

AVALIAÇÃO DE FALHAS EM ENSAIO DE FADIGA EM CORPO DE PROVA DE ALUMÍNIO ATRAVÉS DO MÉTODO DA IMPEDÂNCIA

Carolina Bittencourt

Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC), Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Avenida João Naves de Ávila, 2121

carol.bittencourt@yahoo.com.br

Karina Mayumi Tsuruta

Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC), Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Avenida João Naves de Ávila, 2121

karinamayumi@yahoo.com.br

Raquel Santini Leandro Rade

Instituto de Física (INFIS), Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Avenida João Naves de Ávila, 2121

rsrlr@ufu.br

Resumo: *Um dos projetos mais importantes de Engenharia na área de estruturas é o desenvolvimento de técnicas de monitoramento de integridade estrutural (SHM) em tempo real, para aplicação em estruturas de custo elevado e de grande importância dentro de um sistema. Dentre as técnicas SHM, o método baseado na impedância eletromecânica é um dos mais promissores. Trata-se de um método não destrutivo, que utiliza as características eletromecânicas de materiais piezelétricos para monitorar o surgimento e evolução de falhas estruturais. O método consiste em colar pastilhas piezelétricas na estrutura, e através destas monitorar as mudanças que ocorrem na impedância eletromecânica do sistema (PZT - Estrutura), as quais podem ocorrer devido à mudança da massa ou rigidez do sistema, que pode indicar a presença de danos. Neste contexto, o objetivo deste trabalho é analisar danos em ensaios de fadiga através do método da impedância eletromecânica. A metodologia consiste em colar uma pastilha PZT em corpos de prova de tração de alumínio e submetê-los a ensaios cíclicos de tração, adicionando falhas nos corpos de prova no decorrer dos ensaios. Através de um analisador de impedância, mede-se o sinal da impedância inicial do sistema, e a cada determinado número de ciclos realizados. Usando um índice denominado métrica do dano, analisam-se os sinais de impedância medidos durante os ensaios, sendo possível avaliar se o método é eficaz na detecção e acompanhamento da evolução do dano.*

Palavras-chave: *Impedância Eletromecânica, Fadiga, Detecção de Falha, Monitoramento de Integridade Estrutural, PZT.*

1. INTRODUÇÃO

Antes da Revolução Industrial, as máquinas existentes eram de funcionamento manual, com solicitações estáticas. A construção das primeiras máquinas expostas a esforços dinâmicos fez surgir inúmeras ocorrências de ruptura por fadiga. O aumento destas ocorrências levou ao aparecimento dos primeiros estudos sobre este fenômeno. A fadiga é a causa de 80 a 90% de todas as ruínas de peças e estruturas submetidas a esforços mecânicos e pode causar elevados prejuízos econômicos por provocar paralisações de equipamentos na indústria por impossibilidade de funcionamento. Logo, a criação ou aperfeiçoamento de técnicas capazes de monitorar e aumentar a segurança estrutural é altamente desejável e é objeto de estudos tanto no meio industrial quanto no meio acadêmico.

Existem várias técnicas destinadas ao monitoramento da ocorrência e propagação de danos estruturais, que se baseiam em diferentes princípios, desde a inspeção visual, o uso de raios-x e ultra-som. Todavia, seu uso prático é limitado pelo fato que a inspeção é localizada, o que torna estes métodos demorados e onerosos.

Mais recentemente, foram desenvolvidos métodos de monitoramento baseados no uso de materiais ditos inteligentes, que exibem características específicas que os tornam adaptados a esta finalidade. Citam-se, como principais exemplos, os materiais piezelétricos e as fibras ópticas (GIURGIUTIU, 2000; TOOD, 2004).

Particularmente no tocante aos transdutores piezelétricos, uma técnica foi bastante desenvolvida e vêm sendo amplamente estudada: a técnica baseada na impedância eletromecânica. Esta técnica baseia-se no acoplamento eletromecânico que resulta da colagem de um transdutor piezelétrico à estrutura monitorada, ficando definida a função de impedância que depende tanto das características elétricas do transdutor quanto das características físicas (inércia e rigidez) da estrutura. Assim, através de curvas características da impedância, variações da rigidez da estrutura decorrentes do aparecimento de falhas podem ser avaliadas. Como a perda de rigidez progressiva está intimamente relacionada com o processo de falha estrutural, faz-se tal correlação utilizando ferramentas numéricas e estatísticas já descritas na bibliografia (DAVIS, 2002; KABEYA, 1998; KIM, 2002; RAJU, 1997).

Em vista disso, o presente trabalho tem como objetivo estudar a validade do método da impedância para avaliar falhas em ensaio de fadiga em um corpo de prova de alumínio.

2. FADIGA

“Fadiga é um processo de alteração estrutural permanente, progressivo e localizado, que ocorre num material sujeito a condições que produzem tensões ou extensões dinâmicas num ponto ou em vários pontos, e que pode culminar em trincas ou fratura completa após um número suficiente de variações de carga.” (Branco, 1994)

Devido à importância do fenômeno da fadiga, seu estudo é o mais significativo na área do comportamento mecânico dos materiais.

A ruptura por fadiga é provocada pela nucleação e propagação de trincas que aparecem em uma peça submetida a tensões mecânicas. É, na maioria das vezes, súbita e ocorre sem dar sinal porque a trinca não é visível ou acessível.

O comportamento de materiais em fadiga depende de inúmeros fatores, tais como:

- Acabamento superficial
- Geometria e tamanho da peça
- Concentração de tensões
- Estado de tensões
- Temperatura
- Material
- Tratamento térmico

A influência de cada parâmetro depende das condições de solicitação da peça.

A morfologia das superfícies de fratura de uma peça que rompe por fadiga depende do nível das tensões aplicadas e do modo de solicitação – tração, torção, flexão, etc. No entanto, todas as superfícies apresentam características comuns que independem destes parâmetros, como seu aspecto do tipo “frágil” sem sinais de deformação plástica a nível macroscópico.

A duração de uma peça à fadiga é determinada pelo número de ciclos de aplicação da carga até a ruptura. Os principais tipos de ciclos de tensão de fadiga podem ser divididos em dois grandes grupos: ciclos a amplitude de tensão constante e ciclos a amplitude de tensão variável. Em um ciclo de tensão a amplitude constante, a peça está sempre submetida ao mesmo ciclo de tensões com a mesma amplitude e, este tipo de ciclo pode ser verificado em mecanismos que funcionam com velocidade constante, como cames, rolamentos, polias, etc. Ciclos de tensão a amplitude variável é o tipo mais freqüente de ciclos de tensão e o mais difícil de analisar, e ocorre em veículos de transporte, estruturas soldadas, estruturas aeronáuticas, etc.

3. IMPEDÂNCIA

O método de monitoramento de integridade estrutural baseado em impedância tem sido desenvolvido como uma ferramenta promissora para identificação de falhas estruturais em tempo real e é considerado como um novo método de avaliação não destrutiva.

A técnica utiliza pastilhas piezelétricas, que funcionam como sensores e atuadores, coladas ou incorporadas na estrutura, para realizar o monitoramento em tempo real. O princípio consiste na utilização de freqüências elevadas (acima de 30 KHz) aplicadas às pastilhas de PZT para detectar mudanças decorrentes do aparecimento de falhas internas, falhas superficiais e danos em juntas (lesões em soldas, por exemplo), avaliando as modificações dos sinais capturados pelo sensor.

Os materiais piezelétricos são utilizados devido à dificuldade de se medir diretamente a impedância eletromecânica de uma estrutura. A impedância elétrica do material PZT pode ser associada diretamente à impedância mecânica da estrutura à qual a pastilha de PZT esteja colada.

A impedância elétrica é compreendida como sendo uma oposição que o circuito ou dispositivo oferece à passagem de uma corrente alternada em uma dada freqüência. Similarmente, como a impedância elétrica pode ser compreendida como a razão entre a voltagem de energização pela corrente resultante, a impedância mecânica é calculada pela razão entre a força aplicada na estrutura e a velocidade com que a mesma desloca-se.

No sistema PZT versus estrutura estudada neste trabalho será medida a impedância eletromecânica do sistema. Supondo que a impedância elétrica do sistema não varia, a variação encontrada nas medidas é atribuída à parte mecânica, sendo esta resultante das modificações geométricas da estrutura ou de suas propriedades mecânicas, caracterizando a evolução de um dano.

3.1. Sensores e atuadores Piezelétricos

A principal característica que possibilita a utilização do PZT como sensor e atuador, é seu efeito piezelétrico. A aplicação de um campo elétrico produz uma deformação no material (efeito inverso), e a aplicação de uma tensão mecânica resulta no aparecimento de um campo elétrico (efeito direto). Esta característica, associada aos conceitos de impedância elétrica e falha métrica, permite a localização e o monitoramento da falha.

Dentro de um material piezelétrico, a tensão mecânica, a deformação, o campo elétrico e o deslocamento elétrico, podem ser completamente descritos por um par de equações eletromecânicas. A relação definida por (Crawley et al., 1983) que descreve o acoplamento entre as variáveis elétricas e mecânicas são descritas pelas Equações 1 e 2, as quais representam, respectivamente, o efeito inverso e direto do PZT:

$$S_i = s_i^E T_j + d_m E_m \quad (1)$$

$$D_m = d_m T_j + \varepsilon_{mk}^T E \quad (2)$$

Ou na forma Matricial:

$$\begin{bmatrix} S \\ D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s^E & d_t \\ d & \varepsilon^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T \\ E \end{bmatrix} \quad (3)$$

onde:

S : vetor das deformações [m/m]

T : vetor das tensões [N/m²]

E : vetor campo elétrico [V/m]

D : vetor deslocamento elétrico [C/m²]

s : tensor de flexibilidade [m²/N]

d : tensor das constantes piezelétricas em deformação [m/V]

ε : permissividade elétrica [F/m]

Os índices i, j e m indicam as direções da tensão e da deformação e o índice k a do campo elétrico.

3.2. O método de monitoramento baseado na impedância

O monitoramento da estrutura é feito aplicando-se um campo elétrico alternado no PZT, através de um analisador de impedância, que está colado à mesma. Dessa forma, o mesmo se deforma conjuntamente com a estrutura fazendo com que o conjunto vibre. Se a frequência de excitação for muito alta, a resposta dinâmica da estrutura refletirá apenas o comportamento de uma pequena região próxima ao PZT. A excitação elétrica causa uma excitação mecânica correspondente na estrutura, que se deformará. A partir desta resposta dinâmica, o PZT se deforma gerando um campo elétrico. Assim, o mesmo funciona como um atuador e um sensor de deformações. Quando algum tipo de dano ou uma fissura aparecem na estrutura, a resposta dinâmica da mesma é alterada e percebida através da resposta elétrica do PZT, ou seja, o princípio básico consiste em monitorar a variação da impedância mecânica, causada devido a uma mudança estrutural (falha), através da impedância elétrica.

Um modelo simples, como mostrado na Figura 1, pode descrever a interação entre um PZT e a estrutura a ele vinculada. O PZT é considerado como uma barra fina exposta a uma vibração axial em resposta a aplicação de tensão elétrica alternada. Uma extremidade é fixada e a outra é conectada na estrutura, representando um sistema com um grau de liberdade.

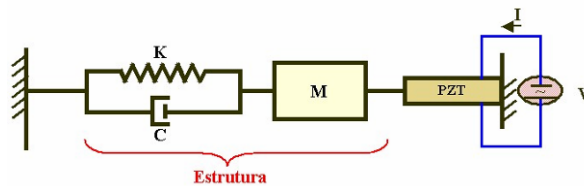


Figura 1: Modelo unidimensional do acoplamento eletromecânico utilizado pelo método baseado em impedância.

onde:

K : constante da mola.

M : massa.

C : coeficiente do amortecedor.

V : Voltagem de entrada no atuador PZT.

Partindo do pressuposto de que as propriedades mecânicas do PZT não variam ao longo do tempo que o mesmo é utilizado para o monitoramento estrutural, Liang et al. (1994) demonstraram

que a admitância $Y(\omega)$ do atuador PZT é uma função combinada da impedância mecânica do atuador PZT, $Z_a(\omega)$ e da estrutura, $Z(\omega)$, como mostra a Equação 4.

$$Y(\omega) = \frac{I}{V} = i\omega a \left(\bar{\epsilon}_{33}^T - \frac{Z(\omega)}{Z(\omega) + Z_a(\omega)} d_{3x}^2 \hat{Y}_{xx}^E \right) \quad (4)$$

onde:

V : Voltagem de entrada no atuador

I : Corrente de saída do PZT.

a : Constante geométrica.

d_{3x} : Constante de acoplamento piezelétrico.

Y_{xx}^E : Módulo de Young.

$\bar{\epsilon}_{33}^T$: Constante dielétrica complexa do PZT com tensão zero.

Portanto, a impedância elétrica do PZT é diretamente relacionada, através da Equação 4, com a impedância mecânica da estrutura, levando à utilização dos sinais de impedância elétrica do PZT para o monitoramento da integridade estrutural do sistema representado pela impedância mecânica da estrutura.

Segundo Raju 1997, a técnica consiste basicamente na obtenção de funções de respostas em frequência (FRFs) da estrutura e posterior avaliação da modificação destes sinais. Idealmente, uma modificação destas FRFs indicaria uma modificação estrutural e, portanto, algum tipo de dano.

3.3. Falha Métrica

A falha métrica é um índice usado para monitorar a ocorrência de falhas e, é definida como a soma da raiz das diferenças quadráticas das mudanças de impedância para cada frequência, dividida pelo quadrado da impedância do PZT medido sob condições iniciais.

Este índice simplifica a interpretação das variações de impedância e fornece informações do sinal em impedância para região de influência do atuador (Lopes et al. 2000).

O monitoramento de cada PZT é feito separadamente, isto é, cada PZT é continuamente monitorado na faixa de frequência especificada. Para cada PZT, deve-se definir um valor mínimo, acima do qual é uma indicação de falha naquela região.

O valor de M , descrito como “desvio da raiz média quadrática”, é definido por Sun et al. (1995):

$$M = \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{[\text{Re}(Z_{i,1}) - \text{Re}(Z_{i,2})]^2}{[\text{Re}(Z_{i,1})]^2}} \quad (5)$$

onde :

M : representa a medida da falha.

$Z_{i,1}$: representa o PZT medido sob condições iniciais

$Z_{i,2}$: representa o sinal a ser comparado, para o i -ésimo valor da frequência.

4. METODOLOGIA

Com o objetivo de verificar se o método baseado na impedância era válido para monitorar as mudanças estruturais que ocorrem em componentes sujeitos a cargas cíclicas, realizaram-se ensaios de fadiga.

Nos ensaios realizados foi utilizado um corpo de prova de alumínio padronizado, utilizado em ensaio de tração, com uma pastilha piezelétrica colada no sentido longitudinal na extremidade de uma das faces de cada amostra.

Os ensaios cíclicos de tração foram realizados em uma Máquina Universal de Ensaio de Bancada modelo VERSAT 500, apresentada na Figura 2.



Figura 2: Máquina Universal de ensaio de bancada, modelo VERSAT 500.

A impedância elétrica foi mensurada no analisador de impedância HP4194A (Figura 3), e o processo de aquisição de dados foi realizado pelo computador. O analisador de impedância foi configurado com os seguintes parâmetros: OSC Level: = 1 Volt; AVG = 8 (Número de médias) e pontos amostrados = 401. A faixa de frequência utilizada foi de 30 a 35 KHz.

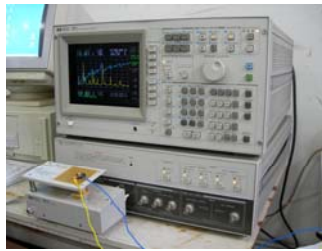
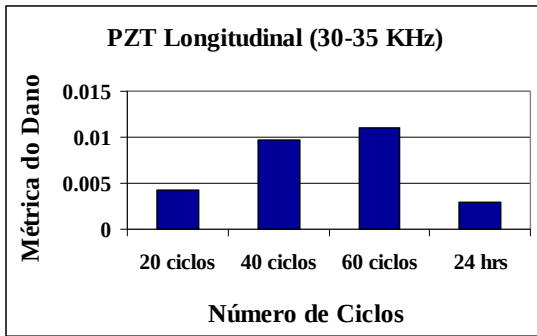


Figura 3: Analisador de impedância modelo HP 4194

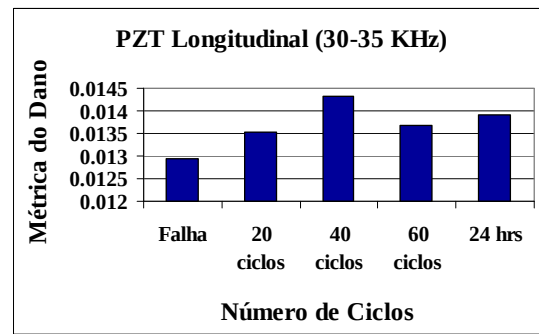
Durante o experimento, o corpo de prova foi submetido a ensaios cíclicos de tração, com a carga variando de 0 a 120 Kgf. Primeiramente, mediu-se o sinal de impedância eletromecânica inicial do corpo de prova. A seguir, foram realizados 20 ciclos de tração no corpo de prova, medindo-se posteriormente o sinal de impedância. Este procedimento foi realizado até atingir o número de 60 ciclos de tração, quando se esperou 24 horas para realizar uma nova aquisição da impedância da amostra, com o intuito de analisar a acomodação e/ou recuperação do material em relação à estrutura original. Inseriu-se então, uma falha de 1 mm a 40 mm da extremidade do corpo de prova, e todos os passos descritos anteriormente foram realizados novamente. Mais duas falhas de 1 mm foram inseridas no corpo de prova, a 60 mm e 20 mm da extremidade, respectivamente, e repetiu-se tudo o que foi feito para a 1ª falha. Cada sinal de impedância foi mensurado três vezes.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

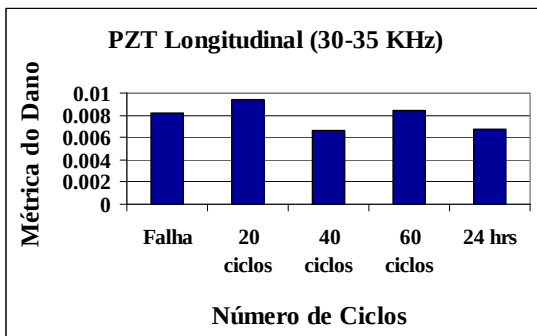
Os sinais adquiridos após a realização dos ensaios cíclicos, foram aplicados na equação 5 e são apresentados graficamente nas Figuras 4, sendo que os gráficos relacionam a métrica do dano com o número de ciclos.



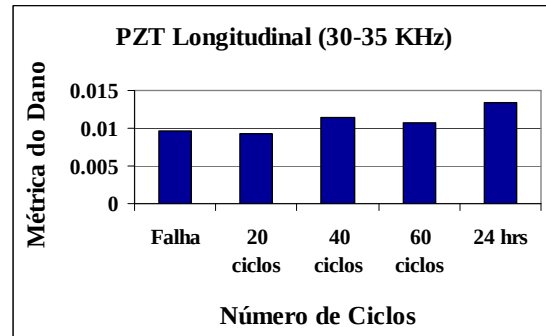
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4 – Gráficos de barras da raiz média quadrática obtidos a partir do sinal de impedância. (a) Sem falha (b) 1ª Falha (c) 2ª Falha (d) 3ª Falha

Pode-se observar nos gráficos a evolução do desvio da raiz média quadrática com o aumento do número de ciclos em que o corpo de prova foi tracionado. Nota-se que com o aumento do número de ciclos aplicados ao corpo de prova metálico o valor da falha métrica tende a aumentar proporcionalmente. Desse modo, espera-se que após uma estrutura metálica ser submetida a ciclos de fadiga, o valor da falha métrica aumente linearmente, podendo, inclusive, adotar-se um modelo matemático que corresponda ao nível de deformação que o material está submetido.

No entanto, pode-se observar que nem todos os gráficos apresentaram um comportamento linear, como o gráfico (c) principalmente. Erros na realização dos ensaios ou ainda fatores externos, tais quais vibrações, podem ter afetado o sinal de impedância adquirido, e conseqüentemente os resultados obtidos.

Observou-se também que no gráfico (d), após esperar vinte e quatro horas para uma nova aquisição de dados, sem que nenhuma força fosse aplicada ao corpo de prova, o valor da falha métrica também aumentou. Uma explicação para este fato seria que o material modificou sua estrutura após os ensaios, ou seja, o material não retornou à sua estrutura original após ser submetidos a ciclos de tração e dessa forma pode-se dizer que o mesmo sofreu uma deformação plástica. Pode ainda, ter ocorrido erro na leitura do sinal de 60 ciclos realizados.

6. CONCLUSÕES

Analisando os resultados obtidos após os ensaios de fadiga pode-se concluir que o método da impedância eletromecânica é válido para monitorar as modificações que ocorrem no material após o mesmo ser submetido a esforços cíclicos de tração. O método permite ainda detectar se o material sofre ou não deformações plásticas quando submetido a ensaios de fadiga.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPQ pela bolsa implementada para que a realização deste trabalho fosse possível.

8. REFERÊNCIAS

- 1 - Banks, H.T., Smith, R.C. and Wang, Y., “Smart Materials Structures – Modeling, Estimation and Control”, John Wiley & Sons, Paris, France.,1996.
- 2 - Crawley, P., The impedance Method of Non-destructive Inspection. Ultrasonics International, 1983.
- 3 - Giurgiutiu, V, Zagrai, A., and Bao, J.J., “Piezoelectric Wafer Embedded Active Sensors for Aging Aircraft Structural Health Monitoring,” International Journal of Structural Health Monitoring, Vol. 1, 41–61.2002.
- 4 - Liang, C., Sun, F.P., and Rogers, C.A., 1994, “Coupled Eletromechanical Analysis of Adaptive Material Systems – Determination of the Actuator Power Consumption and System Energy Transfer”, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 5, 12 – 20.
- 6- Lopes, V. Junior, Turra, A. E., Muller, H. H., Brunzel, F., Inman. D. J. “A New Methodology of Damage Detection by Electron Impedance and Optimization Technique”, Diname, pp. 311-316, 2001.
- 7 - Moura Jr, J. R. V. and Steffen Jr, V., 2004, “Impedance based Health Monitoring: Frequency Band Evaluation”, XXII IMAC, Dearborn, MI – USA.
- 8 - Raju, V. Implementing Impedance-Based Health Monitoring. Master thesis. Virginia Polytechnic Institute and State University. Blacksburg – USA, 1997.
- 9 – Worden, K., Allen, D., Sohn, H., Farrar, C.R., Damage Detection in Mechanical Structures using extreme Value Statistics, Smart Structures and Materials, Vol. 4693, p. 289-299, 2002.
- 10 – Branco, C. A. M., Mecânica dos Materiais, Vol. 1, p. 903-1026, 1994.
- 11 – Kim, J.-T. and Stubbs, N., Improved Damage identification Method Based on Modal Information. Journal of Sound and Vibration, 252(2), 223–238, 2002.
- 12 – Park, G., Kabeya, K.m Cusney, H.H., Inman, D.J.,“Impedance-based Structural Health Monitoring for Temperature Varying Applications,”JSME International Journal, 1999.

DAMAGE EVALUATION IN FATIGUE ASSAY OF ALUMINUM TEST SPECIMEN THROUGH THE METHOD OF IMPEDANCE

Carolina Bittencourt

Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC), Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Avenida João Naves de Ávila, 2121

carol.bittencourt@yahoo.com.br

Karina Mayumi Tsuruta

Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC), Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Avenida João Naves de Ávila, 2121

karinamayumi@yahoo.com.br

Raquel Santini Leandro Rade

Instituto de Física (INFIS), Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Avenida João Naves de Ávila, 2121

rslr@ufu.br

Abstract: *One of the most important projects in the area of engineering structures is the development of techniques for the monitoring of structural integrity (SHM) in real time, to be used in structures with high cost and great importance in a system. Among the techniques SHM, the method based on the impedance is one of the most promising. It is a non-destructive method, which use the electromechanical characteristics of piezoelectric materials to monitor the occurrence and evolution of structural damages. The method consists in bonding piezelectric patches, in the structure, and through them monitor changes occurring in electromechanical impedance of the system (PZT-structure), which indicates changes in inertia and stiffness of the base structure, and these changes could indicate the presence of damages. In this context, the objective of this work is to study flaws in fatigue assays through the impedance electromechanical method. The methodology consists in bonding piezelectric patches in aluminum test specimen and submit them to cyclical tension assays, adding flaws in the bodies in the course of the trials. Through the impedance analyzer, it is possible to measured signal impedance healthy, and at each number of cycles performed. Using an index called damage metric, the impedance signals measured are analyzed, and it is possible to assess if the method is efficient in the detention and accompaniment of the evolution of the damage.*

Keywords: *Electro-Mechanical Impedance, Fatigue, Damage Detection, Structural Health Monitoring, PZT.*