



CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21 - 25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

TÉCNICAS PARA IDENTIFICAÇÃO DO ESTÁGIO INICIAL E/OU ACOMPANHAMENTO DE TRINCA OCASIONADA POR FADIGA MECÂNICA

Raul Gaspari Santos, gaspariraul@msn.com¹

Emerson dos Reis, emersonr@ifsp.edu.br¹

Renato Chaves Souza, rchaves@ifsp.edu.br¹

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo - IFSP, Câmpus São João da Boa Vista, Acesso Dr. João Batista Merlin, S/N – Jd. Itália, São João da Boa Vista/SP, CEP.13872-551.

Resumo: A fadiga mecânica, fenômeno de ruptura progressiva de componentes sujeitos a ciclos repetidos de tensão ou deformação, corresponde a 90% das falhas em elementos de máquinas, causando prejuízo e acidentes. Com base em informações da literatura, este trabalho contribui para o estudo dos diferentes tipos de sensores que podem ser utilizados para identificação do estágio inicial e/ou acompanhamento de trinca a partir de diferentes princípios de funcionamento: corrente parasita, ultrassom, emissão acústica, resistência elétrica, clip gauge, strain gauge, fotográfico, etc. Vários deles podem gerar sinais relacionados ao fenômeno, sobre os quais podem ser aplicadas diferentes técnicas de análise de sinais, isso levando em conta se tratar de um sistema variante no tempo, cuja linearidade ou não dependerá da própria técnica de medição. As considerações apontam que, dentre os diferentes sensores e técnicas de medição, há alguns que tem potencial para serem aplicados na indústria.

Palavras-chave: Fadiga Mecânica, Técnicas de Medição, Sensores, Análise de Sinais.

1. INTRODUÇÃO

A falha mecânica, em geral iniciada por uma trinca, é definida como um fenômeno irreversível associado ao crescimento interno de superfícies em um sólido que sofre processo de deformação, o qual tende a tornar uma peça ou componente de máquina incapaz de executar uma tarefa para a qual foi projetada (Shigley *et al.*, 2005).

As trincas podem surgir por diferentes motivos: imperfeições superficiais oriundas de um descuido durante o processo de fabricação, pontos de soldagem, vazios decorrentes do processo de fundição, formas geométricas complexas que geram concentrações de tensão e arranhões, os quais favorecem a movimentação de discordâncias na grade cristalina do material (Shigley *et al.*, 2005). A sua propagação, mecanismo que culminará na falha da peça, tem o seu comportamento descrito pela Mecânica da Fratura através dos estudos realizados por diferentes pesquisadores como, por exemplo, A.A. Griffith, C. Inglis e P. Paris. O processo de propagação ou crescimento da trinca pode ser acelerado por diversos fatores como: ambiente, se corrosivo ou não, temperatura, presença de cargas variantes no tempo, micro estrutura do material da peça, dentre outros (Meyers; Chawla, 2009).

Cargas variantes no tempo é um tipo de aplicação de carga encontrado em vários equipamentos de serviço, as quais podem assumir diferentes padrões de amplitude e/ou frequência como: alternadas, quando não há variação da amplitude nem frequência e; as aleatórias, quando não há nem amplitude e nem frequência definidas, as quais são mais comuns em peças, por exemplo, da suspensão de um carro, da fuselagem de avião, nos eixos de trem, etc (Shigley *et al.*, 2005).

Cargas variantes no tempo são responsáveis pela chamada fadiga mecânica, a qual deve ser levado em consideração já na fase de projeto de máquinas. Com base na literatura, a fadiga mecânica é definida como: fenômeno decorrente, em geral, da aplicação de cargas variantes no tempo, cuja amplitude está, geralmente, abaixo do limite de escoamento do material, e que estimulam a formação e o crescimento de uma ou mais trincas, culminando na falha de uma peça ou componente mecânico (Shigley *et al.*, 2005).

A propagação da trinca por fadiga pode ser dividida em 3 estágios. No estágio I, ocorre a formação de uma ou mais micro trincas através de um processo de deformações plásticas concentradas, as quais podem se estender de dois a cinco grãos de comprimento a partir da origem. O estágio II é caracterizado pela propagação da trinca no interior do material (Meyers; Chawla, 2009). O estágio III é marcado pela ruptura da peça, que ocorre quando a tensão concentrada na ponta da trinca atinge seu ponto crítico (Shigley *et al.*, 2005).

A falha por fadiga mecânica tornou-se um sério problema ao setor industrial devido aos prejuízos financeiros e à ocorrência de acidentes graves com vítimas. Estima-se que cerca de 50 a 90% das falhas ocorridas em máquinas de serviço sejam causadas por fadiga mecânica (Stephens; Fuchs, 2001).

As informações, obtidas por meio dos ensaios laboratoriais de fadiga, podem ser representadas graficamente como: tensão $\times$ número de ciclos ou S-N, onde o interesse está na vida em fadiga do material; taxa de crescimento da trinca $\times$ faixa de variação do fator de intensidade de tensão ou $da/dN \times \Delta K$, onde o acompanhamento do crescimento da trinca é o alvo de interesse e; deformação $\times$ número de ciclos ou ϵ -N, que permite monitorar a deformação sofrida pelo corpo de prova durante o processo de aplicação de uma carga ou carregamento cíclico (Shigley *et al.*, 2005).

Existe uma grande variedade de técnicas de detecção de danos por meio de sensores, os quais podem ser baseados em diferentes princípios de funcionamento: ultrassom, emissão acústica, corrente parasita (*eddy current*), *strain gauges*, *clip gauges*, microscopia ótica, por imagem comum ou térmica, piezoelétricos (PZT), dentre outros descritos na literatura. Basicamente, é necessário se definir o estágio da trinca que se deseja monitorar, isto é, inicial, propagação ou fratura, assim como a grandeza que se deseja medir: comprimento linear da trinca, abertura da trinca, área, identificação dos estágios de propagação, etc, para que a técnica mais adequada seja escolhida (Meyers; Chawla, 2009).

O formato do corpo de prova também deve ser levado em conta na escolha do sensor, sendo que, neste trabalho, se considera as especificações da norma ASTM E399-12 que exige um formato de corpo de prova cujas dimensões são baseadas na largura W do furo de fixação até a lateral esquerda, como mostrado na Fig. 1. Contudo, a escolha de sensores e os desdobramentos de sua utilização tanto para detecção do início quanto para o monitoramento do crescimento de trincas ainda é um assunto aberto para investimentos em pesquisa, principalmente se for considerado o potencial para aplicação em ambiente industrial, estabelecendo assim, um regime de manutenção preditiva para uma peça crítica de um determinado processo.

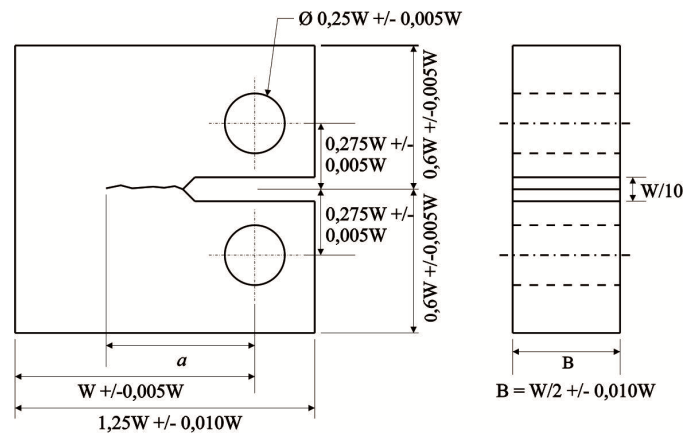


Figura 1. Corpo de prova conforme a norma ASTM E399-12.

Dado o exposto, com base nas informações da literatura, este trabalho tem como objetivo apresentar os diferentes tipos de sensores utilizados para o monitoramento de peças metálicas submetidas a cargas variantes no tempo, bem como as técnicas de análise de sinais mais adequadas para utilização em conjunto com determinado sensor.

2. SENSORES

Nos ensaios de fadiga mecânica, os sensores estão envolvidos em um processo de transdução ou de conversão de um tipo de energia associada a uma grandeza física em outro tipo de energia associada a uma outra grandeza física (em geral, elétrica), o que possibilita a utilização de sistemas digitais, displays e indicadores que facilitam a interpretação pelo operador ou usuário (Webster, 1999).

Neste trabalho, são abordados os sensores com princípio de funcionamento mecânico, elétrico, sonoro e ótico por imagem. A grandeza de interesse no estudo será o comprimento linear da trinca (a) mostrado na Fig. 2, e, indiretamente, os valores do fator de intensidade de tensão (K) e a deformação (ϵ) no corpo de prova, os quais podem ser utilizados, por exemplo, nos gráficos (e modelos) S-N, $da/dN \times \Delta K$ ou ϵ -N.

A informação do sinal elétrico gerado pelo sensor + condicionador de sinal pode ser convertida no comprimento linear da trinca por meio curva de calibração do sensor determinada previamente *in situ*. Ela é empírica, uma vez que o crescimento da trinca depende de diversos fatores como: da estrutura cristalina do material, da força aplicada, da temperatura do corpo de prova, da direção da força aplicada, etc. A norma ASTM E647-13 sugere a curva de calibração como uma função entre a e a tensão de saída V , tomando como referência uma condição de a_r e V_r como na Eq. (1).

$$a = f\left(\frac{V}{V_r}, a_r\right) \quad (1)$$

Se destaca que, segundo a norma ASTM E647-13, o ângulo de deslocamento da trinca em relação à linha principal (pontilhada) em 10° é aceitável, entre 10° e 20° deve ser analisado, porém, deslocamentos superiores a 20° incidem na inutilização dos dados do ensaio. Uma representação do deslocamento é apresentada na Fig. 2.

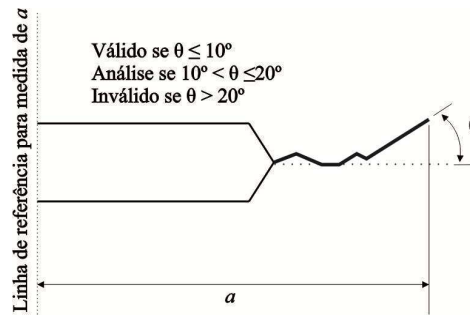


Figura 2. Deslocamento da frente da trinca.

2.1. Sensores Mecânicos

Sensores mecânicos são relativamente simples e são utilizados para se medir, diretamente, a abertura da frente da trinca e a deformação sofrida pela peça durante o teste. A relação entre a variação de tensão na saída do sensor e o comprimento linear da trinca, necessária para calibração, segue a Eq. (1).

2.1.1. Clip gauge

Este tipo de sensor é utilizado para fornecer informações sobre o crescimento de trinca e o Fator de Intensidade de Tensão (K_I). A variação na abertura das garras do sensor, mostrado na Fig. 3, gera uma variação na resistência elétrica interna. Um circuito conversor embutido, em geral uma ponte de Wheatstone, gera um sinal de tensão elétrica na saída proporcional à abertura da frente da trinca.

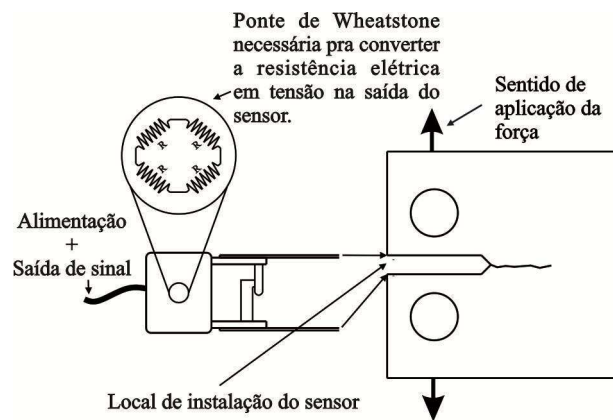


Figura 3. Medição de trinca com clip gauge.

Essa tensão, que varia na faixa de 0 a 10 V, pode ser ajustada pelo usuário, porém, a recomendação é de que o ganho seja mantido entre 70% e 90% para se obter maior precisão e linearidade do sistema. A resolução do sensor deve ser calculada levando em conta a faixa de tensão de saída e o comprimento linear entre as garras (Webster, 1999).

Na Eq. (2), considera-se que, havendo a variação de uma das resistências do circuito, representadas por R_1 , R_2 , R_3 e R_4 , sendo que R_1 é tido como a sensor enquanto R_2 , R_3 e R_4 permanecem constantes, há um desbalanço da ponte que resulta numa tensão V_o devido à tensão de excitação V_{ex} (National Instruments, 2016). O clip gauge é um sensor de custo não tão elevado, que executa a medição de trincas por meio da abertura da sua frente, porém, o seu uso é limitado à peças que sigam a norma ASTM E399, o que representa uma limitação significativa.

$$V_o = \left[\frac{R_3}{R_3 + R_4} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right] \cdot V_{ex} \quad (2)$$

2.1.2. Strain Gauges

Os *strain gauges*, ou extensômetros, são sensores com princípio de funcionamento semelhantes aos *clip gauges*, citados no item anterior, uma vez que há a variação da resistência elétrica, porém, em função da deformação mecânica (Riedle *et al.* 1995). Com o auxílio de uma ponte de Wheatstone semelhante à utilizada no *clip gauge* (Fig. 3), os *strain gauges* apresentam, na saída do sistema transdutor, um sinal de tensão que varia proporcionalmente com a deformação local, a qual pode ser convertida por meio da relação empírica apresentada na Eq. (2).

Os *strain gauges* são constituídos com filamento metálico montado em uma base de poliamida com espessura de cerca de 40 μm . A Fig. 4 mostra como um *strain gauge* pode ser instalado em uma peça que será submetida a um ensaio de fadiga mecânica, onde, em destaque, está a área que sofrerá a deformação identificada pelo sensor. Esta técnica é capaz de apresentar, de forma aproximada, o comprimento da trinca e o estágio em que ela se encontra.

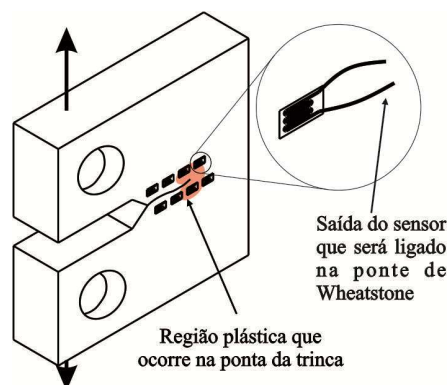


Figura 4. Medição da trinca com *strain gauges*.

Os *strain gauges* possuem diferentes valores de resistência que podem variar de 120 a 350 Ω , com tolerância de $\pm 0,35\%$ deste valor. Sensores com comprimento de 3 mm e 120 Ω possuem sensibilidade da ordem de $\pm 0,2\% \Omega/\text{mm}$ do valor nominal. A temperatura de referência recomendada é de 23°C e o intervalo operacional de temperatura em medições dinâmicas está na faixa de -10°C a 155°C. É importante lembrar que estes sensores também podem sofrer fadiga mecânica junto com a peça que está sendo monitorada. Em seu trabalho, Riedle *et al.* (1995) utilizaram o *strain gauge* para fazer uma estimativa do comprimento linear da trinca (a). O comprimento é estimado por meio da Análise por Elementos Finitos (FEA) dos pontos de deformação identificados pelo sensor. Vale ressaltar que os *strain gauges* somente percebem a deformação que acontece ao redor da trinca e não apresentam de forma direta o seu comprimento linear, importante fator ligado à fadiga mecânica, o que se mostra como uma limitação deste sensor.

2.2. Sensores Elétricos

Em geral, estes sensores possuem princípio de funcionamento baseado em alterações de fluxo de campos magnéticos ou elétricos, os quais ocorrem, respectivamente, em nível mensurável em um meio eletricamente condutor devido à sua elevada permeabilidade magnética ou condutividade elétrica. Significa que tais sensores não operam com materiais poliméricos, cerâmicos e compósitos, os quais dependeriam, por exemplo, do desenvolvimento de uma técnica baseada na capacitância ainda não descrita na literatura.

2.2.1. Magnetômetro

Os magnetômetros possuem uma bobina geradora de campo magnético variante, chamada de bobina de excitação, e outra chamada de bobina de detecção, na qual é induzido um sinal elétrico com base na chamada Lei de Faraday. Esta Lei estabelece que, se um meio condutor em laço fechado, seja uma bobina ou mesmo um material sólido, é submetido a um fluxo magnético variável Φ , uma tensão elétrica proporcional à taxa de variação do fluxo magnético será induzida na bobina de detecção (Webster, 1999).

O aparecimento de uma trinca, bem como o seu crescimento, altera as chamadas correntes parasitas induzidas no interior do material pela bobina de excitação como mostrado na Fig. 5, as quais, por passarem nas proximidades, induzem tensão elétrica da bobina de detecção. A diminuição da amplitude do sinal na bobina de detecção é um indicativo da iniciação ou do crescimento de uma trinca (Webster, 1999), sendo que a curva de calibração segue o proposto pela Eq. (1).

A tecnologia de identificação do início e de acompanhamento do crescimento da trinca usando magnetômetros permite a aquisição e a análise de sinais. Papazian *et al.* (2007) utilizaram este tipo de sensor para identificar o aparecimento de micro trincas em um corpo de provas construído em alumínio. O monitoramento foi realizado em um furo semelhante aos encontrados em fuselagens de aeronaves para fixação de arrebites, local com concentradores de tensão e, portanto, suscetível a falha por fadiga. Estes sensores podem detectar trincas de até 40 μm de comprimento, e são construídos em uma base de substrato cerâmico, operando com temperaturas de 0 a 50°C. Mesmo sendo uma ótima

opção na detecção do início e medição da trinca após calibração, uma importante limitação deste tipo de sensor é que ele só pode ser utilizado em materiais condutores de eletricidade devido ao seu princípio de funcionamento.

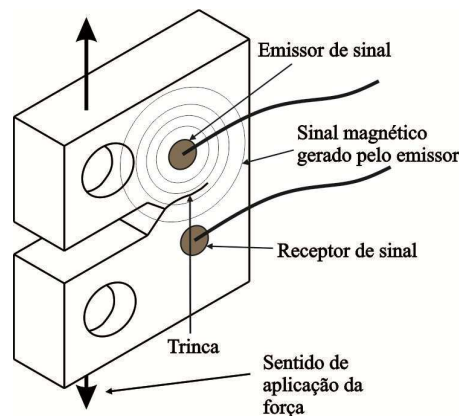


Figura 5. Princípio de sensoriamento de um magnetômetro.

2.2.2. Tinta piezoelétrica (PZT)

Os cristais piezoelétricos são utilizados em diferentes aplicações nas mais diversas áreas da engenharia. Estes cristais possuem a característica de gerar uma diferença de potencial no eixo transversal àquele que é aplicada uma força, o que confere a ele excelentes aplicações na área de sensoriamento.

Cristais piezoelétricos, são comuns em sensores utilizados no monitoramento de vida em fadiga de materiais metálicos, poliméricos, cerâmicos ou compósitos, como por exemplo os sensores de ultrassom e os de emissão acústica, entretanto, estes sensores são de difícil utilização em geometrias complexas ou pontos de solda.

Para evitar adversidades associadas com materiais piezoelétricos convencionais, uma tinta piezoelétrica (PZT) com base polimérica vem sendo estudada para uma possível substituição das cerâmicas piezoelétricas tradicionais como elementos sensores em determinadas áreas de aplicação. As tintas PZT são, na verdade, um compósito formado por uma base polimérica misturada à pequenas partículas de cristais piezoelétricos. Uma camada da tinta PZT é aplicada entre dois eletrodos finos de cobre, como mostrado na Fig. 6a, que farão o papel de captar as diferenças de potencial geradas pelos cristais. Desta forma, o sensor terá a flexibilidade necessária para que seja instalado em diferentes tipos de configurações de peças, sendo possível identificar micro deformações que acontecem na superfície do material e, conseqüentemente, a identificação de pontos de nucleação de micro trincas. A Fig. 6b mostra um exemplo de aplicação do sensor construído com a tinta PZT em uma placa de alumínio (Zhang, 2006). Um problema da tinta PZT é que a identificação da trinca ocorre somente se ela atravessar a camada depositada sobre o material, deste modo, se uma falha acontecer nos seus arredores, não haverá monitoramento.

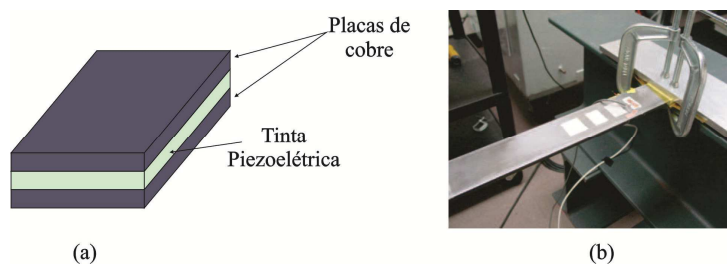


Figura 6. (a) Método de montagem do sensor e (b) Modo de aplicação. Adaptado de Zhang (2006).

2.3. Sonoro

Os sensores com o princípio de funcionamento sonoro possuem transdutores construídos com cristais piezoelétricos, os quais são utilizados para fazer a conversão do sinal sonoro emitido pela iniciação e propagação da trinca em um sinal elétrico de baixa intensidade. Na construção destes sensores, é usual que seja acoplado um sistema de amplificação de sinal. Cristais piezoelétricos possuem a característica de gerarem uma diferença de potencial quando sofrem algum tipo de esforço mecânico instantâneo, sejam eles de grande magnitude como uma “pancada” súbita, ou de pequena magnitude, como por exemplo um simples deslocamento de ar causado pela voz (Webster, 1999).

2.3.1. Ultrassônicos

Em geral, são fabricados a partir de um cristal piezoelétrico de quartzo. São versáteis, robustos e de fácil utilização inclusive em ambiente industrial. O sistema de medição é constituído de duas partes: o emissor que emite um sinal sonoro de frequência acima de 20 kHz, em uma faixa, portanto, que não é audível aos seres humanos, de frequência fixa e que percorre todo o material; a outra parte é constituída de um sensor que capta o sinal emitido pelo emissor, chamado de receptor de ultrassom (Gupta *et al.*, 2008). A Fig. 7 mostra a presença de uma trinca ou descontinuidade na peça, seja ela de material metálicos, poliméricos, cerâmicos ou compostos, onde o sinal captado pelo receptor sofre atenuação (Webster, 1999).

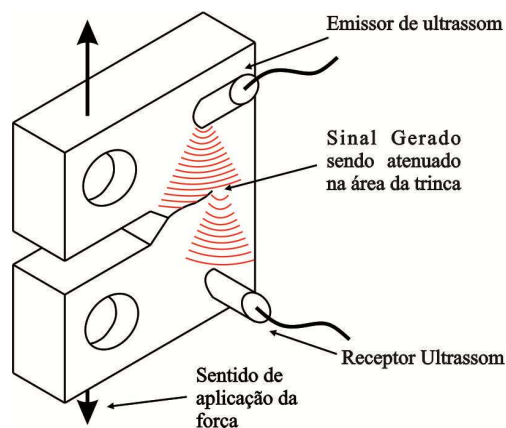


Figura 7. Princípio de sensoriamento de um sensor ultrassônico.

Gupta *et al.* (2008) identificaram o início de uma trinca por meio da análise dos sinais. Ao mesmo tempo, os autores realizaram o acompanhamento com uma câmera fotográfica.

Os sensores ultrassônicos são vendidos em conjunto com um sistema de monitoramento com interface e display. Os modelos operam em frequências de 0,5 a 18 MHz, ganhos que variam de 0 a 110 dB, resoluções da ordem de 0,01 mm e podem operar em temperaturas de 0 a 60°C. A utilização deste tipo de sensor requer cuidados com vibrações externas, correntes de ar turbulentas e rugosidades superficiais da peça, o que pode causar interferência no sinal gerado.

2.3.2. Emissão acústica

Sensores de emissão acústica, assim como os ultrassônicos, podem ser utilizados em manutenção preditiva ou preventiva para identificar falhas em tubulações, componentes estruturais e fuselagem de aeronaves, podendo ser utilizados com materiais metálicos, poliméricos, cerâmicos ou compósitos. A Fig. 8 representa o modo de instalação em um ensaio de fadiga mecânica.

Este tipo de sensor é utilizado para identificar as emissões acústicas produzidas pela trinca no momento da sua iniciação ou propagação, sem que haja um emissor de sinal externo.

Devido à sua elevada sensibilidade, o sensor de emissão acústica é mais utilizado na identificação do estágio inicial da trinca (estágio I de $da/dN \times \Delta K$), mas também tem boa resposta no acompanhamento do seu crescimento, quando os sinais sonoros são de menor intensidade. Em seu estudo, Lyasota *et al.* utilizaram de um sensor de emissão acústica para identificar a formação de micro trincas na liga de alumínio 1201-T. O sinal captado pelo sensor foi amplificado em 40dB e adquirido por um sistema operando com uma frequência de aquisição de 0,2 a 0,6 MHz e tempo de amostragem de 0,25 ms (Lyasota *et al.* 2013). Do mesmo modo que os sensores ultrassônicos, os sensores de emissão acústica devem ser instalados em peças que não sofram vibração causada por fatores externos. Este tipo de perturbação também pode causar interferência no sinal gerado pelo sensor.

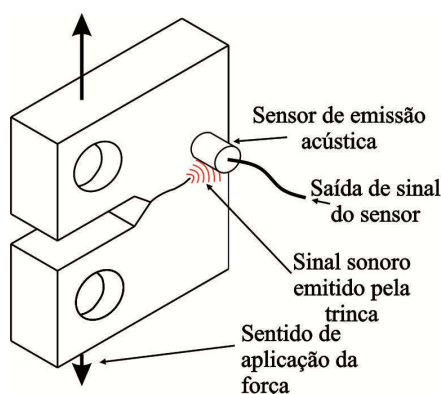


Figura 8. Medição de trinca com sensor de emissão acústica.

2.4. Uso de Imagens para a Identificação e Acompanhamento de Trincas

A utilização de câmeras e microscópios em um ensaio de fadiga pode ser utilizada junto com os sensores mecânicos, elétricos e acústicos, e permite adotar uma estratégia de comparação dos sinais obtidos.

Gupta *et al.* (2008) utilizaram de um sensor ultrassônico para estudar o fenômeno da fadiga comparando, a cada fase, a imagem da trinca em fase de crescimento com os sinais de um sensor sonoro.

A utilização de câmeras tem vantagens por ser, em geral, de fácil instalação, fácil manuseio e de interpretação descomplicada pelo usuário, havendo um número de softwares disponível que permitem a análise das imagens, como é o caso do MATLAB®. Uma lente profissional que permita um grau de ampliação adequada deve ser utilizada.

Carroll *et al.* (2013) utilizaram de um microscópio ótico Olympus, modelo BX51 M para monitorar uma região de aproximadamente $2,7 \text{ mm} \times 0,9 \text{ mm}$ de ocorrência da trinca. Foram utilizadas ampliações de 5 e 50 vezes. A de 5 vezes permitiu obter resolução de $0,87 \text{ } \mu\text{m}/\text{pixel}$, enquanto a de 50 vezes de $0,087 \text{ } \mu\text{m}/\text{pixel}$, como mostrado na Fig. 9. Sistemas de medição de trincas por imagem não conseguem identificar o início de uma trinca devido a limitações do próprio equipamento, ponto que pode ser importante em determinados testes.

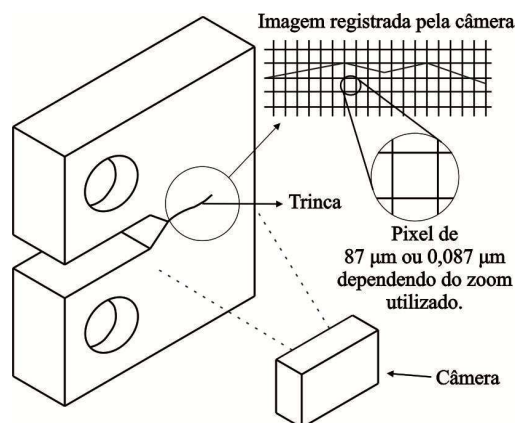


Figura 9. Medição de trinca por imagem.

3. TÉCNICAS DE ANÁLISE DE SINAIS

Técnicas de análise de sinais se mostram como uma importante ferramenta que permite estudar, sob diferentes aspectos, sinais decorrentes de sistemas complexos. Antes, é necessário que sejam examinadas as características do sistema que se deseja estudar, sendo que um sistema é definido como objeto ou grupo de objetos que interagem com o mundo. Tal interação, portanto, é representada por meio de sinais de entrada e de saída, onde o transmissor, que emite o sinal para o sistema, se encontra localizado em algum ponto do espaço, o receptor, que recebe o sinal do sistema, em outro ponto separado do transmissor, enquanto um canal modulado os interliga (Haykin, 2001).

No caso de um ensaio de fadiga mecânica, como o seu sinal de entrada, se tem uma excitação mecânica sobre o corpo de prova, que é percebido por um sensor que a converte em um sinal elétrico de saída. Portanto, o sensor é um dos subsistemas sobre o qual se espera que não ocorram não-linearidades ou invariâncias ao longo do tempo, deixando que tais características tenham sua origem estritamente associada ao fenômeno da fadiga.

Os sinais decorrentes de um sensor utilizado em uma peça submetida a um regime de fadiga, tanto no início quanto ao longo do crescimento de uma trinca, são classificados como sendo oriundos de sistemas não-linear e variante no tempo (SNLVT), porém, a questão da invariância pode ser levada em conta considerando os tempos e os instantes de observação do fenômeno. Sob determinado ponto de vista, a questão de ser linear ou não linear, ou variante ou invariante no tempo e tipo de informação requerido irá determinar a escolha da técnica de análise mais adequada. A interface entre o sinal gerado pelo fenômeno e o meio digital fica à cargo de um sistema de aquisição de dados, o qual, por meio de um conversor analógico/digital (A/D), transforma o sinal contínuo gerado pelo sensor em um sinal discreto que possa ser tratado digitalmente (Lathi, 1998).

Sob este aspecto, as técnicas de análise de sinais possuem dois propósitos principais: determinar os parâmetros necessários para a construção de um modelo e se apresentar como uma estratégia para validação dos modelos de um fenômeno (Huang *et al.*, 1998).

3.1. Transformada de Fourier

Elaborada pelo físico e matemático francês Jean Fourier (1768-1830) no ano de 1822, a Transformada de Fourier (TF) é amplamente utilizada como ferramenta de análise de sinais contínuos, discretos e também como método para filtragem de um sinal. Como o sinal do fenômeno é adquirido por meio de um conversor A/D, o mesmo possui características discretas. Neste caso, a TF em sua versão discreta para um sinal discreto $x[n]$ com N "pontos" dada por:

$$X[k] = X(\omega_k) = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \exp(-j\omega_k n) \quad (3)$$

onde x é uma variável cuja natureza depende da técnica instrumental utilizada na geração do sinal e $j = (-1)^{1/2}$. Vale ressaltar que alguns autores empregam um fator de normalização de $1/N$ na Eq. (3), mas a expressão aqui apresentada é a empregada pelo software MATLAB®. O parâmetro ω , denominado frequência, assume os seguintes valores:

$$\omega_k = 2\pi \frac{k}{N}, \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (4)$$

onde k é chamado “índice de frequência”.

Na TF, se assume a hipótese de que o sinal se trata de um Sistema Linear e Invariante no Tempo, os chamados SLIT (Haykin, 2001), o que representa uma limitação, uma vez que o fenômeno da fadiga mecânica se caracteriza como um sistema variante no tempo, portanto, esta técnica é destinada a analisar curtos espaços de tempo de um dado sinal que será tomado como invariante no tempo.

Para análise de sinais provenientes de um estudo de fadiga, o sistema poderá ser linear ou não, porém, sempre será variante no tempo. Visando atender a hipótese de invariância no tempo, uma alternativa é adotar uma técnica de janelamento, por meio da qual se divide o sinal em janelas, ou frações, e se aplicar a TF em cada uma delas separadamente. Matematicamente, a Transformada de Fourier Janelada (TFJ) de um sinal $x[n]$ é dada pela expressão:

$$X(p, \omega_k) = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] w(x-p) \exp(-j\omega_k n) \quad (5)$$

onde $w(x)$ é uma função de janelamento, responsável pela delimitação do trecho do sinal que está sendo considerado e o parâmetro p da equação expressa a posição da janela dentro do sinal (Galvão *et al.*, 2001).

A TF pode ser aplicada ao estudo da fadiga mecânica para acompanhar o crescimento de uma trinca. Através da análise de sinais adquiridos em diferentes instantes de tempo, é possível que haja a comparação de um estado da trinca com outro tendo assim a comprovação do seu crescimento. Gagar *et al.* (2015) utilizaram a TF para análise da integridade estrutural por meio do acompanhamento do crescimento de uma trinca em diferentes intervalos de tempo. Os autores utilizaram um sensor de emissão acústica.

3.2. Transformada de Ondeletas ou Wavelet

A análise de sinais por TF sofre com algumas limitações que são minimizadas pela TFJ, onde o sinal é dividido, por meio de cortes abruptos, em janelas e analisadas uma a uma, porém, neste método, há a ocorrência de um problema chamado “fenômeno de Gibbs” (Galvão *et al.*, 2001).

A fim de minimizar os problemas ocasionados pelo fenômeno de Gibbs na TF, foi proposta a chamada Transformada *Wavelet* (TW), que visa melhorar o desempenho no tratamento de sinais que variam no tempo (Galvão *et al.*, 2001). A formulação matemática da TW de um sinal discreto no tempo $x(t)$ é expressa pela seguinte equação:

$$W(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \Psi_{a,b}(t) dt \quad (6)$$

A função $\Psi_{a,b}(t)$, chamada de *wavelet*, é derivada de uma função $\psi(t)$ por meio da equação abaixo, onde o “*” denota o conjugado complexo.

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \Psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (7)$$

A Eq. (6), que trata da formulação matemática da TW, pode ser comparada com a Eq. (5) por meio dos parâmetros de janelamento representados por p e w na TFJ e por a e b na TW. Na TF, o p representa a posição e w a frequência da janela com a sua largura em um valor fixo. Na TW, b também representa a posição, ou translação da *wavelet*, e a , chamado de parâmetro de escala, está associado à largura da janela (Galvão *et al.*, 2001).

Em seu trabalho, Gupta *et al.* (2008) utilizaram a TW para monitorar um sinal com o intuito de identificar o momento do início de uma trinca e também acompanhar o seu crescimento, culminando na fratura. É importante lembrar que tanto a TF quanto a TW são aplicadas assumindo que o sistema é linear.

3.3. Transformada Hilbert-Huang

No caso da fadiga mecânica onde a linearidade do sistema fica comprometida pela própria natureza do fenômeno (Huang; Attoh-Okine, 2005), a Transformada de Hilbert-Huang (THH), proposta pelo Prof. Dr. Norden E. Huang no ano de 1998, tem como principal objetivo analisar sinais não lineares e variantes no tempo baseado na decomposição de algoritmos chamada modo empírico de decomposição e uma ferramenta de análise espectral chamada análise espectral Hilbert (Huang *et al.*, 1998).

A THH é uma ferramenta que fornece a descrição tempo-frequência energética de dados de séries temporais. O método também descreve os dados variantes no tempo de forma local a fim de calcular frequências e as suas amplitudes e, então, descrever o sinal com mais facilidade. A Eq. (8) é a expressão principal da THH, a qual leva em conta um sinal contínuo no tempo $x(t)$, onde PV é o valor principal da integral de Cauchy (Huang *et al.*, 1998).

$$H[x(t)] \equiv y(t) = \frac{1}{\pi} PV \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (8)$$

Uma função analítica pode ser formada com a THH mostrada na Eq. (9), deste modo:

$$z(t) = x(t) + jy(t) = A(t)e^{j\theta(t)} \quad (9)$$

onde A é a função de amplitude do sinal e $\theta(t)$ a função de fase instantânea e pode ser escrito como:

$$A(t) = \sqrt{x^2 + y^2} \quad e \quad \theta(t) = \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right) \quad (10)$$

Como decorrência, a frequência instantânea pode ser escrita como a derivada do tempo de fase:

$$\omega = \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (11)$$

As funções de amplitude e frequência são expressas em função do tempo, chamadas espectro de Hilbert, exibindo a amplitude relativa ou energia e as contribuições para uma certa frequência em um momento específico da função $H(w,t)$ (Huang *et al.*, 1998).

Em seu trabalho, Liu *et al.* (2015) utilizam da THH para identificar não-linearidades em sinais gerados através de uma técnica chamada modulação de sinais vibro-acústicos. Nesta técnica, um sinal acústico de frequência pré-estabelecida é aplicado à uma peça onde é refletido e capitado novamente por uma célula receptora do sensor. Havendo alguma imperfeição ou trinca na superfície da peça, o sinal de retorno apresenta uma não linearidade característica, identificada pela aplicação da THH.

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho, foram apresentados alguns dos métodos mais utilizados na detecção e acompanhamento de trincas ocasionadas por fadiga mecânica. A fadiga mecânica é um assunto que desperta interesse por parte de pesquisadores e de diversos setores da indústria, tanto por representar um grande prejuízo social e econômico quanto por sua complexidade de entendimento e associação a outros fatores que o influenciam. Alinhados a estes estudos, os sensores e sistemas de monitoramento de trincas se mostram como um forte aliado na busca pela excelência na identificação e acompanhamento de trincas ocasionadas por fadiga mecânica, formando assim métodos de estimativa de vida em fadiga e de sistemas confiáveis de manutenção preditiva e preventiva.

A determinação de relações matemáticas que apresentem, de forma direta, os valores de comprimento de trinca (a) e fator de intensidade de tensão (K_I) para materiais metálicos, poliméricos, cerâmicos ou compósitos, mostra-se como um desafio de avanço no estudo da fadiga mecânica. A determinação destes fatores passa por um processo oneroso de calibragem de equipamentos que muitas vezes necessitam de outros sistemas trabalhando em conjunto para validação de dados.

Para o setor industrial, convém um sistema de monitoramento preditivo em regime constante que una, em um mesmo sistema portátil, as técnicas de sensoriamento e de análise de sinais, a fim de tornar a identificação de falhas em pontos críticos de estruturas complexas mais rápido e eficaz.

5. AGRADECIMENTOS

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio financeiro concedido por meio de bolsa de estudo.

6. REFERÊNCIAS

- Carroll, J.D.; Abuzaid, W.; Lambros, J.; Sehitoglu, H., 2013, "High resolution digital image correlation measurements of strain accumulation in fatigue crack growth", *International Journal of Fatigue*, Vol. 57, pp. 140–150.
- Gagar, D.; Foote, P.; Irving, P.E., 2015, "Effects of loading and sample geometry on acoustic emission generation during fatigue crack growth: Implications for structural health monitoring", *International Journal of Fatigue*, Vol. 81, pp. 117–127.
- Galvão, R.K.H.; Ugulino de Araújo, M.C.; Saldanha, T.C.B.; Visani, V.; Pimentel, M.F., 2001, "Comparative study on instrumental signal denoising using Fourier and Wavelet transforms", *Química Nova*, Vol. 24, No. 6, pp. 874–884.
- Gupta, S.; Singh, D.S.; Ray, A., 2008, "Statistical pattern analysis of ultrasonic signals for fatigue damage detection in mechanical structures", *NDT & E International*, Vol. 41, No. 7, pp. 491–500.
- Haykin, S., 2001, "Sinais e sistemas", Porto Alegre: Bookman.
- Huang, N.E.; Shen, Z.; Long, S.R.; Wu, M.C.; Shih, H.H.; Zheng, Q.; Yen, N.C.; Tung, C.C.; and Liu, H.H., 1998, "The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis", *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, Vol. 454, No. 1971, pp. 903–995.
- Huang, N.E.; Attoh-Okine, N.O. (EDS.), 2005, "The Hilbert-Huang transform in engineering", New York: Taylor & Francis.
- Lathi, B.P., 1998, "Signal processing and linear systems", Carmichael, Calif: Berkeley Cambridge Press.
- Liu, B.; Gang, T.; Wan, C.; Wang, C. and Luo, Z., 2015, "Analysis of nonlinear modulation between sound and vibrations in metallic structure and its use for damage detection", *Nondestructive Testing and Evaluation*, No. ahead-of-print, pp. 1–14.
- Lyasota, I.M.; Stankevych, O.M. and Skal's'kyi, V.R., 2013, "Acoustic-emission diagnostics of the initiation of fatigue fracture of 1201-T aluminum alloy" *Materials Science*, Vol. 48, No. 5, pp. 680–686.
- Medindo distensão com Strain Gauges - National Instruments. Disponível em: <<http://www.ni.com/white-paper/3642/pt/>>. Acesso em: 1 abr. 2016.
- Meyers, M.A.; Chawla, K.K., 2009, "Mechanical behavior of materials", Cambridge; New York: Cambridge University Press.
- Papazian, J.M.; Nardiello, J.; Silberstein, R.P.; Welsh, G.; Grundy, D.; Craven, C.; Evans, L.; Goldfine, N.; Michaels, J.E.; Michaels, T.E.; Li, Y. and Laird, C., 2007, "Sensors for monitoring early stage fatigue cracking", *International journal of fatigue*, Vol. 29, No. 9, pp. 1668–1680.
- Riedle, J.; Wulf, J.; Schmauder, S., 1995, "A method for measuring compliances and crack length by strain gauge and 3D finite element calculation", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 51, No. 2, pp. 323–325.
- Shigley, J.E.; Mischke, C.R.; Budynas, R.G.; Aguiar, J.B. and Aguiar, J.M., 2005, "Projeto de engenharia mecânica", Porto Alegre: Bookman.
- Stephens, R.I.; Fuchs, H.O. (EDS.), 2001, "Metal fatigue in engineering", 2nd ed. New York: Wiley.
- Webster, J.G. (ED.), 1999, "The measurement, instrumentation, and sensors handbook", Boca Raton, Fla: CRC Press published in cooperation with IEEE Press.
- Zhang, Y., 2006, "In Situ Fatigue Crack Detection using Piezoelectric Paint Sensor", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 17, No. 10, pp. 843–852.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

“O(s) autor(es) é(são) o(s) único(s) responsável(is) pelo conteúdo deste trabalho”.

TECHNIQUES FOR IDENTIFICATION OF EARLY STAGE AND/OR MONITORING OF CRACK GROWTH RESULT FOR MECHANICAL FATIGUE

Raul Gaspari Santos, gaspariraul@msn.com¹

Emerson dos Reis, emersonr@ifsp.edu.br¹

Renato Chaves Souza, rchaves@ifsp.edu.br¹

¹Federal Institute of Education, Science and Technology of São Paulo - IFSP, campus of São João da Boa Vista, Acesso Dr. João Batista Merlin, S/N – Jd. Itália, São João da Boa Vista/SP, Zip. Code.13872-551.

Abstract: *The mechanical fatigue, progressive breakdown phenomenon of components subject to repeated cycles of stress or deformation, corresponding to 90% of failures in machines elements, causing damage and accidents. Based on literature information, this work contributes to the study of the relationship between the magnitudes associated phenomena as mechanical stress, strain, force, linear crack length, etc. and the various types of sensors that can be used to identify the early stage and / or monitoring of crack from different operating principles: eddy current, ultrasonic, acoustic emission, electrical resistance, clip gauge, strain gauge, photographic, etc. Several of them can generate signals related to the phenomenon with the potential to be applied to different signal analysis techniques, taking into account that it is a variant system in time, whose linearity or not will depend on the actual measurement technique. The considerations point that, among the different sensors and measurement techniques, there are some who have the potential to be applied in the industry.*

Palavras-chave: *Mechanical Fatigue, Measurement Techniques, Sensors, Signal Analysis*