

**VIABILIDADE DA ANÁLISE DE PROPAGAÇÃO DE  
TRINCAS DE FADIGA POR EXTENSOMETRIA**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**  
**PROGRAMA DE PÓS – GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**VIABILIDADE DA ANÁLISE DE PROPAGAÇÃO DE TRINCAS DE FADIGA POR  
EXTENSOMETRIA**

Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos para a  
obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica

**ENILDO MATOS DE OLIVEIRA**

**Florianópolis**  
**Março 2007**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**VIABILIDADE DA ANÁLISE DE PROPAGAÇÃO DE TRINCAS DE FADIGA POR  
EXTENSOMETRIA**

**Enildo Matos de Oliveira**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de

**Mestre em Engenharia Mecânica**

Sendo aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

---

Prof. Edison da Rosa, Dr. Eng.  
Orientador

---

Prof. Fernando Cabral, Ph. D.  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Lauro Cesar Nicolazzi, Dr. Eng.

---

Prof. Arcanjo Lenzi, Ph.D.

---

Prof. Marco Antonio Martins Cavaco, Ph.D.

***Dedicatória***

*Aos meus pais, que sempre me incentivaram a estudar; a minha irmã por ser uma grande mulher;  
ao meu grande irmão que sem ele, não teria galgado este degrau da minha vida; a minha  
namorada pela compreensão e paciência, aos meus eternos amigos de mestrado que nunca me  
negaram a ajuda necessária; e aos demais eternos amigos feitos fora do mestrado e que sempre  
torceram por mim.*

## **AGRADECIMENTOS**

Aos professores Túlio e Sérgio do Curso de Engenharia Mecânica da Unileste MG, que confiaram em minha capacidade.

Ao Grupo de Análise e Projeto Mecânico – GRANTE, que me deu a oportunidade de complementar outra etapa de estudo.

Ao Prof. Edison da Rosa que me acompanhou com paciência e disposição na elaboração deste trabalho.

E ao meu irmão que me livrou nos momentos de dificuldade.

*“Se a vida te dá um limão, faça dele uma limonada.”*

*Domínio Popular*

# SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>X</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>XII</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS.....</b>	<b>XIII</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>XVI</b>
<b>TITLE &amp; ABSTRACT.....</b>	<b>XVII</b>
<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1. O PROBLEMA DA TRINCA POR FADIGA.....	1
1.2. TRINCA POR FADIGA NAS MÁQUINAS INJETORAS DE PLÁSTICO.....	1
1.3. MÉTODO DE IDENTIFICAÇÃO DA TRINCA POR FADIGA.....	2
1.4. JUSTIFICATIVA E PROPOSTA DE TRABALHO.....	2
<b>CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>3</b>
2.1. FADIGA.....	3
2.1.1. <i>Histórico</i> .....	3
2.1.2. <i>Cargas de Fadiga</i> .....	4
2.1.3. <i>Estágio de Propagação de Trinca</i> .....	6
2.1.4. <i>Propagação por Corrosão</i> .....	8
2.2. MECÂNICA DA FRATURA APLICADA À FADIGA.....	10
2.2.1. <i>Breve Histórico</i> .....	10
2.2.2. <i>Concentração de Tensão</i> .....	10
2.2.3. <i>Fator de Intensidade de Tensão</i> .....	11
2.2.4. <i>Relação do Fator de Intensidade de Tensão com a Energia Liberada</i> .....	12
2.2.5. <i>Geometria de Trinca</i> .....	13
2.2.6. <i>Propagação Crítica ou Fratura Frágil</i> .....	15
2.2.7. <i>Propagação Subcrítica</i> .....	15
2.2.8. <i>Fratura Dúctil</i> .....	16
2.3. PROPAGAÇÃO DE ONDAS.....	18
2.3.1. <i>Introdução</i> .....	18
2.3.2. <i>Propagação de Ondas Elásticas em Meios Sólidos Infinitos</i> .....	19
2.3.3. <i>Propagação de Ondas Elásticas em Meios Sólidos Finitos</i> .....	21
2.3.4. <i>Ondas Longitudinais</i> .....	23
2.3.5. <i>Características da Onda</i> .....	24
2.4. IMPACTO LONGITUDINAL DE UMA ESFERA ELÁSTICA NA EXTREMIDADE DE UMA BARRA UNIFORME.....	26
2.5. PÊNDULO BALÍSTICO.....	27
2.6. EXTENSOMETRIA.....	28
2.6.1. <i>Histórico</i> .....	28
2.6.2. <i>Tipos</i> .....	28
2.6.3. <i>O Extensômetro de Grade Metálica (Metal Foil Strain Gauge)</i> .....	29
2.6.4. <i>O Extensômetro Semicondutor (Silício)</i> .....	29
2.6.5. <i>Ponte de Wheatstone</i> .....	30
2.7. EMISSÃO ACÚSTICA.....	31
<b>CAPÍTULO 3 - PROPOSTA DE TRABALHO.....</b>	<b>33</b>
3.1. MOTIVAÇÃO PARA O TRABALHO.....	33
3.2. MONTAGEM DA BANCADA EXPERIMENTAL.....	33
3.2.1. <i>Barras Cilíndricas</i> .....	34
3.2.2. <i>Pêndulo Simples</i> .....	35
3.2.3. <i>Dispositivo Externo Para Captar a Onda de Tensão</i> .....	36
3.2.4. <i>Aquisição de Sinais</i> .....	39
<b>CAPÍTULO 4 - DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS.....</b>	<b>41</b>
4.1. AQUISIÇÃO DO SINAL.....	41
4.2. ANÁLISE DO SINAL DE IMPACTO.....	42

4.3.	DETERMINAÇÃO DA DEFORMAÇÃO EXPERIMENTAL NA SUPERFÍCIE DA BARRA .....	44
4.4.	COLETA DAS AMOSTRAS DE DEFORMAÇÃO .....	44
4.5.	DETERMINAÇÃO DA DEFORMAÇÃO EXPERIMENTAL CAPTADA PELO DISPOSITIVO EXTERNO .....	47
4.6.	FORÇA DE AJUSTE .....	48
4.6.1.	<i>Resultados</i> .....	49
4.7.	ANÁLISE DE PROPAGAÇÃO DA TRINCA POR FADIGA .....	56
<b>CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES .....</b>		<b>61</b>
5.1.	CONCLUSÕES GERAIS.....	61
5.2.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	62
<b>REFERÊNCIAS.....</b>		<b>63</b>
<b>LEITURAS COMPLEMENTARES.....</b>		<b>65</b>



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Máquina injetora de plástico. Fonte: ROMI (2004).	1
Figura 1.2: Guias da máquina injetora de plástico.	1
Figura 2.1: Cargas de fadiga. Fonte: NORTON (2004).	5
Figura 2.2: Evolução da trinca devido à fadiga. Fonte: NCODE (2006).	6
Figura 2.3: Características da curva de taxa de crescimento de trinca de fadiga.	7
Figura 2.4: Gráfico de propagação de trincas de CST. Fonte: FILHO (2004).	9
Figura 2.5: Variação do valor de $K$ e estágio de CST. Fonte: FILHO (2004).	9
Figura 2.6: Entalhe elíptico numa placa plana.	11
Figura 2.7: Modos de fratura.	12
Figura 2.8: Situações de geometria para uma trinca elíptica, modo I. Fonte: Da Rosa (2002).	13
Figura 2.9: Circunferência circunscrita à elipse. Fonte: Da ROSA (2002).	14
Figura 2.10: Crescimento subcrítico de descontinuidade até um valor crítico. Fonte: FILHO (2004).	16
Figura 2.11: $J \times \Delta a$ para o AISI 304. Fonte; FILHO (2004).	17
Figura 2.12: Gráfico da curva R. Fonte: FILHO (2004).	18
Figura 2.13: Coordenadas cartesianas: Coordenadas cilíndricas. Fonte: MALAVOLTA (2003).	19
Figura 2.14: Coordenada para o sólido cilíndrico. Fonte: MALAVOLTA (2003).	22
Figura 2.15: Barra cilíndrica com seu respectivo elemento diferencial. Fonte: KAISER (1998).	23
Figura 2.16: Elemento diferencial em compressão. Fonte: KAISER (1998).	23
Figura 2.17: Forças de compressão no elemento diferencial. Fonte: KAISER (1998).	24
Figura 2.18: Efeito de poisson na barra. Fonte: GRAFF (1975).	25
Figura 2.19: Reflexão da onda. Fonte: GRAFF (1975).	25
Figura 2.20: A resposta em três pontos distintos na barra sujeita ao impacto. Fonte: GRAFF (1975).	26
Figura 2.21: Impacto longitudinal numa barra uniforme. Fonte: GOLDSMITH (1960).	26
Figura 2.22: Pêndulo balístico.	27
Figura 2.23: Extensômetro de grade metálica. Fonte: OMEGA (2005).	29
Figura 2.24: Extensômetro semiconductor.	30
Figura 2.25: Ponte de wheatstone.	30
Figura 2.26: Emissão acústica.	31
Figura 3.1: Barra usada para o ensaio experimental.	34
Figura 3.2: Pêndulo simples.	35
Figura 3.3: Sistema de guia usado no direcionamento do pêndulo.	35
Figura 3.4: Bloco utilizado para o controle da energia imposta à barra.	36
Figura 3.5: Dimensões do dispositivo externo.	37
Figura 3.6: Dispositivo montado na barra.	37
Figura 3.7: Dispositivo e conjunto parafuso-mola.	37
Figura 3.8: Extensômetros montados nas lâminas do dispositivo.	38
Figura 3.9: Extensômetro de silício.	38
Figura 3.10: Extensômetro de grade metálica.	39
Figura 3.11: Sistema de aquisição.	39
Figura 4.1: Local de montagem do extensômetro de silício ( $\frac{1}{4}$ de ponte).	41
Figura 4.2: Extensômetro de silício colado na barra.	41
Figura 4.3: Sinal.	42
Figura 4.4: Sinal após a filtragem.	42
Figura 4.5: Tempo de impacto.	43
Figura 4.6: Período da onda de impacto.	43
Figura 4.7: Pulsos de tensão na tração e compressão.	45
Figura 4.8: Relação energia x deformação.	47
Figura 4.9: Interface entre a superfície da barra e a lâmina do dispositivo.	48

Figura 4.10: Deformação experimental na lâmina devido à força de ajuste.....	49
Figura 4.11: Energia x deformação no dispositivo externo, força de ajuste: 11,23 N.....	51
Figura 4.12: Energia x deformação no dispositivo externo, força de ajuste: 16,84 N.....	53
Figura 4.13: Energia x deformação no dispositivo externo, força de ajuste: 22,46 N.....	55
Figura 4.14: Comparação entre as curvas energia x deformação no dispositivo externo e a curva energia x deformação experimental na superfície da barra.....	56
Figura 4.15a à 4.15l: Relação a/c x ciclos.....	58
Figura 1.16: Energia x número de ciclos.....	59

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Relação entre $a/c$ e $\phi$ . Fonte: DA ROSA (2002).....	14
Tabela 2.2: Algumas relações fundamentais da elasticidade. Fonte: MALAVOLTA (2003).....	20
Tabela 4.1: Energia liberada pelo tamanho de trinca em $mm^2$ .....	44
Tabela 4.2.a: Deformação experimental.....	45
Tabela 4.2.b: Deformação experimental.....	46
Tabela 4.3: Comparação: deformação teórica x experimental.....	47
Tabela 4.4: Deslocamento da mola x carga imposta pela mola.....	49
Tabela 4.5: Deformação experimental no dispositivo, força de ajuste: 11,23 N.....	50
Tabela 4.6: Deformação experimental: superfície da barra x deformação experimental do dispositivo, força de ajuste: 11,23N.....	51
Tabela 4.7: Deformação experimental no dispositivo, força de ajuste: 16,84 N.....	52
Tabela 4.8: Deformação experimental: superfície da barra x deformação experimental do dispositivo, força de ajuste: 16,94N.....	53
Tabela 4.9: Deformação experimental no dispositivo, força de ajuste: 22,46 N.....	54
Tabela 4.10: Deformação experimental: superfície da barra x deformação experimental do dispositivo, força de ajuste: 22,46N.....	55
Tabela 4.11: Energia x ciclos.....	58

## LISTA DE SÍMBOLOS

$a$  = comprimento de trinca

$A$  = constante para cálculo de fadiga

$A_0$  = área inicial

$a/c$  = relação entre semi-eixos da elipse

$C_0$  = velocidade de propagação do som

$da/dN$  = taxa de crescimento de trinca de fadiga

$E$  = módulo de elasticidade

$E_1$  = módulo de elasticidade da barra

$E_2$  = módulo de elasticidade da esfera

$F_y$  = força na direção do eixo  $y$

$f(\beta)$  = função que caracteriza a variação do fator geométrico

$g$  = aceleração da gravidade

GF = gauge factor

$G^I$  = módulo de cisalhamento

$G$  = taxa de liberação de energia elástica mais plástica

$h$  = altura

$k$  = a constante de proporcionalidade entre a variação da resistividade e a deformação

$K$  = fator intensidade de tensões

$K_I$  = fator intensidade de tensões (modo I)

$K_{ICST}$  = fator intensidade de tensões para corrosão sob tensão (modo I)

$K_{IC}$  = tenacidade à fratura (modo I, crítica) para estado plano de deformação

$K_{II}$  = fator intensidade de tensões (modo II)

$K_{III}$  = fator intensidade de tensões (modo III)

$L$  = comprimento

$m$  = constante para cálculo de fadiga

$Y$  = fator geométrico

$J$  = valor da integral  $J$

$J_{total} = J_{el} + J_{pl}$

$J_{el}$  = parcela elástica do  $J$

$J_{pl}$  = parcela plástica do  $J$

$R$  = razão de tensão de fadiga

$R_1$  = resistor 1

$R_2$  = resistor 2

$R_3$  = resistor 3

$R_g$  = extensômetro

$r$  = raio da esfera

$t$  = tempo

$u_r$  = deslocamento em  $r$

$u_\theta$  = deslocamento em  $\theta$

$u_z$  = deslocamento em  $z$

$u_x$  = deslocamento em  $x$

$u_y$  = deslocamento em  $y$

$u_z$  = deslocamento em  $z$

$\nu_1$  = coeficiente de poisson da barra

$\nu_2$  = coeficiente de poisson da esfera

$v$  = velocidade

$V_{out}$  = tensão de saída em Volts

$V_{in}$  = tensão de entrada em Volts

$\xi$  = número de onda

$\Lambda$  = comprimento de onda

$\theta$  = ângulo de rotação

$\phi$  = integral elíptica do segundo tipo dependente da relação entre semi-eixos da elipse

$\nu$  = coeficiente de poisson

$\rho$  = densidade

$\sigma$  = tensão nominal aplicada

$\sigma_{min}$  = tensão mínima

$\sigma_{max}$  = tensão máxima

$\nabla^2$  = operador laplaciano

$\Delta a$  = incremento de trinca

$\Delta k_0$  = variação mínima do fator de intensidade de tensões

$\Delta k$  = variação do fator de intensidade de tensões

$\Delta R$  = variação de resistividade

## RESUMO

O objetivo deste trabalho consiste em estudar a viabilidade de uma nova técnica, na identificação da propagação de trincas de fadiga. No instante de propagação de uma trinca no interior de um material, há liberação de energia, gerando uma onda de tensão. O enfoque está na identificação e análise, através da extensometria, do pulso de tensão gerado devido a esta propagação. Com a utilização de uma massa em pêndulo, é imposta a energia à uma barra cilíndrica equivalente àquela liberada no momento da propagação. A obtenção deste sinal de energia é realizada pela fixação direta de extensômetros de silício na superfície da barra e pelo desenvolvimento de um dispositivo acoplado a sua superfície. Desta forma pode-se avaliar a suscetibilidade deste sinal de baixa intensidade e alta frequência às interferências eletromagnéticas, comparar a aplicação dos métodos experimentais utilizados e estabelecer uma avaliação teórica e experimental do ensaio. O desenvolvimento teórico faz uso da teoria de impacto, da teoria de propagação de ondas longitudinais em barras cilíndricas, teoria de fadiga e da teoria da mecânica da fratura. Assim, partindo da energia liberada pela propagação da trinca, juntamente com a teoria de impacto e do estudo de propagação de ondas, é possível obter os resultados analiticamente. Através do aparato experimental desenvolvido, foram obtidos os resultados experimentais pela aplicação da extensometria e assim comparados aos teóricos. As conclusões do trabalho estão relacionadas à análise de aplicabilidade da técnica empregada na inspeção de propagação de trincas em equipamentos mecânicos.

**Palavras chave:** 1. Fadiga, 2. Extensometria, 3. Impacto, 4. Mecânica da Fratura, 5. Propagação de Ondas

## TITLE & ABSTRACT

### **Analysis Viability of Fatigue Crack Propagation Through Strain Gauge**

The objective of this work consists in studying the viability of a new technique, in the identification of fatigue cracks propagation. By the moment, the cracks propagation inside of material, there is some energy release which generates a wave tension. The focus is the identification and analysis, through the strain gauge, of the pulse tension generated due to this propagation. With the use of a mass in a pendulum, the equivalent energy is imposed on cylindrical bar that liberated in the moment of the propagation. The energy signal acquisition is accomplished by the direct fixation of silicon strain gauge in the surface of the bar and through the development of a device coupled in the surface. This way, it is possible to evaluate the low-intensity high frequency signal propagation, its susceptibility of electromagnetic interferences, to compare the application of the used experimental methods and to establish a theoretical and experimental evaluation of the rehearsal. The theoretical development makes use of the impact theory, the longitudinal waves theory in cylindrical bars, the fatigue theory and the fracture mechanics theory. This way, using the energy liberated by the propagation of the crack, together with the impact theory and the study of waves propagation, it is possible to obtain the results analytically. Through the developed experimental apparatus, the results were obtained through the use of the strain gauge and compared with the theoretical ones. The conclusions of the work are related to the analysis of applicability of the employed technique in the inspection of propagation of cracks in mechanical equipments.

**Key Words:** 1. Fatigue, 2. Strain Gauge, 3. Impact, 4. Fracture Mechanics, 5. Waves Propagation



## CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

### 1.1. O PROBLEMA DA TRINCA POR FADIGA

No campo industrial, há uma infinidade de peças mecânicas em que o modo de falha é a fadiga. A falha por fadiga ocorre devido às cargas variáveis impostas em tais peças, resultando na ruptura das mesmas. A fadiga é uma redução gradativa da capacidade de carga das peças mecânicas, conseqüência do avanço de micro-trincas que acumulam com o tempo até a ruptura final, segundo as deformações cíclicas em que o material é submetido. Portanto, em todos os ramos da engenharia, há uma grande preocupação com a fadiga, resultando na constante busca por técnicas de monitoramento de trincas provenientes de tal fenômeno.

A maioria das estruturas de engenharia está sujeita à cargas variáveis no tempo. Uma falha por fadiga ocorre dentro de uma sucessão de ciclos de carga, desde valores da ordem de 10 ciclos até mais de  $10^7$ ,  $10^8$  ciclos, DA ROSA (2002). O número de ciclos que uma peça há de resistir dependerá do nível de sollicitação a qual está sujeita.

### 1.2. TRINCA POR FADIGA NAS MÁQUINAS INJETORAS DE PLÁSTICO

Em máquinas injetoras de plástico conforme Figura 1.1, há uma grande ocorrência de quebra das guias durante o seu funcionamento causado pela fadiga. Estas guias são submetidas à força de fechamento da máquina durante o processo de moldagem por injeção, Figura 1.2.



Figura 1.1: Máquina injetora de plástico. Fonte: ROMI (2004).

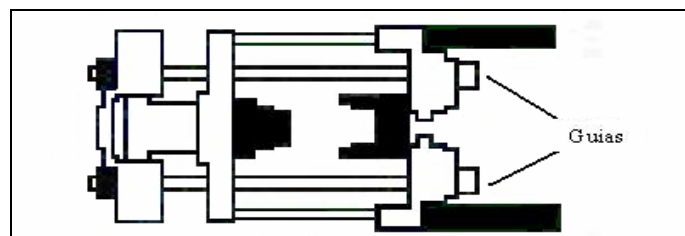


Figura 1.2: Guias da máquina injetora de plástico.

Na quebra dessas guias durante o funcionamento da máquina, há desperdício de matéria prima, perda de produtividade e perigo de danos corporais ao operador. Por isso a importância da

identificação inicial da trinca de fadiga antes da quebra, permitindo assim o monitoramento evitando tais perdas.

### **1.3. MÉTODO DE IDENTIFICAÇÃO DA TRINCA POR FADIGA**

Por isso, a identificação e o acompanhamento dinâmico da propagação da trinca são fundamentais para evitar conseqüências ocasionadas pela fadiga. Possibilitando uma inspeção eficaz do equipamento, e possibilitando um melhor gerenciamento por parte da manutenção, como por exemplo, uma parada planejada do equipamento, que evitariam paradas inesperadas na produção.

Uma técnica bastante eficaz para a identificação da propagação da trinca é a Emissão Acústica, que permite o monitoramento do equipamento em plena operação. Porém apresenta um custo elevado decorrente da construção do equipamento empregado e da qualificação técnica do pessoal envolvido.

### **1.4. JUSTIFICATIVA E PROPOSTA DE TRABALHO**

O objetivo principal deste trabalho é elaborar uma nova técnica eficiente de identificação da propagação da trinca, porém com um custo menor comparado à emissão acústica. A intenção principal é provar que o método é viável, justificando estudos mais avançados no futuro sobre o assunto. Esse passo inicial simplesmente consiste em identificar a energia necessária para a propagação da trinca no material. Teoricamente, quando ocorre a propagação da trinca, ela libera um pulso de energia a ser identificado pela aplicação da extensometria. Sabe-se que esse pulso de tensão é de baixa intensidade, uma vez que a energia também é baixa, tornando difícil identificá-la. Portanto a identificação desse pulso é fundamental para a continuação de estudos futuros. Assim o foco do trabalho está no reconhecimento do pulso de energia necessária para a propagação da trinca no material.

## CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. FADIGA

A maioria das falhas em máquinas acontece devido a cargas que variam no tempo, e não a esforços estáticos. Estas falhas ocorrem, tipicamente, em níveis de tensão significativamente inferiores aos valores de resistência ao escoamento dos materiais. Fadiga é o termo utilizado para expressar a falha de um material submetido a um carregamento cíclico ou flutuante, mesmo se os níveis de tensões aplicados forem menores que o limite de escoamento. Os materiais solicitados dinamicamente, podem apresentar falhas em níveis de tensão bem abaixo da tensão de fratura sob carregamento estático. Estima-se que cerca de 90% das falhas de componentes de automóveis, aviões, pontes, turbinas, bombas, máquinas e equipamentos em geral, sujeitos aos carregamentos repetidos e/ou vibrações, deve-se ao fenômeno da fadiga. DA ROSA (2002).

#### 2.1.1. Histórico

No início das construções das ferrovias, vagões ferroviários começaram a falhar após um pequeno período em serviço. Apesar de serem feitos de aço dúctil, os mesmos exibiam características de fraturas frágeis e repentinas. Rankine publicou um artigo em 1843, *“On the causes of the accidental breaking of the journals of originally sound railway axles and on the means of preventing it by observing the law of continuity in their construction”* o qual dizia que o material havia “cristalizado” e se tornado frágil devido as tensões flutuantes. Os eixos haviam sido projetados com toda a perícia da engenharia disponível na época, a qual se baseava em experiências decorrentes de estudos com estruturas carregadas estaticamente.

Cargas dinâmicas eram, portanto, um fenômeno novo, resultantes da introdução das máquinas movidas a vapor. Esses eixos eram fixos às rodas e girava em conjunto com as mesmas. Desse modo, a tensão de flexão em qualquer ponto da superfície do eixo varia ciclicamente entre valores positivos e negativos. Esse carregamento é denominado alternado. August Wöhler, engenheiro alemão, realizou a primeira investigação científica sobre o que estava sendo chamado de falha por fadiga, testando eixos até a falha, sob carregamento alternado. Ele publicou suas descobertas em 1870, as quais identificavam o número de ciclos de tensão como os causadores do colapso e a descoberta da existência de uma tensão limite de resistência à fadiga para aços, isto é, um nível de tensão que toleraria milhões de ciclos de uma tensão alternada. O diagrama *S-N* ou Curva de Wöhler tornou a forma padrão para caracterizar o comportamento dos materiais submetidos a solicitações alternadas utilizado atualmente, apesar de outras medidas sobre resistência dos materiais, sob cargas dinâmicas, estarem disponíveis hoje. O termo “fadiga” foi aplicado à situação recém descrita pela primeira vez por Poncelet em 1839. O mecanismo de falha

até então incompreendido, e a aparência de uma fratura frágil na superfície de um material dúctil gerou especulações, que o material, de alguma maneira, apresentou “cansaço” e fragilizou-se devido às oscilações da carga aplicada. Wöhler, mais tarde, mostrou que cada uma das metades dos eixos quebrados ainda continuava tão resistente e dúctil, em ensaios de tração, quanto ao material original. De qualquer maneira, o termo falha por fadiga permaneceu e ainda é usado para descrever qualquer falha devido a cargas variáveis no tempo.

As falhas por fadiga constituem um custo significativo para a economia. O custo pode envolver também vidas humanas, como por exemplo, o primeiro avião a jato comercial de passageiros, o inglês *Comet*, que se despedaçou duas vezes em 1954 por causa de falhas por fadiga em sua fuselagem, consequência dos ciclos de pressurização e despressurização da cabine.

Suponha que o material é um metal dúctil e, sendo manufaturado, não apresenta trincas, mas possui partículas, inclusões, etc. E em seguida, que existam algumas regiões de concentração geométrica de tensão (entalhes) em locais com tensões variantes no tempo. Conforme as tensões no entalhe oscilam, pode ocorrer escoamento local quanto à concentração de tensão, mesmo que a tensão nominal na seção esteja bem abaixo do valor de tensão de escoamento do material.

A deformação plástica localizada, causa distorções e cria bandas de deslizamento (região de intensa deformação causado por tensões cisalhantes nos cristais do material. À medida que os ciclos de tensão ocorrem, novas bandas de deslizamento aparecem, formando-se as trincas. Mesmo na ausência de um entalhe, este mecanismo ainda ocorre desde que se exceda o limite de escoamento em alguma região do material. Vazios ou inclusões serve como intensificadores de tensão para iniciar a trinca.

Materiais menos dúcteis não apresentam a mesma habilidade para escoar, e tendem a desenvolver trincas mais rapidamente. Eles são mais sensíveis ao entalhe.

Materiais frágeis (especialmente os fundidos), que não escoam podem anular esse estágio inicia, indo diretamente para a propagação da trinca em locais de existência de vazios ou inclusões, que atuam como trincas microscópicas.

### **2.1.2. Cargas de Fadiga**

Qualquer carga que potencialmente varie no tempo, pode provocar uma falha por fadiga. O comportamento desse tipo de carga varia substancialmente de uma aplicação a outra. Em máquinas rotativas, as cargas tendem a ser consistentes na amplitude ao longo do tempo e repetem-se com alguma frequência. Em equipamentos de serviço (veículos de todos os tipos), as cargas tendem a mudar completamente a sua amplitude e frequência no decorrer do tempo, podendo até mesmo

assumir uma natureza aleatória. A forma da onda da carga em função do tempo parece não ter nenhum efeito significativo na falha por fadiga na ausência de corrosão FILHO (2004).

Assim, geralmente descreve-se a função, esquematicamente, como uma onda senoidal ou em forma de dente de serra. A forma da onda tensão x tempo ou deformação x tempo, terá a mesma aparência geral e frequência que a onda carga x tempo. Os fatores significativos são a amplitude e o valor médio da onda de tensão-tempo (ou deformação-tempo) e o número total de ciclos a que a peça é submetida.

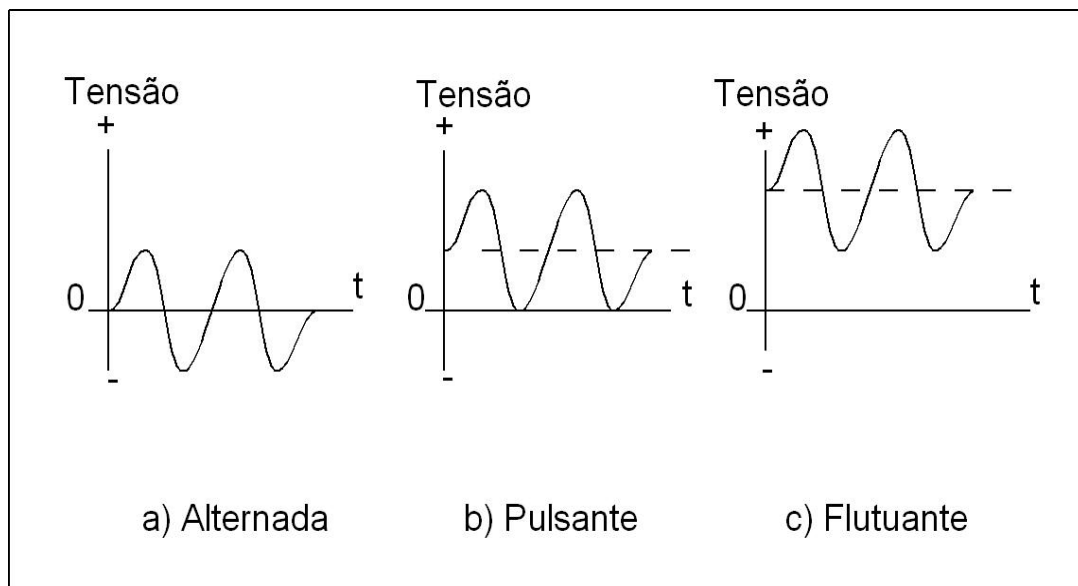


Figura 2.1: Cargas de fadiga. Fonte: NORTON (2004).

As funções típicas de tensão-tempo, experimentadas por máquinas rotativas, podem ser modeladas conforme a Figura 2.1, que ilustra as mesmas, como ondas senoidais. A Figura 2.1a representa o caso da tensão alternada, em que o valor médio é zero. A Figura 2.1b representa o caso da tensão pulsante, onde a forma da onda varia de zero a um máximo com um valor médio igual à componente alternada. A Figura 2.1c ilustra uma versão do caso mais geral, chamado de tensão variada, em que todas as componentes tem valor diferente de zero. Qualquer um dos tipos de ondas citados pode ser caracterizado através do parâmetro calculado da equação 2.1:

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}, \quad (2.1)$$

sendo,  $R$  é a razão de tensão e  $\sigma_{\min}$  e  $\sigma_{\max}$  são, respectivamente, a tensão nominal máxima e mínima. Quando a tensão é alternada, Figura 2.1a,  $R = -1$ , quando a tensão é pulsante, Figura 2.1b,  $R = 0$  e quando a tensões máxima e mínima tem o mesmo sinal, Figura 2.1c,  $0 \leq R \leq 1$ .

### 2.1.3. Estágio de Propagação de Trinca

Quando uma trinca microscópica surge, o mecanismo da fratura entra em ação, criando concentração de tensões, desenvolvendo, uma zona plástica na ponta da trinca. Cada vez que uma tensão de tração alonga a mesma, a trinca cresce um pouco. Quando a tensão de fadiga (ciclo de tensão) passa para um regime de tensão de compressão ou para uma tensão de tração suficientemente baixa, a trinca se fecha.

O escoamento momentaneamente cessa e a trinca torna-se novamente pontiaguda, agora com um comprimento maior. Este processo continua enquanto a tensão local estiver mudando de valores abaixo da tensão de escoamento para outros acima desta, na ponta da trinca. Então, o crescimento de trinca se deve a tensões de tração e se propaga ao longo de planos normais aos de tensão máxima de tração. Tensões cíclicas quando são sempre de compressão, não irão contribuir para o crescimento da trinca, visto que as mesmas tendem a fechá-la, conforme Figura 2.2.

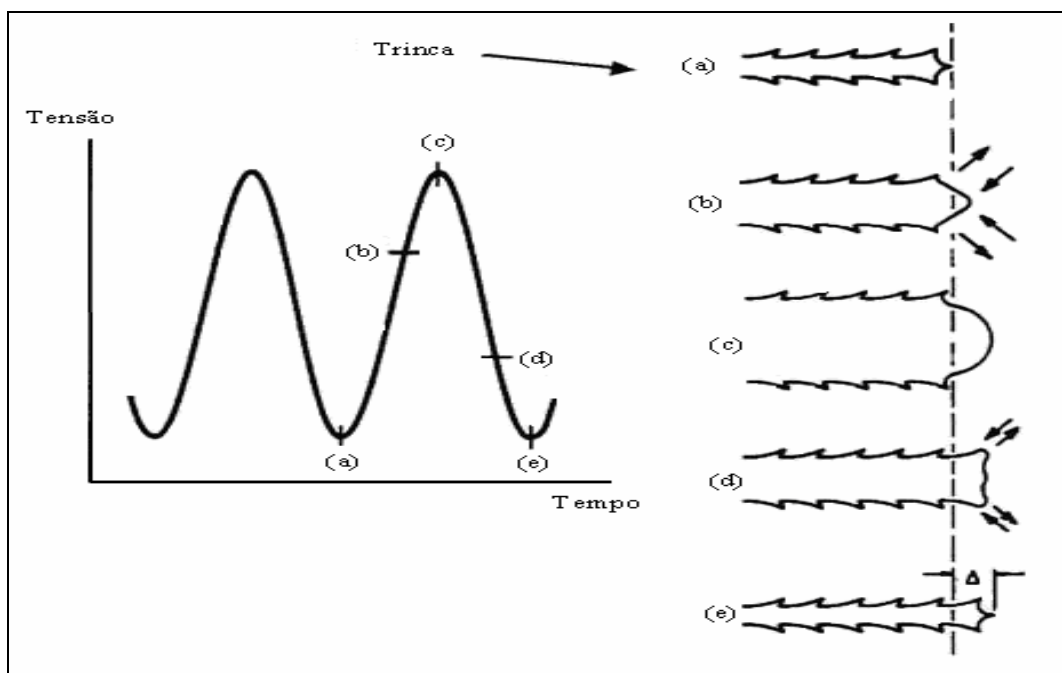


Figura 2.2: Evolução da trinca devido à fadiga. Fonte: NCODE (2006).

A propagação subcrítica na fadiga ocorre sob tensões nominais inferiores aos limites de escoamento, porém, sob tensões extremamente localizadas superiores a este limite. Duas etapas se distinguem: nucleação e propagação. Entretanto, é possível ainda distinguir três diferentes fases, que são funções da velocidade de propagação, Figura 2.3:

- 1) Fase inicial, que representa o comportamento não contínuo, considerando uma estabilização da velocidade de propagação em função do mecanismo de encruamento. Esta fase mostra

um ponto inicial mínimo de fator de intensidade de tensão,  $\Delta K_0$ , abaixo do qual não ocorrerá a propagação;

- 2) Fase intermediária, que representa a velocidade de propagação constante;
- 3) Fase final de propagação, que representa a aceleração final e ruptura.

Cada uma destas fases é influenciada principalmente por fatores como microestrutura, tensão média, corrosão, frequência, etc. EWALDS (1985).

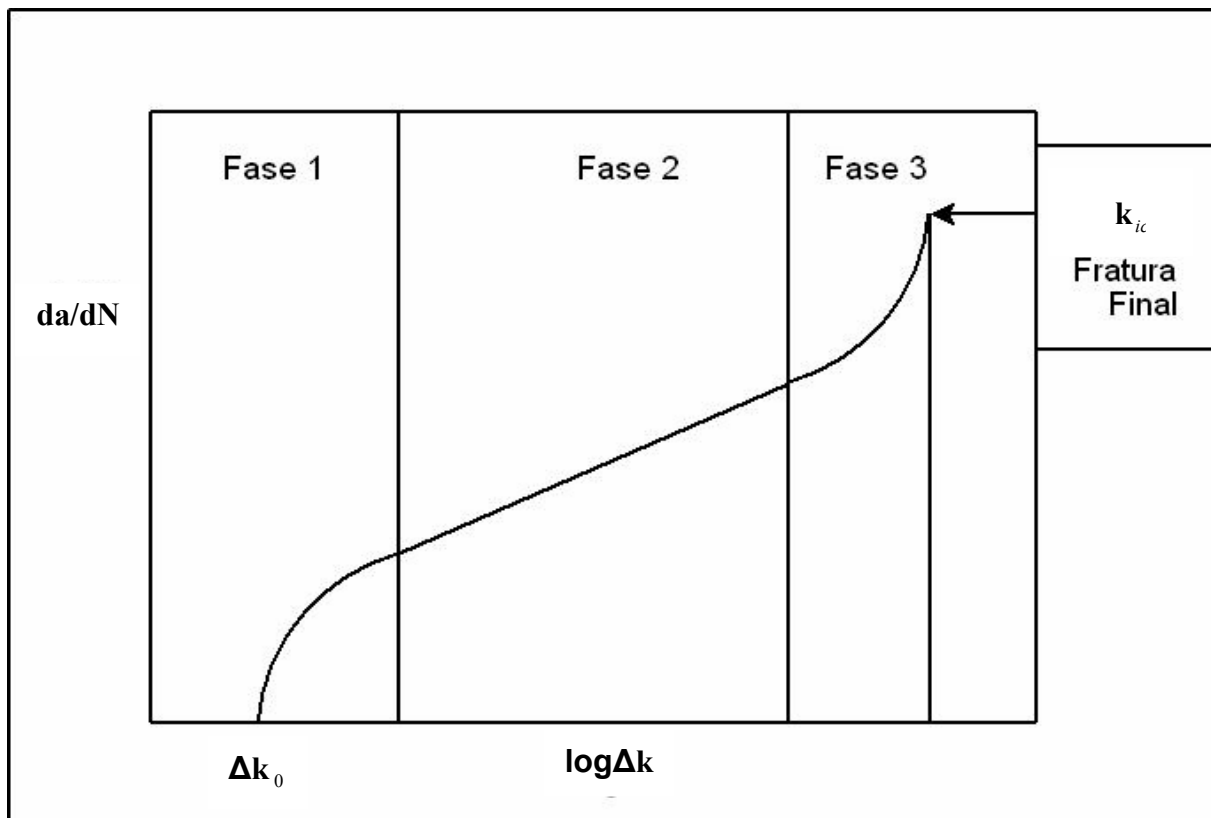


Figura 2.3: Características da curva de taxa de crescimento de trinca de fadiga.

Fonte: FILHO (2004).

A equação de Paris é uma das mais utilizadas nos cálculos de fadiga, e representa a propagação na fase 2:

$$\frac{da}{dN} = A(\Delta K)^m, \quad (2.2)$$

Sendo  $a$  o comprimento de trinca,  $\frac{da}{dN}$  representa a taxa de crescimento de trinca de fadiga,  $A$  e  $m$  são constantes materiais. E  $\Delta K$  representa a variação do fator de intensidade de tensões. Em aços ferríticos, os valores das constantes  $A$  e  $m$  são  $6,9 \times 10^{-3}$  e 3, respectivamente, PARIS (1963).

### 2.1.4. Propagação por Corrosão

A propagação de trincas por corrosão-sob-tensão (CST) ocorre em valores constantes de tensão. Algumas referências bibliográficas indicam que valores tão baixos quanto 10% da tensão de escoamento são suficientes para deflagrar o processo sob certas condições, METALS HANDBOOK (2003). Isto porque, associado à tensão mecânica aplicada ou residual, existe o fenômeno eletroquímico que impede a estabilização do crescimento de uma descontinuidade. A CST é um fenômeno que geram falhas “retardadas”, isto é, a falha do componente não ocorre no início do processo. Três fases distintas do mecanismo de CST podem ser citadas, METAL HANDBOOK (2003).

- 1) Nucleação e estágio 1 de propagação, período em que o material perde a passivação e aparecem os primeiros entalhes em escala microscópica. Está mais associada aos fenômenos eletroquímicos que mecânicos. As tensões, neste estágio, agem no sentido de facilitar a ruptura de filmes protetores (pintura).
- 2) No estágio 2, a velocidade de propagação pode ser facilmente medida por equações que relacionam crescimento de trinca a tenacidade. É estabelecido o conceito do  $K_{ICST}$ , valor de intensidade de tensões a partir do qual dar-se-á a propagação subcrítica da trinca de CST.
- 3) Estágio final, caracterizado pelo aumento da velocidade de propagação pela aproximação do  $K_I$  do valor crítico.

As características de cada um desses estágios estão representados pela Figura 2.4.

Tensões aplicadas inferiores à tensão limite inferior não levarão ao desenvolvimento da CST. Tensões aplicadas entre a tensão limite inferior e a tensão de fratura, levarão à deflagração do processo e propagação subcrítica das trincas. Neste intervalo, quanto maior a tensão aplicada, menor o tempo para a fratura final. Entre a tensão limite inferior e a tensão de fratura, ocorrerá a propagação subcrítica, pelo crescimento do  $K_I$  a partir do  $K_{ICST}$ . Já para tensões maiores que a tensão de fratura, haverá ruptura instantânea sem que haja o desenvolvimento da CST. Enquanto o  $K_I$  não superar o  $K_{IC}$ , haverá crescimento subcrítico, conforme Figura 2.5.



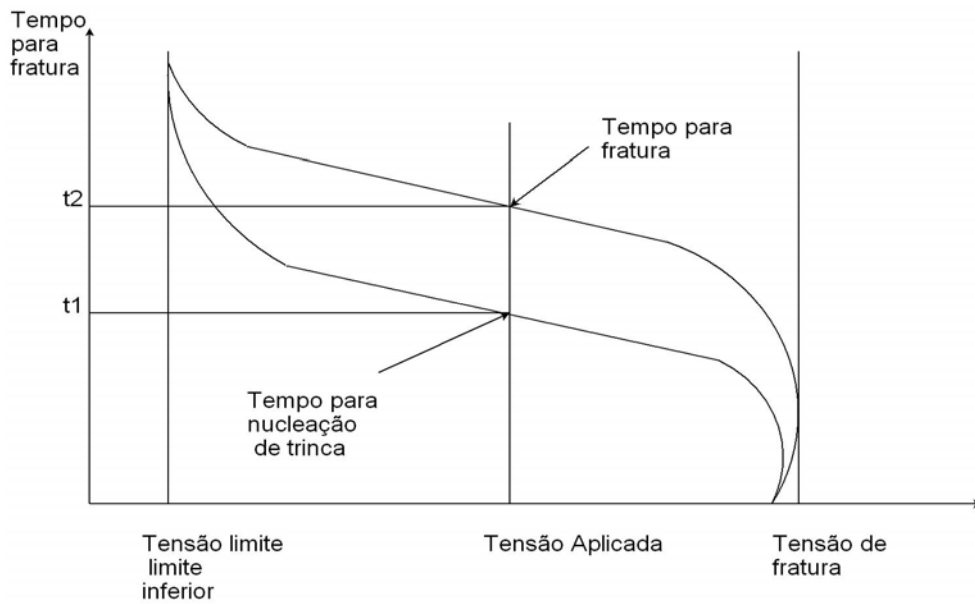


Figura 2.4: Gráfico de propagação de trincas de CST. Fonte: FILHO (2004).

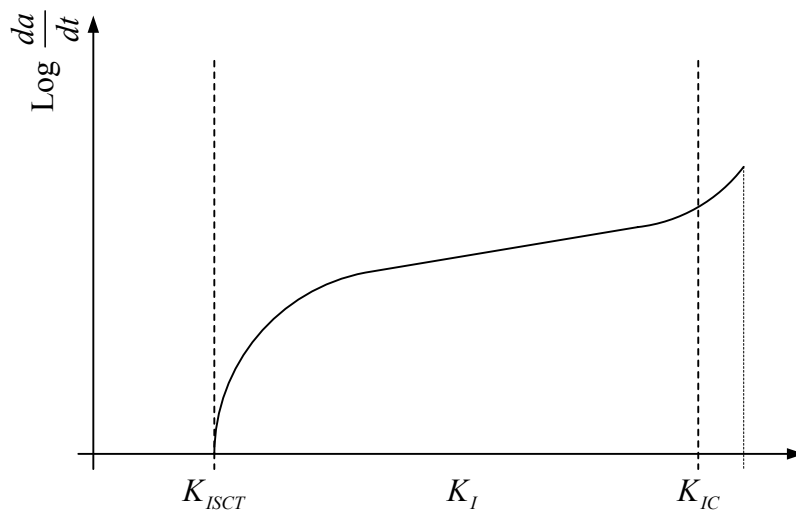


Figura 2.5: Variação do valor de  $K$  e estágio de CST. Fonte: FILHO (2004).

No momento em que a trinca atingir o valor crítico, a tenacidade do material será superada e haverá uma ruptura final crítica, que determinará a falha do componente. Alguns meios corrosivos podem agir no sentido de reduzir a tenacidade dos materiais, como é o caso dos aços carbono quando sujeitos à penetração de hidrogênio, ao mesmo tempo em que ocorre o crescimento subcrítico. Os valores de  $K_{ICST}$  são menores, quanto maior for o limite de resistência em aços ferríticos, METALS HANDBOOK (2003).

A velocidade de propagação  $da/dt$ , é uma função de  $K_I$ , ENGELHARDT (1999). Considera-se que as pontas das trincas são as zonas de dissolução anódica, enquanto as suas bordas são áreas catódicas onde ocorre a redução de hidrogênio. Materiais ferríticos são grandemente

*Estável*

*Sub*

afetados pela penetração de hidrogênio atômico originado nas reações catódicas. Teores crescentes de hidrogênio são responsáveis pelo aumento da velocidade de propagação das trincas, também em aços ferríticos.

Aços inoxidáveis austeníticos geralmente são resistentes à fragilização pelo hidrogênio, nas condições de recozido ou levemente trabalhado a frio. Entretanto, são bastante afetados pelo hidrogênio quando possuem baixo limite de resistência, METALS HANDBOOK (2003).

## 2.2. MECÂNICA DA FRATURA APLICADA À FADIGA

### 2.2.1. Breve Histórico

Falhas em navios construídos durante a 2ª Guerra Mundial chamou a atenção de pesquisadores como Irwin, Orowan e Mott, que aprimoraram os trabalhos já desenvolvidos por Griffith, que em 1920 publicou um importante trabalho, associando a tensão de fratura ao tamanho de trinca, ANDERSON (1995). No final dos anos 50, os fundamentos da Mecânica da Fratura Elástica Linear foram consolidados, quando também Paris e outros pesquisadores lançaram os conceitos da aplicação da Mecânica da Fratura à fadiga. Entretanto, a plastificação na ponta da trinca e a não aplicabilidade da Mecânica da Fratura Elástica Linear neste caso, levaram os pesquisadores a buscar alternativas de análise.

Irwin (1948) propôs uma extensão da Mecânica da Fratura Elástica Linear, enquanto Dugdale (1954) e outros propuseram modelos baseados na plastificação na extremidade da trinca. Rice (1968) desenvolveu o parâmetro que caracteriza o comportamento não linear na ponta da trinca: a *integral J*, fundando a partir daí a Mecânica da Fratura Elastoplástica. Ainda nos anos 60, no Reino Unido, Wells (1961) desenvolveu o parâmetro CTOD (*Crack Tip Opening Displacement*), que começou a ser utilizado na análise de fraturas em estruturas soldadas.

O desenvolvimento da Mecânica da Fratura avançou rapidamente nos EUA por força das demandas da área nuclear, enquanto no Reino Unido, por demandas da área *offshore*. SHIN (1996) demonstrou a relação entre a *integral J*, utilizada nos EUA, com o CTOD, mais utilizado no Reino Unido, unindo os conceitos existentes e fundando a Mecânica da Fratura nos moldes de hoje.

### 2.2.2. Concentração de Tensão

INGLIS (1913) foi o primeiro a quantificar os efeitos da concentração de tensão ao analisar os entalhes elípticos em placas planas. Nesta análise obteve uma expressão que determina a tensão na extremidade do maior eixo da elipse Figura 2.6. Considerou que as tensões no entalhe não eram influenciadas pelo contorno da placa, ou seja, a largura muito maior que  $2a$  e o comprimento muito maior que  $2b$ . A equação de tensão no ponto  $A$  é dada por:

$$\sigma_A = \sigma \left( 1 + 2 \sqrt{\frac{a}{\rho}} \right), \quad (2.3)$$

sendo,  $\rho = b^2 / a$  o raio de curvatura da ponta da elipse.

De acordo com a equação 2.3, o efeito de concentração de tensões é maior quanto mais afiado for o entalhe, ou seja, quanto menor for o raio de curvatura da elipse.

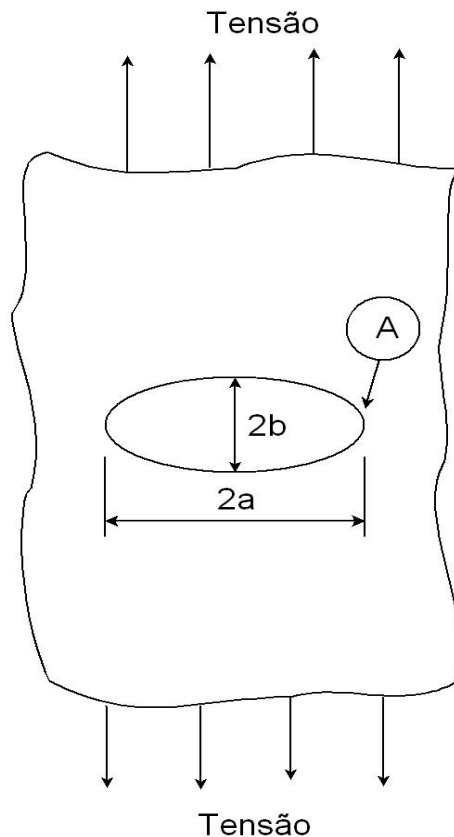


Figura 2.6: Entalhe elíptico numa placa plana.

### 2.2.3. Fator de Intensidade de Tensão

Na Figura 2.7 define-se os três tipos de movimentos relativos das duas superfícies das trincas. Cada um desses modos está associado a um tipo básico de campo de tensões na vizinhança da ponta da trinca, e qualquer problema de deformação na ponta desta, pode ser tratado como uma combinação desses modos de deslocamento. Dessa forma, o campo de tensões pode ser também tratado como a combinação dos três tipos básicos de campo de tensão. Em projeto, o modo I é o mais importante, pois corresponde ao modo de falha por ruptura da maioria das peças trincadas, DA ROSA (2002).

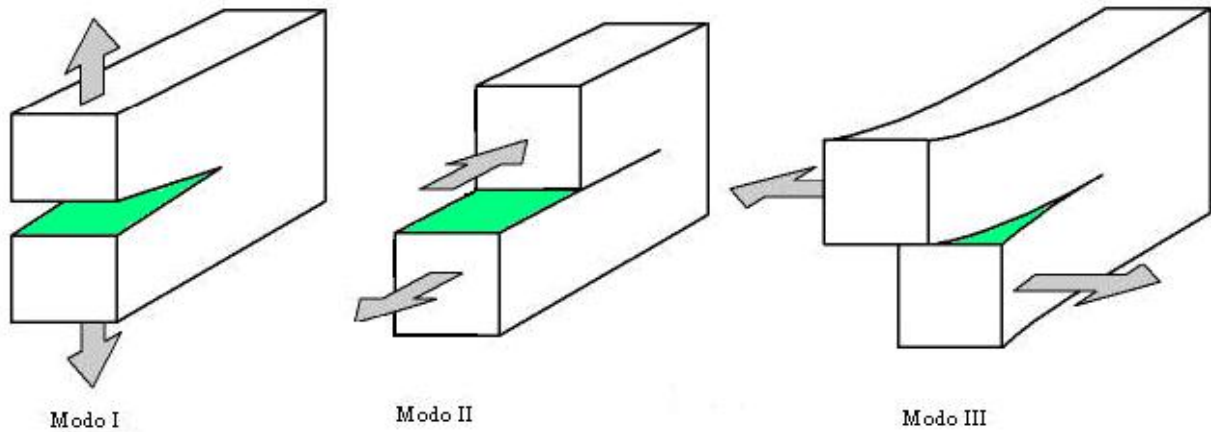


Figura 2.7: Modos de fratura.

Na Mecânica da Fratura Elástica Linear, a trinca pode ser caracterizada em termos de um parâmetro simples  $K$ , chamado fator de intensidade de tensão, para quantificar o campo de tensões em torno de uma trinca numa peça predominante elástica, IRWIN (1957).

Cada modo está associado a um fator de intensidade de tensões:  $K_I$  para o modo I;  $K_{II}$  para o modo II e  $K_{III}$  para o modo III, Figura 2.7. O valor crítico de  $K_I$ , chamado  $K_{IC}$ , é uma propriedade do material e é chamado de tenacidade à fratura.

Num certo ponto, o tamanho da trinca torna-se grande o bastante para aumentar o fator de intensidade de tensão  $K_I$  na extremidade da trinca, até o nível da tenacidade à fratura do material  $K_{IC}$ , quando ocorre uma falha repentina no próximo ciclo de tensão de tração. Esse mecanismo de falha é o mesmo tanto se a condição  $K_I = K_{IC}$  for alcançada pelo motivo de a trinca atingir um tamanho suficiente.

#### 2.2.4. Relação do Fator de Intensidade de Tensão com a Energia Liberada

A taxa de liberação de energia  $G$  e os fatores de intensidade de tensão  $K_I$ ,  $K_{II}$  e  $K_{III}$  nos três modos de fratura são exclusivamente relacionados IRWIN (1957), sendo:

$$G_I = \frac{K_I^2}{E^I}, \quad G_{II} = \frac{K_{II}^2}{E^I}, \quad G_{III} = \frac{K_{III}^2}{2G^I} \quad (2.4)$$

em que,  $E^I = E/(1-\nu^2)$  em estado plano de deformação e  $E^I = E$  em estado plano de tensão.  $E$  é o módulo de elasticidade e  $\nu$  é o coeficiente de Poisson. No caso geral,

$$G = \frac{K_I^2}{E^I} + \frac{K_{II}^2}{E^I} + \frac{K_{III}^2}{2G^I}, \quad (2.5)$$

em que,  $G'$  é o módulo de cisalhamento dado por

$$G' = \frac{E}{2(1 + \nu)} \tag{2.6}$$

**2.2.5. Geometria de Trinca**

Uma geometria de defeito que se apresenta com bastante frequência em problemas práticos tridimensionais é o de uma trinca com projeção elíptica, ou semi-elíptica. Neste caso o fator de intensidade de tensão varia ao longo da frente da trinca. A solução para o fator geométrico para trincas de projeção elíptica, em um plano perpendicular à direção de carregamento, modo I, Figura 2.8, é fornecida pelas expressões 2.7 a 2.10, DA ROSA (2002).

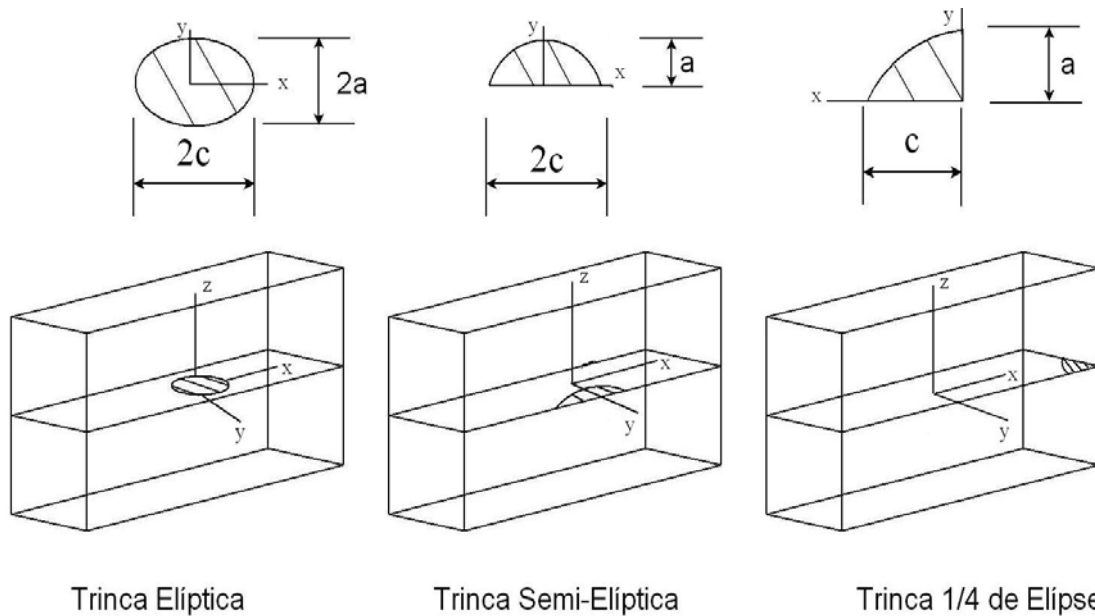


Figura 2.8: Situações de geometria para uma trinca elíptica, modo I. Fonte: Da Rosa (2002).

Trinca elíptica interna:

$$Y = \frac{1}{\phi} f(\beta) \tag{2.7}$$

Trinca circular interna:

$$Y = \frac{2}{\pi} \tag{2.8}$$

Trinca semi-elíptica na face:

$$Y = 1,12 \frac{1}{\phi} f(\beta) \tag{2.9}$$

Trinca de um quarto de elipse, na aresta:

$$Y = 1,12^2 \frac{1}{\phi} f(\beta) . \quad (2.10)$$

Estas expressões fazem uso da integral elíptica do segundo tipo,  $\phi$ , que depende da relação entre os semi-eixos da elipse, conforme a tabela 2.1:

Tabela 2.1: Relação entre  $a/c$  e  $\phi$ . Fonte: DA ROSA (2002)

$a/c$	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$\phi$	1,00	1,02	1,05	1,10	1,15	1,21	1,28	1,35	1,42	1,49	1,57

Quanto à função  $f(\beta)$ , esta caracteriza a variação do fator geométrico, portanto do fator de intensidade de tensão, ao longo da borda da trinca, isto é, a sollicitação da frente da trinca é variável ponto a ponto, ao contrário dos casos vistos até agora, onde a sollicitação na borda da trinca era independente do ponto considerado.

$$f(\beta) = \left[ \text{sen}^2 \beta + (a/c)^2 \cos^2 \beta \right]^{1/4} \quad (2.11)$$

O cálculo da função depende do ângulo  $\beta$ , que é obtido com o uso de uma circunferência auxiliar, circunscrita à elipse, conforme indicado na Figura 2.9.

Pela expressão da função  $f(\beta)$ , vê-se que esta assume um máximo, igual à unidade, para pontos sobre o semi-eixo menor da elipse, ou seja,  $\beta = 90^\circ$ , atingindo um mínimo para os pontos sobre o semi-eixo maior,  $\beta = 0^\circ$ . Desta forma os pontos mais propensos para iniciar a propagação da trinca são os pontos próximos aos extremos do semi-eixo menor, aumentando-o, fazendo com que a trinca elíptica, tenda assim, a uma trinca circular, onde  $f(\beta)$  é constante ao longo de todo o perímetro da mesma, fazendo  $a = c$  na expressão de  $f(\beta)$ . Uma geometria de trinca semi-elíptica é bastante comum em peças onde a trinca tem origem a partir de um defeito superficial, que nucleia a trinca, por sua vez, penetrando no material.

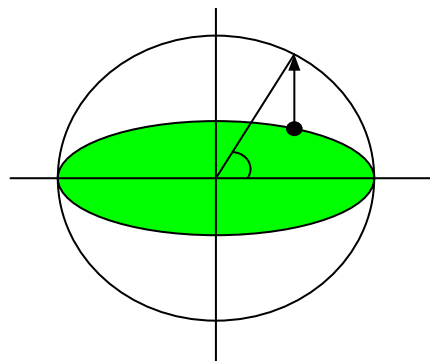


Figura 2.9: Circunferência circunscrita à elipse. Fonte: Da ROSA (2002).

### 2.2.6. Propagação Crítica ou Fratura Frágil

Propagação crítica ou fratura frágil é aquela caracterizada por rápida propagação, levando ao rompimento e separação de seções de um componente ou equipamento, com baixa liberação de energia e sem que haja deformação plástica apreciável. As superfícies de fratura são brilhantes, sem estricção, planas (normalmente na direção perpendicular da máxima tensão normal). Dá-se pela ocorrência de baixa tenacidade do material, por estado plano de deformação ou devido a condições transientes como, por exemplo, choques térmicos. Microscopicamente em aços ferríticos, uma fratura frágil apresenta relevos e arestas que caracterizam o fenômeno da clivagem, com orientação radial que aponta para a direção de nucleação (METALS HANDBOOK (2003)).

A propagação frágil ocorre sem que haja deformação plástica significativa, que é uma característica do estado plano de deformação. Utiliza-se para esta condição a Mecânica da Fratura Elástica Linear, podendo ser traduzida pela equação:

$$K_I = Y \sigma \sqrt{\pi a}, \quad (2.12)$$

sendo,  $K_I$  é o fator intensificador de tensão do modo I de carregamento (modo I);  $\sigma$  é a tensão nominal;  $a$  é o tamanho da trinca e  $Y = f(a/W)$  é o fator de forma que depende da geometria do corpo de prova.

Pela Mecânica da Fratura Elástica Linear, haverá propagação de uma trinca no momento em que o valor de  $K_I$ , calculado pela equação acima descrita, superar o valor da tenacidade do material  $K_{mat}$  (crítico), obtido a partir de ensaios de tenacidade. Então, a condição de falha será definida por:

$$K_{mat} \leq Y \sigma \sqrt{\pi a} \quad (2.13)$$

A Mecânica da Fratura Elástica Linear está limitada a situações onde a plastificação na ponta da trinca é pequena quando comparada às dimensões da mesma. Materiais que apresentam elevada tenacidade terão uma plastificação maior que os materiais frágeis ou de elevada resistência. E resistirão mais a propagação de defeitos, reduzindo a precisão da Mecânica da Fratura Elástica Linear e dificultando sua aplicação.

A partir deste ponto utiliza-se a Mecânica da Fratura Elastoplástica, que possui ferramentas adequadas para calcular a estabilidade de defeitos em materiais que apresentam elevada plasticidade e tenacidade. A utilização de um dos métodos da mecânica da fratura deve ser avaliada em função destas características dos materiais e da geometria da peça ou equipamento.

### 2.2.7. Propagação Subcrítica

A propagação subcrítica de uma descontinuidade dá-se em pequenos incrementos (saltos), pela elevação das cargas aplicadas ou por mecanismos de danos como fadiga, fluência ou corrosão

sob-tensão, que incorporam conceitos relacionados à variação do fator intensificador de tensões ( $\Delta K$ ). Torna-se possível, em função das características do componente e do carregamento, projetar sua vida útil.

A fratura dúctil ocorre com apreciável deformação plástica final, ao mesmo tempo perpendicularmente às maiores tensões normais ou a 45° das mesmas, pelo efeito de cisalhamento.

O cálculo da vida residual do componente se torna possível, partindo de equações dos mecanismos de propagação – geralmente função do número de ciclos ou do tempo ( $da/dN$  ou  $da/dt$  respectivamente). O limite de crescimento alcançado será o tamanho crítico da trinca, quando haverá ruptura frágil instantânea do componente, conforme visto na Figura 2.10.

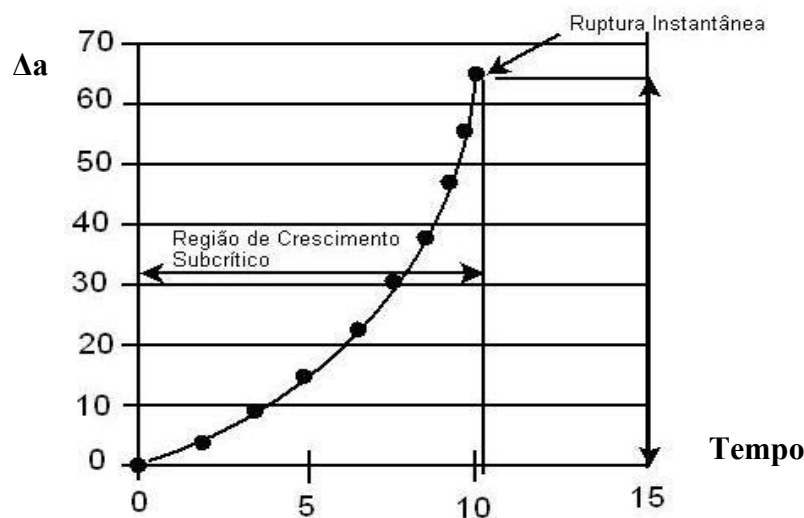


Figura 2.10: Crescimento subcrítico de descontinuidade até um valor crítico. Fonte: FILHO (2004).

### 2.2.8. Fratura Dúctil

A ocorrência de propagação depende das características relacionadas ao tipo de carregamento, ao tamanho da descontinuidade e ao material, podendo ser indiretamente medida através do conceito da *integral J*. A *integral J* é um valor de energia absorvido através do campo elastoplástico de tensão/deformação que se obtém sobre um caminho em volta da ponta de uma trinca (BARSOM, 1987).

Este conceito foi desenvolvido por Rice (1968), e possibilita caracterizar se haverá ou não propagação dúctil e permite o cálculo do valor de  $\Delta a$  (incremento sobre uma descontinuidade conhecida). A Figura 2.11 representa uma curva característica de J-R (curva de resistência à aplicação de um carregamento):



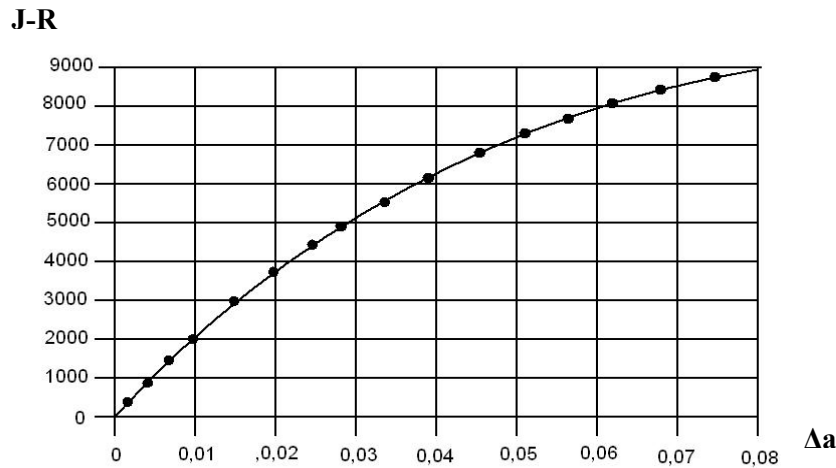


Figura 2.11:  $J \times \Delta a$  para o AISI 304. Fonte; FILHO (2004).

O parâmetro  $J$ , ou  $J_{total}$  é composto de duas parcelas distintas, que se somam algebricamente:  $J_{el}$  (elástico) e  $J_{pl}$  (plástico). O  $J_{el}$  é calculado em função da parcela do comportamento elástico do material, e pode ser obtido através de relações com o fator de intensidade de tensões  $K_I$  :

$$J_{el} = \frac{K_I(1-\nu)^2}{E}, \quad (2.14)$$

para um estado plano de deformação, ou

$$J_{el} = \frac{K_I^2}{E} \quad (2.15)$$

para um estado plano de tensão, sendo que  $E$  e  $\nu$  são, respectivamente, o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson.

O valor de  $J_{pl}$  é obtido através de soluções e cálculos que relacionam tensão de escoamento, carregamento e geometria. Quando ao valor de  $J_{total}$ , ultrapassa um valor crítico de  $J_{IC}$ , que é uma propriedade do material (determinada por ensaio do ASTM E1820 e representa a tenacidade do material no início da propagação de uma trinca), poderá haver propagação instável da trinca. Caso  $J_{IC}$  não seja ultrapassado, será verificado o arredondamento da ponta da trinca com uma pequena propagação, FILHO (2004).

Outra maneira de verificar se haverá propagação subcrítica, é através da curva R, também chamada de curva de resistência à propagação de trincas. Uma derivação da Mecânica da Fratura Elástica Linear que considera a situação de um componente não estar sujeito ao estado plano de deformação. Através das curvas R é possível prever se haverá propagação crítica ou subcrítica para um dado material e configuração do estado de tensões do componente. As curvas R consideram a comparação da sollicitação x resistência de um componente ( $R$ ), tendo a forma geral da Figura 2.12.,

em que,  $\sigma_3, \sigma_2, \sigma_1$  são valores de tensões aplicadas ao material. E os valores de R (curva de resistência) são obtidos através de ensaios pelo ASTM E561, enquanto os valores da curva de solicitação são obtidos através da equação 2.16.

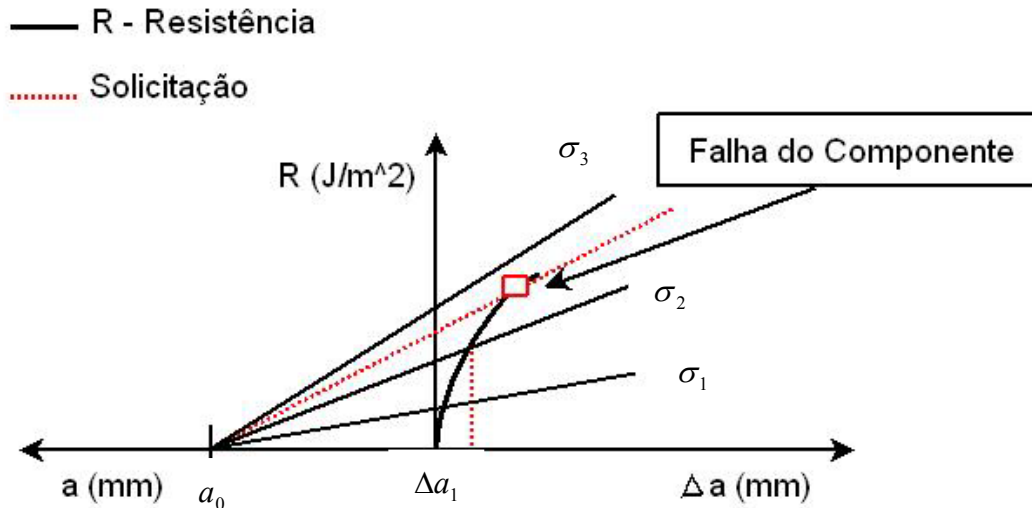


Figura 2.12: Gráfico da curva R. Fonte: FILHO (2004).

$$G = \frac{(Y^2 \sigma^2 \pi a)}{E}, \quad (2.16)$$

Sendo,  $G$  a taxa de liberação da soma das energias elástica e plástica.

Para cada valor de tensão, haverá um valor de  $G$  diretamente relacionado a um tamanho de trinca. Por este motivo, as curvas de solicitação são lineares. Conforme mostrado na Figura 2.12, os valores muito baixos de tensão ( $\sigma_1$ ) provocarão nenhum ou pequeno incremento no tamanho da trinca ( $\Delta a$ ), pois estarão interceptando a curva de resistência no trecho vertical. Uma tensão maior poderá interceptar a curva de resistência no trecho inclinado, caracterizando o aumento de trinca  $\Delta a_1$ , por crescimento subcrítico. Para um valor maior de tensão ( $\sigma_3$ , por exemplo), a curva de solicitação não mais interceptará a curva de resistência, indicando a região de instabilidade da trinca. O momento exato da falha, caracterizado pela intersecção das duas curvas está representado pelo ponto vermelho, ocorrendo uma tensão entre  $\sigma_3$  e  $\sigma_2$ . A taxa de energia de fratura ( $G$ ) para aço dúctil é na ordem de  $300 \text{ J/m}^2$ , BURG & HOSSON (1995).

## 2.3. PROPAGAÇÃO DE ONDAS

### 2.3.1. Introdução

A teoria de propagação de ondas elásticas em meios sólidos começou a ser desenvolvida no século XIX com Stokes, Poisson, Rayleigh e Kelvin, entre outros, a partir da teoria da elasticidade.

A determinação da resposta de sistemas mecânicos submetidos a cargas de impacto pode ser obtida por meio da teoria de propagação de ondas. Conforme GRAFF (1975) o fenômeno pode, basicamente, ser dividido em três categorias:

- Ondas Elásticas: quando as tensões do material estão em regime elástico.
- Ondas Viscoelásticas: quando os efeitos viscoelásticos estão presentes.
- Ondas plásticas: quando o limite de escoamento do material é ultrapassado.

A seguir serão discutidos alguns aspectos básicos da teoria de propagação de ondas elásticas em meios sólidos, visando um melhor entendimento do fenômeno e de suas simplificações para a obtenção de expressões que determinam as tensões geradas no impacto.

### 2.3.2. Propagação de Ondas Elásticas em Meios Sólidos Infinitos

Considere as tensões atuantes nos elementos das Figuras 2.13a e 2.13b. Os sub-índices das componentes de cisalhamento representam, o 1º, o plano em que está atuando e o 2º a sua direção. As componentes de tensão das outras faces dos elementos foram omitidas por simplificação.

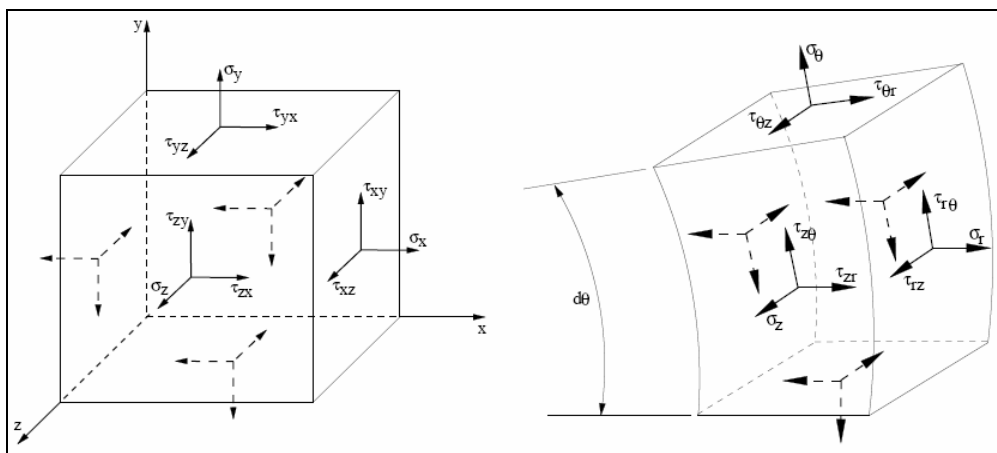


Figura 2.13: Coordenadas cartesianas: Coordenadas cilíndricas. Fonte: MALAVOLTA (2003).

Na ausência de forças de campo, o balanço de forças fornece em coordenadas cartesianas:

$$\rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \tag{2.17}$$

$$\rho \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} = \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \tag{2.18}$$

$$\rho \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} = \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z}, \tag{2.19}$$

Sendo,  $u_x$ ,  $u_y$  e  $u_z$ , respectivamente, os deslocamentos nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$ . Em coordenadas cilíndricas, têm-se:

$$\rho \frac{\partial^2 u_r}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} \quad (2.20)$$

$$\rho \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial t^2} = \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial z} + \frac{2\tau_{r\theta}}{r} \quad (2.21)$$

$$\rho \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} = \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial \theta} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\tau_{rz}}{r}, \quad (2.22)$$

Onde,  $u_r$ ,  $u_\theta$  e  $u_z$  são, respectivamente, os deslocamentos nas direções: radial, circunferencial e axial. A tabela 2.2 ilustra nos sistemas de coordenadas cartesianas e cilíndricas, algumas relações fundamentais da teoria da elasticidade.

Tabela 2.2: Algumas relações fundamentais da elasticidade. Fonte: MALAVOLTA (2003).

Sistema $x, y, z$	Sistema $r, \theta, z$
$\varepsilon_x = \frac{\partial u_x}{\partial x}$	$\varepsilon_r = \frac{\partial u_r}{\partial r}$
$\varepsilon_y = \frac{\partial u_y}{\partial y}$	$\varepsilon_\theta = \frac{u_r}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial \theta}$
$\varepsilon_z = \frac{\partial u_z}{\partial z}$	$\varepsilon_z = \frac{\partial u_z}{\partial z}$
$\gamma_{xy} = \frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial y}$	$\gamma_{\theta z} = \frac{1}{r} \frac{\partial u_z}{\partial \theta} + \frac{\partial u_\theta}{\partial z}$
$\gamma_{yz} = \frac{\partial u_z}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial z}$	$\gamma_{zr} = \frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial r}$
$\gamma_{zx} = \frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x}$	$\gamma_{r\theta} = \frac{\partial u_\theta}{\partial r} - \frac{\partial \theta}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta}$
$\Delta = \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z}$	$\Delta = \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_r}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial u_z}{\partial z}$
$2\omega_x = \frac{\partial u_z}{\partial y} - \frac{\partial u_y}{\partial z}$	$2\omega_r = \frac{1}{r} \frac{\partial u_z}{\partial \theta} - \frac{\partial u_\theta}{\partial z}$
$2\omega_y = \frac{\partial u_x}{\partial z} - \frac{\partial u_z}{\partial x}$	$2\omega_\theta = \frac{\partial u_r}{\partial z} - \frac{\partial u_z}{\partial r}$
$2\omega_z = \frac{\partial u_y}{\partial x} - \frac{\partial u_x}{\partial y}$	$2\omega_z = \frac{1}{r} \left[ \frac{\partial}{\partial r} (r u_\theta) - \frac{\partial u_r}{\partial \theta} \right]$
$\sigma_i = \lambda \Delta + 2\mu \varepsilon_i$	$\sigma_i = \lambda \Delta + 2\mu \varepsilon_i$
$\tau_{ij} = \tau_{ji} = \mu \gamma_{ij} = \mu \gamma_{ji}$	$\tau_{ij} = \tau_{ji} = \mu \gamma_{ij} = \mu \gamma_{ji}$

Substituindo-se essas expressões, em coordenadas cartesianas, nas equações (2.17) à (2.19) obtêm-se

$$\rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial \Delta}{\partial x} + \mu \nabla^2 u_x \quad (2.23)$$

$$\rho \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial \Delta}{\partial y} + \mu \nabla^2 u_y \quad (2.24)$$

$$\rho \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial \Delta}{\partial z} + \mu \nabla^2 u_z, \quad (2.25)$$

em que,  $\nabla^2$  é operador Laplaciano dado por:

$$\nabla^2 = \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right).$$

e  $\lambda$  e  $\mu$  são as constantes de Lamé:

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}; \quad \mu = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

O mesmo para sistema de coordenadas cilíndricas fornece:

$$\rho \frac{\partial^2 u_r}{\partial t^2} = (\lambda + 2\mu) \frac{\partial \Delta}{\partial r} - \frac{2\mu}{r} \frac{\partial \omega_z}{\partial \theta} + 2\mu \frac{\partial \omega_\theta}{\partial z} \quad (2.26)$$

$$\rho \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial t^2} = (\lambda + 2\mu) \frac{1}{r} \frac{\partial \Delta}{\partial \theta} - 2\mu \frac{\partial \omega_r}{\partial z} + 2\mu \frac{\partial \omega_z}{\partial r} \quad (2.27)$$

$$\rho \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} = (\lambda + 2\mu) \frac{\partial \Delta}{\partial z} - \frac{2\mu}{r} \frac{\partial}{\partial r} [r \omega_\theta] + \frac{2\mu}{r} \frac{\partial \omega_r}{\partial \theta}. \quad (2.28)$$

A solução das equações 2.23 a 2.25 ou 2.26 a 2.28 para determinadas condições de contorno, determina a trajetória de um ponto do meio em coordenadas cartesianas ou cilíndricas respectivamente.

### 2.3.3. Propagação de Ondas Elásticas em Meios Sólidos Finitos

Quando um pulso de tensão se propaga pelo meio, um número infinito de componentes de frequência pode estar presente. Cada uma destas componentes viaja com velocidade e comprimento de ondas próprias. Essa velocidade de propagação é denominada velocidade de fase  $c$ .

Na maioria dos casos a propagação é um fenômeno dispersivo, ou seja, a velocidade de fase das ondas  $c$ , é função de sua frequência angular  $\omega$  ou do comprimento de onda  $\lambda$ . A análise dos efeitos de dispersão é necessária para determinar a variação da velocidade de fase com o comprimento de onda ou com o número de onda  $\xi$ . Essa investigação pode ser representada na forma de curvas denominadas curvas de dispersão.

Uma aproximação para a solução do problema em vigas infinitas de secção circular uniforme, conforme GOLDSMITH (1960), foi dada por *Pochhammer and Chree* cujas equações consideram a propagação de infinitas ondas senoidais ao longo do eixo  $z$  da viga, tal que o deslocamento de cada ponto é uma função harmônica simples da coordenada  $z$  e do tempo, Figura 2.14, conforme equações 2.29 à 2.31.

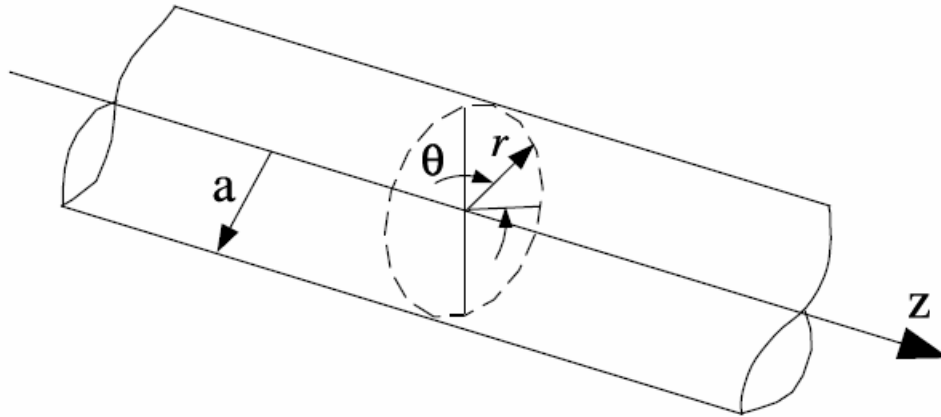


Figura 2.14: Coordenada para o sólido cilíndrico. Fonte: MALAVOLTA (2003).

$$u_r = U e^{i(\xi z + \omega t)} \quad (2.29)$$

$$u_\theta = V e^{i(\xi z + \omega t)} \quad (2.30)$$

$$u_z = Z e^{i(\xi z + \omega t)}, \quad (2.31)$$

Sendo,  $U$ ,  $V$  e  $W$  funções de  $r$  e  $\theta$ ,  $\xi$  é o número de onda e  $\omega$  a frequência angular.

Substituindo os deslocamentos  $u_r$ ,  $u_\theta$  e  $u_z$  nas equações 2.17 a 2.19 aplicando-se às condições de contorno na superfície da barra,  $r = b$ , onde  $\sigma_r = \tau_{r\theta} = \tau_{rz} = 0$ , expressões podem ser desenvolvidas para os deslocamentos e para a velocidade de fase das ondas. Três diferentes tipos de onda podem ser considerados em vigas: longitudinais, flexionais e torcionais. O 1º caso será discutido posteriormente.

Para cada tipo é possível obter uma equação envolvendo os parâmetros adimensionais  $c/c_0$ ,  $r/\Lambda$  e  $\nu$  em termos da função de Bessel, onde  $c_0 = \sqrt{E/\rho}$ . As raízes reais da equação freqüencial podem ser determinadas numericamente e plotadas em curvas de dispersão com diferentes ramos. Cada ramo representa um modo de propagação da onda e está associado a um modo de vibrar e à sua frequência natural. Maiores detalhes da obtenção da equação freqüencial e das curvas de dispersão podem ser demonstradas em DAVIES (1948), KOLSKY (1963), GRAFF (1975) e ACHENBACH (1975).

No caso de vigas de secção não circular, o problema torna-se mais complicado. E sua solução tem sido proposta por vários autores. Em MORSE (1950) são obtidas curvas de dispersão e valores experimentais para curvas longitudinais em vigas retangulares, com diferentes valores de coeficientes de Poisson, e os valores calculados mostraram boa concordância com os valores medidos para grandes comprimentos de onda. MINDLIN & FOX (1960) desenvolvem uma formulação a partir de soluções de propagação de ondas em placas infinitas para vigas de secção retangular. NIGRO (1996) desenvolve soluções aproximadas pelo método de Ritz para as curvas de dispersão dos modos: longitudinal, flexional e torcional de vigas retangulares. AALAMI (1973) apresenta uma formulação baseada em métodos de discretização e no método de Rayleigh-Ritz para a propagação de ondas em vigas ortotrópicas com secção arbitrária. FRASER (1969) aplica o método da colocação para obter curvas de dispersão em vigas retangulares infinitas. NAYFEH & ABDELRAHMAN (2000) propõem um modelo aproximado para a obtenção de curvas de dispersão em vigas retangulares simplificando as condições de contorno. LIU & LI (2000) estudam a propagação de ondas torcionais e vigas retangulares ortotrópicas aplicando o método da bi-característica para resolver as equações diferenciais do problema.

#### 2.3.4. Ondas Longitudinais

O elemento diferencial tem comprimento  $dy$  e secção transversal  $A_0$ . Inicialmente a barra está em equilíbrio estático, Figura 2.15. Após o impacto em uma das extremidades da barra, partículas no elemento diferencial estão em compressão devido às forças  $F_1$  e  $F_2$ , conforme mostrado na Figura 2.16.

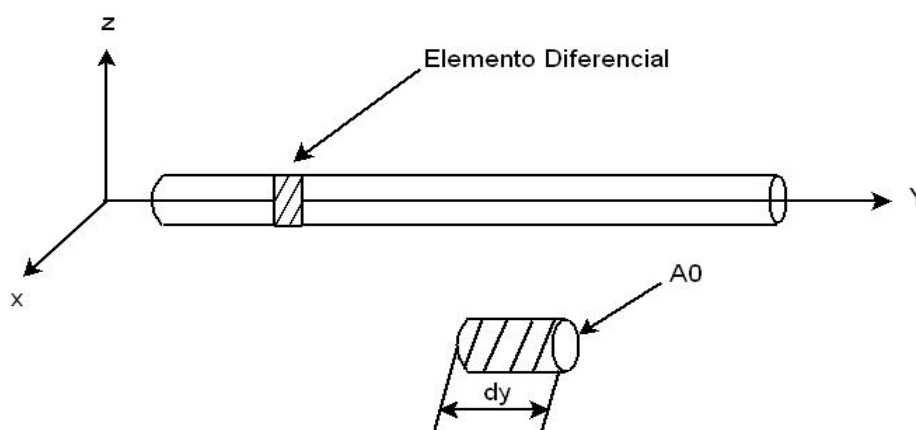


Figura 2.15: Barra cilíndrica com seu respectivo elemento diferencial. Fonte: KAISER (1998).



Figura 2.16: Elemento diferencial em compressão. Fonte: KAISER (1998).

As forças de compressão no elemento diferencial estão relacionadas com as tensões impostas na seção transversal do mesmo. Para barras elásticas, as tensões estão relacionadas com as deformações pelo módulo de elasticidade. As deformações podem ser expressas em termos de deslocamentos. Portanto, as forças de compressão podem ser expressas em termos de deslocamentos,  $u$ :

$$F_y = A_o E \frac{\partial u}{\partial y}. \quad (2.32)$$

Considerando um estado uniaxial de tensão, a força atua na direção normal às faces do elemento diferencial como mostrado na figura 2.17.



Figura 2.17: Forças de compressão no elemento diferencial. Fonte: KAISER (1998).

Somando as forças atuantes no elemento diferencial aplicando a segunda Lei de Newton,  $F = m y''$ , obtém-se a seguinte equação, que descreve o movimento dos pulsos de tensão.

$$A_0 E \frac{\partial u_1}{\partial y} - A_0 E \frac{\partial u_2}{\partial y} = A_0 dy \rho \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} \quad (2.33)$$

Essa equação supõe que a aceleração da partícula é constante no elemento diferencial. Simplificando a equação 2.32, chega-se à equação do movimento da barra.

$$C_o^2 \left( \frac{\partial u_1}{\partial y} - \frac{\partial u_2}{\partial y} \right) = \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} dy \quad (2.34)$$

Na equação 2.27,  $C_o$  é a velocidade do som, calculada de:

$$C_o = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (2.35)$$

Sendo,  $E$  o módulo de elasticidade e  $\rho$  a densidade. Para o aço,  $C_o \cong 5,1 \times 10^3 \text{ ms}^{-1}$ , GRAFF (1975).

### 2.3.5. Características da Onda

Após o impacto imposto na extremidade da barra, a onda de tensão ao viajar no interior da mesma e provoca expansões e contrações laterais devido ao efeito de Poisson conforme Figura 2.18.



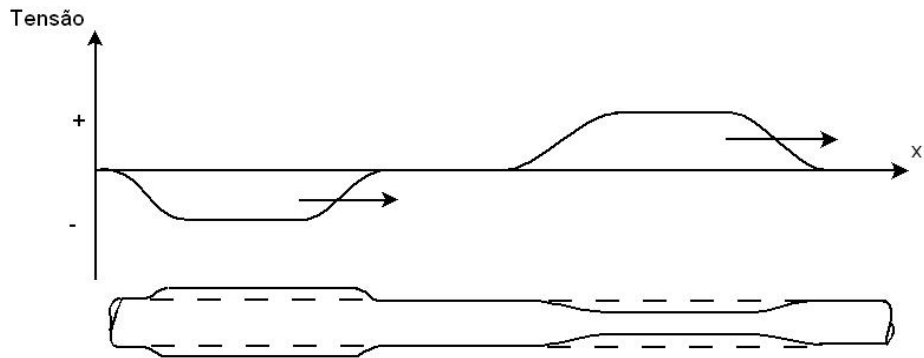


Figura 2.18: Efeito de Poisson na barra. Fonte: GRAFF (1975).

A onda ao chegar à extremidade oposta da barra, é refletida na outra extremidade com sinal contrário. Tal fenômeno é ilustrado pelos passos a, b, c e d na Figura 2.19.

Informações complementares sobre as características da onda em barras engastadas, onde o comportamento da reflexão será diferente, são apresentadas em GRAFF (1975).

Quanto à resposta do sinal imposto pelo impacto, este será diferente em cada ponto ao longo da barra, devido ao amortecimento do material e a dispersão desse sinal. A Figura 2.20 faz a comparação desta resposta em três pontos distintos na barra. Nota-se que no ponto intermediário da barra (ponto B) haverá menor dispersão do sinal da onda de tensão. Portanto esse ponto é o ideal para análise experimental, e assim pode-se comparar teoricamente a resposta da onda com a resposta experimental, devido à ausência de vibrações internas neste ponto. GRAFF (1975).

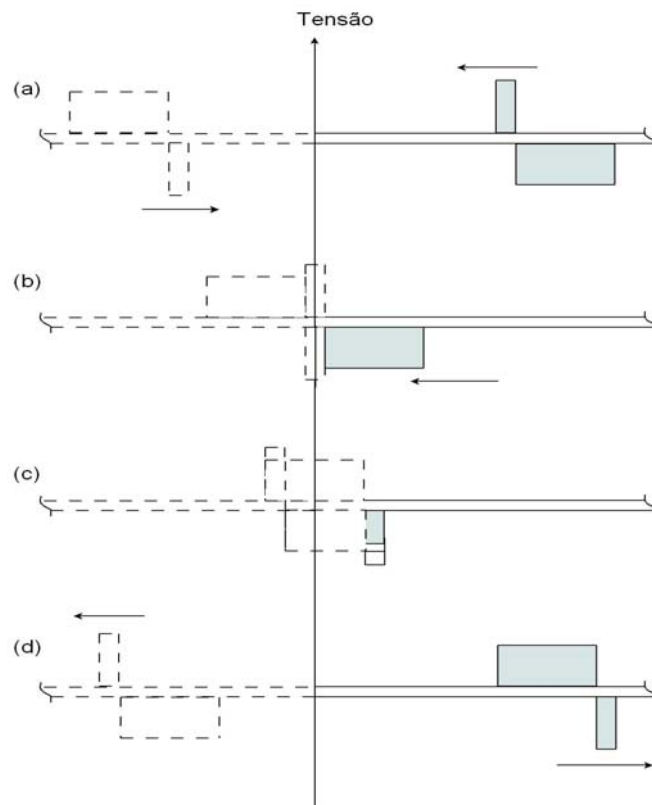


Figura 2.19: Reflexão da onda. Fonte: GRAFF (1975)

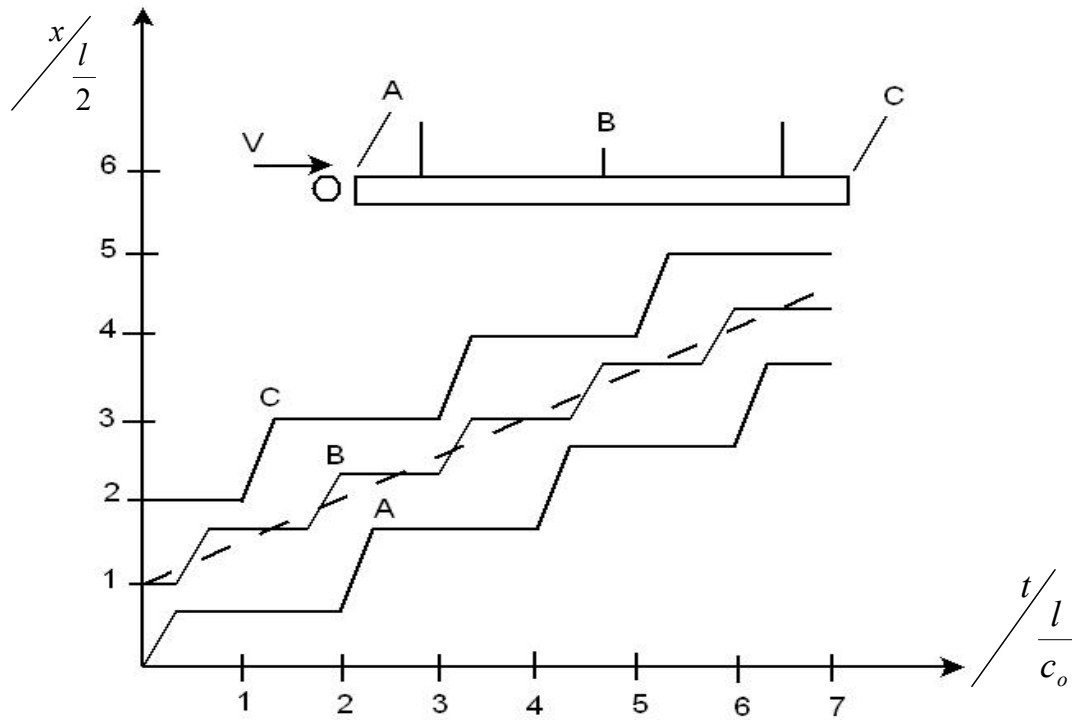


Figura 2.20: A resposta em três pontos distintos na barra sujeita ao impacto. Fonte: GRAFF (1975).

**2.4. IMPACTO LONGITUDINAL DE UMA ESFERA ELÁSTICA NA EXTREMIDADE DE UMA BARRA UNIFORME**

Considera-se uma esfera colidindo com uma velocidade  $v_0$  sobre uma superfície plana em uma das extremidades de uma barra cilíndrica uniforme com densidade  $\rho$ . O diâmetro da esfera é menor que o raio  $R$  da barra, podendo assim o deslocamento  $u$  da barra ser negligenciado GOLDSMITH (1960). O tipo de impacto é demonstrado na Figura 2.21.

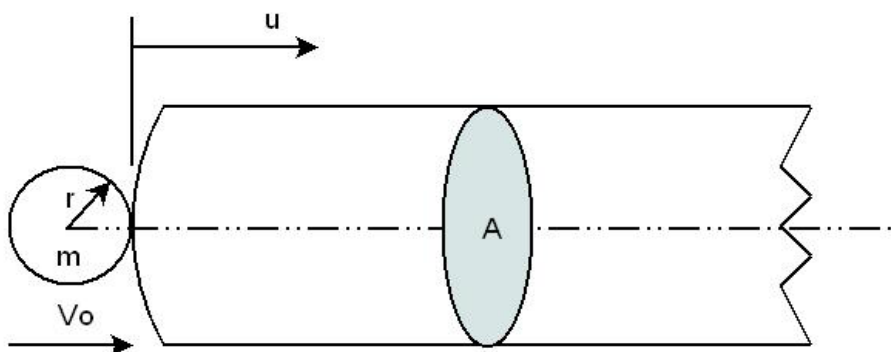


Figura 2.21: Impacto longitudinal numa barra uniforme. Fonte: GOLDSMITH (1960).

A força de impacto imposta pela esfera sobre a extremidade da barra será:

$$\left\{ \begin{array}{l} F = \frac{1,14v_0^2}{K\alpha} \operatorname{sen}\left(\frac{1,068v_0 t}{\alpha}\right), \quad \text{se } 0 \leq t \leq \frac{\pi\alpha}{1,068v_0} \\ F = 0, \quad \text{se } t > \frac{\pi\alpha}{1,068v_0} \end{array} \right. , \quad (2.36)$$

em que,

$$K = \frac{3}{4\pi\rho r^3} \quad (2.37)$$

e

$$\alpha = \left[ \frac{15\pi v_0^2 (\delta_1 + \delta_2) m}{16\sqrt{r}} \right]^{\frac{2}{5}}, \quad (2.38)$$

sendo que

$$\delta_1 = \frac{1-\nu_1^2}{E_1\pi} \text{ e } \delta_2 = \frac{1-\nu_2^2}{E_2\pi}.$$

Nas Equações 2.36 a 2.38,  $v_0, \nu_2, E_2$  e  $r$  é respectivamente, a velocidade de impacto da esfera, coeficiente de Poisson, módulo de elasticidade e raio da esfera e  $\nu_1$  e  $E_1$  é respectivamente, o coeficiente de Poisson e módulo de elasticidade do material da barra.

### 2.5. PÊNDULO BALÍSTICO

O pêndulo balístico é usado para medir a velocidade de um projétil pela observação do ângulo máximo de inclinação  $\theta_{\max}$  do corpo atingido pelo projétil. Considere uma caixa de massa  $M$  pendurada por um cabo de tamanho  $L$ , conforme Figura 2.22.

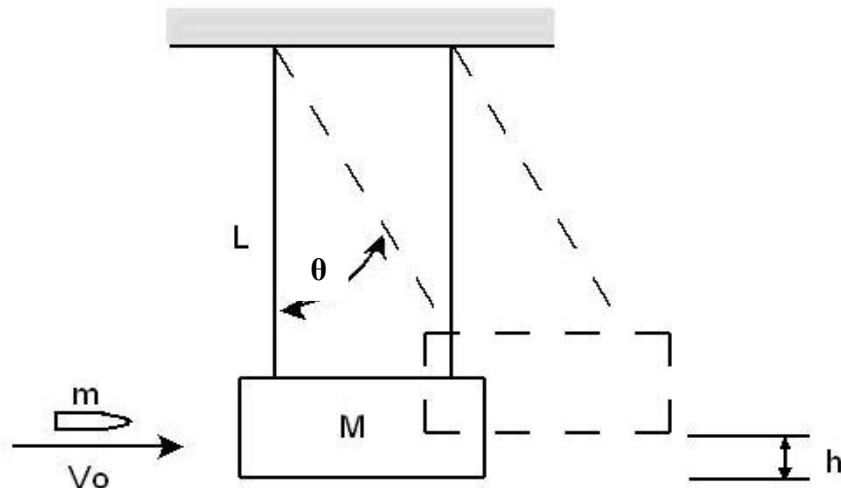


Figura 2.22: Pêndulo balístico.

Considerando a conservação da energia do movimento ao longo da direção horizontal, a quantidade de movimento inicial do projétil é  $mv_0$  e na caixa pendurada, a quantidade de movimento é zero. Após o projétil penetrar na caixa, no impacto, a velocidade da caixa e do projétil será a mesma, no caso  $v_1$ .

$$mv_0 = (M + m)v_1 \quad (2.39)$$

Após o impacto, o problema se reduz a um pêndulo simples. A única força que está atuando é a força da gravidade e, assim, pode se aplicar o princípio da conservação de trabalho e energia. Quando  $\theta$  é máximo, a velocidade também é zero. Da conservação de energia, finalmente obtemos:

$$\frac{1}{2}(M + m)v_1^2 = (M + m)gh_{\max} \quad (2.40)$$

Como  $h = L(1 - \cos \theta)$ , obtém:

$$\theta_{\max} = \cos^{-1} \left( 1 - \left( \frac{m}{M + m} \right)^2 \frac{v_0^2}{2Lg} \right) \quad (2.41)$$

## 2.6. EXTENSOMETRIA

### 2.6.1. Histórico

Em 1856 o professor da Royal Society of London, William Thomson, notou que a resistência elétrica de um condutor aumentava, quando este era submetido a uma força de tração. E diminuía quando esta força também diminuía. Tal descoberta só teve sua aplicação prática para a realização de medidas, com as experiências levadas a efeito pelo norte-americano P.W. Bridgman em 1923. Mas somente em 1930 a 1940 que Roy Carlson realmente aplicou o princípio, na construção do extensômetro de fio livre, que é utilizado até hoje em transdutores de pressão, aceleração, torção e outros, devido à sua excelente estabilidade. Em 1937, Edward Simmons (Califórnia Institute of Technology, Pasadena, CA, USA) e Arthur Ruge (Massachusetts Institute of Technology - Cambridge, MA, USA) trabalhando independentemente um do outro, utilizaram pela primeira vez fios metálicos colados à superfície de um corpo de prova para a medida de deformações. Essas experiências deram origem aos extensômetros que são utilizados atualmente.

### 2.6.2. Tipos

Basicamente, existem dois tipos de extensômetros: os extensômetros metálicos (grade metálica) onde variação de resistência é devida às variações dimensionais, e os semicondutores onde a variação é mais atribuída ao efeito piezo-resistivo. A característica comum entre ambos é o

fator do extensômetro  $K$  ou comumente conhecido na engenharia como “gauge factor” (GF), o qual relaciona a deformação ( $\varepsilon$ ) à variação de resistência ( $R$ ), dado por:

$$\frac{\Delta R}{R} = K \varepsilon . \quad (2.42)$$

Nessa relação o fator  $K$  é a constante de proporcionalidade entre a variação da resistividade e a deformação. O fabricante normalmente calibra e fornece o fator de medição do extensômetro.

### 2.6.3. O Extensômetro de Grade Metálica (*Metal Foil Strain Gauge*)

O primeiro extensômetro de grade metálica, Figura 2.23, foi produzido na Inglaterra em 1952 por Saunders e Roe. Atualmente se fabricam extensômetros para as mais variadas finalidades, e com os mais diversos tipos de grades. São mais usados devido a sua ampla variedade de configurações, facilidade na aplicação e pelo custo mais baixo.

No processo de fabricação, usa-se uma finíssima lâmina de uma liga resistiva, recortada por processo de máscara fotosensitiva corroída com ácido. As vantagens destes tipos de extensômetros são a sua versatilidade de fabricação e o fato de possuírem uma área maior de colagem, o que, conseqüentemente, diminui a tensão no adesivo. Uma outra vantagem é o da dissipação térmica, possibilitando desta maneira circuitos mais sensíveis, uma vez que o nível de excitação do extensômetro depende da sua taxa de dissipação térmica.

Estas lâminas são montadas em suporte (base) de epóxi, resina fenólica, poliamida e outros, tornando-se bastante flexíveis e permitindo assim uma colagem perfeita nas diversas superfícies.

As ligas resistivas utilizadas para fabricação de extensômetros são: Constantan, Isoelastic, K-alloy, Karma e outros. O fator  $K$ , em torno de 2,0 requer uma maior amplificação do sinal de saída da ponte. Conseqüentemente o ruído eletrônico também será amplificado.

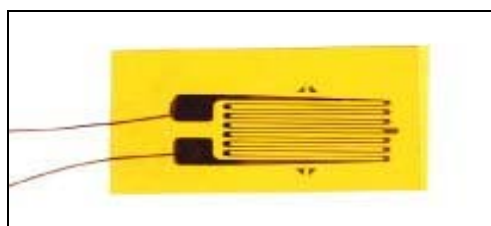


Figura 2.23: Extensômetro de grade metálica. Fonte: OMEGA (2005).

### 2.6.4. O Extensômetro Semicondutor (Silício)

O extensômetro semicondutor, Figura 2.24, consiste basicamente de um pequeno e finíssimo filamento de cristal de silício que é geralmente montado em um suporte epóxico ou fenólico. As características principais dos extensômetros elétricos de semicondutores são: sua grande capacidade

de variação de resistência em função da deformação e seu alto valor do fator de extensômetro,  $K$ , que é de aproximadamente 150, podendo ser positivo ou negativo. O tipo semiconductor também existe em uma grande variedade de configurações. No entanto, são mais difíceis na aplicação e apresentam um custo maior, quando comparados aos extensômetros de lâminas. O alto fator de medição aumenta a resolução, permitindo um alto sinal com baixo nível de ruído. Uma desvantagem do semiconductor é a sua grande variação de resistividade causada pela mudança de temperatura, o que requer um sistema de balanceamento da ponte. Devido ao fato do sinal produzido pela propagação da trinca ser de baixa amplitude, o extensômetro semiconductor foi escolhido para ser empregado neste trabalho.



Figura 2.24: Extensômetro semiconductor.

### 2.6.5. Ponte de Wheatstone

Pela sua excelente sensibilidade, a ponte de Wheatstone, Figura 2.25, é extensamente usada em instrumentação. A ponte é alimentada por uma tensão de entrada ( $V_{in}$ ) e quando a tensão de saída ( $V_{out}$ ) for zero, é dito que a ponte está equilibrada. Quando ocorre uma variação de resistividade do extensômetro, devida a deformação imposta no mesmo, haverá um desequilíbrio, fazendo aparecer um certo valor tensão na saída da ponte ( $V_{out}$ ). Esse valor do desequilíbrio será medido e convertido, para obter as unidades de deformação usual em engenharia.

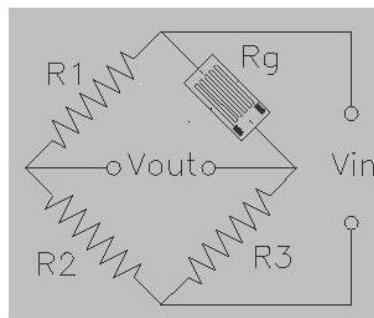


Figura 2.25: Ponte de wheatstone.

A equação que mede esse desequilíbrio é:

$$V_{out} = V_{in} \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_{gage}}{R_{gage} + R_3} \right) \quad \text{EFUNDA (2005)} \quad (2.43)$$

## 2.7. EMISSÃO ACÚSTICA

O princípio desse método, Figura 2.26, consiste na detecção de ondas acústicas emitidas por um material em função de uma força ou deformação imposta a ele. Caso esse material possua uma trinca, descontinuidade ou defeito, a sua propagação irá gerar ondas acústicas detectadas pelo sistema. A emissão acústica é a técnica mais adequada na detecção de trincas internas numa estrutura.

A emissão acústica é um fenômeno que ocorre naturalmente nos materiais, principalmente como resultados de processos de fratura ou transformação de fase. Quando em grande escala, esse fenômeno se manifesta de maneira audível, como na ruptura de rochas.

Diversos estudos foram realizados e concluíram que a emissão acústica é a classe de fenômenos onde ondas elásticas transientes são geradas pela própria liberação de energia de fontes localizadas internamente nos materiais. Nos metais, tais fontes são constituídas por mecanismos de deformação e fratura, tais como, nucleação e propagação de trincas, e movimento de discordâncias. A aplicação da emissão acústica como técnica não destrutiva, na avaliação da presença de defeitos em materiais, veio com o desenvolvimento da instrumentação capaz de detectar e amplificar os sinais emitidos por estas fontes, possibilitando a sua localização e identificação.

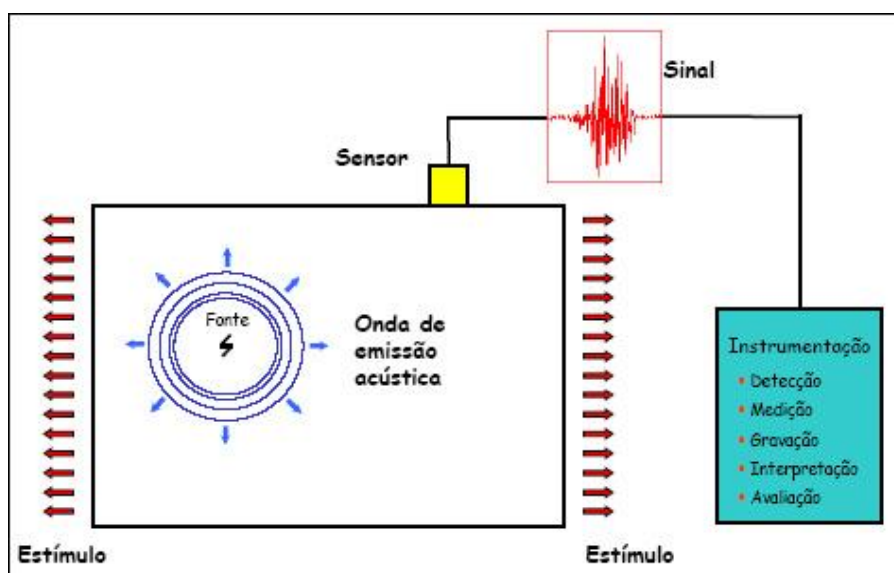


Figura 2.26: Emissão acústica.

A energia detectada é gerada pelo próprio defeito. O método de emissão acústica é capaz de detectar os processos dinâmicos associados com a degradação da integridade estrutural do objeto. O método é não direcional, sendo independente do conhecimento prévio da localização provável e da orientação da descontinuidade.

A detecção dos sinais é o fator mais importante no ensaio por emissão acústica. Qualquer problema nesta fase irá afetar as medições subsequentes e, conseqüentemente, todos os resultados do teste. Os principais tipos de sensores utilizados são os piezoelétricos, eletromagnéticos, capacitivos e óticos, sendo os mais freqüentes os piezoelétricos. A seleção do sensor dependerá das condições de ensaio, como por exemplo, a propriedade do material, espessura, etc. DUNEGAN (1970) discutiu alguns dos fatores a serem considerados na análise de emissão acústica, e enfatizou quais são os mais problemáticos, que comprometem a emissão acústica:

- Baixa taxa de tensão;
- Alta temperatura;
- Isotropia;
- Homogeneidade do material;
- Seção fina;
- Fratura dúctil;
- Material isento de defeitos;
- Deformação plástica;
- Estrutura forjada;
- Pequeno tamanho de grão.



## **CAPÍTULO 3 - PROPOSTA DE TRABALHO**

### **3.1. MOTIVAÇÃO PARA O TRABALHO**

Comentou-se no Capítulo 1, o surgimento de trincas por fadiga presentes nos equipamentos mecânicos. A engenharia mecânica sempre se preocupou na pesquisa de técnicas para o controle deste fenômeno, uma vez que uma quebra repentina do equipamento em operação pode acarretar danos financeiros com a perda de produtividade e principalmente com a segurança das pessoas em torno deste equipamento.

O Capítulo anterior mostrou que, atualmente, a técnica mais adequada para o controle da propagação da trinca por fadiga, é a emissão acústica. Tal técnica é de elevado custo tanto na construção como na aplicação. Vale ressaltar que o fator custo é uma preocupação sempre presente na tomada de decisões, como por exemplo, a escolha das técnicas de monitoramento da trinca.

Em virtude dos altos custos envolvidos no emprego da emissão acústica, tomou-se a iniciativa de pesquisar de uma nova técnica para a monitoração da trinca por fadiga com menor custo, porém com o mesmo grau de confiabilidade conseguida com a Emissão Acústica. Portanto a idéia principal deste trabalho é viabilizar uma técnica de monitoração de trinca utilizando o recurso da extensometria.

O presente trabalho consiste em simular uma trinca no interior da barra, e esta trinca ao propagar libera certa quantidade de energia dentro do material. Esta energia gera um pulso de tensão gerando uma onda, que por sua vez, poderá ser captado pelo extensômetro de silício. Então o ponto chave é simular essa energia de trinca. Para isto, usaremos um pêndulo simples que ao impactar-se com a extremidade da barra gerará o pulso de tensão, podendo assim finalmente ser identificado pelo extensômetro.

### **3.2. MONTAGEM DA BANCADA EXPERIMENTAL**

O aparato experimental é basicamente constituído de uma barra cilíndrica e de um pêndulo simples. Para a coleta dos dados experimentais foi utilizado um módulo de aquisição de sinais.

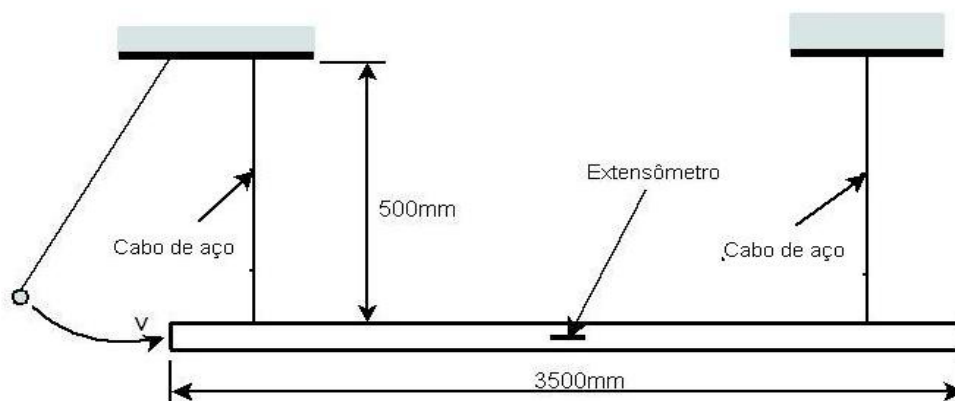
A análise baseia-se na simulação experimental da energia de uma trinca, a comparação analítica e experimental dos valores. Para a simulação da energia de trinca, utiliza-se o pêndulo simples, composto basicamente de uma esfera suspensa por um fio de cobre. Ao ocorrer o impacto do pêndulo na extremidade da barra, a energia imposta pelo pêndulo será identificada por um extensômetro de silício em configuração de 1/4 de ponte montado de duas maneiras: um na superfície do ponto médio da barra e outro montado no dispositivo projetado e desenvolvido que será mais bem detalhado posteriormente.

Durante a fase inicial dos experimentos, por ser a amplitude do sinal de energia, na ordem de micro-volts e a alta frequência de aquisição, tornaram-se susceptíveis a interferências eletromagnéticas. Depois de várias tentativas para contornar o problema, foi necessário de fazer os ensaios experimentais no período entre 00h00min hora e 06h00min horas da manhã. Uma vez que, durante este intervalo de horário, notou que a incidência de ruído no sinal medido é praticamente inexistente.

Após a aquisição do sinal na fase experimental, o mesmo foi analisado e comparado matematicamente com a teoria de impacto.

### 3.2.1. Barras Cilíndricas

As medidas de comprimento e diâmetro da barra foram estipuladas baseando-se na medida das guias de uma máquina injetora de plásticos. Ela é suspensa em dois pontos próximos às suas extremidades. Utiliza-se para a suspensão da mesma, cabos de aço cujo diâmetro é de 0,7mm, podendo assim, ser desprezada a baixíssima taxa de energia transportada da barra aos cabos. São utilizados dois tirantes, um para cada cabo para permitirem a boa nivelção da barra.



Massa Esfera : 28,6 gramas  
Diâmetro da barra : 50mm  
Diâmetro dos cabos de sustentação: 0,7mm

Figura 3.1: Barra usada para o ensaio experimental.

Medidas nominais da barra:

Comprimento: 3500 mm

Diâmetro: 50 mm

Material: Aço SAE 1040

### 3.2.2. Pêndulo Simples

Na montagem do pêndulo foi utilizada uma esfera de aço de alta dureza com 19 mm de diâmetro, especificação DIN100Cr6 (própria para rolamentos), que não possibilitasse deformação por parte da esfera, que foi suspensa por um fio de cobre de 0,3 mm de diâmetro, atuando como um pêndulo, que foi fixado numa base que possibilitou o deslocamento angular no plano longitudinal da barra, permitindo uma regulagem adequada do ponto de impacto na extremidade da barra. Também foi montado um sistema auxiliar de guias, para impedir que o pêndulo saísse da trajetória desejada. Essas guias eram do mesmo material utilizado na suspensão da esfera, porém lubrificadas para diminuir o atrito, conforme Figuras 3.2 e 3.3.

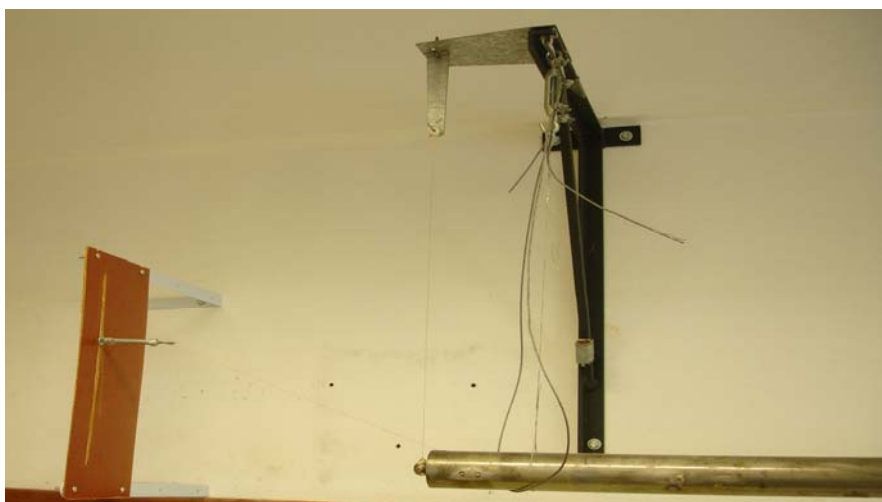


Figura 3.2: Pêndulo simples.

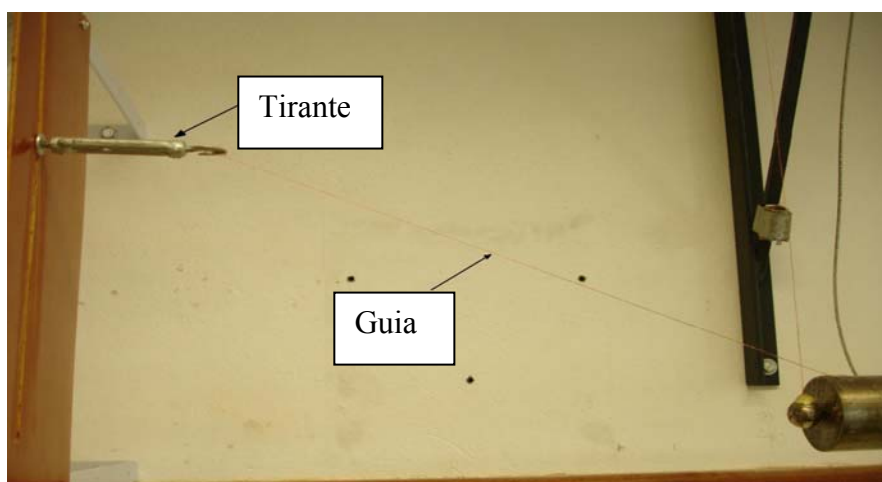


Figura 3.3: Sistema de guia usado no direcionamento do pêndulo.

Para um melhor controle da energia imposta pelo pêndulo, foram construídos blocos de madeira de vários comprimentos, a fim de serem utilizados entre a esfera e a extremidade da barra. Assim pode-se controlar a posição inicial do pêndulo e, conseqüentemente controlar a energia imposta pelo pêndulo à barra, Figuras 3.4.

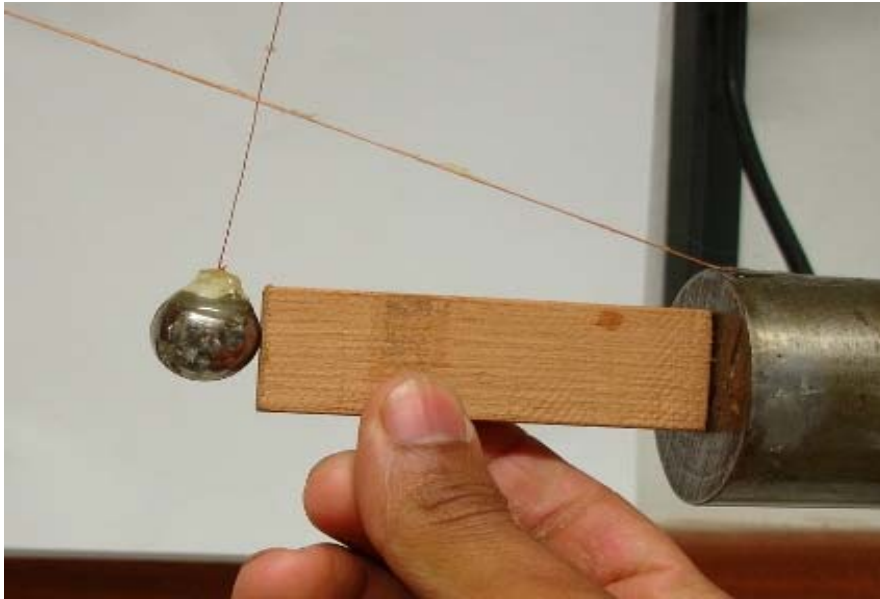


Figura 3.4: Bloco utilizado para o controle da energia imposta à barra.

### 3.2.3. Dispositivo Externo Para Captar a Onda de Tensão

Na indústria não é possível colar um extensômetro para a inspeção de propagação de trincas nos equipamentos, uma vez que teria que parar a linha de produção para tal procedimento. Outra razão óbvia é o custo, uma vez que sempre iria sacrificar um extensômetro para cada inspeção em um determinado equipamento. Então há a necessidade de projetar um dispositivo que permita fazer a inspeção com a mesma eficácia de um extensômetro colado na própria superfície do equipamento. Com esse intuito projetou-se o dispositivo externo para captar o pulso de deformação proveniente do momento da propagação da trinca, Figura 3.5. Tal dispositivo tem o objetivo de verificar a possibilidade da passagem do pulso de deformação na interface entre a superfície da barra e a lâmina do próprio dispositivo. No decorrer do trabalho, o dispositivo permitiu identificar o mesmo sinal captado anteriormente pelo extensômetro colado no ponto médio da superfície da barra. A construção do dispositivo consistia basicamente de duas lâminas metálicas, nas quais foram fixados os extensômetros. E estas lâminas são pressionadas contra a superfície externa do ponto médio da barra, conforme Figuras 3.6. Para o controle adequado do ajuste do dispositivo na barra, foi usado um sistema parafuso-mola, Figura 3.7.

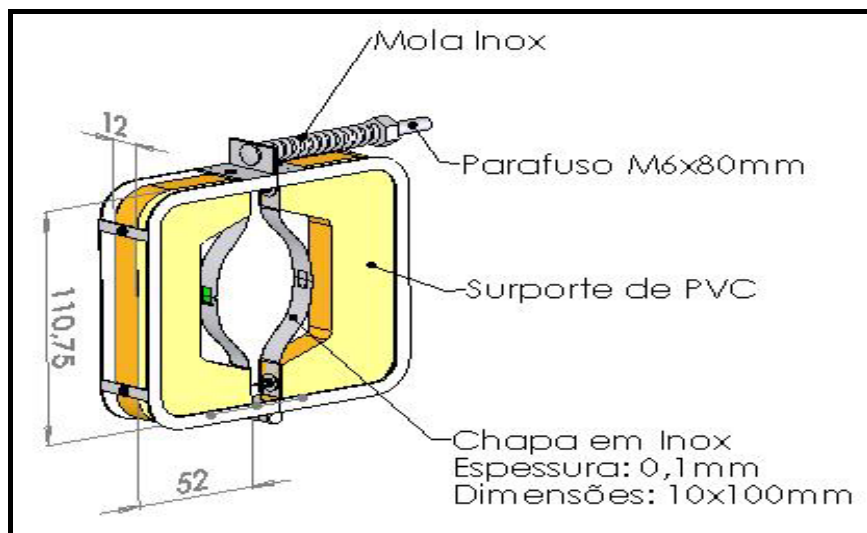


Figura 3.5: Dimensões do dispositivo externo.



Figura 3.6: Dispositivo montado na barra.



Figura 3.7: Dispositivo e conjunto parafuso-mola.

O dispositivo foi montado na seguinte forma: numa lâmina foi fixado um extensômetro de silício para captar o sinal da energia de trinca imposta na barra. Na outra lâmina é fixado um extensômetro de grade metálica, Figura 3.9, para captar a deformação imposta, no momento em que foi o ajuste do dispositivo, ver Figuras 3.8 a 3.10.

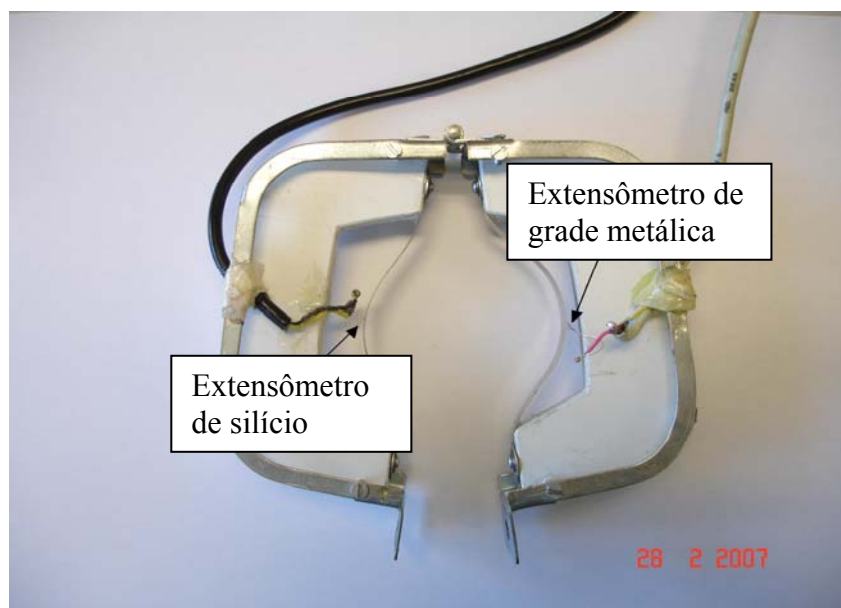


Figura 3.8: Extensômetros montados nas lâminas do dispositivo.



Figura 3.9: Extensômetro de silício.

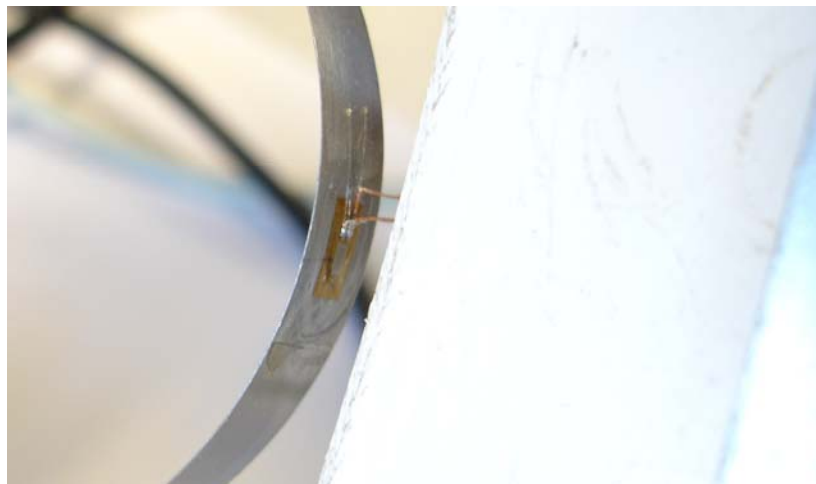


Figura 3.10: Extensômetro de grade metálica.

#### 3.2.4. Aquisição de Sinais

O módulo de aquisição de sinais usado para a coleta dos dados é da marca Lynx modelo ADS 2000, 8 canais e taxa de aquisição de 37khz. Os softwares utilizados (AQ-Dados e AQD-Análises) para a análise dos resultados foram fornecidos pela Lynx. Para a comunicação entre o módulo e o *software* foi utilizado um computador PC Pentium 2.67 Ghz com 1Gb de RAM, Figuras 3.11 e 3.12.



Figura 3.11: Sistema de aquisição.





## CAPÍTULO 4 - DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS

### 4.1. AQUISIÇÃO DO SINAL

Por razões descritas no capítulo 2, o extensômetro de silício (1/4 de ponte) foi montado no ponto intermediário na superfície da barra, conforme Figuras 4.1 e 4.2:

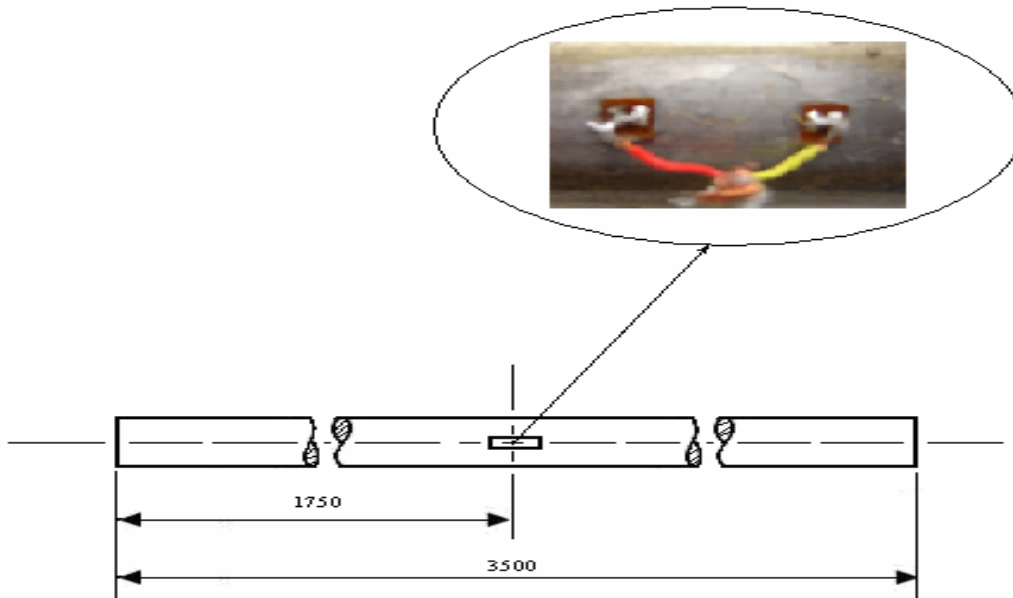


Figura 4.1: Local de montagem do extensômetro de silício (1/4 de ponte).



Figura 4.2: Extensômetro de silício colado na barra.

Conforme descrito no capítulo anterior, houve a necessidade da aquisição no período noturno. Após esse cuidado, restou estabelecer a frequência teórica do sinal (onda), para que pudesse ser feita uma filtragem, eliminando os sinais de frequência indesejados. A frequência do sinal de onda é aproximadamente 800Hz, HOFFMANN (1987), portanto houve a filtragem do sinal adquirido nesta faixa de frequência. Esta filtragem foi feita utilizando o próprio software do módulo de aquisição, restringindo um intervalo de frequência de 750 a 800Hz, e utilizando um filtro de passa-alta, conforme mostra Figuras 4.3 e 4.4. Após a filtragem é feito um zoom no sinal, e assim o mesmo pode ser analisado.

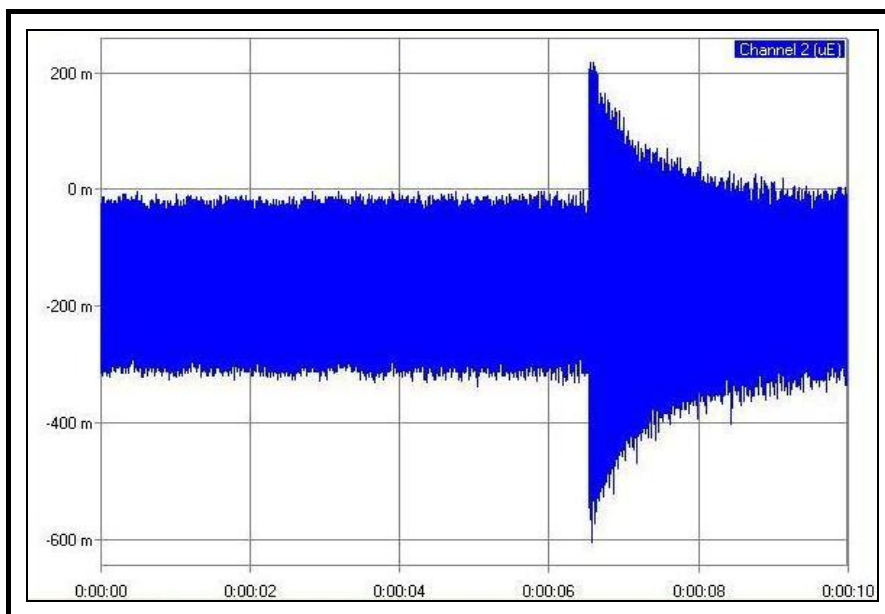


Figura 4.3: Sinal.



Figura 4.4: Sinal após a filtragem.

#### 4.2. ANÁLISE DO SINAL DE IMPACTO

Uma vez montado o extensômetro, houve a preocupação de que o sinal adquirido descrevesse realmente o que ocorreu na barra após o impacto. Após a aquisição desse sinal, concluiu-se que:

- O tempo de impacto é de  $134 \mu s$  conforme apresenta a Figura 4.5.
- O período entre os picos positivos de onda corresponde a  $1,294 ms$  e sua frequência  $772,247 Hz$ , ver Figura 4.6.

A onda percorre uma distância de 7000mm no interior da barra, assim a velocidade de propagação da onda  $C_0$  é aproximadamente de  $5,4 \times 10^3 \text{ m/s}$ , a mesma velocidade descrita no item 2.3.4.

A diferença entre a velocidade obtida experimentalmente, a descrita no Capítulo 2 é de apenas 6%. Considerando os valores tabelados para  $E$ ,  $\rho$  e possíveis imprecisões na gravação do sinal durante a aquisição, pode-se considerar que o erro é pequeno.

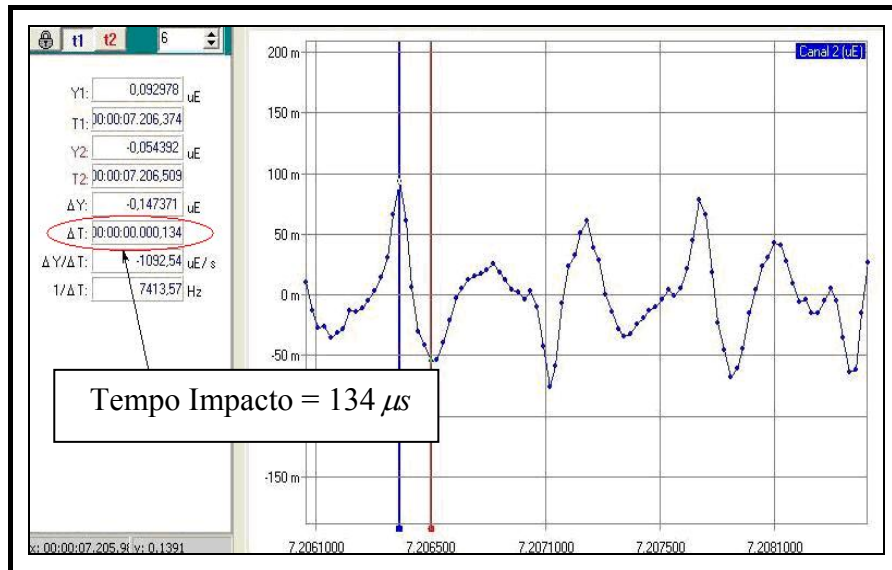


Figura 4.5: Tempo de impacto.

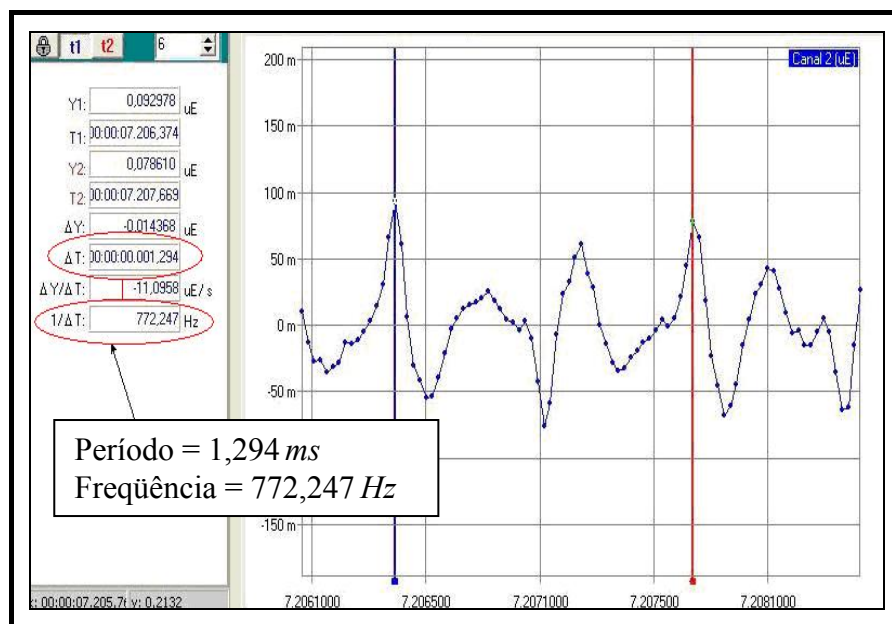


Figura 4.6: Período da onda de impacto.

### 4.3. DETERMINAÇÃO DA DEFORMAÇÃO EXPERIMENTAL NA SUPERFÍCIE DA BARRA

Após a aquisição do sinal, partiu-se para a análise das deformações impostas na barra pela energia liberado por um dado tamanho de trinca. Conforme BURG & HOSSON (1995), a energia necessária para iniciar uma fratura frágil no aço dúctil é na ordem de  $300 J / m^2$ . Portanto baseando em tal parâmetro, determinou-se a energia necessária para a propagação de um certo tamanho de trinca, Tabela 4.1. E, assim simular essa energia experimentalmente na extremidade da barra utilizando o pêndulo simples.

Tabela 4.1: Energia liberada pelo tamanho de trinca em  $mm^2$ .

Tamanho de Trinca ( $mm^2$ )	Energia (Joules)
01	0,0003
02	0,0006
03	0,0009
04	0,0012
05	0,0015
06	0,0018
07	0,0021
08	0,0024
09	0,0027
10	0,0030

Uma vez simulado a energia de trinca no pêndulo, o impacto deste na extremidade da barra, provocará uma deformação interna no material, identificado pelo extensômetro. A deformação se caracteriza por duas fases: na 1ª fase ocorre uma tensão de tração e na 2ª fase uma tensão de compressão, Figura 4.7. Assim, a deformação total será:

$$\varepsilon_T = \varepsilon_t - (-\varepsilon_c) \quad (4.1)$$

$$\varepsilon_T = \varepsilon_t + \varepsilon_c, \quad (4.2)$$

Sendo  $\varepsilon_T$ ,  $\varepsilon_t$  e  $\varepsilon_c$  são, respectivamente, as deformações total, de tração e de compressão.

### 4.4. COLETA DAS AMOSTRAS DE DEFORMAÇÃO

Para a obtenção dos dados experimentais, foram simulados 10 diferentes tamanhos de trinca. Para cada tamanho de trinca, 10 amostras, perfazendo um total de 100 amostras. Destas amostras obteve-se a média e o desvio padrão para cada tamanho de trinca, Tabelas 4.2a e 4.2b.

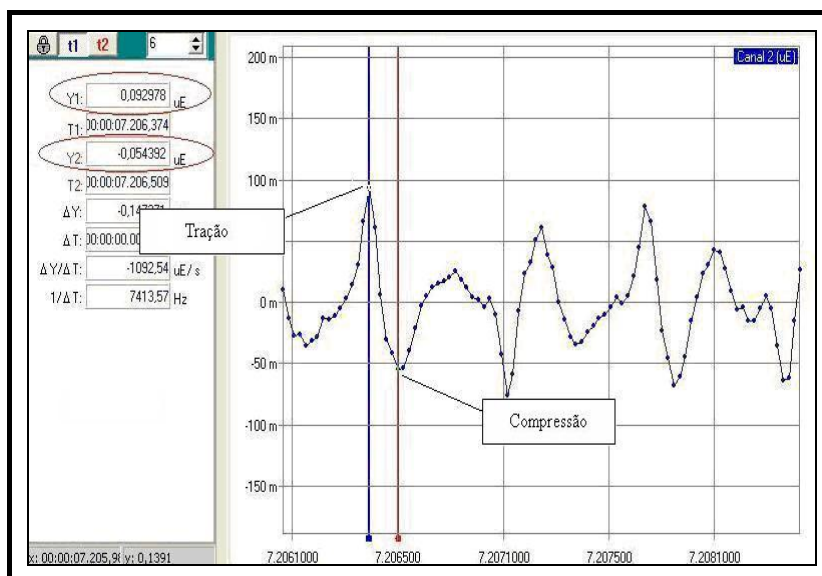


Figura 4.7: Pulsos de tensão na tração e compressão.

Tabela 4.2a Deformação experimental.

Amostra	Tamanho Simulado de trinca									
	10 mm <sup>2</sup>		09 mm <sup>2</sup>		08 mm <sup>2</sup>		07 mm <sup>2</sup>		06 mm <sup>2</sup>	
	Deformação Máxima. Compressão	Deformação Mínima Tração	Deformação Máxima. Compressão	Deformação Mínima Tração	Deformação Máxima. Compressão	Deformação Mínima Tração	Deformação Máxima. Compressão	Deformação Mínima Tração	Deformação Máxima. Compressão	Deformação Mínima Tração
1 <sup>a</sup>	0,099014	0,061006	0,090097	0,066818	0,088082	0,059534	0,080711	0,057822	0,074495	0,045705
2 <sup>a</sup>	0,100039	0,075278	0,092757	0,059862	0,088336	0,057729	0,082074	0,051102	0,075966	0,053857
3 <sup>a</sup>	0,098615	0,063254	0,085759	0,054406	0,084293	0,053123	0,084895	0,058405	0,074265	0,047877
4 <sup>a</sup>	0,099879	0,066656	0,092158	0,052887	0,08458	0,050376	0,078212	0,048473	0,075614	0,045199
5 <sup>a</sup>	0,097698	0,06604	0,093668	0,060874	0,088892	0,059753	0,086029	0,05755	0,076466	0,049513
6 <sup>a</sup>	0,095733	0,064296	0,094869	0,059149	0,093396	0,06087	0,083159	0,05391	0,08081	0,052908
7 <sup>a</sup>	0,096246	0,071651	0,08906	0,055856	0,088598	0,06064	0,08778	0,055398	0,080148	0,053535
8 <sup>a</sup>	0,093345	0,062104	0,088466	0,06177	0,096845	0,06534	0,085111	0,054186	0,086095	0,048139
9 <sup>a</sup>	0,094664	0,063321	0,092236	0,061134	0,086496	0,056034	0,080605	0,050959	0,07956	0,056297
10 <sup>a</sup>	0,102281	0,061293	0,092162	0,06181	0,09025	0,053231	0,085345	0,053625	0,080963	0,051087
Média	0,097751	0,065489	0,091123	0,059456	0,088976	0,057663	0,083392	0,054143	0,078438	0,050411
Def.Total ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	0,1632413		0,1505798		0,1466398		0,1375351		0,1288499	
Incerteza na medição	± 0,009865		± 0,00939		± 0,013721		± 0,009706		± 0,010514	

Tabela 4.2b: Deformação experimental.

Amostra	Tamanho Simulado de trinca									
	05 mm <sup>2</sup>		04 mm <sup>2</sup>		03 mm <sup>2</sup>		02 mm <sup>2</sup>		01 mm <sup>2</sup>	
	Deformação Máxima. Compressão	Deformação Mínima Tração	Deformação Máxima. Compressão	Deformação Mínima Tração	Deformação Máxima. Compressão	Deformação Mínima Tração	Deformação Máxima. Compressão	Deformação Mínima Tração	Deformação Máxima. Compressão	Deformação Mínima Tração
1 <sup>a</sup>	0,068163	0,046546	0,068075	0,049482	0,05864	0,038801	0,046429	0,032641	0,031277	0,006525
2 <sup>a</sup>	0,06995	0,040528	0,066828	0,038347	0,056017	0,034696	0,056165	0,041119	0,032687	0,010907
3 <sup>a</sup>	0,06764	0,0444	0,071186	0,038106	0,055049	0,032561	0,044907	0,02676	0,037709	0,020609
4 <sup>a</sup>	0,070091	0,039106	0,064251	0,039269	0,054892	0,025924	0,055616	0,034982	0,037612	0,020254
5 <sup>a</sup>	0,066958	0,04212	0,063174	0,042991	0,054231	0,036656	0,048511	0,032389	0,032832	0,021233
6 <sup>a</sup>	0,074777	0,048959	0,069033	0,040352	0,05532	0,037368	0,04429	0,027039	0,033313	0,0119
7 <sup>a</sup>	0,074517	0,042208	0,062210	0,039379	0,054505	0,030905	0,049976	0,029306	0,033628	0,015028
8 <sup>a</sup>	0,073854	0,045662	0,063576	0,039699	0,056584	0,043912	0,055363	0,032989	0,030863	0,015489
9 <sup>a</sup>	0,070034	0,0534	0,069878	0,037996	0,0562	0,039787	0,046218	0,027518	0,034441	0,013509
10 <sup>a</sup>	0,074517	0,043239	0,060341	0,037208	0,056115	0,033811	0,044037	0,030671	0,037128	0,022506
Média	0,071050	0,044616	0,065855	0,040283	0,055755	0,035442	0,049151	0,031541	0,034149	0,015796
Def.Total ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	0,1156669		0,10613815		0,0911974		0,08069264		0,049945	
Incerteza na medição	± 0,00956		± 0,009424		± 0,010151		± 0,015227		± 0,012599	

Com os valores experimentais de deformação levantados, tornou-se possível fazer uma comparação com os valores teóricos de deformação, calculados a partir do item 2.4. E assim levantar a diferença entre as duas curvas de deformação, Figura 4.8 e Tabela 4.3.

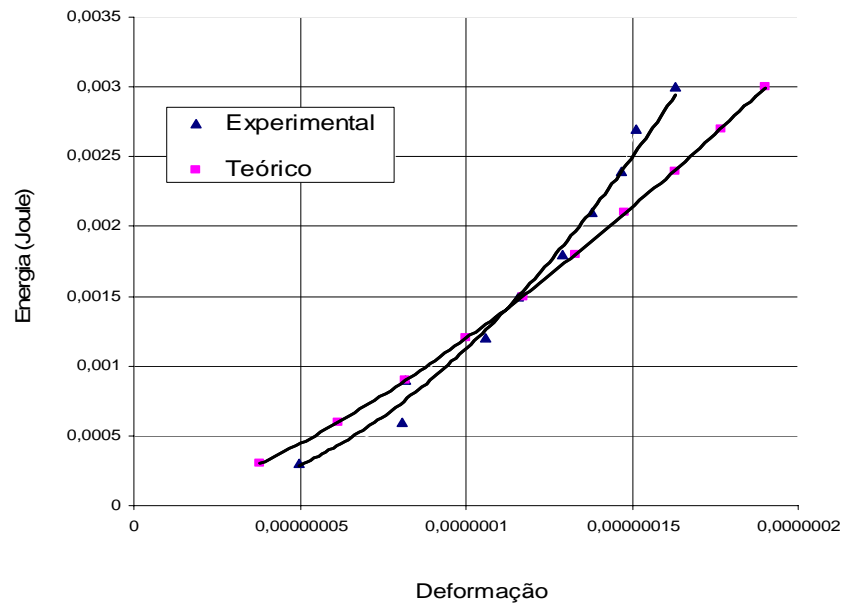


Figura 4.8: Relação energia x deformação.

Tabela 4.3: Comparação: deformação teórica x experimental.

Energia (Joules)	Def. Teórica	Def. Experimental	Diferença (%)
0,0030	1,90E-07	1,63E-07	-14,10
0,0027	1,77E-07	1,51E-07	-14,70
0,0024	1,63E-07	1,47E-07	-09,82
0,0021	1,48E-07	1,38E-07	-06,76
0,0018	1,33E-07	1,29E-07	-03,01
0,0015	1,17E-07	1,16E-07	-00,85
0,0012	1,00E-07	1,06E-07	+06,00
0,0009	8,20E-08	8,20E-08	00,00
0,0006	6,17E-08	8,07E-08	+30,79
0,0003	3,80E-08	4,99E-08	+31,30

A frequência de aquisição recomendada para o sinal analisado é da ordem de  $\geq 5$  mhz KAISER (1998). Para o aparelho utilizado para a aquisição, o valor da frequência é de 37 khz, fator que pode ter influenciado consideravelmente na diferença do valor experimental em relação ao teórico, principalmente nos valores menores de tamanho de trinca.

#### 4.5. DETERMINAÇÃO DA DEFORMAÇÃO EXPERIMENTAL CAPTADA PELO DISPOSITIVO EXTERNO

Conforme descrito no capítulo anterior, foi construído um dispositivo com o objetivo de medir a deformação na barra. A idéia consiste em verificar a possibilidade da medição da energia de propagação de trinca na barra, sem a necessidade de montar extensômetros na mesma, resultando

em praticidade. Antes de iniciar as medições, houve a preocupação quanto à passagem do pulso de deformação entre a lâmina do dispositivo e a superfície da barra. Em outras palavras, preocupou-se em evitar uma perda significativa do sinal de deformação imposta à barra. A fim de evitar essas perdas, a maneira encontrada para minimizar o problema, foi utilizar uma camada de lubrificante pastoso (graxa, vaselina) na interface das superfícies, Figura 4.9. Este procedimento permite a passagem do pulso de deformação de uma superfície à outra sem grande dissipação de energia (GRAFF, 1975).



Figura 4.9: Interface entre a superfície da barra e a lâmina do dispositivo.

O objetivo deste experimento em particular foi verificar a possibilidade da passagem do pulso de deformação na interface entre a superfície da barra e a lâmina do dispositivo. A idéia era que o pulso de deformação fosse identificado pelo extensômetro de silício montado nesta lâmina, a qual estivesse em contato com a superfície da barra. Foi ensaiada a energia de cinco tamanhos diferentes de trincas, sendo 20 amostras para cada tamanho de trinca.

#### 4.6. FORÇA DE AJUSTE

O dispositivo foi fixado à barra com o auxílio de um conjunto parafuso-mola. O objetivo era permitir o controle do ajuste da lâmina do dispositivo sobre a barra, possibilitando assim, determinar a influência da intensidade do contato da lâmina na superfície da barra nos resultados de deformação medidos. Uma vez medido o deslocamento da mola, pôde-se então calcular a força de ajuste no parafuso, e assim relacionar essa força com a deformação da barra captada pelo dispositivo. As características da mola são:

Dados da mola:

Aço Inox

Módulo de Cisalhamento: 73 GPa



Diâmetro do fio: 02 mm

Diâmetro médio da espira: 10 mm

Número de espiras ativas: 13 espiras

Comprimento: 53 mm

Tabela 4.4: Deslocamento da mola x carga imposta pela mola.

Deslocamento da mola (milímetros)	Carga imposta pela mola (Newtons)
1,0	11,23
1,5	16,84
2,0	22,46

Conforme comentado no capítulo anterior monta-se um extensômetro de grade metálica em uma das lâminas do dispositivo. O intuito do dispositivo é obter a deformação experimental da lâmina, quando ocorrer o ajuste do dispositivo externo, Figura 4.10.

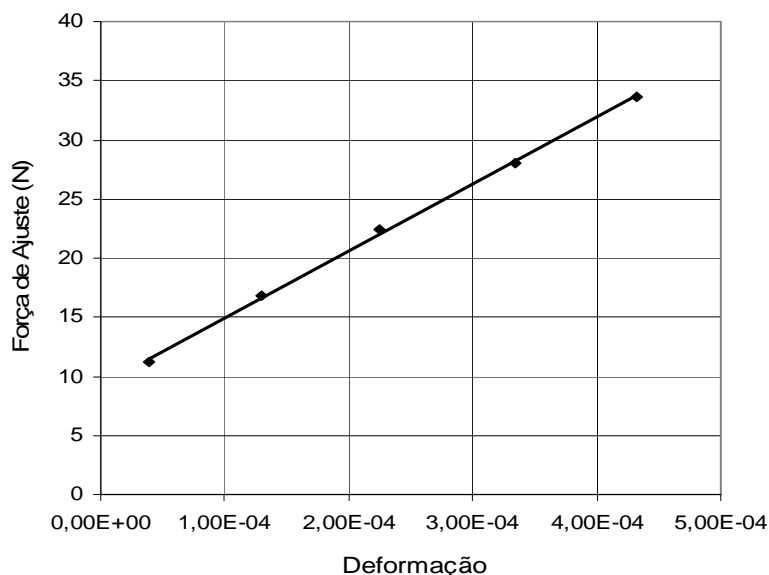


Figura 4.10: Deformação experimental na lâmina devido à força de ajuste.

#### 4.6.1. Resultados

Para os três tipos de carga de mola, Tabela 4.4, foram feitos os ensaios para cada tamanho de trinca. Possibilitando a comparação da influência dessas forças de ajuste do dispositivo, nos resultados e verificar a esperada perda de amplitude do pulso, na passagem pela interface, entre a barra e a lâmina. A carga de 11,23 N é a carga mínima de ajuste necessário para que o dispositivo desempenhe seu papel satisfatoriamente, sem o risco do mesmo se desprender da barra, o que inviabilizaria o ensaio. Os resultados estão descritos na Tabela 4.5. Em seguida, obtém-se a curva energia x deformação, conforme Figura 4.11.

Tabela 4.5: Deformação experimental no dispositivo, força de ajuste: 11,23 N.

Amostra	Tamanho simulado de trinca									
	09 mm <sup>2</sup>		07 mm <sup>2</sup>		05 mm <sup>2</sup>		03 mm <sup>2</sup>		01 mm <sup>2</sup>	
	Deformação Máxima. Compressão	Deformação Mínima Tração	Deformação Máxima. Compressão	Deformação Mínima Tração	Deformação Máxima. Compressão	Deformação Mínima Tração	Deformação Máxima. Compressão	Deformação Mínima Tração	Deformação Máxima. Compressão	Deformação Mínima Tração
01 <sup>a</sup>	0,064213	0,036973	0,05994	0,03332	0,05206	0,023328	0,047835	0,019756	0,03258	0,019028
02 <sup>a</sup>	0,06894	0,037741	0,058883	0,036088	0,054355	0,025056	0,045412	0,026107	0,0275	0,014269
03 <sup>a</sup>	0,065708	0,037361	0,06151	0,034157	0,056515	0,024172	0,04093	0,017493	0,028693	0,013727
04 <sup>a</sup>	0,06985	0,044672	0,058925	0,028203	0,054874	0,026934	0,047473	0,024642	0,028936	0,009516
05 <sup>a</sup>	0,067492	0,038118	0,060192	0,030453	0,053801	0,028291	0,041587	0,02031	0,029118	0,011952
06 <sup>a</sup>	0,064051	0,03389	0,060452	0,025771	0,051502	0,025365	0,043349	0,021689	0,027841	0,019571
07 <sup>a</sup>	0,063828	0,037956	0,059801	0,032569	0,055703	0,032352	0,04541	0,021608	0,03105	0,014732
08 <sup>a</sup>	0,07196	0,048167	0,05945	0,044632	0,056204	0,03137	0,042639	0,023995	0,026254	0,015103
09 <sup>a</sup>	0,071123	0,04719	0,060022	0,038207	0,05504	0,034952	0,04249	0,018916	0,032296	0,020631
10 <sup>a</sup>	0,066682	0,04419	0,059876	0,031577	0,050355	0,034988	0,043438	0,026871	0,02578	0,021324
11 <sup>a</sup>	0,062453	0,033521	0,060763	0,031562	0,055539	0,030312	0,044879	0,025455	0,033124	0,01738
12 <sup>a</sup>	0,067448	0,042198	0,060795	0,027881	0,052813	0,026261	0,042292	0,027578	0,030339	0,020434
13 <sup>a</sup>	0,066421	0,035456	0,062987	0,03709	0,05774	0,031074	0,043411	0,014867	0,030928	0,014594
14 <sup>a</sup>	0,075507	0,041046	0,062933	0,028097	0,054267	0,036735	0,042182	0,016214	0,027575	0,005403
15 <sup>a</sup>	0,070221	0,044407	0,059925	0,038141	0,049437	0,03514	0,041331	0,019718	0,028442	0,016674
16 <sup>a</sup>	0,064585	0,039474	0,058631	0,035008	0,052635	0,029724	0,03942	0,024318	0,031596	0,015024
17 <sup>a</sup>	0,067176	0,04345	0,061058	0,036621	0,054605	0,027775	0,043329	0,02409	0,030095	0,013096
18 <sup>a</sup>	0,068719	0,041959	0,061252	0,037619	0,052372	0,036658	0,04741	0,031893	0,02831	0,01881
19 <sup>a</sup>	0,06691	0,047031	0,058189	0,03695	0,056915	0,026669	0,040925	0,01976	0,026844	0,01361
20 <sup>a</sup>	0,065658	0,045387	0,058191	0,030586	0,050299	0,022108	0,041975	0,030922	0,033615	0,017684
Média	0,067447	0,041009	0,060188	0,033726	0,053851	0,029463	0,043385	0,022810	0,029545	0,015628
Def.Total ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	0,1084566		0,09391535		0,08331475		0,06619595		0,0451739	
Incerteza na medição	± 0,011561		± 0,00784		± 0,008545		± 0,009639		± 0,008511	

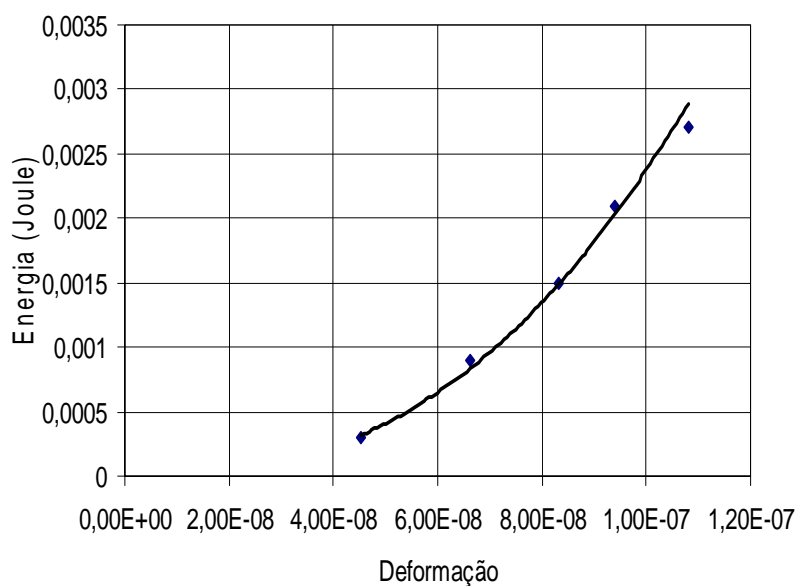


Figura 4.11: Energia x deformação no dispositivo externo, força de ajuste: 11,23 N.

Na Tabela 4.6, são comparados os resultados obtidos no dispositivo com os resultados experimentais obtidos na superfície da barra.

Tabela 4.6: Deformação experimental: superfície da barra x deformação experimental do dispositivo, força de ajuste: 11,23N.

Energia de trinca (Joule)	Deformação Experimental Superfície Barra	Deformação Experimental Lâmina Dispositivo	Diferença (%)
0,0027	1,51E-07	1,08E-07	-28,50
0,0021	1,38E-07	9,39E-08	-32,00
0,0015	1,16E-07	8,33E-08	-28,20
0,0009	8,20E-08	6,62E-08	-19,30
0,0003	4,99E-08	4,52E-08	-09,42

Após a aplicar carga de 11,23N, houve um novo implemento de carga na mola. Isso foi feito impondo o deslocamento de 1,5 mm na mola, equivalente a 16,84 N de força de ajuste, obteve-se os seguintes resultados mostrados na Tabela 4.7 e Figura 4.12.

Conforme esperado, o aumento da carga de ajuste acarretou uma melhor aproximação entre os valores obtidos com o dispositivo e os valores adquiridos na superfície da barra, ver Tabela 4.8.

Tabela 4.7: Deformação experimental no dispositivo, força de ajuste: 16,84 N.

Amostra	Tamanho simulado de trinca									
	09 mm <sup>2</sup>		07 mm <sup>2</sup>		05 mm <sup>2</sup>		03 mm <sup>2</sup>		01 mm <sup>2</sup>	
	Deformação Máxima. Compressão	Deformação Mínima Tração	Deformação Máxima. Compressão	Deformação Mínima Tração	Deformação Máxima. Compressão	Deformação Mínima Tração	Deformação Máxima. Compressão	Deformação Mínima Tração	Deformação Máxima. Compressão	Deformação Mínima Tração
01 <sup>a</sup>	0,07297	0,051173	0,0474	0,107877	0,05629	0,032267	0,044841	0,020154	0,030257	0,011859
02 <sup>a</sup>	0,069397	0,049004	0,044001	0,108499	0,052551	0,03007	0,046299	0,030998	0,026952	0,018274
03 <sup>a</sup>	0,065506	0,031885	0,03258	0,100855	0,05128	0,037957	0,043441	0,028367	0,027194	0,020462
04 <sup>a</sup>	0,068964	0,046837	0,031505	0,094526	0,055252	0,03521	0,044948	0,022136	0,029826	0,017734
05 <sup>a</sup>	0,069451	0,039131	0,025197	0,081668	0,055789	0,027666	0,04335	0,023176	0,029347	0,007947
06 <sup>a</sup>	0,068971	0,043097	0,028332	0,093798	0,058156	0,030324	0,041673	0,021613	0,032234	0,025727
07 <sup>a</sup>	0,071618	0,046761	0,041304	0,106388	0,052217	0,029973	0,043768	0,024202	0,031171	0,013693
08 <sup>a</sup>	0,074469	0,033501	0,044925	0,10685	0,054487	0,037779	0,045246	0,019182	0,03128	0,023643
09 <sup>a</sup>	0,07578	0,048647	0,037331	0,100597	0,055446	0,033547	0,04526	0,021842	0,032393	0,009595
10 <sup>a</sup>	0,066363	0,040853	0,036126	0,098377	0,053499	0,040545	0,041435	0,027629	0,028863	0,015653
11 <sup>a</sup>	0,07535	0,045837	0,039445	0,106664	0,055173	0,027213	0,04444	0,024153	0,03103	0,01355
12 <sup>a</sup>	0,068355	0,039238	0,031429	0,095976	0,057233	0,039286	0,041176	0,029166	0,029627	0,01382
13 <sup>a</sup>	0,070019	0,052455	0,034103	0,098837	0,049537	0,037377	0,044405	0,029283	0,033574	0,023729
14 <sup>a</sup>	0,065732	0,037437	0,050211	0,115124	0,052166	0,025806	0,040359	0,019968	0,029077	0,013186
15 <sup>a</sup>	0,074376	0,042772	0,037132	0,102458	0,05742	0,028055	0,041898	0,019323	0,030315	0,023662
16 <sup>a</sup>	0,069716	0,0362	0,039186	0,102427	0,057873	0,030855	0,044268	0,026299	0,028136	0,014277
17 <sup>a</sup>	0,069458	0,044061	0,04398	0,105838	0,057727	0,033027	0,041791	0,027522	0,027842	0,015622
18 <sup>a</sup>	0,071981	0,041147	0,041501	0,101098	0,054219	0,034611	0,043473	0,025259	0,028794	0,014447
19 <sup>a</sup>	0,070708	0,041084	0,042906	0,102784	0,05148	0,038623	0,043502	0,019628	0,026894	0,014466
20 <sup>a</sup>	0,076381	0,044207	0,036958	0,097946	0,053815	0,033587	0,042835	0,027327	0,027766	0,018103
Média	0,070778	0,042766	0,063151	0,038277	0,054580	0,033188	0,043420	0,024361	0,029628	0,016472
Def.Total ( $\mu m/m$ )	0,1135446		0,10142935		0,0877694		0,06778175		0,04610105	
Incerteza na medição	± 0,012509		± 0,011849		± 0,007456		± 0,007015		± 0,009479	

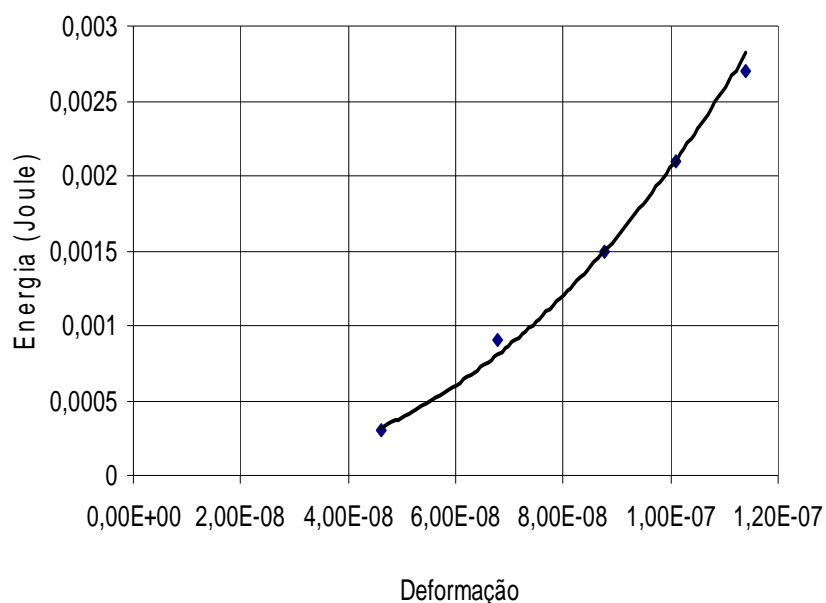


Figura 4.12: Energia x deformação no dispositivo externo, força de ajuste: 16,84 N.

Tabela 4.8: Deformação experimental: superfície da barra x deformação experimental do dispositivo, força de ajuste: 16,94N.

Energia de trinca (Joule)	Deformação Experimental Superfície Barra	Deformação Experimental Lâmina Dispositivo	Diferença (%)
0,0027	1,51E-07	1,14E-07	-24,50
0,0021	1,38E-07	1,01E-07	-26,80
0,0015	1,16E-07	8,78E-08	-24,30
0,0009	8,20E-08	6,78E-08	-17,30
0,0003	4,99E-08	4,61E-08	-07,62

Finalmente, após impor a carga de 22,46N , aumenta-se o deslocamento da mola para 2 mm, equivalente a 22,46 N de força de ajuste. Obtiveram-se, então, os seguintes resultados, mostrados na Tabela 4.9 e Figura 4.13:

Tabela 4.9: Deformação experimental no dispositivo, força de ajuste: 22,46 N.

Amostra	Tamanho simulado de trinca									
	$09\text{ mm}^2$		$07\text{ mm}^2$		$05\text{ mm}^2$		$03\text{ mm}^2$		$01\text{ mm}^2$	
	Deformação Máxima. Compressão	Deformação Mínima Tração	Deformação Máxima. Compressão	Deformação Mínima Tração	Deformação Máxima. Compressão	Deformação Mínima Tração	Deformação Máxima. Compressão	Deformação Mínima Tração	Deformação Máxima. Compressão	Deformação Mínima Tração
01 <sup>a</sup>	0,070565	0,038624	0,064764	0,035599	0,059175	0,036105	0,045454	0,028987	0,028098	0,014462
02 <sup>a</sup>	0,070091	0,038732	0,063547	0,039741	0,053365	0,031928	0,043788	0,01947	0,027784	0,015176
03 <sup>a</sup>	0,068247	0,035849	0,061967	0,037265	0,058564	0,035407	0,043407	0,022985	0,034379	0,01186
04 <sup>a</sup>	0,06376	0,040918	0,065454	0,036914	0,05745	0,032268	0,050199	0,025941	0,027792	0,017264
05 <sup>a</sup>	0,064624	0,038581	0,062063	0,040161	0,054012	0,034316	0,045137	0,032299	0,029333	0,01006
06 <sup>a</sup>	0,067915	0,047014	0,061498	0,044879	0,058858	0,040292	0,04894	0,020037	0,031862	0,018105
07 <sup>a</sup>	0,067667	0,040891	0,062491	0,038137	0,051988	0,029068	0,046498	0,028134	0,028968	0,018073
08 <sup>a</sup>	0,064854	0,033907	0,062316	0,043852	0,060179	0,030904	0,044453	0,026298	0,031357	0,017968
09 <sup>a</sup>	0,067685	0,040885	0,06535	0,04002	0,060823	0,030157	0,043357	0,029204	0,030191	0,013571
10 <sup>a</sup>	0,069303	0,046093	0,064559	0,037396	0,057333	0,02747	0,042933	0,020379	0,029718	0,011322
11 <sup>a</sup>	0,072889	0,047851	0,064266	0,048743	0,060732	0,04592	0,044669	0,022928	0,029516	0,016005
12 <sup>a</sup>	0,068873	0,043418	0,063935	0,040972	0,054618	0,028578	0,050385	0,025536	0,039742	0,018867
13 <sup>a</sup>	0,070005	0,041841	0,066406	0,039433	0,056047	0,030363	0,053953	0,032756	0,024808	0,01681
14 <sup>a</sup>	0,071479	0,04616	0,063965	0,038628	0,055273	0,038334	0,048393	0,033287	0,033882	0,016426
15 <sup>a</sup>	0,075288	0,043807	0,060282	0,038039	0,055876	0,032756	0,049393	0,021328	0,027711	0,012754
16 <sup>a</sup>	0,068647	0,040782	0,061688	0,039323	0,053736	0,035364	0,045913	0,028381	0,032887	0,011004
17 <sup>a</sup>	0,066951	0,046568	0,063805	0,039789	0,057968	0,03283	0,045747	0,02847	0,032438	0,01279
18 <sup>a</sup>	0,072517	0,03892	0,061863	0,03879	0,056556	0,036084	0,047393	0,025653	0,029698	0,014997
19 <sup>a</sup>	0,073264	0,044856	0,061736	0,042919	0,054283	0,035427	0,046641	0,037564	0,027799	0,011703
20 <sup>a</sup>	0,070516	0,043689	0,063228	0,040024	0,054999	0,028847	0,042398	0,030212	0,028224	0,01559
Média	0,069257	0,041969	0,063259	0,040031	0,056591	0,033620	0,046452	0,026992	0,030309	0,014740
Def.Total ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	0,1112263		0,10329035		0,09021265		0,073445		0,0450497	
Incerteza na medição	$\pm 0,009694$		$\pm 0,005480$		$\pm 0,009920$		$\pm 0,010369$		$\pm 0,00760$	

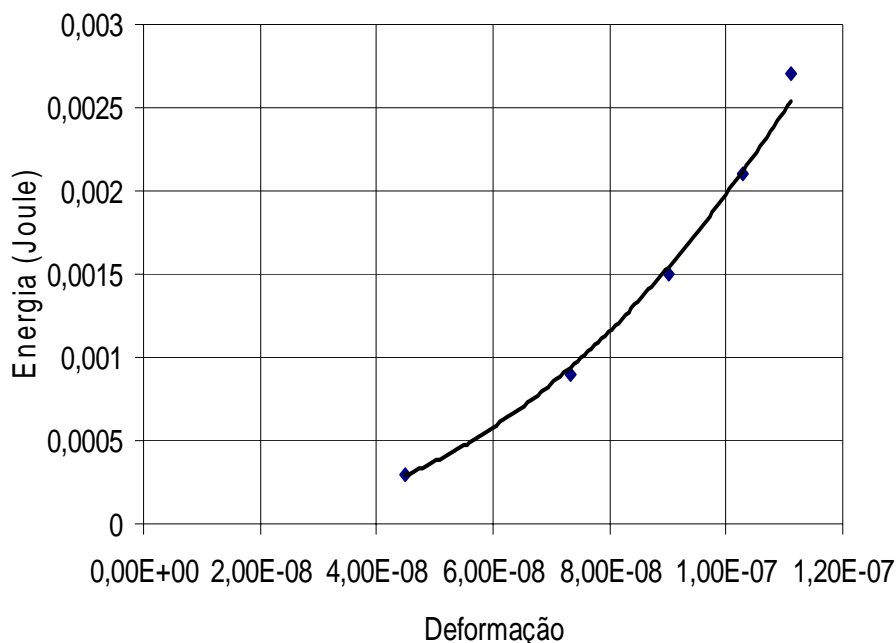


Figura 4.13: Energia x deformação no dispositivo externo, força de ajuste: 22,46 N.

Tabela 4.10: Deformação experimental: superfície da barra x deformação experimental do dispositivo, força de ajuste: 22,46N.

Energia de trinca (Joule)	Deformação experimental superfície barra	Deformação experimental lâmina dispositivo	Diferença (%)
0,0027	1,51E-07	1,11E-07	-26,50
0,0021	1,38E-07	1,03E-07	-25,40
0,0015	1,16E-07	9,02E-08	-22,20
0,0009	8,20E-08	7,34E-08	-10,50
0,0003	4,99E-08	4,50E-08	-09,82

Dos dados experimentais notou-se que apesar do aumento considerável da força de ajuste no dispositivo, a melhora dos resultados foi insignificante, ou seja, o sistema tende a se estabilizar. Em outras palavras, mesmo que a força de ajuste fosse aumentada, a curva experimental do dispositivo não se aproximou significativamente da curva experimental da superfície da barra. Este fato que pôde ser observado mais facilmente na Figura 4.14, o que compara as três curvas experimentais obtidas no dispositivo, com a curva experimental dos valores adquiridos na superfície da barra.

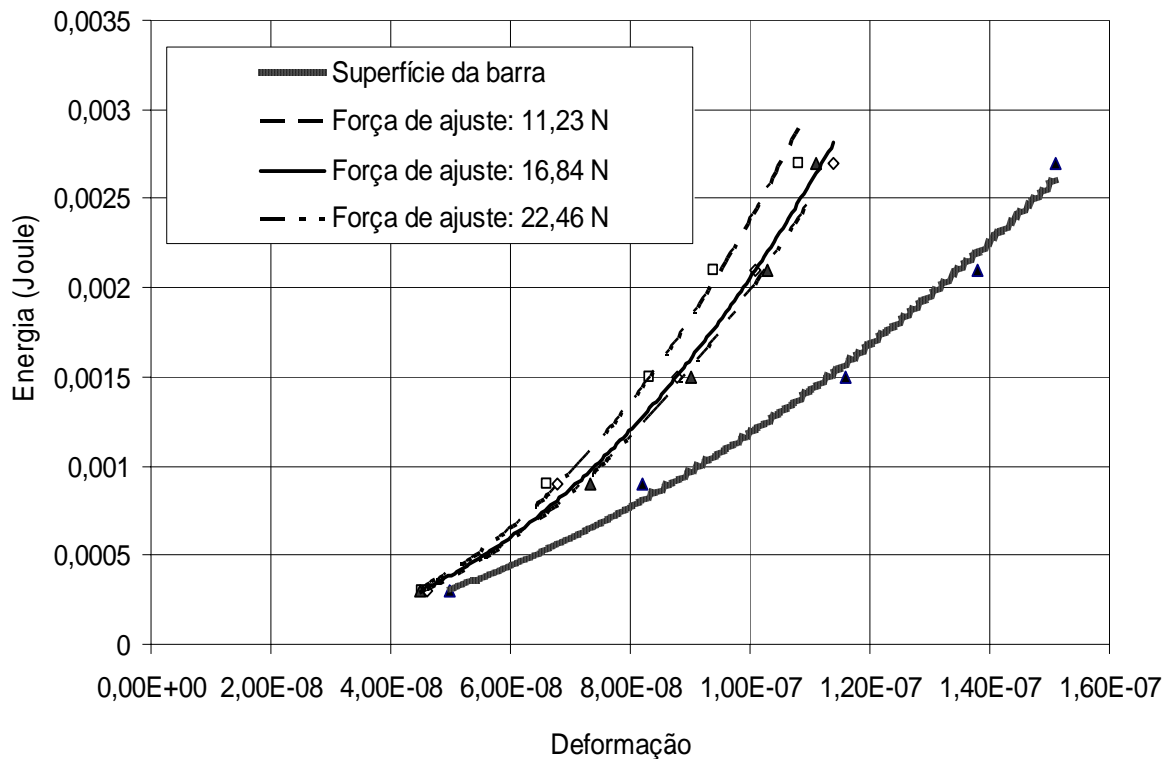


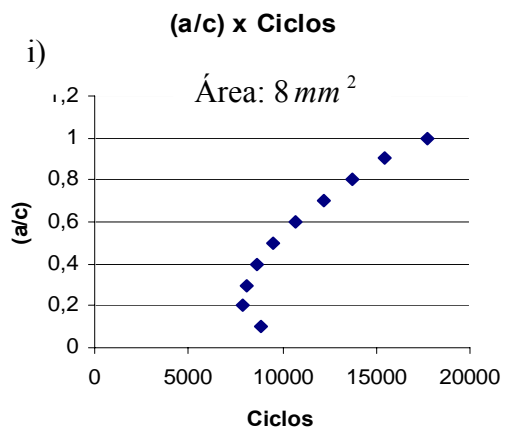
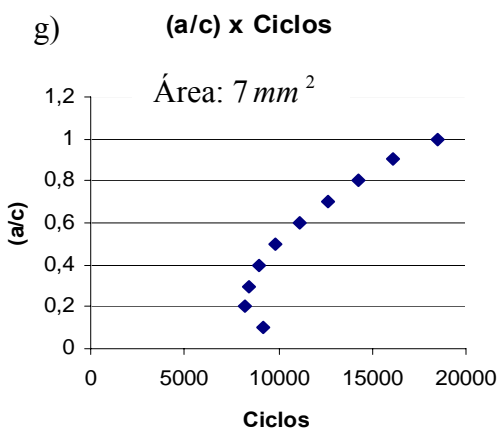
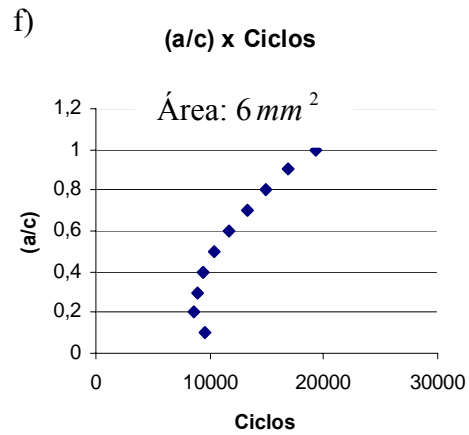
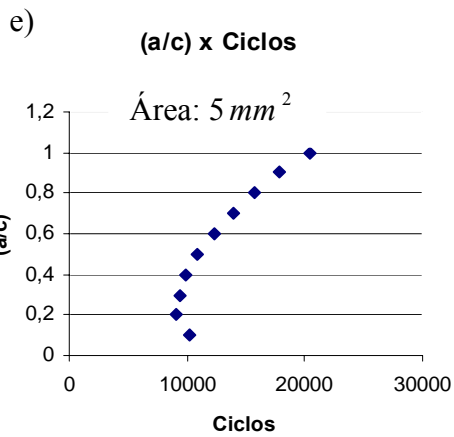
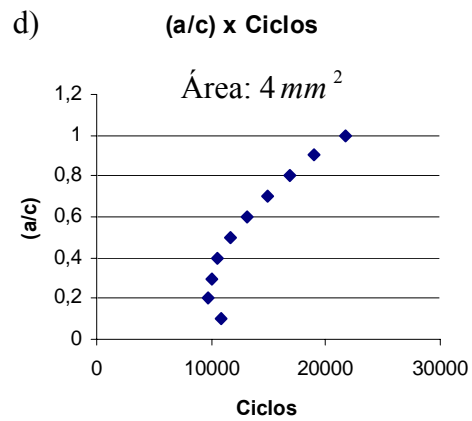
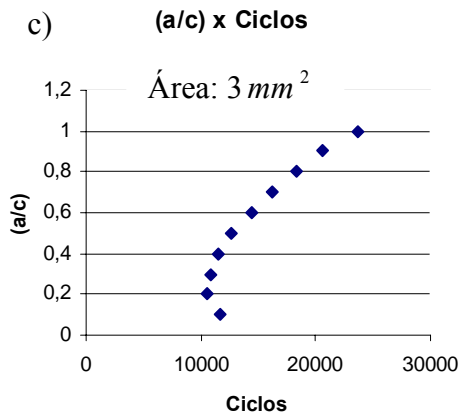
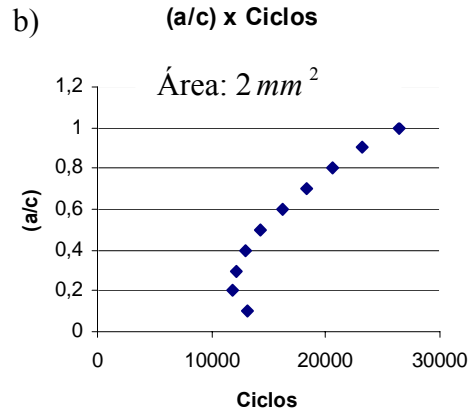
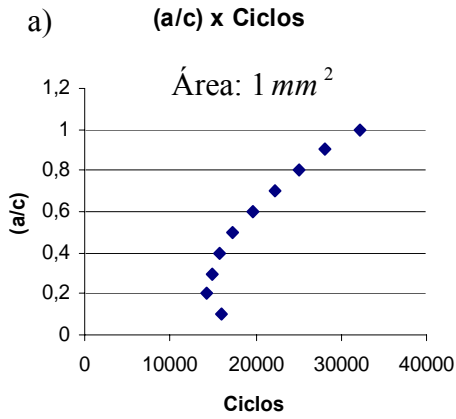
Figura 4.14: Comparação entre as curvas energia x deformação no dispositivo externo e a curva energia x deformação experimental na superfície da barra.

#### 4.7. ANÁLISE DE PROPAGAÇÃO DA TRINCA POR FADIGA

Após a simulação da passagem de energia de propagação na barra, houve a necessidade de verificar se a mesma correspondia à energia liberada na propagação de uma trinca de fadiga, isto é, verificar a ocorrência de propagação. Para isto, aplicou-se a Teoria de fadiga descrita no Capítulo 2.

Uma vez que cada valor de energia, corresponde a uma determinada área de trinca, através desta, podemos, enfim, supor uma determinada geometria de trinca. Pelo fato de o método pesquisado apresentar maior dificuldade de identificação, foi escolhida a geometria de uma trinca elíptica, Figura 2.8. Conforme Tabela 2.1, o valor de  $a/c$ , relação entre os semi-eixos da elipse, varia para cada valor de  $\Phi$ . Então foi calculado o número de ciclos para cada valor de  $a/c$  para uma determinada área de trinca. Observou-se que em todas as áreas de trinca, a vida foi menor em  $a/c=0,2$ . Figuras 4.15a à 4.15l.





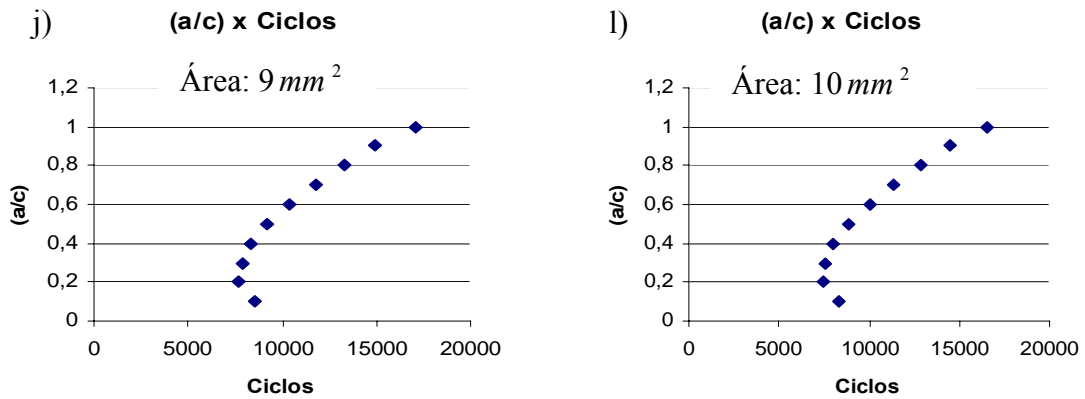


Figura 4.15a à 4.15l: Relação a/c x ciclos.

Baseando-se nesta observação, foi calculada a vida de fadiga para cada área utilizando  $a/c=0,2$  que é o valor crítico, Tabela 4.11. Conforme Norton (2004), o fator mínimo intensificador de tensão,  $\Delta k_0$ , para o material da barra é da ordem de  $6 \text{ Mpa} \sqrt{m}$  para uma razão de tensão R igual a 0,2. Para valores de R diferentes de 0,2 o valor de  $\Delta k_0$  é menor, e para que uma trinca se propague, é necessário que  $\Delta k > \Delta k_0$ . Portanto, há propagação de trincas para qualquer que seja o valor de R, em conjunto com os determinados valores de energia as quais a barra foi submetida no decorrer do trabalho.

Tabela 4.11: Energia x ciclos.

Energia (Joules)	Área ( $\text{mm}^2$ )	Tamanho inicial de trinca $a_1$	Ciclos - N	Fator intensificador de tensão $\Delta k$
0,0003	1	0,000252337	26753	7,381
0,0006	2	0,000356858	22253	6,206
0,0009	3	0,000437061	19960	7,381
0,0012	4	0,000504674	18469	8,168
0,0015	5	0,000564243	17383	8,777
0,0018	6	0,000618097	16500	9,281
0,0021	7	0,000667621	15857	9,714
0,0024	8	0,000713717	15286	10,095
0,0027	9	0,000757011	14798	10,438
0,0030	10	0,00079796	14374	10,750

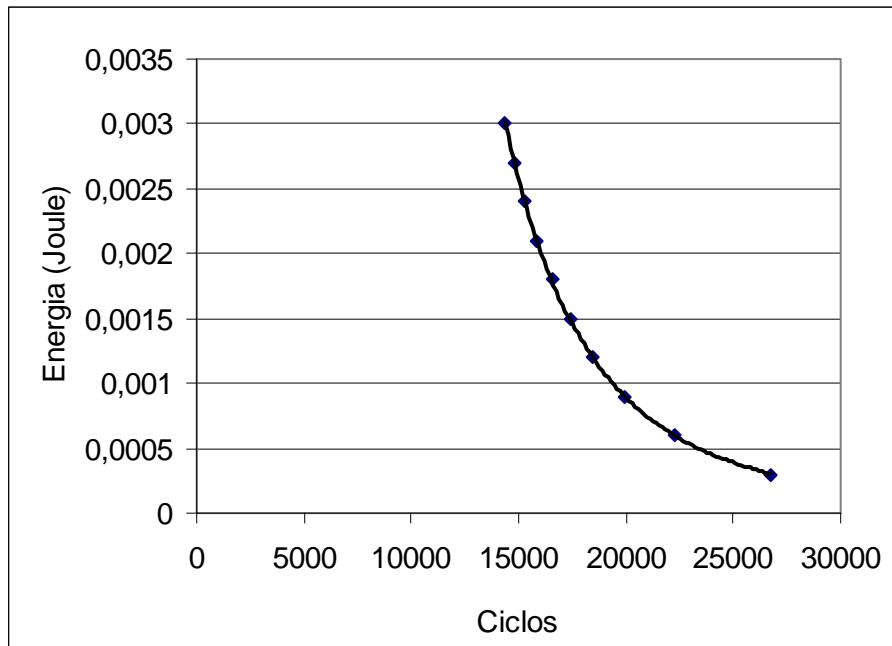


Figura 4.16: Energia x número de ciclos.



## CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES

### 5.1. CONCLUSÕES GERAIS

- 1- As interferências eletromagnéticas influenciam de forma significativa na aquisição do sinal, levando os valores distantes do real. O ideal seria projetar uma blindagem eficiente, para que essas interferências não atrapalhem nos resultados. Já que num ambiente industrial há uma infinidade de equipamentos eletroeletrônicos que podem causar essas interferências;
- 2- Mesmo usando uma taxa de aquisição de 37kHz, abaixo do indicado ( $\geq 5\text{MHz}$ ) para a identificação da onda de tensão, houve êxito na identificação da mesma. O que mostra que utilizando uma taxa maior de aquisição, diminuirá o erro entre os valores teóricos e experimentais;
- 3- A diferença entre o sinal teórico e o experimental na superfície da barra é esperado, uma vez que haja sempre perda de energia da onda quando esta se desloca ao longo da barra;
- 4- Houve sucesso na experimentação do dispositivo externo. O que comprovou que pode identificar o sinal externamente à barra. A diferença entre o sinal do dispositivo e o sinal na superfície da barra é esperada, visto que haverá perda de energia na interface;
- 5- Era esperado que, com o aumento gradativo da força de ajuste do dispositivo, o que aumenta o contato da lâmina à superfície da barra, melhorasse na captação do sinal do pulso de tensão. Essa melhoria foi comprovada porém, foi constatado que há um limite de ajuste do dispositivo, que quando for ultrapassado, não haverá melhora significativa da captação do sinal;
- 6- Baseado nas considerações descritas anteriormente, observou-se que empenhando mais profundamente na parte de filtragem de ruídos eletromagnéticos, e utilizando uma maior taxa de aquisição, haverá melhoria significativa dos resultados e assim melhorará a aplicação do método na identificação de trincas de fadiga mecânica.

- 7- Após a determinação da vida de fadiga, comprovou-se que a energia simulada na barra, realmente corresponde a propagação de um determinado tamanho de trinca, o que comprova o método de identificação de trincas por extensometria.
- 8- Os resultados foram satisfatórios, de modo que possibilitará pesquisas futuras na tentativa de monitorar em campo, os efeitos da fadiga de componentes mecânicos. Como por exemplo, o problema mencionado no trabalho, fadiga nas guias de máquinas injetoras.

## **5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Baseando na experiência adquirida durante a elaboração do trabalho, sugere-se desenvolver uma maneira eficaz de blindagem do sistema às interferências eletromagnéticas na aquisição do sinal. Desde que feita uma blindagem eficiente, pode-se então partir para os testes de campo, ou seja, simular um problema real aplicando o método diretamente no equipamento, que são as guias de uma máquina injetora de plástico.

**REFERÊNCIAS**

- BURG, M.V.; HOSSON, J., TH.M *Interface Science*, 3, p. 107, 1995
- DA ROSA, EDISON, Mecânica da Fratura, Apostila do Curso de Mestrado, UFSC, 2002
- DAVIES, R.M., Stress Waves in Solids, Cambridge Monographs on Mechanics and Applied Mathematics, p.64-138, 1948
- DUNEGAN, H.L, HARRIS, D.O.; TETELMAN, A.S, Detection of Fatigue Crack Growth by Acoustic Emission Techniques, Material Evaluation, Vol.28, pág.221 a 227, 1970
- EFUNDA, Wheatstone Bridges, disponível em: < <http://www.efunda.com>> Acesso em 20 de abril de 2005
- ENGEHARDT, G.R.; MACDONALD, D.D., URQUIDI-MACDONALD, M., Development of Fast Algorithms for Estimating Stress Corrosion Crack Growth Rate, Corrosion Science,41, pág.2267 a 2302,1999
- EWALDS, H.L., WANHILL, R.J.H., Fracture Mechanics, Second imprint, 1985, Deftse Uitgevers Maatschappij, London
- FILHO, J.P DOS SANTOS, Análise de Efeitos de Teste Hidrostático em Vaso de Pressão, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, pág.25 a 41, 2004
- GOLDSMITH, W., Impact The Theory and Physical Behavior of Colliding Solids, Dove Publications, pág,82 a 108, 1960
- GRAFF, K.F., Wave Motion in Elastic Solids, Dove Publications, pág.75 a 108, 1975, USA
- HOFFMAN, K., A Introduction to Measurements using Strain Gages, Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, pág,88 a 91,1989, Germany
- HUH, H.; KANG, W.J.; HAN, S.S., A Tension Split Hopkinson Bar for Investigation the Dynamic Behavior of Street Metals, Vol.42, nº1, pág.9 a 17, March 2002
- IINGLIS, C.E., Stresses in a plate due to the presence of cracks and sharp corners, Trans. Inst. Naval Architects, 55, pp.219-241, 1913
- IRWIN, G.R., Analysis of stresses and strains near the end of a crack transversing a plate, Journal of Applied Mechanics, Vol.24, 1957, pp. 361-364.
- KAISER, M.A., Advancements in the Split Hopkinson Bar Test, Virginia Polytechnic Institute and State University, p.15-18, 1998
- KOLSKY, H., Stress Waves in Solids 1.ed, New York, Dover Publications, 1963
- MALAVOLTA, A.T., Metodologia para a Análise de Impacto em Sistemas Elásticos usando-se Método dos Elementos finitos e a Integração Explícita no Tempo, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo – USP, pág.7 a 9, pág.13 a 15, 2003

METALS HANDBOOK, ASM., Volume 11, Ninth Edition, American Society for Metals, Capítulos

MINDLIN, R.D.; FOX, E.A., Vibrations and Wave in Elastics Bars of Rectangular Cross Section, Journal of Applied Mechanics, v.27, p.152-158, 1960

MORSE, R.W., The Velocity of Compressional Waves in Rods of Rectangular Cross Section. The Journal of the Acoustical Society of America, v.22, p.219-223, 1950

NCODE, Fatigue Engineering: An Introduction, disponível em: <<http://www.ncode.com>>. Acesso em: 20 de agosto de 2006

NORTON, L., Projeto de Máquinas, Segunda Edição, Bookman, pág. 291 a 314, 2004

OMEGA, The Strain Gage, disponível em: <<http://www.omega.com>> Acesso em 15 de março de 2005

ROBERTS, T.M.; TALEBZATH, M., Acoustic Emission Monitoring of Fatigue Crack Propagation, Journal of Constructional Steel Research, pág.695 a 712, April 2002

ROMI, Romi Plastic Injection Molding Machines, disponível em: <<http://www.romi.com.br>>. Acesso em: 05 de agosto de 2004

SALIBURY, CHRISTOPHER, Spectral Analysis of a Wave Propagation Through a Polymeric Hopkinson Bar, Thesis, University of Waterloo, Ontario, Canada, pág.6 a 32, 2001

Shackelford, J.F., Introduction to Materials Science for Engineers, Fifth Edition, University of California, pág. 270-299, 1999

SHIN, YC.; KIM, J., Plasma enhanced machining of Inconel 718. Mfg. Science and Engg. (ASME MED-v4), pp243-249, 1996

WELLS, A. A., Unstable Crack Propagation in Metals – Cleavage and Fast Fracture. Crack Propagation Symposium Proc., Cranfield College of Aeronautics, 1, p.210, 1961



**LEITURAS COMPLEMENTARES**

- ALLEVATTO, CLÁUDIO, A técnica de inspeção por emissão acústica, PETROBRAS Technical Bulletin, v. 23, n. 3, p. 285-310, July/September, Rio de Janeiro, RJ, Brazil, 1980
- AALAMI, B., Waves in Prismatic Guides of Arbitrary Cross Section, Journal of Applied Mechanics, v.40, p.1067-1072, 1973
- ACHENBACH, J.D., Wave Propagation in Elastic Solids, 1. ed, Amsterdam, North-Holland, 1975
- AGARWAL, A.; DAHOTRE, N.B., The Functionality of Laser Surface Engineered Composite Titanium Diboride Coatings, The Minerals, Metals and Materials Society, 2000
- COURTNEY, T.H., Mechanical Behavior of Materials, Second edition, McGraw-Hill, pág. 445 a 456, 1990
- DROUILLARD, T. F., A history of acoustic emission, Journal of Acoustic Emission, v 14, n 1, 1-33, 1986
- FRASER, W.B., Stress Wave Propagation in Rectangular Bars, International Journal of Solids and Structures, v.5, p.379-397, 1969
- FREW, D.J.; FORRESTAL, M.J.; CHEN, W., Pulse Shaping Techniques for Testing Brittle Materials with a Split Hopkinson Pressure Bar, Vol.42, pág.93 a 106, October 2000
- GRIFFITH, A.A., 1921, The phenomena of rupture and flow in solids, Phil. Trans. Roy. Soc. of London, A221, pp 163-197.
- IRWIN, G.R., Fracture Dynamics, Fracturing of Metals, pp. 147-166, 1948
- LOPATNIKOV, S.L.; Gama, B.A.; Krauthouser, K.; Gillespie, G., Applicability of the Classical Analysis of Experiments with Split Hopkins Pressure Bar, Nauka Interperiodica Vol.30, nº3, pág.102 a 105, April 2003
- NAYFEH, A.H., ABDELRAHMAN, An Aproximate Model for Wave Propagation in Rectangular Rods and their Geometric Limits, Journal of Vibration and control, v.6, p. 3-17, 2000
- NIGRO, N.J., Steady State Wave Propagation in Infinite Bars of Noncircular Cross Section. The Journal of the Acoustical Society of America, v.40, p.1501-1508, 1966
- PARK, S.W.; ZHOU, M.; Separation of Elastic Waves in Split Hopkinson Bars Using One-Point Strain Measurements, Sage Science Press, Vol.39, nº4, pág.287 a 294, December 1999