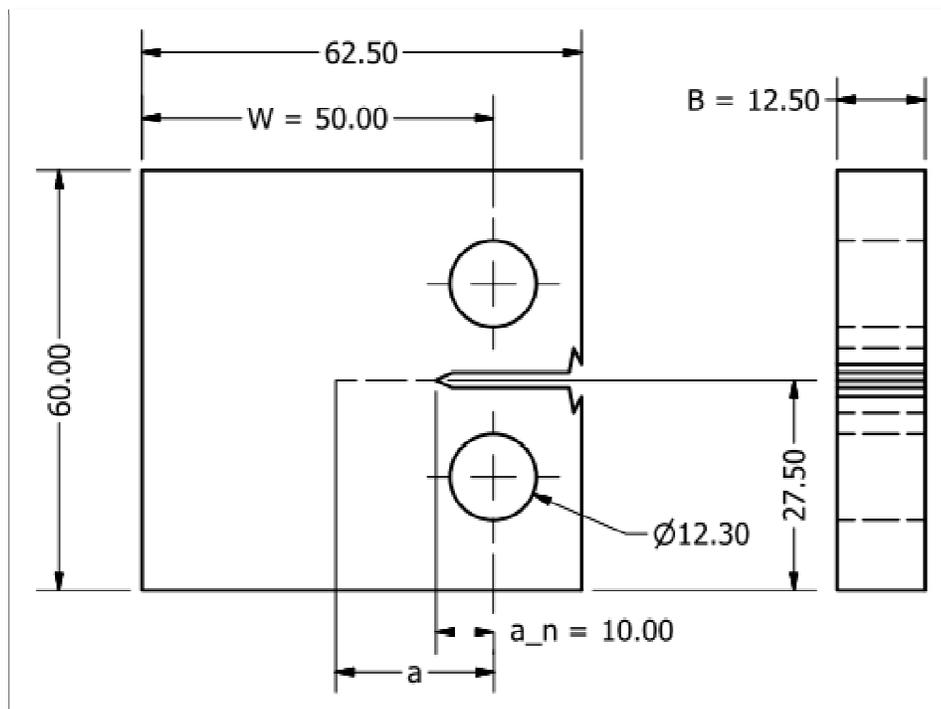


Figura 34 - Dimensões do corpo de prova utilizado nos ensaios. Cotas em mm.

4.2 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:

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

Tabela 1 - Composição química em % de peso da liga de aço A743. Fonte: (WORLDWIDE GUIDE TO EQUIVALENT IRONS AND STEELS, 2000)

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

Tabela 2 - Propriedades Mecânicas para o Aço ASTM A743 CA6NM. Fonte: (WORLDWIDE GUIDE TO EQUIVALENT IRONS AND STEELS, 2000)

4.3 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 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, em cada lixa subsequente até desaparecerem os traços da lixa anterior.

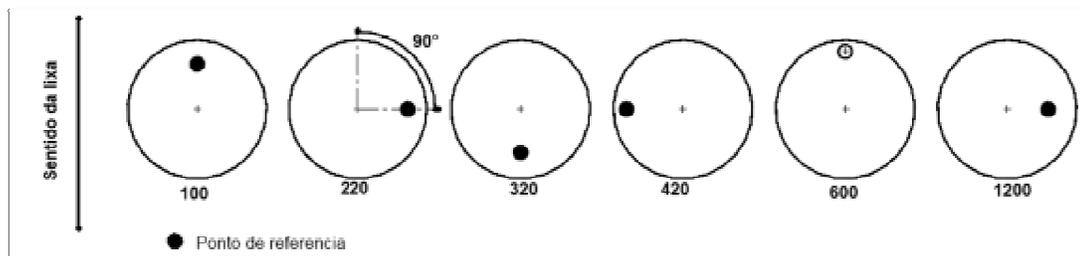


Figura 35- Representação esquemática do método de lixamento com trabalho em sentidos alternados. Fonte: (ROHDE, 2010)

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 já com a 220. 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 inutiliza-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;
- Metais diferentes não devem ser lixados com a utilização da mesma lixa; reaproveitamento.



Figura 36- Diferentes numerações de lixa.

Procedimento para o lixamento, de acordo com a **Erro! Fonte de referência não encontrada.**6.

- 1- Verificar se há todas as lixas necessárias para a preparação da amostra mecanográfica.
- 2- Verificar se há água
- 3- Fazer um ponto de referência na amostra
- 4- Começar o lixamento de desbaste
- 5- Lixar até que só restem os riscos da última lixa utilizada
- 6- Gire 90° e vá para a próxima lixa
- 7- Repetir passos 5 e 6 até chegar à lixa de granulometria 1200.



Figura 37– a) Equipamento para o processo de lixamento. b) Corpo de prova sendo lixado.

4.4 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 **Erro! Fonte de referência não encontrada..** Já a **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra o resultado final de uma amostra polida e uma não polida.



Figura 38-- Processo de Polimento do corpo de prova



Figura 39 - a) Corpo de prova polido. b) corpo de prova não-polido.

4.5 MARCAÇÃO NO CORPO DE PROVA

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 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** juntamente com o riscador padrão do laboratório de metrologia.

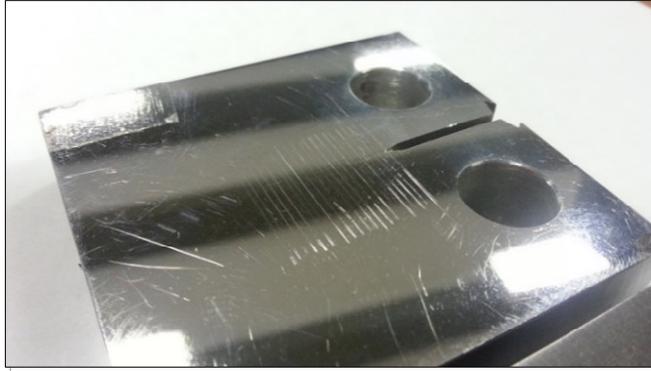
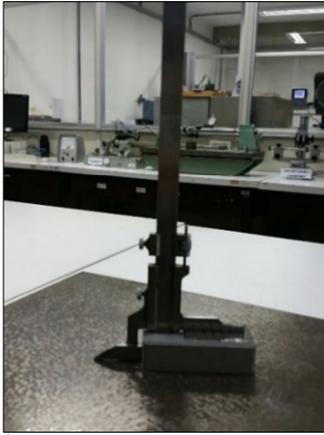


Figura 40- a) Riscador padrão para marcação no corpo de prova. b) Corpo de prova marcado.

4.6 MTS (MATERIAL TESTING SYSTEM)

O equipamento utilizado para os ensaios de fadiga é a máquina de ensaio universal MTS 810, representada na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** Através 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 governado por um computador central, que liga a bomba principal, a qual provê a 'força' desempenhada pelo atuador hidráulico. Além disso, é nele que se programa o ensaio desejado.



Figura 41-MTS (Material Testing System)

4.6.1 OS PRINCIPAIS COMPONENTES DA MTS

- MTS 810 quadro de carga com atuador linear, cruzeta ajustável, transdutores de carga (100 e 2,5 kN), apertos, e os controles (fechaduras),
- Sistema de computador pessoal com o Gerenciador de Estação 3.1B v,
- Controlador da estação remota (RSC ou Pod para o short),
- Bomba hidráulica, colector de serviço e de fornecimento aderência,
- MTS unidade de controle (TestStar IIS),
- Controlador de temperatura,
- Câmara Ambiental.

TestStar IIS Station Manager é o principal programa de exploração da estrutura de sustentação MTS. Ele dispõe de: menus para ativar o sistema hidráulico para mover o atuador e aderência espécimes, Janela para exibir as informações do sistema quer textualmente, quer graficamente (Osciloscópio-wise).

O sistema de energia hidráulica pode ser operada automaticamente por um PC ou manualmente, ou seja, utilizando o RSC.

O atuador pode ser controlado pela força ou deslocamento. A RSC é um painel de controle dedicado para controlar manualmente a estação MTS.

Controle Manual da Unidade de Carga:

Para usar o controle manual que você precisa para estar em aplicação Station Manager e ative o controle pressionando o botão "Ativar / Desativar" no painel RSC.

A RSC tem uma série de botões (posicionamento, indicando e controladores) e um conversor digital visor programável mostra que as saídas do sensor e o modo de controle de corrente.



Figura 42 Remote Station Controller (RSC)

Modos de Controle (modelo 793,67)

Há três aplicativos que são executados em computador que se pode selecionar a partir do painel de controles da estação exibido na janela do Station Manager.

Function Generator Application

É usado quando se quer gerar ondas de amplitude específica, frequência e formas disponíveis, por exemplo, para aquecer a máquina antes de testar amostras.

Basic aplicação testware

É usado se deseja se executar um procedimento de teste simples (monótono ou cíclico) tal como um teste de compressão simples, com a aquisição de dados de base e monitoramento sem qualquer projeto processual.

MPT Application

É usado quando se quer executar um já especificado método de ensaio ou para editar um novo procedimento de teste e guardá-lo para vários espécimes / projetos. 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 **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

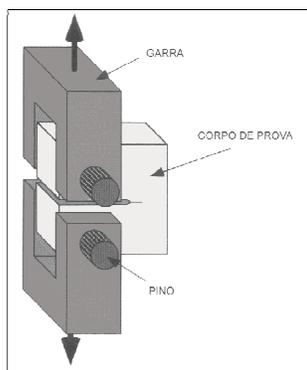


Figura 42- Alinhamento do conjunto (garra, corpo de prova e pinos). Fonte: (MANDAI, 2010)

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 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, 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 tamanho da trinca e por consequência a possível identificação do fenômeno de fechamento de trinca.

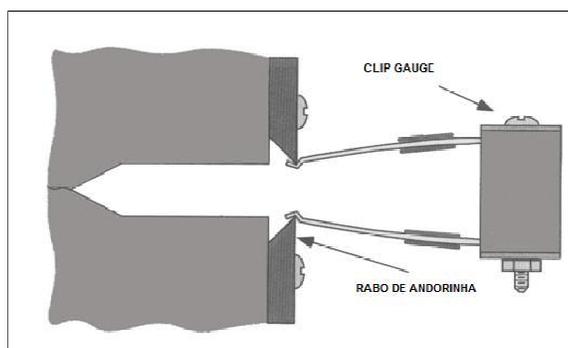


Figura 43- Representação esquemática do encaixe do clip gauge no corpo de prova. Fonte: (MANDAI, 2010)

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 (8)

$$\frac{EBV_0}{P} = \left[15.52 \frac{a}{W} - 26.38 \left(\frac{a}{W} \right)^2 + 49.7 \left(\frac{a}{W} \right)^3 - 40.74 \left(\frac{a}{W} \right)^4 + 14.44 \left(\frac{a}{W} \right)^5 \right] / \left[1 - \frac{a}{W} \right]^2 \quad (8)$$

4.7 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:

$$G = \frac{1}{K} \cdot \frac{dK}{da} = \frac{1}{K_{m\acute{a}x}} \cdot \frac{dK_{m\acute{a}x}}{da} = \frac{1}{K_{m\acute{i}n}} \cdot \frac{dK_{m\acute{i}n}}{da} = \frac{1}{\Delta K} \cdot \frac{d\Delta K}{da} \quad (9)$$

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.

4.8 EXTENSÔMETROS

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 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** A ponte extensométrica utilizada foi configurada como ¼ de ponte no aquisitor ADS 2000, em um arranjo a três fios e uma compensação interna em 120Ω .

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.

KFG-5-120-C1						
						
※Figure is KFG-5-120-C1-11						
	KFG-5-120-C1-5					
	KFG-5-120-C1-11					
	KFG-5-120-C1-16		5	1.4	9.4	2.8
	KFG-5-120-C1-23					
	KFG-5-120-C1-27					

Figura 44- Modelo de extensômetro utilizado nos ensaios. Fonte: (KIOWA)

4.8.1 TESTE DOS EXTENSÔMETROS

Os extensômetros, **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, 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, **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, se o extensômetro foi danificado no procedimento de colagem ou se a solda não foi corretamente executada.



Figura 45- Extensômetro unidirecional (Strain Gage).



Figura 46- Multímetro digital para realização de teste da resistência elétrica do extensômetro.

4.8.2 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 1.

4.9 AQUISIÇÃO DE DADOS

O termo Aquisição de Dados é usado genericamente para designar a obtenção de informações a respeito de um processo. Os processos podem ser de naturezas diversas, podendo-se citar, entre outros: Químico, biofísico, industrial, elétrico, mecânico.

As informações a respeito de um processo interessam aos profissionais envolvidos no seu estudo, projeto, melhoria ou manutenção. Podem, quase sempre, ser transformadas em sinal elétrico e registradas de alguma forma. Abaixo são listadas algumas formas de registro: papel e lápis, gravadores de fita, registrador gráfico, analisadores de espectro, osciloscópios com memória, polígrafos.

A figura a seguir ilustra um exemplo de aquisição de dados (pressão arterial, batimento cardíaco, ondas cerebrais, etc.) de um processo biofísico.

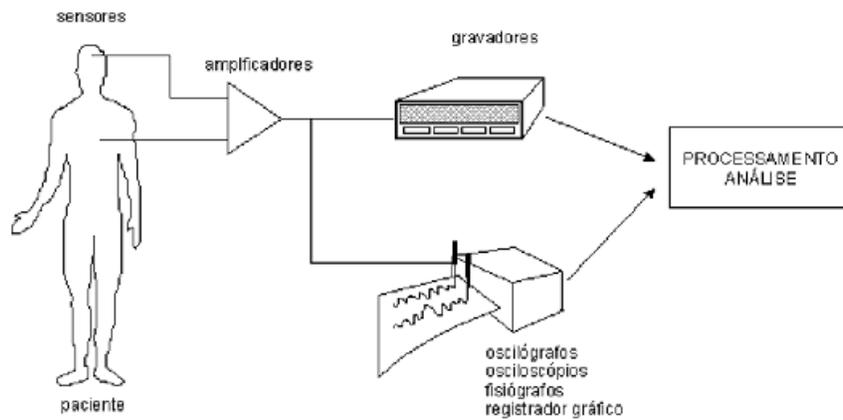


Figura 47-aquisição de dados de um processo biofísico. FONTE(LYNX).

A utilização de microcomputadores torna a aquisição de dados muito mais eficiente e confiável, se comparada a métodos tradicionais. Além disso, acrescenta uma grande vantagem: os dados já estão prontos para: análise do sinal; processamento do sinal; elaboração de relatório (gráficos e tabelas); exportação de dados para outros programas.

A figura abaixo mostra a aquisição de dados do mesmo processo da figura anterior com a utilização de microcomputador.

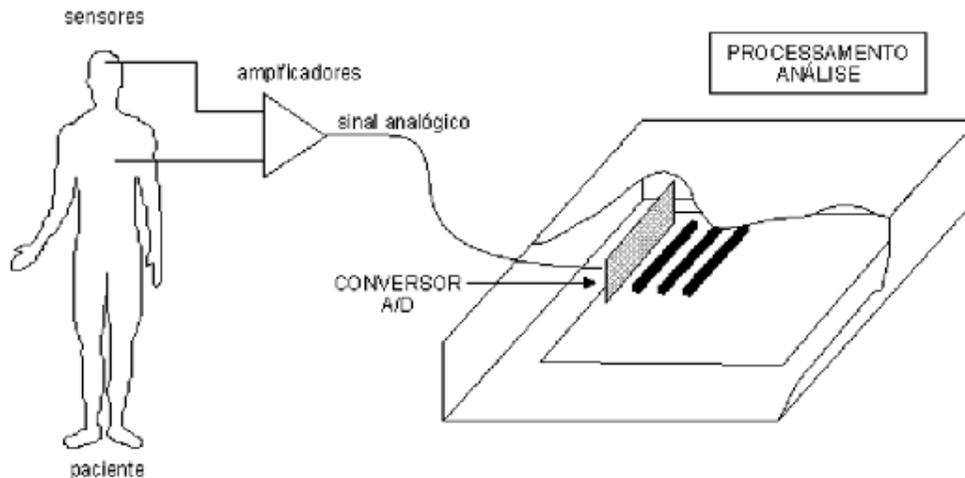


Figura 48-Utilização de microcomputador

Processo em Análise: É o objeto que se deseja estudar. O processo é analisado através do estudo de suas grandezas físicas que podem ser medidas por sensores. São exemplos: temperatura, pressão, aceleração, vazão, pressão arterial, etc.

Sensores: Sensores ou transdutores são dispositivos que convertem grandezas físicas em sinais elétricos (tensão ou corrente). São exemplos de sensores: acelerômetro: mede aceleração; termopar: mede temperatura; célula de carga: mede força.

Condicionadores: Os condicionadores são equipamentos eletrônicos que modificam o sinal de entrada de alguma forma. São exemplos de condicionamento:

Cabos: Os cabos interligam os sensores, condicionadores e placas de conversão A/D nos microcomputadores. Em geral os cabos não podem ser muito longos (principalmente se os sinais forem de tensão e de baixa amplitude). Em ambientes sujeitos a ruídos por indução eletromagnética deve-se utilizar cabos tipo manga que são compostos por pares trançados envolvidos em blindagem.

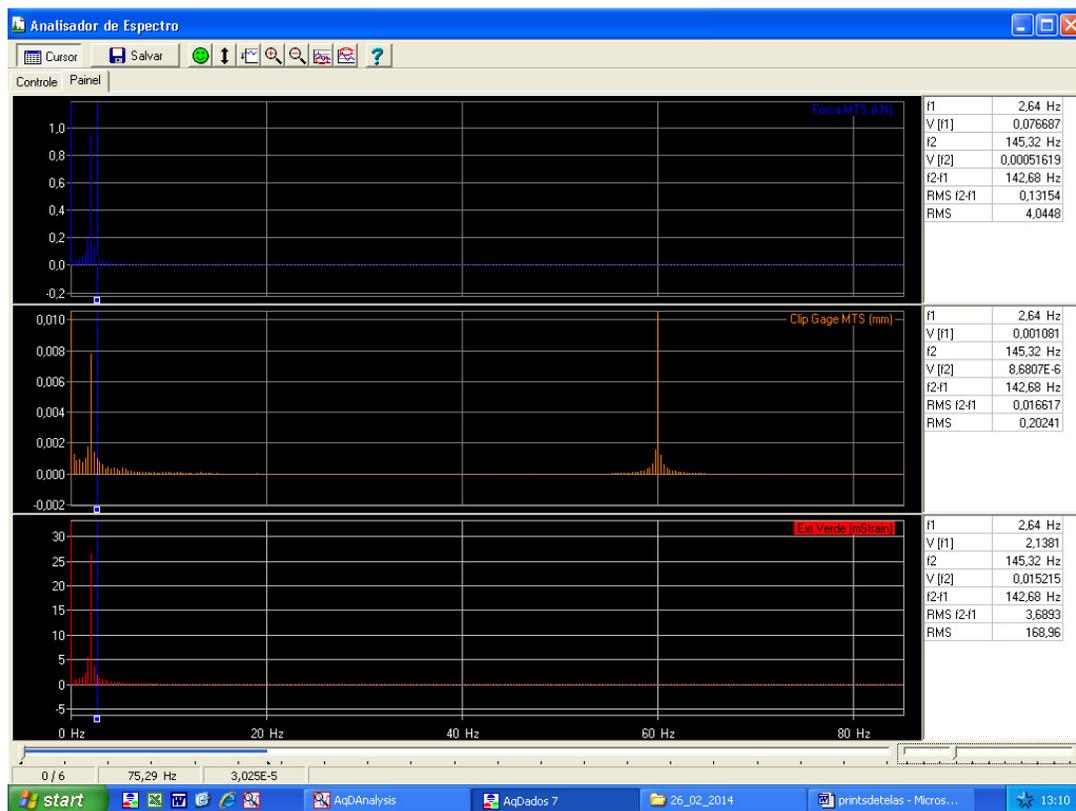


Figura 49 Problema de interferência no clippage

Conversor A/D: O conversor A/D converte um sinal analógico em dado digital. O sinal digitalizado pode então ser manipulado pelo microcomputador.

Microcomputadores e Programas: O microcomputador realiza a aquisição de dados com o conversor A/D através de programas específicos como, por exemplo, o AqDados.

O programa AqDAnalysis, que acompanha o AqDados 7, possui funções de consulta de arquivos de séries temporais, análise espectral, análise estatística, análise de rainflow e markov, análise de fadiga, análise de conforto, filtragem de sinais e operações aritméticas com séries temporais.

4.10 CONFIGURANDO AS ENTRADAS

Antes de realizar um ensaio você deve configurar os canais de entrada analógica e de entrada de contagem, especificando quais canais serão adquiridos no ensaio e as suas características, tais como: nome, unidade de engenharia, faixa de entrada do conversor A/D e fatores de conversão para unidade de engenharia.

6.1. Configuração das Entradas Analógicas

Para configurar as entradas analógicas, selecione na barra de menu do AqDados 7 o comando Ensaio / Entradas Analógicas. Ao executar o comando, é apresentada a caixa de diálogo Configuração das Entradas Analógicas.

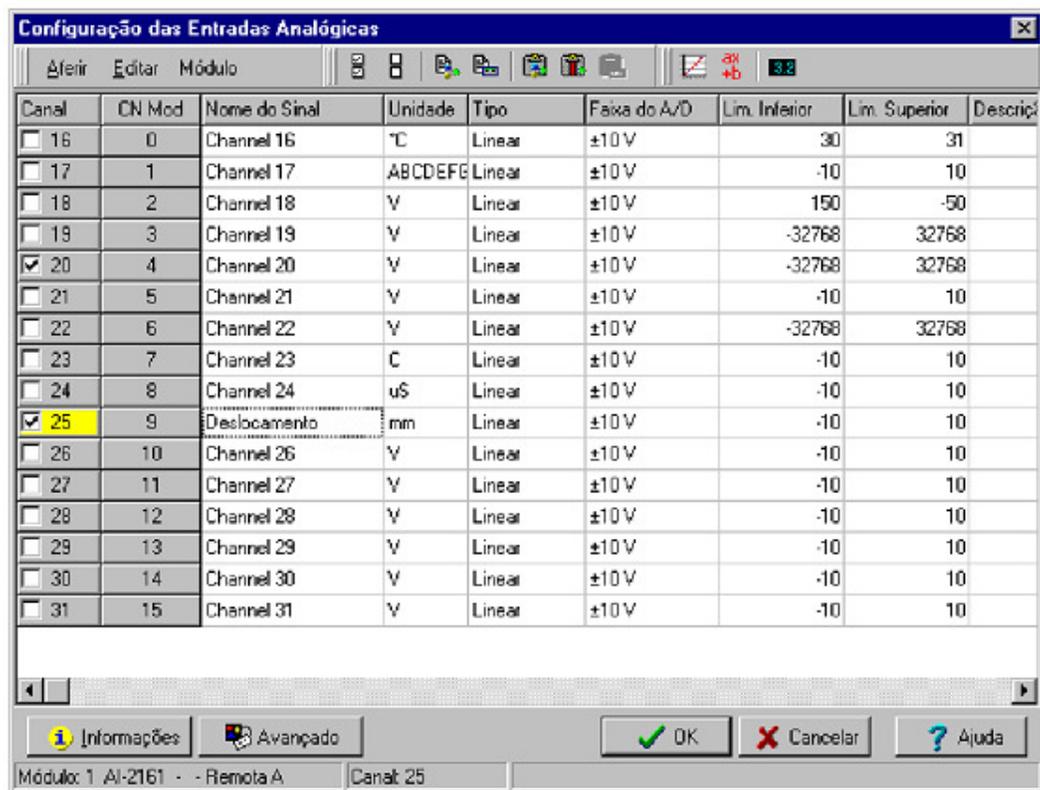


Figura 50-Configuração das Entradas Analógicas

A caixa de diálogo Configuração das Entradas Analógicas apresenta uma tabela com os canais de entrada analógica disponíveis no hardware de aquisição de sinais. Caso o AqDados 7 esteja configurado para utilizar módulos de expansão (condicionamento de sinais), a tabela de canais é apresentada por módulo de condicionamento de sinais.

As linhas da tabela correspondem aos canais de entrada analógica, enquanto que as colunas se referem aos parâmetros desses canais. Os parâmetros editáveis para cada canal de entrada analógica são:

Canal: Este campo apresenta o número do canal de entrada analógica de acordo com a numeração definida pelo AqDados. Ao lado do número do canal, é apresentada uma caixa de opção, que quando

marcada indica que o respectivo canal de entrada analógica será adquirido no ensaio. Clique nesta caixa de opção para habilitar ou inibir a aquisição do respectivo canal de entrada analógica.

CN Mod: Esta coluna é apresentada somente quando o hardware de aquisição de sinais está configurado para a utilização de módulos de expansão. A coluna apresenta o número do canal de entrada analógica no módulo condicionador de sinais.

Nome do Sinal: Edite neste campo a identificação do sinal que será lido pelo canal. Para facilitar a identificação, recomenda-se utilizar nomes que descrevam a grandeza medida pelo canal (por exemplo, Temperatura, Pressão, etc.) ou a localização do sensor (por exemplo, Forno 2, Eixo Traseiro, Asa direita, etc.). O nome do sinal é limitado a 15 caracteres.

Unidade: Edita-se neste campo a unidade de engenharia representada pelo sinal adquirido pelo canal. Exemplos: cm/s², g (aceleração), N (força), C (temperatura), etc. A unidade é limitada a 7 caracteres.

Tipo: Este campo é uma caixa de seleção que permite selecionar o tipo de sinal a ser adquirido. Normalmente o valor especificado para este parâmetro é a opção Linear. Outros tipos podem estar disponíveis, como por exemplo, tipos para linearização de termopares. Veja mais sobre linearização de termopares no apêndice A deste manual.

Faixa do A/D: Este campo é uma caixa de seleção que permite selecionar a faixa de entrada do conversor A/D a ser utilizada para a leitura do canal.

Normalmente quando se altera a faixa de entrada do conversor A/D de um canal, os campos Lim. Inferior e Lim. Superior também devem ser alterados.

Lim. Inferior: Edita-se neste campo o valor da grandeza correspondente ao limite inferior da faixa de entrada do conversor A/D especificada para o canal.

Lim. Superior: Edita-se neste campo o valor da grandeza correspondente ao limite superior da faixa de entrada do conversor A/D especificada para o canal.

Os valores do Lim. Inferior e do Lim. Superior podem ser determinados através da operação de aferição por regressão linear ou por ganho e ponto de referência, descritos a seguir neste capítulo.

Descrição: Edita-se neste campo um comentário para o canal. A descrição é limitada a 23 caracteres. Essa informação é gravada no arquivo de série temporal do ensaio quando o formato de arquivo selecionado for o *.LFT.

Menu Aferir: O menu Aferir possui comandos de auxílio à determinação dos limites de fundo de escala do canal de entrada analógica selecionado. Os comandos disponíveis no menu são:

Regressão Linear: Este comando abre uma caixa de diálogo para o cálculo dos limites de fundo de escala do canal selecionado através de aferição por regressão linear. Veja a descrição deste comando no tópico Aferição por Regressão Linear neste capítulo.

Ganho e Ponto de Referência: Este comando abre uma caixa de diálogo para o cálculo dos limites de fundo de escala do canal selecionado através de aferição por ganho e ponto de referência. Veja a descrição deste comando no tópico Aferição por Ganho e Ponto de Referência neste capítulo.

Leitura do A/D: Este comando liga/desliga a leitura dos canais de entrada analógica. A leitura dos canais é apresentada numa tabela no lado direito da caixa de diálogo. Na tabela são apresentadas as leituras em unidade da faixa de entrada do A/D e em unidade de engenharia. Quando o sinal na entrada do canal A/D está fora da faixa de entrada, os valores correspondentes a esse canal são apresentados na cor vermelha.

Aferição por Regressão Linear: Um recurso muito utilizado no AqDados, por exemplo, para a aferição de uma célula de carga, é a obtenção dos limites de fundo de escala de um canal de entrada analógica através de aferição por regressão linear. Neste método tabela-se um conjunto de pontos de tensão na entrada do canal de conversão A/D e os respectivos valores na unidade de engenharia. Com esses pontos, o AqDados determina, por regressão linear, a melhor reta que passa por esses pontos e consequentemente calcula os limites de fundo de escala para o canal, ou seja, determina os valores em unidade de engenharia correspondentes aos limites de entrada do conversor A/D utilizando a reta obtida na regressão linear.

Observe que a regressão linear só deverá ser utilizada se existir uma linearidade entre a variação do sinal lido no conversor A/D e a grandeza medida.

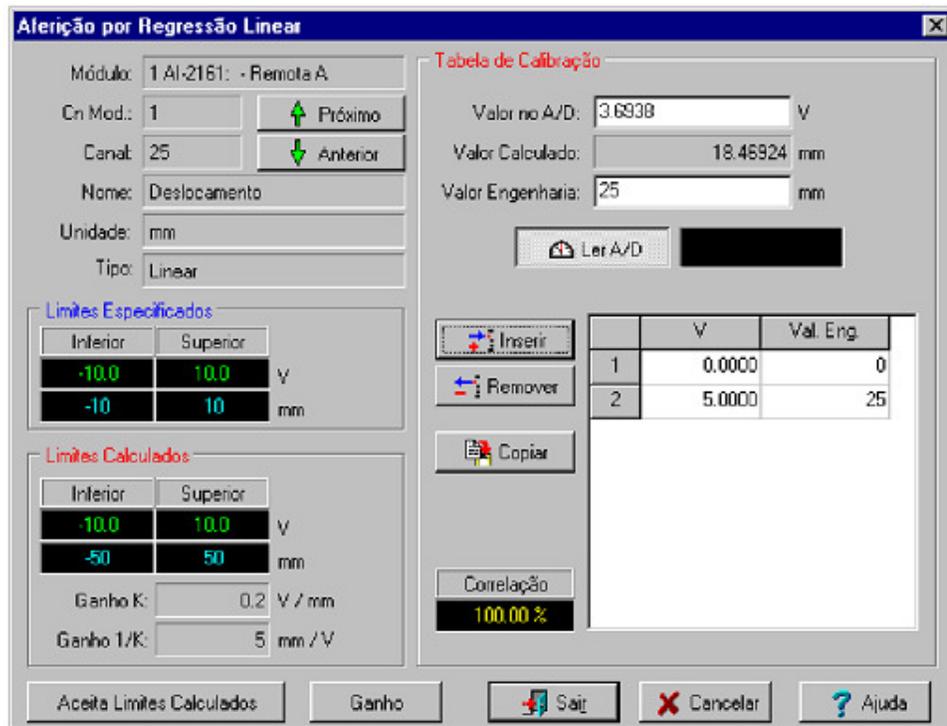


Figura 51-Tela de aferição dos canais. FONTE:(LYNX)

Devem ser seguidos os seguintes passos para aferir um canal por regressão linear:

1. Na caixa de diálogo Configuração das Entradas Analógicas, selecione o canal a ser aferido e execute o comando Aferir / por Regressão Linear ou pressione o botão correspondente. É apresentada a caixa de diálogo Aferição por Regressão Linear.

2. Remova os pontos apresentados na tabela pressionando repetidamente o botão Remover.

3. As etapas 4, 5 e 6 devem ser repetidas para cada ponto da tabela de aferição do sensor.

4. Edite no campo Valor no A/D o valor em volts do ponto a ser inserido.

5. Edite no campo Valor Engenharia o valor correspondente em unidade de engenharia do ponto a ser inserido.

6. Pressione o botão Inserir para inserir na tabela o ponto editado.

7. Repita os passos 4, 5 e 6 para os demais pontos. Devem ser inseridos no mínimo 2 pontos e no máximo 50 pontos na tabela. A partir da inserção do segundo ponto na tabela, a cada novo ponto inserido, o AqDados realiza a regressão linear dos pontos tabelados e apresenta os limites calculados e o índice de correlação.

1. Pressione o botão Aceita Limites Calculados para salvar os limites calculados.

1. Pressione o botão Anterior ou o botão Próximo para selecionar respectivamente o canal anterior e o próximo canal do módulo.

Recomenda-se que os pontos de aferição sejam bem distribuídos por toda a faixa de variação do sinal, pois não se pode confiar numa aferição realizada com pontos muito próximos e concentrados numa região pequena da faixa do sinal. O comportamento do sinal em regiões mais afastadas dos pontos utilizados não estaria representado na aferição, levando a possíveis erros de medida. Por exemplo, não é confiável aferir uma célula de carga que mede até 100 Kg utilizando-se apenas pontos abaixo de 10 Kg, quando se pretende utilizá-la para medir valores maiores que 10 Kg.

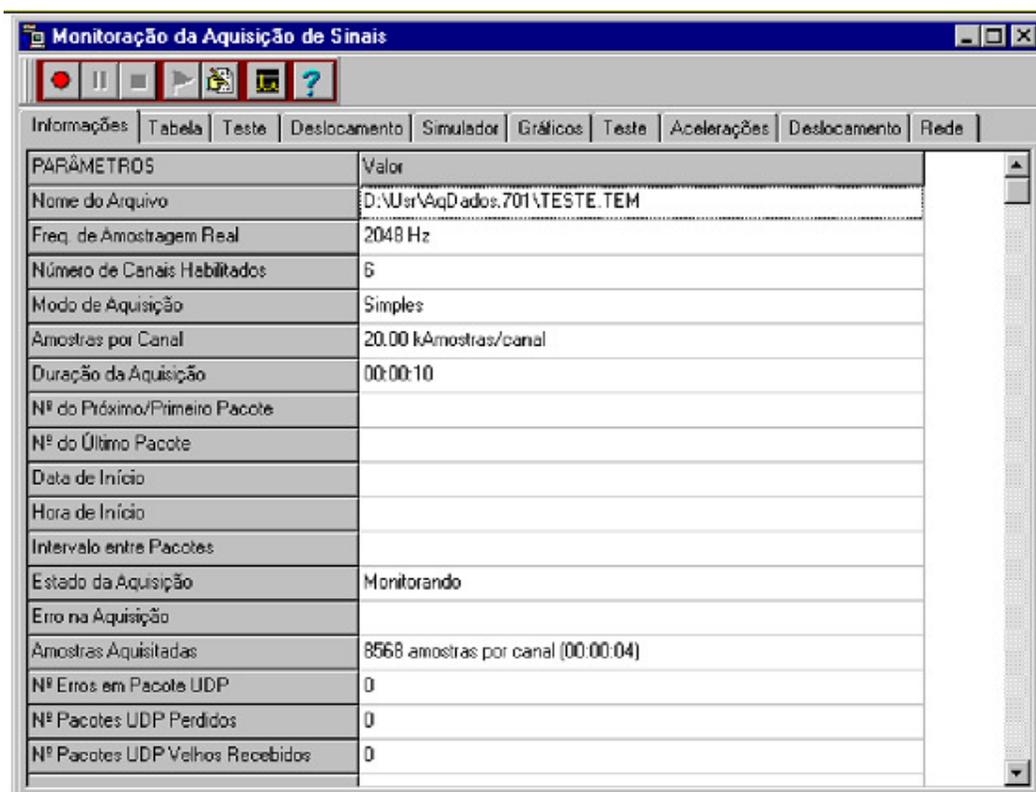
Ao introduzir valores na tabela, observe o índice de correlação. Com dois pares de valores, o índice será sempre 100% e não será possível avaliar a linearidade. Com 3 ou mais valores, a correlação dos pontos será boa se o índice de correlação for maior que 99%. Caso o índice seja ruim, várias podem ser as causas: não linearidade do sensor; saturação da tensão na entrada do canal (faixa de entrada não apropriada ao sinal); erro na edição de um valor da tabela; excesso de ruído (interferência) na leitura do sinal ou no seu condicionamento problemas diversos na placa de conversor A/D, no condicionador ou no sensor

Se a faixa de entrada do canal A/D for alterada, os limites correspondentes na unidade de engenharia também deverão ser alterados. Se você fez a última aferição do canal por regressão linear, os pontos utilizados podem ainda estar presentes na janela Aferição por Regressão Linear. Nesse caso, se esses pontos ainda forem válidos, bastará entrar novamente na caixa de diálogo da regressão linear e pressionar o botão Aceita Limites Calculados. Os limites serão atualizados conforme a nova faixa de entrada do canal A/D.

4.11 EXECUTANDO UM ENSAIO

Neste capítulo você vai tomar conhecimento dos procedimentos finais para a realização de um ensaio. Os parâmetros básicos vistos nos capítulos anteriores já devem estar devidamente configurados.

A Pasta de Informações do Ensaio



PARÂMETROS	Valor
Nome do Arquivo	D:\Usu\AqDados.701\TESTE.TEM
Freq. de Amostragem Real	2048 Hz
Número de Canais Habilitados	6
Modo de Aquisição	Simplex
Amostras por Canal	20.00 kAmostras/canal
Duração da Aquisição	00:00:10
Nº do Próximo/Primeiro Pacote	
Nº do Último Pacote	
Data de Início	
Hora de Início	
Intervalo entre Pacotes	
Estado da Aquisição	Monitorando
Erro na Aquisição	
Amostras Aquisitadas	8568 amostras por canal (00:00:04)
Nº Erros em Pacote UDP	0
Nº Pacotes UDP Perdidos	0
Nº Pacotes UDP Velhos Recebidos	0

Figura 52- Pasta de Informações do Ensaio

Na pasta Informações da janela de monitoração da aquisição de sinais são apresentadas as seguintes informações gerais da aquisição:

Nome do Arquivo: Este campo informa o nome do arquivo de série temporal onde foi ou será gravada a série temporal correspondente aos sinais aquisitados.

Freq. de Amostragem Real: Informa a frequência de amostragem em Hz em que os sinais estão sendo amostrados.

Número de Canais Habilitados: Este campo informa o número de canais de entrada que foram habilitados para a aquisição na configuração de entradas analógicas de contagem de pulso.

Amostras por Canal: Neste campo é informado o número de amostras que serão aquisitados por canal. Corresponde à duração programada para a aquisição, em segundos, multiplicada pela frequência de amostragem.

Duração da Aquisição: Informa o valor programado para a duração da aquisição de sinais dada em horas, minutos e segundos. Se o modo de aquisição especificado for do tipo ensaio múltiplo, este campo correspondente à duração de cada pacote de aquisição.

Estado da Aquisição: Este campo informa o estado atual da aquisição: Monitorando ou Gravando. No estado Monitorando, os sinais estão sendo aquisitados, porém não estão sendo gravados em disco. No estado Gravando, os sinais estão sendo aquisitados e gravados no arquivo de série temporal especificado. Em ambos os estados, os sinais podem ser visualizados em forma gráfica temporal ou através de valores numéricos.

Erro na Aquisição: Apresenta uma mensagem de erro caso ocorra algum erro grave na aquisição dos sinais.

Amostras Adquiridas: Informa o número de amostras aquisitadas por canal até o momento.

4.12 VISUALIZANDO GRAFICAMENTE OS SINAIS

A janela Monitoração da Aquisição de Sinais possui, além das pastas Informações e Tabelas descritas anteriormente, pastas configuráveis pelo usuário onde se podem visualizar os sinais correspondentes aos canais de entrada habilitados para a aquisição. Essas pastas podem conter de 1 a 8 gráficos temporais ou xy, cada um deles podendo ser configurado para apresentar um dos canais de entrada habilitados para aquisição nos eixos x e y. A Monitoração da Aquisição de Sinais pode ter de 1 a 16 pastas de visualização de gráficos.

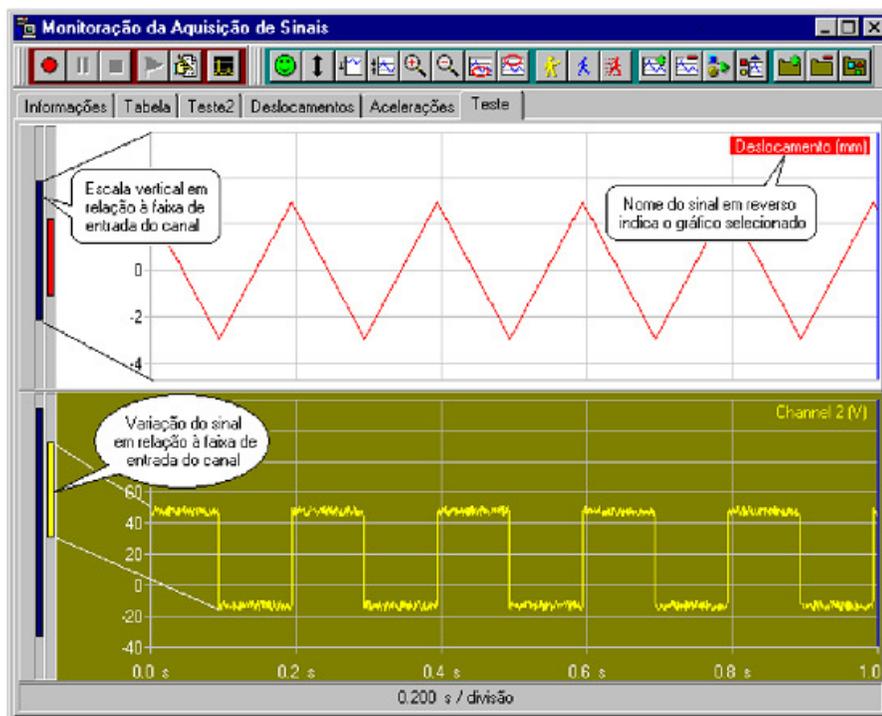


Figura 53 – Visualização dos canais

A figura acima ilustra a janela Monitoração da Aquisição de Sinais para gráficos temporais, onde uma pasta de gráficos está selecionada. A pasta Teste está configurada para apresentar dois gráficos, respectivamente com os sinais Deslocamento e Channel 2. No lado esquerdo de cada gráfico são apresentadas duas barras verticais. A barra mais à esquerda representa a escala vertical em relação à faixa de entrada do canal A/D. A outra barra indica a variação do sinal, visível no gráfico, em relação à faixa de entrada. Na parte inferior do último gráfico da pasta é apresentada a escala de tempo que é a mesma para todos os gráficos. A escala de tempo é ajustada por comandos, descritos mais a frente neste tópico, que permitem controlar a varredura horizontal.

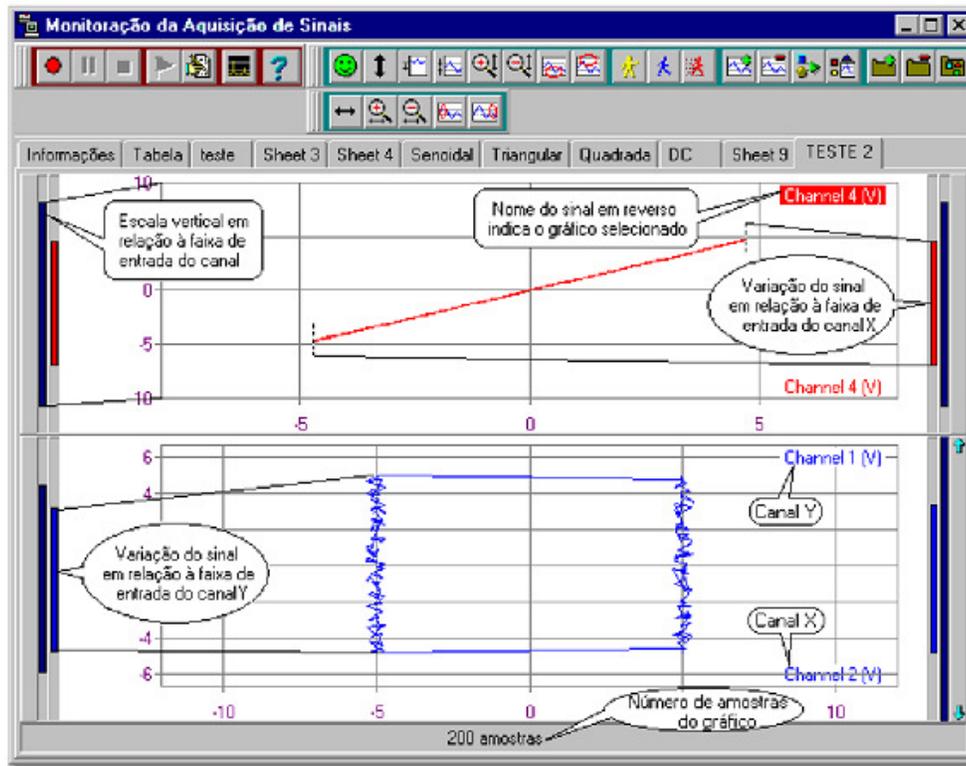


Figura 54 – Monitoração da aquisição

A figura acima ilustra a janela Monitoração da Aquisição de Sinais para gráficos XY. A pasta Teste 2 está configurada para apresentar dois gráficos, respectivamente com os sinais Channel 4 x Channel 4 no primeiro gráfico e Channel 1 x Channel 2 no segundo gráfico. No lado esquerdo de cada gráfico são apresentadas duas barras verticais. A barra mais à esquerda representa a escala vertical em relação à faixa de entrada do canal A/D. A outra barra indica a variação do sinal, visível no gráfico, em relação à faixa de entrada. No lado direito de cada gráfico também são apresentadas duas barras verticais. A barra mais à direita representa a escala horizontal em relação à faixa de entrada do canal A/D. A outra barra indica a variação do sinal, visível no gráfico, em relação à faixa de entrada. Na parte inferior do último gráfico da pasta é apresentado o número de amostras que compõem o gráfico.

Quando o sinal selecionado para o gráfico assume valores fora da faixa da escala vertical do gráfico, o AqDados satura a apresentação dos respectivos valores das amostras do sinal no limite

superior ou inferior da escala vertical, indicando que o valor da amostra se encontra, respectivamente, acima do limite superior ou abaixo do limite inferior da escala vertical.

4.13 PASTA DE INFORMAÇÕES DO ENSAIO

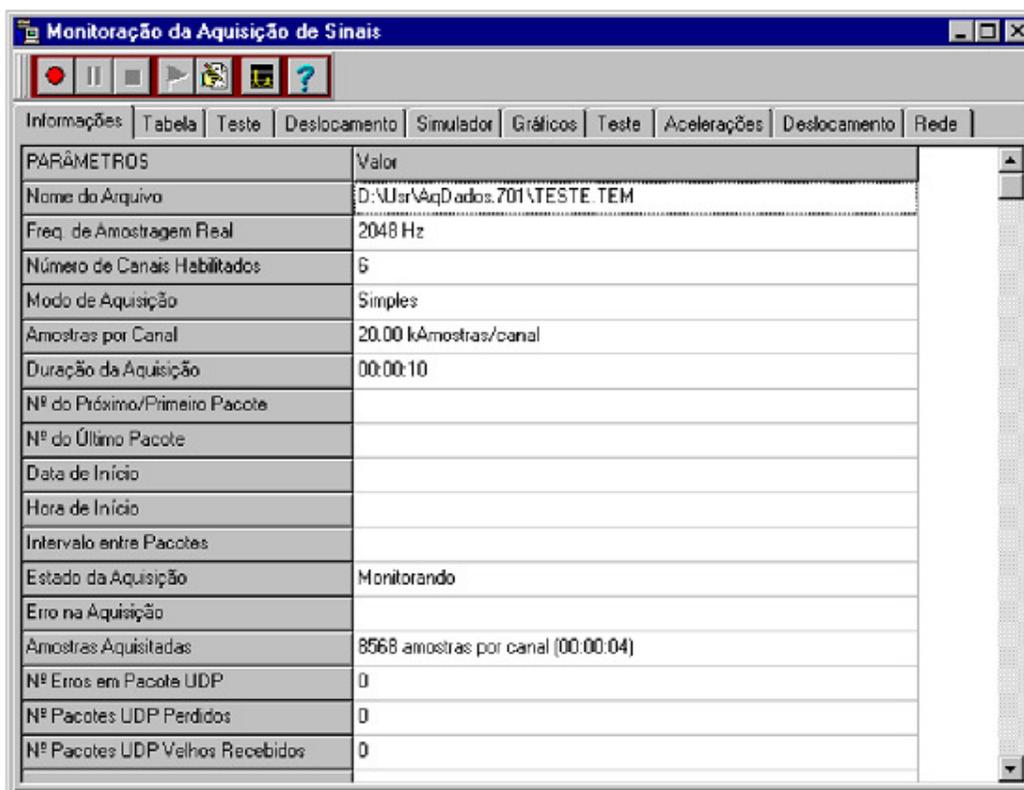


Figura 55 - Pasta de Informações

Na pasta Informações da janela de monitoração da aquisição de sinais são apresentadas as informações gerais da aquisição

4.14 OPERANDO UM ENSAIO SIMPLES

Visualize graficamente os sinais e quando o seu experimento estiver pronto para iniciar o registro dos sinais em disco, pressione o botão Rec para iniciar a gravação. Assim como na fase de monitoração, durante a aquisição com gravação você pode acompanhar a aquisição dos sinais através de displays numéricos, visualização gráfica dos sinais ou visualização dos espectros dos sinais. Decorrido o intervalo de tempo especificado para a duração da aquisição ou depois de pressionado o botão Stop, a aquisição e a gravação dos sinais em disco são encerradas e o ensaio finaliza-se. As pastas de gráficos, displays numéricos e a janela do analisador do espectro não são mais atualizados. Feche a janela Monitoração da Aquisição de Sinais.

Este equipamento, o software de aquisição de dados e o software de controle da MTS, que transmitiram 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

5 METODOLOGIA DE MONITORAÇÃO

5.1 INTRODUÇÃO

O ensaio de propagação de trincas é a base do projeto para se obter a identificação do fenômeno de fechamento de trinca, pois ele é o responsável por difundir a trinca através do corpo de prova que é a fonte de estudo. É o tamanho dessa trinca que se deve determinar e conseqüentemente usar a metodologia proposta por Elber. Por isso é essencial que o ensaio seja metódico e configurado para os dados que se deseja obter.

5.2 CONFIGURAÇÃO DO ENSAIO DE PROPAGAÇÃO DE TRINCAS

A montagem e configuração da MTS 810 para o ensaio de propagação de trincas de fadiga está especificada no Apêndice 2.

5.3 MONITORAMENTO DOS DADOS GERADOS

Os dados obtidos do ensaio de propagação de trincas serão analisados pelo programa da MTS o *Fatigue Crack Growth Template*, 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. Esses dados serão armazenados no computador de monitoramento dos ensaios e depois serão tratados afim de se obter os gráficos comprobatórios da identificação do fenômeno

5.4 DECISÕES

Algumas decisões foram tomadas no que tange o ensaio de propagação de fadiga para a obtenção de subsídios para a identificação do fenômeno. Os quais serão explicados neste tópico.

Corpo de prova: foi escolhido o corpo de prova do tipo C(T) pois é o que mais tem subsídio na literatura quando se trata do método de deformação da face traseira. Outros motivos é porque 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 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, que é o anexo A1.5.2.1 da norma ASTM E647.

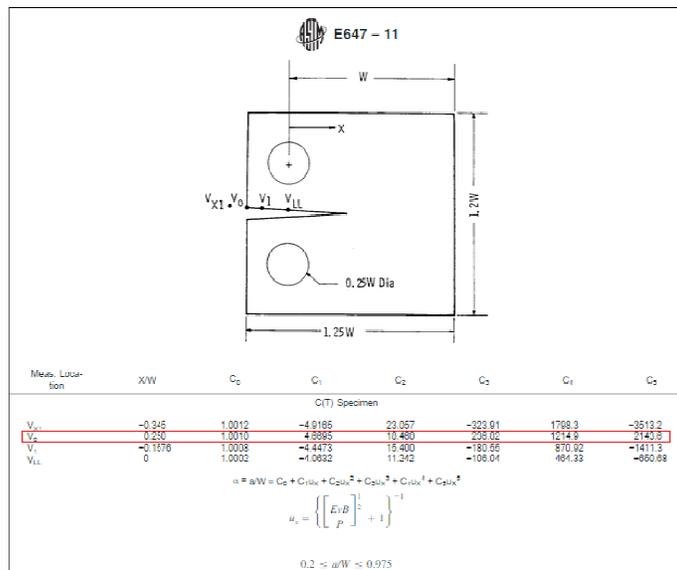


Figura 56 - Tamanho de trinca normalizado como função do compliance do plano de trabalho elástico para corpos de prova do tipo C(T). (ASTM E647, 2011)

A razão de carregamento, Load Ratio R, é uma variável do ensaio, sendo que para os ensaios realizados neste trabalho o R foi de 0,33.

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 correspondente deste relatório, o menor extensômetro disponível no laboratório.

Estudos de Deans e Richards, mostraram que a posição ideal para localização do extensômetro na face traseiro 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 KIC. 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 .

Por estar em um estado adimensional os dados de *compliance* 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 3 Hz, para os ensaios. Nestes ensaios o valor da força é mantida constante e o valor de K aumenta à medida que a trinca se propaga. Tal frequência tão baixa quando comparada aos ensaios corriqueiros é porque aumenta a capacidade de obtenção de dados em cada

ciclo de carga, Característica essa necessária para a otimização da capacidade de identificação do fenômeno de fechamento de trinca.

Realizado em microscópio ou telescópio, 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 mesma 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 e não requer um corpo de prova se comportando 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, não tem como ser automatizado, logo consome tempo e necessita de superfícies acessíveis e em condições de perfeito polimento.

5.5 MÉTODO ÓTICO

Realizado em microscópio ou telescópio, 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, Tem como vantagem o fato de ser um método barato, que não requer calibrações e não requer um corpo de prova se comportando 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, não tem como ser automatizado, logo consome tempo e necessita de superfícies acessíveis e em condições de perfeito polimento.

A MTS possui também um sistema de monitoramento dos dados por ela colhido. Neste ensaio por se tratar de um ensaio de crescimento de trincas por fadiga, o método utilizado será o MTS Fatigue Crack Growth TestWare, existem outros como o MTS Compliance Crack Monitor, o Basic TestWare e o MTS Fracture Toughness TestWare, dentre outros como já citados nesse trabalho, cada um com suas especificações que variam com o propósito do ensaio.

Esse software interno é capaz de controlar e ao final do ensaio fornecer curvas essenciais para o processo de propagação de trincas como:

Gráfico soma dos quadrados residuais 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.

5.6 FATIGUE CRACK GROWTH TEMPLATE DA MTS

A MTS possui também um sistema de monitoramento dos dados por ela colhido. Neste ensaio por se tratar de um ensaio de crescimento de trincas por fadiga, o método utilizado será o MTS Fatigue Crack Growth TestWare, existem outros como o MTS Compliance Crack Monitor, o Basic TestWare e o MTS Fracture Toughness TestWare, dentre outros como já citados nesse trabalho, cada um com suas especificações que variam com o propósito do ensaio.

Esse software interno é capaz de controlar e ao final do ensaio fornecer curvas essenciais para o processo de propagação de trincas como:

Gráfico soma dos quadrados residuais 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.

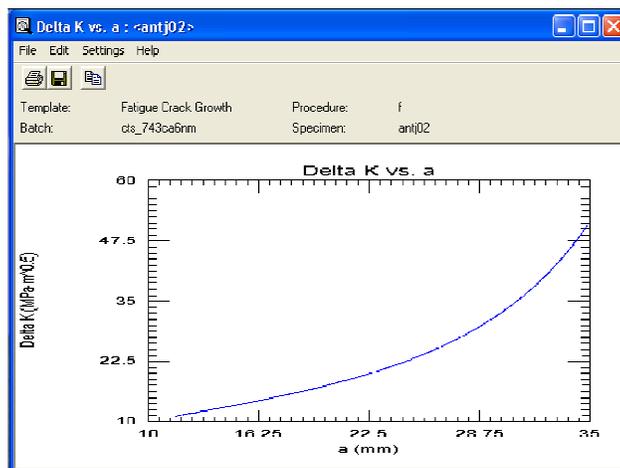


Figura 57 - Exemplo de dado gerado pela MTS. Delta K por COD.

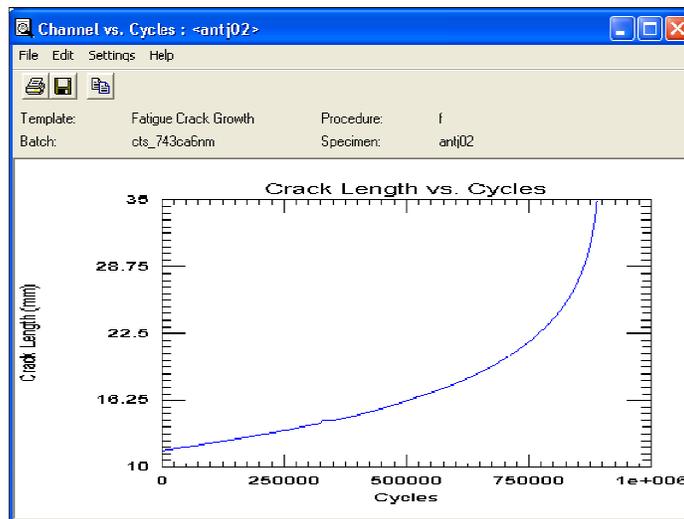


Figura 58 - Configuração das Entradas Analógicas

5.7 MONITORAMENTO DO TAMANHO DA TRINCA PELO BFS

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 aquisitor, através da ligação por três fios nas entradas (E,+ e o terra) no canal que será utilizado, como mostra a **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, as outras pontas do fio são unidas em duas pontas que vão em um fio do extensômetro e outro que vai na outra saída do mesmo. O monitoramento é feito de maneira simultânea às deformações na peça, porém a gravação dos dados é feita de acordo com o tempo que o usuário programa o aquisitor. É possível acompanhar os dados de deformação em cada canal que foi ajustado e devidamente calibrado para extensometria.



Figura 59 – Entradas analógicas.

Já os dados de força e deslocamento que vem da MTS também podem ser lidos pelo aquisitor AQDados para que o programa também faça as correlações entre as forças que estão entrando e a

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

6 TRATAMENTO DOS DADOS

6.1 COVERSÃO DOS DADOS .LTD PARA .MAT

Os dados coletados e armazenados, no computador de aquisição, têm como característica a sua extensão “.LTD”. Para a conversão desse tipo de mídia para uma extensão legível em MatLab (.mat) é usado o aplicativo “HdrLTD2Mat4”.

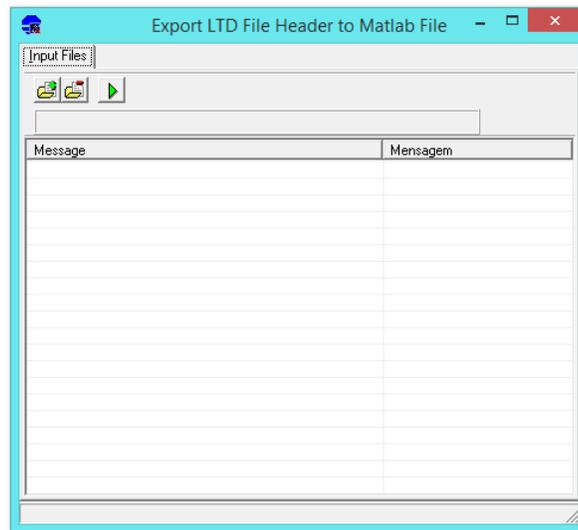


Figura 63 - Configuração das Entradas Analógicas

Tal característica torna possível um tratamento eficiente e permite ao pesquisador já familiarizado com a linguagem do MatLab, conforto no trabalho. Todas as funções presentes nas programações também só podem ser alimentadas por esse tipo de arquivo (.mat), o que leva quase a obrigatoriedade de seu uso

6.2 PROGRAMAS E FUNÇÕES UTILIZADAS

A programação que será utilizada no contexto de identificação do fenômeno de fechamento de trinca em fadiga está transcrita no anexo 2. Ela consiste em diversas funções de leitura dos arquivos gerados em ensaio e na geração de gráfico comprobatório do fenômeno.

- **FUNÇÃO LYNXGENG:** Essa função chamada através do comando abaixo:

```
“function [x, pos, nr, HDST, tempo, ok] = lynxgeng (filename, canal, pos, n)”
```

Onde “x” é uma matriz com “nr” linhas por “canais” colunas. O “nr” é justamente o número de amostras por canais. Os dados do cabeçalho do arquivo AqDados .tem é devolvido em HDST.Em “pos”, a exemplo do HDST, é devolvida a nova posição de índice de amostra no arquivo. O elemento “tempo” é um array (vetor) que contém o tempo de cada amostra.

- **[X, POS, NR, HDST, TIME, OK] = LYNXGENG (FILENAME)**

Essa função é capaz de lê todas as amostras de todos os canais do arquivo Lynx AqDados .tem especificado em FILENAME. Essa função retorna “-1” no caso de erro ou “0” em caso de sucesso.

- **[X, POS, NR, HDST, TIME, OK] = LYNXGENG (FILENAME, CHANNEL)**

Lê todas as amostras do canal especificado no parâmetro do canal(CHANNEL). Deve-se Especificar “1” em “CHANNEL” para ler o primeiro canal ativo do arquivo,2 para ler o segundo canal ativo, e assim por diante. Quando 0 ou -1 é passado para esta função, todos os canais ativo serão lidos.

- **[X, POS, NR, HDST, TIME, OK]=LYNXGENG (FILENAME, CHANNEL, POS, N)**

Lê “N” amostras do canal especificado no parâmetro CHANNEL iniciado em POS-th amostra do ficheiro. Se o valor 0 ou -1 for passado para o parâmetro N, as amostras restantes no arquivo serão lidas.Por exemplo, para ler 256 amostras do segundo canal início da 1024º usar a amostra com o comando:

[X, pos, NR] = lynxgeng ('demodado.tem', 2, 1024, 256);

[X, pos, NR] = lynxgeng ('demodado.ltd', 2, 1024, 256);

- **FUNÇÃO LINXINFO**

Essa função chamada através do comando abaixo:

“funcion [HDST, ok] = lynxinfo (filename)”

Ela é capaz de ler os dados do cabeçalho do arquivo Lynx AqDados .tem especificado em “filename” após isso ela retorna “-1” no caso de erro ou 0 em caso de sucesso. O cabeçalho do arquivo Lynx AqDados .tem são retornados em HDST, que é um tipo de estrutura com a seguinte estrutura de campos:

DTHR: 7 elementos matriz com data e hora da aquisição.

DTHR (1): dia

DTHR (2): mês

DTHR (3): ano

DTHR (4): hora

DTHR (5): minuto

DTHR (6): segundo

DTHR (7): MS

COMMENT: linha com comentário da aquisição.

NC: número de canais

FS: frequência de amostragem em Hz

NS: número de amostras por canal

NAME: matriz de elementos NC com nomes de canais

UNIT: matriz de elementos NC com unidades de canais de engenharia

SUP: matriz de elementos NC com canais A / D no limite superior unidade de engenharia

INF: matriz de elementos NC com limite de canais A / D mais baixo no unidade de engenharia

NE: número de eventos

EV: matriz de elementos NE com evento "tempo" (no índice de amostra)

Para acessar os dados da estrutura de HDST é muito simples. Por Exemplo, o nome do primeiro canal ativo é acessado por: Hdst.name (1)

A “lista de canais retornados em NAME, UNIT, SUP e INF corresponde apenas ao canal ativo no arquivo “.tem”.

- **FUNÇÃO LYNXINFO_LTD**

Essa função chamada através do comando abaixo:

```
“function [HDST, ok] = lynxinfo_ltd (filename)”
```

A função desta é ler o cabeçalho do arquivo Lynx AqDados LTD o qual foi especificado em “filename”. A informação é armazenada em um arquivo criado por HdrLTD2Mat4.exe. Se o procedimento foi corretamente feito a função retorna “0”. Os dados do cabeçalho do Lynx AqDados LTD são devolvidos em HDST, que foi mostrado acima.

Para acessar os dados no struct HDST é muito simples. Por exemplo, o nome do primeiro canal ativo é acessado por:

```
Hdst.l_name (1,1: 15)
```

A lista de canais retorna em NAME, UNIT, SUP e INF corresponde apenas ao canal ativo no arquivo LTD.

- **FUNÇÃO LYNXINFO_TEM**

Essa função chamada através do comando abaixo:

```
“function [HDST, ok] = lynxinfo_tem (filename)”
```

A exemplo da função “lynxinfo_ltd” essa lê os dados do cabeçalho do arquivo Lynx AqDados. especificado em FILENAME. Se o procedimento foi “ok”, ela retorna “-1” no caso de erro ou 0 em caso de sucesso. O cabeçalho dos dados Lynx AqDados .tem é retornado em HDST, que é uma estrutura com os seguintes campos:

DTHR: 7 elementos matriz com data e hora da aquisição.

DTHR (1): dia

DTHR (2): mês

DTHR (3): ano

DTHR (4): hora

DTHR (5): minuto

DTHR (6): segunda

DTHR (7): MS

COMMENT: string com comentário da aquisição.

NC: número de canais

FS: frequência de amostragem na Hz

NS: número de amostras por canal

NAME: matriz de elementos NC com nomes de canais

UNIT: matriz de elementos NC com unidades de canais de engenharia

SUP: matriz de elementos NC com canais A / D no limite superior unidade de engenharia

INF: matriz de elementos NC com limite de canais A / D mais baixo no unidade de engenharia

NE: número de eventos

EV: matriz de elementos NE com evento "tempo" (no índice de amostra)

Para acessar os dados no struct HDST é muito simples. Por Exemplo, o nome do primeiro canal ativo é acessado por:

`"Hdst.name (1)".`

A lista de canais retornou em NAME, UNIT, SUP e INF corresponde apenas para o canal ativo no arquivo .tem.

FUNÇÃO: LYNXTURBINADO

Essa função chamada através do comando abaixo:

`"function [x, pos, nr, HDST, tempo, ok] = lynxturbinado (filename, canal, pos, n)"`

A função lynxturbinado é capaz lê todas as amostras de todos os canais do arquivo Lynx AqDados .tem especificado em "FILENAME". Se o procedimento deu certo, retorna "-1" no caso de erro ou "0" em caso de sucesso. X é matriz Com NR linhas por número de canais cols. NR é o número de amostras por canais. Os dados do cabeçalho do arquivo AqDados .tem são devolvidos em HDST.

No lugar de "POS" É devolvido a nova posição de índice de amostra no arquivo. TEMPO é um array com o tempo de cada amostra.

`[X, POS, NR, HDST, TIME, OK] = LYNXGENG (FILENAME, CHANNEL)` lê todas as amostras do canal especificado no parâmetro do canal.

Deve-se especificar 1 em "CHANNEL" para ler o primeiro canal ativo do arquivo, 2 Para ler o segundo canal ativo, e assim por diante. Quando 0 ou -1 é passado para esta função, todos os canais ativos serão lidos.

`[X, POS, NR, HDST, TIME, OK] = LYNXGENG (FILENAME, CHANNEL, POS,N)`

Lê N amostras do canal especificado no parâmetro "CHANNEL" iniciando na posição de numero "POS" do arquivo. Se 0 ou valor -1 é passado para parâmetro N, as amostras restantes no arquivo serão lidas. Por exemplo, para ler 256 amostras do segundo canal inícioem 1024° deve-se usar o comando:

`[X, pos, NR] = lynxgeng ('demodado.tem', 2, 1024, 256);`

- **PROGRAMA BACKFACE**

Esse é o programa mais importante no processo de tratamento de dados. Ele é capaz chamar as funções acima e isolar alguns poucos ciclos de carga para que se faça o tratamento matemático da deformação da face traseira e dos dados provenientes da MTS como também mostra o comportamento do gráfico Força X Deformação que no caso desse projeto deve apresentar um aspecto de curvo.

Para o tratamento matemático de transformação da deformação da face traseira em tamanho detrinca, foi usado o polinômio proposto por Newman Jr e Yamada em 2011.

$$\frac{a}{W} = 1.0033 - 2.35U + 1.3694U^2 - 15.294U^3 + 63.182U^4 - 74.42U^5 \quad (49)$$

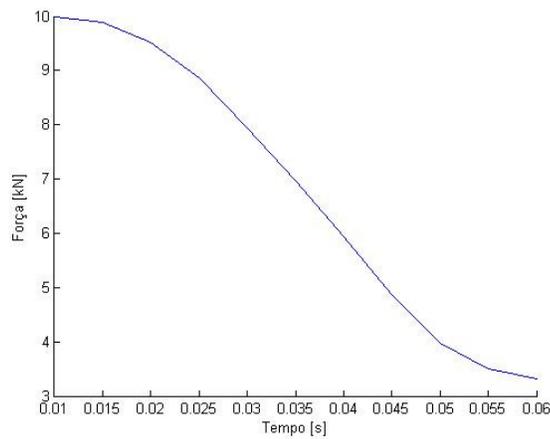


Figura 57 gráfico gerado pelo programa BACK, Força X Tempo

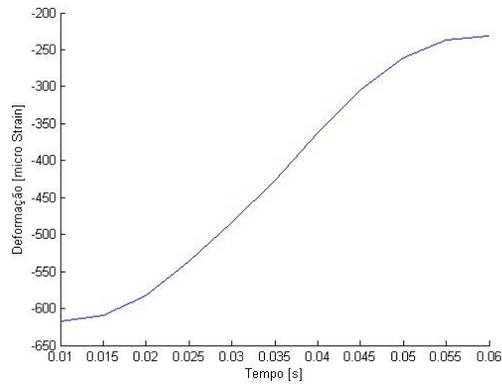


Figura 65 - Gráfico gerado pelo programa BACK, Deformação X Tempo

Nota-se uma diferença de fase entre a deformação e a força aplicada em um mesmo corpo. Fato explicado em razão de a coleta da deformação ter sido feita na fase traseira do corpo de prova. Ou seja, quando se traciona uma face, ocorre compressão na outra.

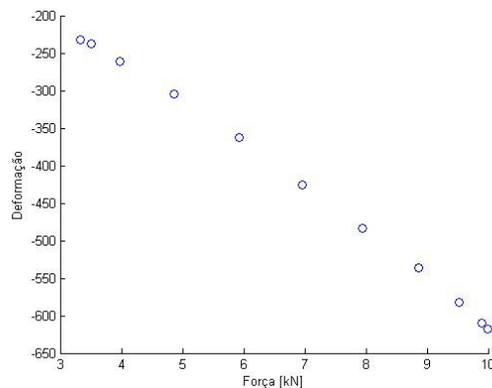


Figura 58 - Gráfico gerado pelo programa BACK, Deformação X Força

Nota-se uma pequena curva nesse gráfico característico do fenômeno de fechamento de trinca. Para melhorar essa identificação foi proposto nesse trabalho o aumento da taxa de aquisição e a redução da frequência de ensaio. O que poderá ser visualizado nos resultados.

- **PROGRAMA AJUSTEBILINEAR**

A proposta inicial do presente trabalho foi a de uma implementação de uma rotina em MatLab, o qual permitiria obter o ajuste bilinear dos dados coletados, ajuste esse necessário pela natureza do fenômeno de fechamento de trinca como já mostrado na figura 5. Essa rotina foi implementada seguindo alguns preceitos do Cálculo Numérico como Método dos Mínimos Quadrados e permite que se faça o ajuste dos dados já traduzidos do tipo .LTD para .mat pelo aplicativo HdrLTD2Mat4.

Ao ser inserido no programa um conjunto de pontos cartesianos ajustáveis em duas retas o aplicativo é capaz de gerar tais linhas como pode ser visto na figura a seguir:

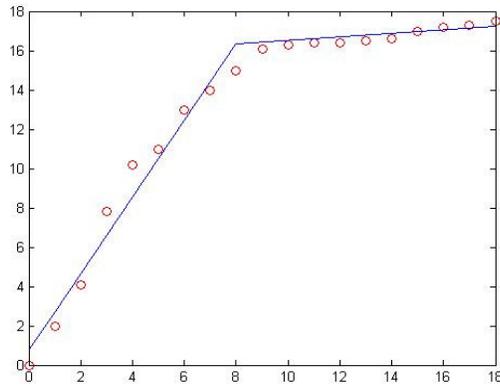


Figura 67 - Configuração das Entradas Analógicas

O ajuste é feito tomando-se alguns “n” primeiros pontos mais próximos a origem dos eixos, para que se aplique nestes o método numérico dos mínimos quadrados, e a partir do último ponto obtido por esse método, busca-se uma inclinação ótima para ajustar os pontos ainda não tomados.

Logo após a obtenção dessas duas retas, a obtida pelo MMQ e a plotada usando o último ponto da primeira e a inclinação ótima, o programa calcula a soma dos desvios quadráticos das retas em relação aos pontos dados e guarda esse valor.

Nas etapas seguintes são feitos os mesmos procedimentos passados mas não mais com os “n” primeiros pontos mas sim com os “n+1” primeiros pontos. Ou seja, aumenta-se a cada etapa o número de pontos para o primeiro ajuste.

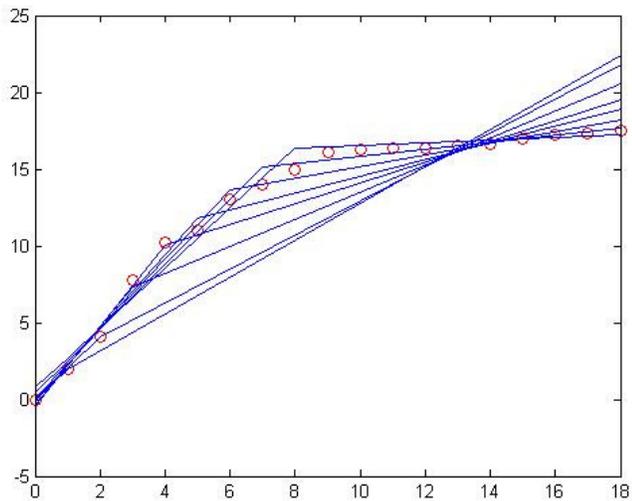


Figura 68 - Configuração das Entradas Analógicas

Tendo todos os desvios quadráticos das retas em relação aos pontos dados em memória o programa identifica o par de retas que possui o menor desvio e plota essas duas retas. Mais detalhes são descritos como comentários na própria programação vide anexo 2

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.

PROCEDIMENTO PARA COLAGEM E CALIBRAÇÃO DOS EXTENSÔMETROS

Este apêndice tem o objetivo de servir como um guia passo a passo para o processo de colagem e calibração dos extensômetros. 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.

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 59- 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 60. 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.

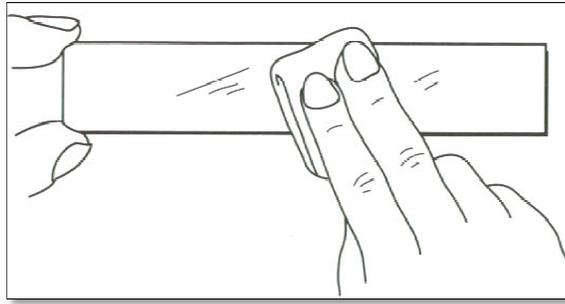


Figura 60 - Limpeza da superfície, previa à colagem do extensômetro. (KYOWA, 2004)

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 61)

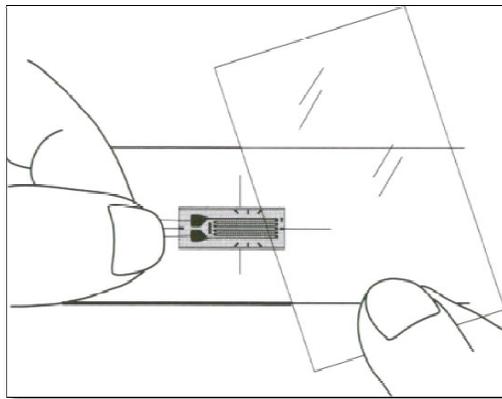


Figura 61 - Posicionamento do extensômetro na amostra. (KYOWA, 2004)

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 62)

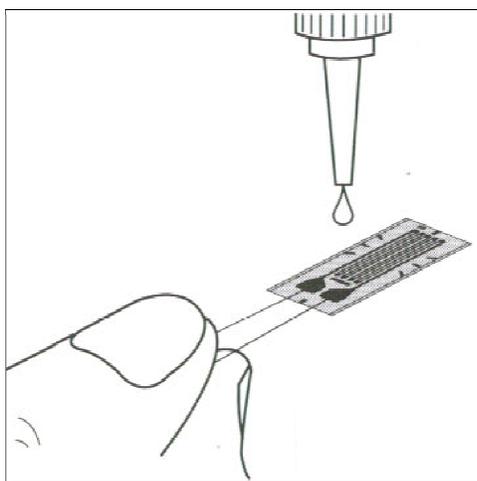


Figura 62 - Colocação de cola (super bonder®) no extensômetro. (KYOWA, 2004)

Com uma almofada de silicone, o ERE é mantido pressionado contra corpo de prova por aproximadamente 1 minuto. (Figura 63)

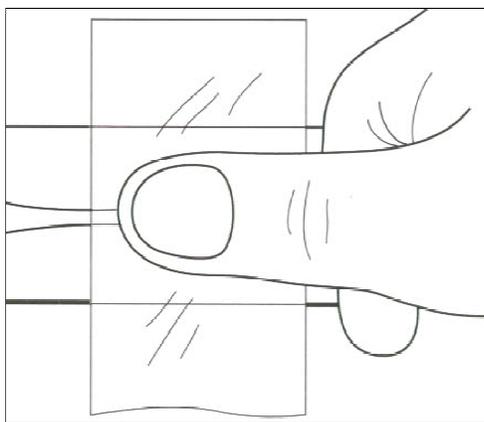


Figura 63 - Colagem do extensômetro na amostra. (KYOWA, 2004)

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. **(Erro! Fonte de referência não encontrada.)**



Figura 64- Corpo de Prova pronto

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 , 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 6565. Neste experimento ele foi ajustado na faixa de medição de 100 μS .



Figura 65 - 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:

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

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 abaixo.

Aquisitor de Dados – LINX – MTS
Modelo ADS 2000
Serial Number: 36015
Rcal1 = 57642 ohms
Rcal2 = 191311 ohms
Rcal3 = 579325 ohms

$$ShuntEng = \left[-\frac{1}{k} \left(\frac{R_G}{R_{cal} + R_G} \right) \right] * 10^6$$

Obs: Verificar qual Rcal utilizar a partir dos dados de Gage Resistance (R_G), Gage Factor (k) e deformação correspondente em μS . Para um extensômetro com $R_G=120$ ohm e $k=2$, o Rcal1 é utilizado para deformações na faixa de $100 \mu S$, o Rcal2 para deformações na faixa de $300 \mu S$ e o Rcal3 para deformações na faixa de $1000 \mu S$.

Figura 66 - 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 abaixo.



Figura 67 - Aba Avançado da configuração do AQDados.

Configuração das Entradas Analógicas do Módulo AI-2161

Canal	CN Mod	Nome do Sinal	Unidade	Faixa do A/D	Ganho	Chaves de Ganho	Filtro Passa Baixas	Balanco	Reposuo	Reposuo Eng	Shunt Cal	Shunt Eng
0	0	0	0	0	0	JSH0 Sw7:OFF Sw8:OFF		0,0725 V	0,0723 V		-10,0000 V	
1	1	Canal 01	mStrain	±10 V		JSH1 Sw7:OFF Sw8:ON		-0,0430 V	-0,0430 V		-10,0000 V	
2	2	Canal 02	mStrain	±10 V		JSH2 Sw7:OFF Sw8:ON		0,7759 V	0,7761 V		-10,0000 V	
3	3	Canal 03 Basic	mStrain	±10 V		JSH3 Sw7:OFF Sw8:ON		-0,0201 V	-0,0201 V		-10,0000 V	
4	4	Canais side 2	mStrain	±10 V	x 2000	JSH4 Sw7:OFF Sw8:ON	100 Hz	0,0021 V	0,0024 V	0	-5,0720 V	-989,28101
5	5	Canais back 1	mStrain	±10 V	x 2000	JSH5 Sw7:OFF Sw8:ON	100 Hz	0,0104 V	0,0107 V	0	-5,1721 V	-989,28101
6	6	Canais side 3	mStrain	±10 V	x 2000	JSH6 Sw7:OFF Sw8:ON	100 Hz	-0,0055 V	-0,0064 V	0	-5,1834 V	-989,28101
7	7	Canais side 4	mStrain	±10 V	x 2000	JSH7 Sw7:OFF Sw8:ON	100 Hz	0,0113 V	0,0110 V	0	-5,0639 V	-989,28101
8	8	Canais side 5	mStrain	±10 V	x 2000	JSH8 Sw7:OFF Sw8:ON	100 Hz	-0,0021 V	-0,0034 V	0	-5,0348 V	-989,28101
9	9	Canais back 2	mStrain	±10 V		JSH9 Sw7:OFF Sw8:ON		-0,7736 V	-0,7733 V		-10,0000 V	
10	10	Canais back 3	mStrain	±10 V		JSH10 Sw7:OFF Sw8:ON		-3,9806 V	-3,9615 V		-10,0000 V	
11	11	Canais back 4	mStrain	±10 V		JSH11 Sw7:OFF Sw8:ON		-0,0018 V	-0,0021 V		-3,4451 V	
12	12	Canais back 5	mStrain	±10 V		JSH12 Sw7:OFF Sw8:ON		-0,3546 V	-0,3545 V		-10,0000 V	
13	13	Canais 7 g	m	±10 V		JSH13 Sw7:OFF Sw8:OFF		-0,7632 V	0,7526 V		-10,0000 V	
14	14	Canal Gage MTS	mN	±10 V	x 1	JSH14 Sw7:OFF Sw8:OFF	100 Hz	-0,0247 V	0,0244 V	0	0,0241 V	1000
15	15	Canal Gage Gas	mm	±10 V	x 1	JSH15 Sw7:OFF Sw8:OFF	100 Hz	-0,0433 V	0,0433 V	0	0,0436 V	1000

Figura 68 - Configuração das entradas analógicas no AQDados.

Canal	CN Mod	Nome do Sinal	Unidade	Faixa do A/D	Ganho	Chaves de Ganho	Filtro Passa Baixas	Balanço	Repouso	Valor no A/D	Valor Eng	Unidade
0	<input type="checkbox"/>		ΩC	±10 V		JSH0 Sw7:OFF Sw8:OFF		0.0726 V	-0.072	0.0705 ✓	0	ΩC
1	<input type="checkbox"/>	Canal 01	mStrain	±10 V		JSH1 Sw7:OFF Sw8:DN		-0.0430 V	-0.043	-0.0400 ✓	2	mStrain
2	<input type="checkbox"/>	Canal 02	mStrain	±10 V		JSH2 Sw7:OFF Sw8:DN		0.7758 V	0.776	0.7465 ✓	1	mStrain
3	<input type="checkbox"/>	Canal 03 Branco	mStrain	±10 V		JSH3 Sw7:OFF Sw8:DN		-0.0201 V	-0.020	-0.0415 ✓	4	mStrain
4	<input checked="" type="checkbox"/>	Extens. acido 2	mStrain	±10 V	x 2000	JSH4 Sw7:OFF Sw8:DN	100 Hz	0.0021 V	0.002	0.0842 ✓	18	mStrain
5	<input checked="" type="checkbox"/>	Extens. back 1	mStrain	±10 V	x 2000	JSH5 Sw7:OFF Sw8:DN	100 Hz	0.0104 V	0.010	-0.3296 ✓	-61	mStrain
6	<input checked="" type="checkbox"/>	Extens. acido 3	mStrain	±10 V	x 2000	JSH6 Sw7:OFF Sw8:DN	100 Hz	-0.0095 V	-0.006	9.5992 ✓	2073	mStrain
7	<input checked="" type="checkbox"/>	Extens. acido 4	mStrain	±10 V	x 2000	JSH7 Sw7:OFF Sw8:DN	100 Hz	0.0113 V	0.011	-0.1402 ✓	-29	mStrain
8	<input checked="" type="checkbox"/>	Extens. acido 5	mStrain	±10 V	x 2000	JSH8 Sw7:OFF Sw8:DN	100 Hz	-0.0021 V	-0.003	18.0000 ✓	2073	mStrain
9	<input type="checkbox"/>	Extensocromo 2	mStrain	±10 V		JSH9 Sw7:OFF Sw8:DN		-0.7736 V	-0.773	-0.8362 ✓	-24	mStrain
10	<input type="checkbox"/>	Extensocromo 3	mStrain	±10 V		JSH10 Sw7:OFF Sw8:DN		-3.9606 V	-3.961	-1.3730 ✓	-13	mStrain
11	<input type="checkbox"/>	Extensocromo 4	mStrain	±10 V		JSH11 Sw7:OFF Sw8:DN		-0.0010 V	-0.002	-0.0040 ✓	0	mStrain
12	<input type="checkbox"/>	Extensocromo 5	mStrain	±10 V		JSH12 Sw7:OFF Sw8:DN		-0.2546 V	-0.254	-0.3732 ✓	0	mStrain
13	<input type="checkbox"/>	Buzete 1 g	N	±10 V		JSH13 Sw7:OFF Sw8:DN		-0.7632 V	-0.763	-0.6057 ✓	2	N
14	<input checked="" type="checkbox"/>	Del Carga MTS	mV	±10 V	x 1	JSH14 Sw7:OFF Sw8:OFF	100 Hz	-0.0247 V	-0.024	-0.0183 ✓	0	mV
>> 15	<input checked="" type="checkbox"/>	Del Digno. Desc	mV	±10 V	x 1	JSH15 Sw7:OFF Sw8:OFF	100 Hz	-0.0439 V	-0.043	0.5096 ✓	0	mV

Figura 69 - 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) Seleccione 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 $\frac{1}{4}$ 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 71;
- 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 70.

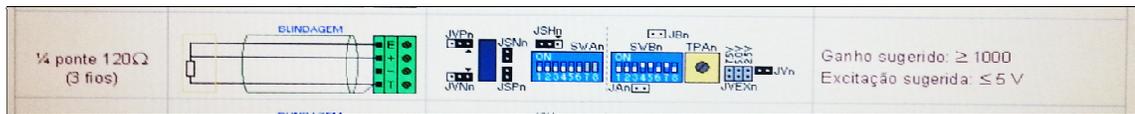


Figura 70 - Configuração dos extensômetros de 120Ω no ADS 2000. (Fonte: LYNX)

- 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 (10). 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.

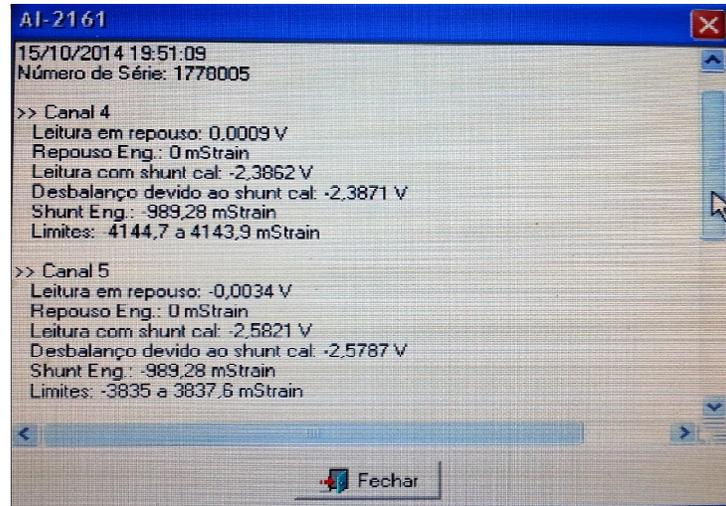


Figura 71 - Relatório de calibração com ShuntCal.

APÊNDICE B

PROCEDIMENTO PARA O ENSAIO DE PROPAGAÇÃO DE TRINCAS POR FADIGA

O ensaio de propagação de trincas é a base do projeto, pois ele é o responsável por difundir a 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 desses dados. 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, no Anexo C encontra-se um procedimento para fazer essa troca de garras.

Para este ensaio de propagação de trincas foram utilizadas as seguintes medidas de configuração do CTS:

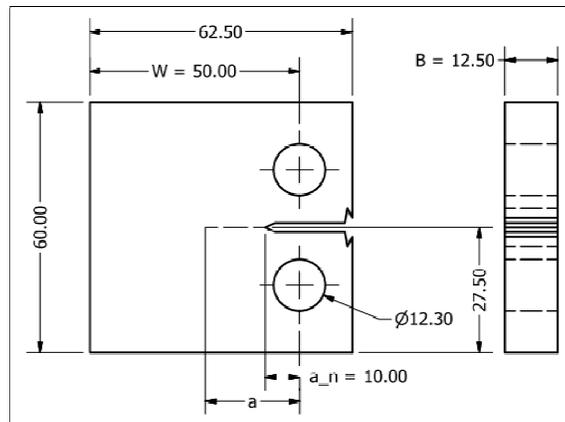


Figura 72 - Dimensões do CTS de propagação de trincas.

ANEXO 2

PROGRAMAS E FUNÇÕES EM MATLAB

PROGRAMA BACK

```
clc
clear
close all
```

```
DIR = strcat('C:\Users\Tácito\Dropbox\back face (1)\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;
W = 50e-3;
B = 12.5E-3;

A = [1.0033 -2.35 1.3694 -15.294 63.182 -74.42];

K = E*W*B;

%INICIO = 2;
%FIM = 10+INICIO

INICIO = 2;
FIM = 10+INICIO;
FACE_FRONT_1 = SAMPLING(INICIO:FIM,1);
BACK_FACE = SAMPLING(INICIO:FIM,2);
FACE_FRONT_4 = SAMPLING(INICIO:FIM,3);

FORCE = SAMPLING(INICIO:FIM,6);
COD = SAMPLING(INICIO:FIM,7);
TEMPO = t_sampling(INICIO:FIM);

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);
            BF(k) = BACK_FACE(i);
            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);

            k = k+1;
            l = l+1;
        end
    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);
        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);

        k = k+1;
        m = m+1;
    end
end
end

%plot(F,abf,F,acd)

H = figure;
hold on
plot(FORCE,BACK_FACE,'bo',...
    'MarkerSize',7)
xlabel('Força [kN]')
ylabel('Deformação')
hold off

H = figure;
hold on
plot(FORCE,BACK_FACE,'bo',...
    'MarkerSize',7)
xlabel('Força [kN]')
ylabel('Deformação')
hold off

H = figure;
hold on
plot(TEMPO, FORCE);
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Força [kN]')
hold off

H = figure;
hold on
plot(TEMPO, BACK_FACE);
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Deformação [micro Strain]')
hold off

```

FUNÇÕES

LYNXGENG

```

function [x, pos, nr, hdst, time, ok] = lynxgeng(filename, channel, pos, n)
%LYNXGENG Read samples from Lynx AqDados .TEM / LTD file.
%
% [X, POS, NR, HDST, TIME, OK] = LYNXGENG(FILENAME) reads all samples
% of all channels of the Lynx AqDados .TEM file especificied in FILENAME.
% OK return -1 in the case of error or 0 in the case of success. X is
matriz
% with NR rows by number of channels cols. NR is the number of samples
per
% channels. Data from AqDados .tem file header is returned in HDST. In
POS
% is returned the new sample index position in the file. TIME is an array
% with time of each sample.
%
% [X, POS, NR, HDST, TIME, OK] = LYNXGENG(FILENAME, CHANNEL) reads all
% samples of the channel specified in the CHANNEL parameter. You must
% specified 1 in CHANNEL to read the first active channel of the file, 2
% to read the second active channel, and so on. When 0 or -1 is passed to
% this function, all active channel will be read.
%
% [X, POS, NR, HDST, TIME, OK] = LYNXGENG(FILENAME, CHANNEL, POS, N)
% reads N samples of the channel specified in the CHANNEL parameter
started
% by POS-th sample of the file. If 0 or -1 value is passed to N
parameter,
% the remainder samples in the file will be read. For example, to read
256
% samples of the second channel begining from 1024th sample use the
% command:
%
% [x, pos, nr] = lynxgeng ('demodado.tem', 2, 1024, 256);
% [x, pos, nr] = lynxgeng ('demodado.ltd', 2, 1024, 256);
%
% See LYNXINFO to get HDST struct format.
%
% See also LYNXINFO.

if (nargin == 1)
    channel = 0;
    pos = 0;
    n = 0;
elseif (nargin == 2)
    pos = 0;
    n = 0;
elseif (nargin == 3)
    n = 0;
elseif (nargin == 4)
elseif
else
    error('Incorrect number of input arguments.');
```

```

    return;
end;

if (channel < 0) channel = 0; end;
if (pos < 0) pos = 0; end;
if (n < 0) n = 0; end;

if ~isstr(filename)
    error('Filename must be a string argument!');
```

```

    return
end

x= upper(filename)

```

```

tpfile= strfind (x, '.TEM')

if size (tpfile) >0
    % --- Read header data from AqDados .TEM file ---
    [hdst, ok] = lynxinfo_tem (filename);
    if ok == -1
        error('Cannot open AqDados file!');
        return
    end
else
    % --- Read header data from AqDados .TEM file ---
    [hdst, ok] = lynxinfo_ltd (filename);
    if ok == -1
        error('Cannot open AqDados file!');
        return
    end
end;
% --- check channel number ---
if (channel > hdst.nc)
    error('Invalid channel!');
    return
end;

% --- check pos ---
if (pos >= hdst.ns)
    error('lynxgeng: no more samples!');
    return
end;

% --- Open AqDados .TEM file ---
hd = fopen (filename, 'r');
if hd == -1
    error('Cannot open AqDados file!');
    return
end

% === Read all channels ===
%
nc = hdst.nc;

if size (tpfile) >0
    p = pos * nc * 2 + 1747;
else
    p = pos * nc * 2 + hdst.FileOfs;
end

fseek (hd, p, -1);
if (n == 0)
    nr = hdst.ns - pos;
else
    nr = hdst.ns - pos;
    if (n < nr)
        nr = n
    end;
end;
pos = pos + nr;
x = fread (hd, [nc, nr], 'int16');
x = x.';

% === engineering unit conversion factors ===
for j=1:hdst.nc,
    m (j) = (hdst.lsup (j) - hdst.linf (j)) / 65536.0;
end;

```

```

        b (j) = m (j) * 32768.0 + hdst.linf (j);
end;

if (channel == 0)
    % --- convert all channels ---
    for j=1:hdst.nc,
        for i=1:nr,
            x(i,j) = x(i,j) * m(j) + b(j);
        end;
    end;
else
    % --- convert select channel ---
    for i=1:nr,
        x(i,channel) = x(i,channel) * m(channel) + b(channel);
    end;
    x=x(1:nr,channel);
end;

% --- process time array ---
if (nargout >= 5)
    dt = 1 / hdst.fs;
    for i=1:nr,
        time(i) = dt * (pos-nr+i);
    end;
    time = time.';
end;

ok = fclose (hd);

```

LYNXINFO

```

function [hdst, ok] = lynxinfo(filename)
%LYNXINFO Read Lynx AqDados .TEM file header.
% [HDST, OK] = LYNXINFO(FILENAME) reads data from header of the
% Lynx AqDados .TEM file especificed in FILENAME. OK return -1 in the
% case of error or 0 in the case of success. Lynx AqDados .TEM header
% data is returned in HDST, that is a struct type with the following
% fields:
%     DTHR: 7 elements array with date and time of the acquisition.
%           dthr (1): day
%           dthr (2): month
%           dthr (3): year
%           dthr (4): hour
%           dthr (5): minute
%           dthr (6): second
%           dthr (7): ms
%     COMMENT: string with acquisition comment.
%     NC: number of channels
%     FS: sample frequency in Hz
%     NS: number of samples per channel
%     NAME: array of NC elements with channels names
%     UNIT: array of NC elements with channels engineering units
%     SUP: array of NC elements with A/D channels upper limit in
%           engineering unit
%     INF: array of NC elements with A/D channels lower limit in
%           engineering unit
%     NE: number of events
%     EV: array of NE elements with event "time" (in sample index)

```

```

%
% To access data in the hdst struct is very simple. For exemplo, the
% name of first active channel is accessed by:
%     hdst.name(1)
%
% The list of channels returned in NAME, UNIT, SUP and INF correspond
% only to active channel in the .TEM file.
%
% See also LYNXGENG.

if (nargin ~= 1)
    error('Invalid sintaxe! Use help lynxinfo');
    return
end;

if ~isstr(filename)
    error('Filename must be a string argument!');
    return
end

% --- Open AqDados .TEM file ---
hd = fopen (filename, 'r');
if hd == -1
    error('Cannot open AqDados file!');
    return
end

% --- Get acquisition date/time ---
dthr = fread (hd, 7, 'uint16');

% --- Get acquisition comment ---
n = fread (hd, 1, 'uint8');
dummy = fread (hd, [1,30], 'char');
comment = char (dummy(1:n));

%
% === Loop to get channels data ===
%
name = {};
unit = {};
ns = 0;
for i=1:32,
    % --- Get channel signal name ---
    n = fread (hd, 1, 'uint8');
    dummy = fread (hd, [1,15], 'char');
    aname = char (dummy(1:n));
    % --- Get channel signal unit ---
    n = fread (hd, 1, 'uint8');
    dummy = fread (hd, [1,7], 'char');
    aunit = char (dummy(1:n));
    % --- Get A/D channel signal eu upper limit ---
    asup = fread (hd, 1, 'float32');
    % --- Get A/D channel signal eu lower limit ---
    ainf = fread (hd, 1, 'float32');
    % --- Get A/D channel signal eu lower limit ---
    used = fread (hd, 1, 'uchar');
    fseek (hd, 2, 0);
    % --- Insert channel if is an active channel ---
    if used ~= 0
        ns = ns + 1;
        name = [name, {aname}];
        unit = [unit, {aunit}];
        sup (ns) = asup;
    end
end

```

```

        inf (ns) = ainf;
    end;
end;

% --- Get the number of acquired channels ---
nc = fread (hd, 1, 'uint16');

% --- Get the sample frequency ---
fseek (hd, 4, 0);
fs = fread (hd, 1, 'float32');

% --- Get the number of samples acquired by channel ---
ns = fread (hd, 1, 'uint32');

% === Loop to get extra comments ===
%
fseek (hd, 252, 0);
excom = {};
for i=1:6,
    % --- Get i-th extra comment ---
    n = fread (hd, 1, 'uint8');
    dummy = fread (hd, [1,30], 'char');
    acom = char (dummy(1:n));
    excom = [excom, {acom}];
end;

% --- Get the number of events ---
ne = fread (hd, 1, 'uint16');

% --- Get the array of events ---
ev = fread (hd, ne, 'uint32');

% --- Create the structure to store the header data ---
hdst = struct ('dthr', dthr, 'comment', comment, 'nc', nc, 'fs', fs, 'ns',
ns, ...
                'name', {name}, 'unit', {unit}, 'sup', sup, 'inf', inf, ...
                'excom', {excom}, 'ne', ne, 'ev', ev);

ok = fclose (hd);

```

LYNXINFO_LTD

```

function [hdst, ok] = lynxinfo_ltd(filename)
%LYNXINFO Read Lynx AqDados .LTD file header.
% [HDST, OK] = LYNXINFO(FILENAME) reads the header of a Lynx AqDados .LTD
% file especificied in FILENAME.
% the information is stored in a file created by HdrLTD2Mat4.exe
% OK returns allawys 0
% Lynx AqDados .LTD header data is returned in HDST, that is a struct
type
%
% To access data in the hdst struct is very simple. For exemple, the
% name of first active channel is accessed by:
%     hdst.l_name(1,1:15)
%

```

```

% The list of channels returned in NAME, UNIT, SUP and INF correspond
% only to active channel in the .LTD file.
%
% See also LYNXGENG.

if (nargin ~= 1)
    error('Invalid sintaxe! Use help lynxinfo');
    return
end;

if ~isstr(filename)
    error('Filename must be a string argument!');
    return
end
filename = strrep(upper(filename),'.LTD','.mat');

% --- Open AqDados .LTD file ---

load (filename);

l_name= l_name'; % transpose these arrays
l_unit= l_unit' ;

hdst = struct ('nc', l_nc, 'fs', l_fs, 'ns', l_ns, 'FileOfs', l_FileOfs,...
              'sname', {l_name}, 'sunit', {l_unit}, 'lsup', l_sup, 'linf',
              l_inf);
ok= true;

return

```

LYNXINFO_TEM

```

function [hdst, ok] = lynxinfo_tem(filename)
%LYNXINFO Read Lynx AqDados .TEM file header.
% [HDST, OK] = LYNXINFO_TEM(FILENAME) reads data from header of the
% Lynx AqDados .TEM file especificied in FILENAME. OK return -1 in the
% case of error or 0 in the case of success. Lynx AqDados .TEM header
% data is returned in HDST, that is a struct type with the following
% fields:
%     DTHR: 7 elements array with date and time of the acquisition.
%         dthr (1): day
%         dthr (2): month
%         dthr (3): year
%         dthr (4): hour
%         dthr (5): minute
%         dthr (6): second
%         dthr (7): ms
%     COMMENT: string with acquisition comment.
%     NC: number of channels
%     FS: sample frequency in Hz
%     NS: number of samples per channel
%     NAME: array of NC elements with channels names
%     UNIT: array of NC elements with channels engineering units
%     SUP: array of NC elements with A/D channels upper limit in
%         engineering unit
%     INF: array of NC elements with A/D channels lower limit in
%         engineering unit
%     NE: number of events

```

```

%      EV: array of NE elements with event "time" (in sample index)
%
%      To access data in the hdst struct is very simple. For exemplo, the
%      name of first active channel is accessed by:
%      hdst.name(1)
%
%      The list of channels returned in NAME, UNIT, SUP and INF correspond
%      only to active channel in the .TEM file.
%
%      See also LYNXGENG.

if (nargin ~= 1)
    error('Invalid sintaxe! Use help lynxinfo');
    return
end;

if ~isstr(filename)
    error('Filename must be a string argument!');
    return
end

% --- Open AqDados .TEM file ---
hd = fopen (filename, 'r');
if hd == -1
    error('Cannot open AqDados file!');
    return
end

% --- Get acquisition date/time ---
dthr = fread (hd, 7, 'uint16');

% --- Get acquisition comment ---
n = fread (hd, 1, 'uint8');
dummy = fread (hd, [1,30], 'char');
comment = char (dummy(1:n));

%
% === Loop to get channels data ===
%
name = {};
unit = {};
ns = 0;
for i=1:32,
    % --- Get channel signal name ---
    n = fread (hd, 1, 'uint8');
    dummy = fread (hd, [1,15], 'char');
    aname = char (dummy(1:n));
    % --- Get channel signal unit ---
    n = fread (hd, 1, 'uint8');
    dummy = fread (hd, [1,7], 'char');
    aunit = char (dummy(1:n));
    % --- Get A/D channel signal eu upper limit ---
    asup = fread (hd, 1, 'float32');
    % --- Get A/D channel signal eu lower limit ---
    ainf = fread (hd, 1, 'float32');
    % --- Get A/D channel signal eu lower limit ---
    used = fread (hd, 1, 'uchar');
    fseek (hd, 2, 0);
    % --- Insert channel if is an active channel ---
    if used ~= 0
        ns = ns + 1;
        sname = [name, {aname}];
        sunit = [unit, {aunit}];
    end
end

```

```

        lsup (ns) = asup;
        linf (ns) = ainf;
    end;
end;

% --- Get the number of acquired channels ---
nc = fread (hd, 1, 'uint16');

% --- Get the sample frequency ---
fseek (hd, 4, 0);
fs = fread (hd, 1, 'float32');

% --- Get the number of samples acquired by channel ---
ns = fread (hd, 1, 'uint32');

% === Loop to get extra comments ===
%
fseek (hd, 252, 0);
excom = {};
for i=1:6,
    % --- Get i-th extra comment ---
    n = fread (hd, 1, 'uint8');
    dummy = fread (hd, [1,30], 'char');
    acom = char (dummy(1:n));
    excom = [excom, {acom}];
end;

% --- Get the number of events ---
ne = fread (hd, 1, 'uint16');

% --- Get the array of events ---
ev = fread (hd, ne, 'uint32');

% --- Create the structure to store the header data ---
hdst = struct ('dthr', dthr, 'comment', comment, 'nc', nc, 'fs', fs, 'ns',
ns, ...
'sname', {sname}, 'sunit', {sunit}, 'lsup', lsup, 'linf',
linf, ...
'excom', {excom}, 'ne', ne, 'ev', ev);

ok = fclose (hd);

```

LYNXTURBINADO

```

function [x, pos, nr, hdst, time, ok] = lynxturbinado(filename, channel,
pos, n)
%LYNXTURBINADO Read samples from Lynx AqDados .TEM file.
%
% contribution from Adriano Axel(adriano.axel@gmail.com) - IPT Sao Paulo -
SP
% %
% [X, POS, NR, HDST, TIME, OK] = LYNXTURBINADO(FILENAME) reads all
samples
% of all channels of the Lynx AqDados .TEM file especificed in FILENAME.
% OK return -1 in the case of error or 0 in the case of success. X is
matriz

```

```

% with NR rows by number of channels cols. NR is the number of samples
per
% channels. Data from AqDados .tem file header is returned in HDST. In
POS
% is returned the new sample index position in the file. TIME is an array
% with time of each sample.
%
% [X, POS, NR, HDST, TIME, OK] = LYNXGENG(FILENAME, CHANNEL) reads all
% samples of the channel specified in the CHANNEL parameter. You must
% specified 1 in CHANNEL to read the first active channel of the file, 2
% to read the second active channel, and so on. When 0 or -1 is passed to
% this function, all active channel will be read.
%
% [X, POS, NR, HDST, TIME, OK] = LYNXGENG(FILENAME, CHANNEL, POS, N)
% reads N samples of the channel specified in the CHANNEL parameter
started
% by POS-th sample of the file. If 0 or -1 value is passed to N
parameter,
% the remainder samples in the file will be read. For example, to read
256
% samples of the second channel beginning from 1024th sample use the
% command:
%
% [x, pos, nr] = lynxgeng ('demodado.tem', 2, 1024, 256);
%
% See LYNXINFO to get HDST struct format.
%
% See also LYNXINFO.

if (nargin == 1)
    channel = 0;
    pos = 0;
    n = 0;
elseif (nargin == 2)
    pos = 0;
    n = 0;
elseif (nargin == 3)
    n = 0;
elseif (nargin == 4)
elseif (nargin == 4)
else
    error('Incorrect number of input arguments. ');
    return;
end;

if (channel < 0) channel = 0; end;
if (pos < 0) pos = 0; end;
if (n < 0) n = 0; end;

if ~isstr(filename)
    error('Filename must be a string argument!');
    return
end

% --- Read header data from AqDados .TEM file ---
[hdst, ok] = lynxinfo (filename);
if ok == -1
    error('Cannot open AqDados file!');
    return
end

% --- check channel number ---
if (channel > hdst.nc)
    error('Invalid channel!');

```

```

    return
end;

% --- check pos ---
if (pos >= hdst.ns)
    error('lynxgeng: no more samples!');
    return
end;

% --- Open AqDados .TEM file ---
hd = fopen (filename, 'r');
if hd == -1
    error('Cannot open AqDados file!');
    return
end

% === Read all channels ===
%
nc = hdst.nc;
p = pos * nc * 2 + 1747;
fseek (hd, p, -1);
if (n == 0)
    nr = hdst.ns - pos;
else
    nr = hdst.ns - pos;
    if (n < nr)
        nr = n;
    end;
end;
pos = pos + nr;
x = fread (hd, [nc, nr], 'int16');
x = x.';

% === engineering unit conversion factors ===
for j=1:hdst.nc,
    m (j) = (hdst.sup (j) - hdst.inf (j)) / 65536.0;
    b (j) = m (j) * 32768.0 + hdst.inf (j);
end;
if (channel == 0)
    % --- convert all channels ---
    for j=1:hdst.nc,
        for i=1:nr,
            x(i,j) = x(i,j) * m(j) + b(j);
        end;
    end;
else
    % --- convert select channel ---
    for i=1:nr,
        x(i,channel) = x(i,channel) * m(channel) + b(channel);
    end;

    x=x(1:nr,channel);
end;

% --- process time array ---
if (nargout >= 5)
    dt = 1 / hdst.fs;

    for i=1:nr,
        time(i) = dt * (pos-nr+i-1);
    end;
end;

```

```

time=[pos-nr:pos-1]*dt;
    time = time.';
end;

ok = fclose (hd);

```

PROGRAMA AJUSTEBILINEAR

```

%BUSCAR O MELHOR AJUSTE BILINEAR PARA PONTOS DADOS.

clear all
close all
clc

% PONTOS.

X = [0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18];

Y =
[0,2,4.1,7.8,10.2,11,13,14,15,16.1,16.3,16.4,16.4,16.5,16.6,17,17.2,17.3,17
.5];

% PRIMEIROS AJUSTES.

% DISPERSÃO.

plot (X,Y, 'ro');

hold on

% MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS.

n = length(X);
somx = sum(X);
somx2 = sum(X.*X);
somy = sum(Y);
somxy = sum(X.*Y);

% FORMANDO AS MATRIZES.

A=[n somx;somx somx2];
R=[somy;somxy];

% SOLUÇÃO DO SISTEMA/OBTENÇÃO DOS COEFICIENTES DA RETA AJUSTADORA

C = inv(A)*R;

% RETA AJUSTADORA

x = [X(1) X(n)];
y = x*C(2)+C(1);

%plot(x,y)

% BUSCAR A MELHOR POSIÇÃO "p" PARA A SINGULARIDADE (QUEBRA DA RETA)

% INICIALIZADOR

j=80000000;

```

```

for p =1:n;

%      AJUSTE DOS p PRIMEIROS PONTOS

X1=X(1:p);
Y1=Y(1:p);

%      METODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS

somx1 = sum(X1);
somx12 = sum(X1.*X1);
somy1 = sum(Y1);
somx1y1 = sum(X1.*Y1);

%      MONTANDO A MATRIZ

A1=[p somx1;somx1 somx12];
R1=[somy1;somx1y1];

%      SOLUÇÃO

C1 = linsolve(A1,R1);

%      PRIMEIRA RETA: AJUSTE DOS "p" PRIMEIROS PONTOS

r1 = X1.*C1(2)+C1(1);

plot(X1,r1)

% DESVIOS

d1=Y1(1:p)-r1(1:p);
d12=d1.*d1;
sd12=sum(d12);

% BUSCAR A INCLINAÇÃO ÓTIMA DA SEGUNDA RETA
%INICIALIZADOR
i=8000000000000;

e=0.001;

%LOOP PARA INCLINAÇÃO ÓTIMA
for a=-4:e:4

    X2=[X(p:n)];
    Y2=X2*a-X1(p)*a+r1(p);

    dk=Y(p:n)-Y2;
    dk2=dk.*dk;
    sdk2=sum(dk2);

    %plot(a,sdk2)

%PARADA DO LOOP

    if i-sdk2<0;
        a;
        break

```

```

        end
        i=sdk2;
end
% %%plotando a segunda reta
x2=[X(p) X(n)];
y2=a*x2-a*(X(p))+r1(p);
plot(x2,y2)
%SOMA DOS DESVIOS DAS DUAS RETAS
f=sdk2+sd12;
if j-f<0
break
end
j=f;
end
plot(X1,r1)
plot(x2,y2)

```

Ajuda do AqDados 7

File Edit Bookmark Options Help

Contents Index Back Print << >>

6.2. Aferição por Regressão Linear

Um recurso muito utilizado no AqDados, por exemplo, para a aferição de uma célula de carga, é a obtenção dos limites de fundo de escala de um canal de entrada analógica através de aferição por regressão linear. Neste método tabela-se um conjunto de pontos de tensão na entrada do canal de conversão A/D e os respectivos valores na unidade de engenharia. Com esses pontos, o AqDados determina, por regressão linear, a melhor reta que passa por esses pontos e consequentemente calcula os limites de fundo de escala para o canal, ou seja, determina os valores em unidade de engenharia correspondentes aos limites de entrada do conversor A/D utilizando a reta obtida na regressão linear.

NOTA: observe que a regressão linear só deverá ser utilizada se existir uma linearidade entre a variação do sinal lido no conversor A/D e a grandeza medida.

Aferição por Regressão Linear

Módulo: 1 AI-2161: - Remota A

Cn Mod: 1 ↑ Próximo

Canal: 25 ↓ Anterior

Nome: Deslocamento

Unidade: mm

Tipo: Linear

Limites Especificados

Inferior	Superior	
-10.0	10.0	V
-10	10	mm

Limites Calculados

Inferior	Superior	
-10.0	10.0	V
-50	50	mm

Ganho K: 0.2 V / mm

Ganho 1/K: 5 mm / V

Tabela de Calibração

Valor no A/D: 3.6938 V

Valor Calculado: 18.46924 mm

Valor Engenharia: 25 mm

Ler A/D

	V	Val. Eng.
1	0.0000	0
2	5.0000	25

Inserir Remover Copiar

Correlação: 100.00 %

Aceita Limites Calculados Ganho Sair Cancelar Ajuda

start

Document01 - Micros...

HD TACTICO (E:)

Ajuda do AqDados 7

15:12