# Modelagem Numérica de Falhas em Estruturas Mecânicas Associadas a Campos Eletromagnéticos

**Luana Ribeiro Orlandini[1], Lurimar Smera Batista[2]**

[1]Graduanda em Engenharia Industrial Mecânica – IFBA. e-mail: luana.orlandini@yahoo.com.br
[2]Professor Doutor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia – IFBA. e-mail: lurimar@ifba.edu.br

**Resumo:** Um dos campos de estudo da engenharia mecânica é a Mecânica da Fratura que quantifica e relaciona as variáveis do fenômeno das falhas. Para tanto, realizam-se análises dos níveis de tensão e dos defeitos geradores de trincas. Além disso, o estudo compreende o mecanismo de propagação das trincas, pois são essas em geral que ocasionam fraturas. Contudo, é necessário na engenharia mecânica não somente o conhecimento do fenômeno e suas variáveis, mas também ser capaz de detectá-lo em estruturas. Para tanto, é trivial serem realizados ensaios não destrutivos, tais como os de natureza eletromagnética. Através de modelagem, é possível fazer uma análise destes ensaios em materiais condutores com presença de trincas. A predição de fraturas é realizada a partir de modelos com placas condutoras de aço inoxidável com incidência de campos eletromagnéticos a partir da simulação computacional. Conhecendo-se o material e a fonte incidente nele, são calculados os campos formados através das equações de Maxwell e Helmholtz. A partir da solução dessas equações pelo Método dos Elementos Finitos, calcula-se a resistividade aparente, que depende do material. Este trabalho utiliza um modelo inicial constituído por duas placas, uma do tipo 430 e outra do tipo 410 (classificação SAE), e um segundo modelo com uma trinca no interior de uma das placas – tendo esta se propagado durante o tempo. Como a trinca é caracterizada por uma região de maior resistividade, devido às deformações plásticas acarretadas e concentração de ar na região, ela é detectada pela modelagem. Assim, a simulação numérica da propagação de campos eletromagnéticos com o método dos elementos finitos provou-se eficaz na detecção trincas que se propagam no decorrer do tempo em estruturas mecânicas, antes de ocorrer a ruptura final. É de suma importância tal detecção preventiva, já que uma fratura constitui um dano e um risco à segurança.

**Palavras–chave:** campos eletromagnéticos, elementos finitos, mecânica da fratura, simulação computacional, trincas

## 1. INTRODUÇÃO

O campo de atuação da engenharia abrange a ciência dos materiais de construção. Essa ciência compreende o conhecimento das propriedades de cada material e também a ação de forças nele. Tanto máquinas e equipamentos quanto estruturas tendem a apresentar falhas e defeitos devido à variação de temperatura, corrosão, fadiga, atrito, pois tais condições acarretam em uma alteração na estrutura do material.

O estudo do fenômeno das falhas é realizado pela Mecânica da Fratura, que quantifica e relaciona as variáveis desse fenômeno, fazendo uma análise de seus níveis de tensão e defeitos geradores de trincas, bem como do mecanismo de propagação das trincas que, em geral, ocasionam fraturas (CAJUHI & BATISTA, 2010). Na engenharia mecânica, entretanto, não se busca apenas o estudo do fenômeno das falhas, mas também se deseja detectar a ocorrência deste nas estruturas. Para detecção de falhas, são realizados ensaios, de natureza não destrutiva.

Ensaios de natureza eletromagnética podem ser realizados com o intuito de se identificar trincas ou descontinuidades em materiais metálicos. Os materiais metálicos possuem uma propriedade denominada de condutividade. Tal propriedade permite que se possa calcular o campo elétrico

ISBN 978-85-62830-10-5

formado em uma placa constituída de um material metálico em presença de outro campo elétrico. A formação desse campo interno ocorre devido aos elétrons livres nos materiais metálicos, que se deslocam na presença de um campo elétrico (SADIKU, 2004).

A finalidade do ensaio é, portanto, a medição do campo gerado, identificando o material e a existência de inconformidades. Entretanto, é possível também se estudar, através de modelagem, como são realizados os ensaios, pois conhecendo o material e a fonte incidente nele, é viável calcular estes campos através das equações de Maxwell e Helmholtz.

Quando aplicadas a modelos complexos, as equações diferenciais obtidas através das Equações de Maxwell, também conhecidas como equações de Helmholtz, para a propagação do campo elétrico e do campo magnético secundários no domínio da frequência, necessitam de métodos numéricos para determinar a solução. Um método muito empregado na física, matemática e também na engenharia é o dos Elementos Finitos.

A partir da solução das equações de Maxwell e Helmholtz, calcula-se a resistividade aparente ou condutividade aparente, que dependem do material. Fazem-se, então, modelagens envolvendo placas de materiais metálicos e presença de falhas ou trincas, pois os valores obtidos de resistividade aparente mostrarão se o material é puro ou se há presença de algum grão distinto do material da placa.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

As equações de Maxwell no domínio da frequência são:

$$\nabla \times E = -ZH; \qquad \text{[Eq. 01]}$$

$$\nabla \times H = YE + J_e; \qquad \text{[Eq. 02]}$$

$$\nabla \cdot (\mu H) = 0; \qquad \text{[Eq. 03]}$$

$$\nabla \cdot (\varepsilon E) = Q_v. \qquad \text{[Eq. 04]}$$

Nas quais os parâmetros $Z = i\omega\mu$ e $Y = \sigma + i\omega\varepsilon$ representam, respectivamente, a impeditividade (impedância por unidade de comprimento) e a admitividade (admitância por unidade de comprimento) do meio, e $\omega$ é a frequência angular (rad/s), $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$ (BATISTA, 1991).

Realizando as devidas operações matemáticas nas equações de Maxwell no domínio da frequência, encontram-se as equações de Helmholtz para os campos elétrico e magnético secundários.

Equação diferencial do campo elétrico secundário:

$$\nabla^2 E_s + \nabla\left(\frac{E_s \cdot \nabla Y}{Y}\right) - ZYE_s = Z\Delta YE_p - \nabla\left(\frac{E_p \cdot \nabla(\Delta Y)}{Y}\right). \qquad \text{[Eq. 05]}$$

Equação diferencial do campo magnético secundário:

$$\nabla^2 H_s + Y\nabla \times H_s \times \nabla\frac{1}{Y} - ZYH_s = Z\nabla YH_p - Y\nabla\frac{\Delta Y}{Y} \times E_p. \qquad \text{[Eq. 06]}$$

Após a resolução das equações pelo Método dos Elementos Finitos, pode-se calcular a resistividade aparente, pelo modo transversal elétrico (MTE), ou seja, perpendicular ( $E_\perp$ ), da seguinte forma:

$$\rho_{\perp} = \frac{1}{\omega\mu}|\tilde{Y}| \qquad \text{[Eq. 07]}$$

em que, $\rho_{\perp}$ representa a resistividade aparente em MET e $\tilde{Y} = \frac{-H_x}{E_z}$ é a admitância aparente. O cálculo dessas resistividades aparentes é necessário para a detecção de trincas e fraturas associadas a campos eletromagnéticos.

Um processo de fratura envolve duas fases, a de aparecimento de uma trinca e a de propagação da mesma, em resposta a uma tensão aplicada. O modo de fratura depende grandemente do mecanismo de propagação. Existem dois tipos de fratura, o tipo frágil e o tipo dúctil. Fratura dúctil é caracterizada pela grande deformação plástica na vizinhança da trinca que se propaga e o processo ocorre lentamente conforme a trinca se alonga. Além disso, é notória a deformação nas superfícies da fratura. Em contrapartida, no caso da fratura frágil, as trincas possuem maior velocidade de propagação e há pouca deformação plástica (CALLISTER, 2008).

O modelo simulado é constituído por duas placas soldadas de materiais condutores. Inicialmente, não apresentam nenhuma deformidade ou trinca em seu interior. Na modelagem, são utilizados dois aços inoxidáveis, tipos 410 e 430 de acordo com a classificação da SAE (*Society of Automotive Engineers*), cujas resistividades são 57($m\Omega \cdot$ mm) e 60 ($m\Omega \cdot$ mm), respectivamente (SHACKELFORD e ALEXANDER, 2001).

Modelam-se também modificações a partir do modelo inicial. É considerado o surgimento de uma falha no interior da placa formada pelo aço inoxidável tipo 410, conforme ilustrado na Figura (1), sendo essa uma falha biaxial. Essa trinca ocorre devido a carregamentos combinados, se propagando com uma angulação, conforme o decorrer do tempo (SAOUMA, 2000). Ocorre, ainda, deformação plástica, já que o material tem ductilidade considerável.

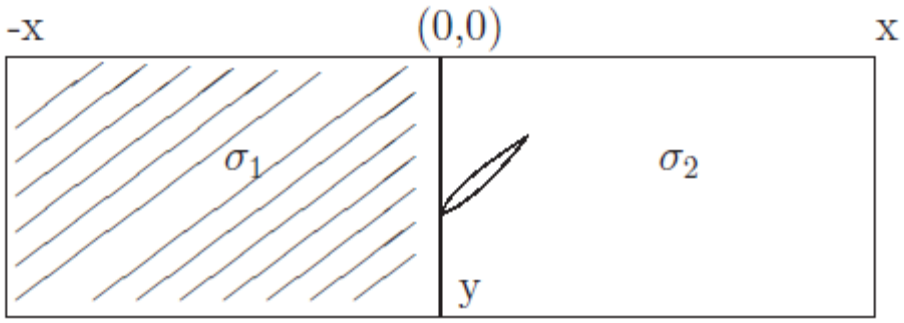


**Figura 1:** Representação do modelo com placas soldadas, cada uma com condutividade distinta, com presença de uma falha biaxial.

Aplica-se o método de resolução numérica das equações diferenciais dos campos elétrico e magnético secundários pelo Método dos Elementos Finitos, em todos os modelos de simulação. Para tanto é utilizada uma malha retangular com elementos triangulares. Todavia, essa malha não é regular, sendo mais adensada nas regiões centrais, conforme demonstrado na Figura (2). As placas localizam-se no interior dessa malha, não tomando sua dimensão total.

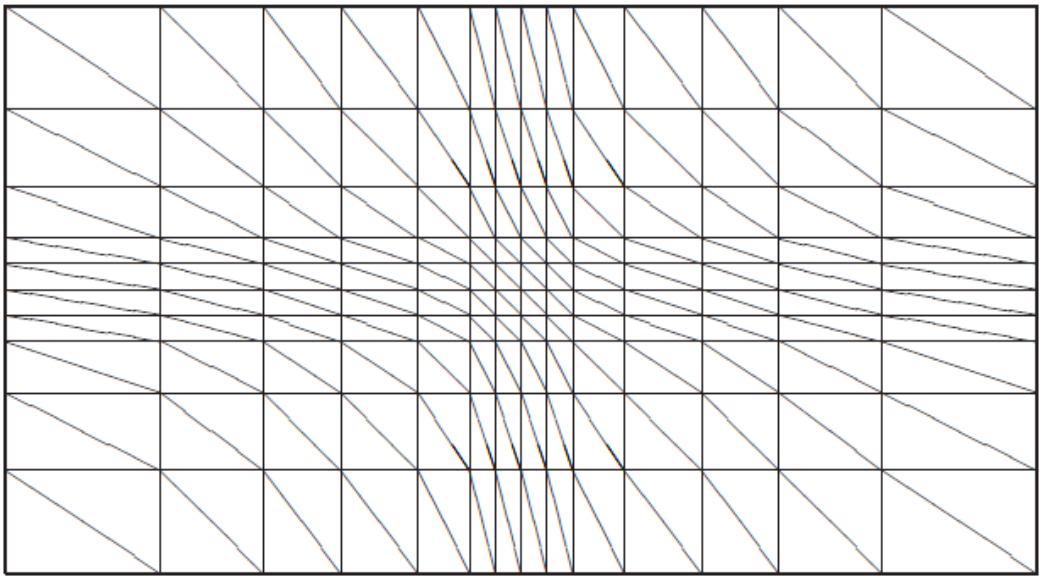

**Figura 2:** Representação de uma malha retangular plana, com elementos triangulares.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O modelo inicial constitui-se por duas placas, uma placa do tipo 430 e outra do tipo 410 de acordo com a classificação da SAE, sem presença de nenhuma trinca. Graficamente, os valores negativos representam a placa classe 430 e os valores positivos, a placa classe 410. Na simulação numérica variaram-se os valores da frequência de 0,01 Hz a 10 Hz. Então, são traçadas as curvas de nível dos valores de períodos, da variação das abscissas (x) e da resistividade aparente da superfície das placas, do modo ilustrado na figura (3).

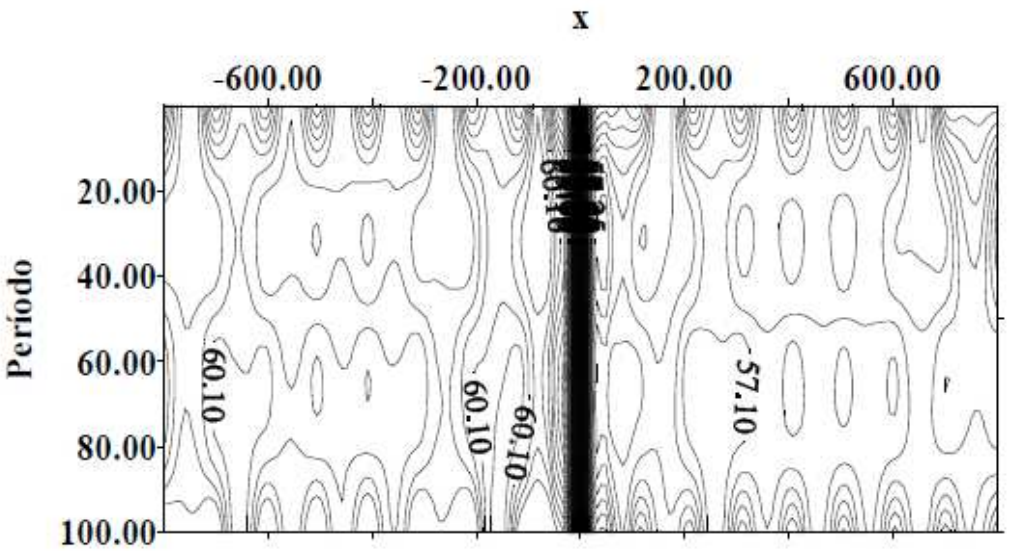


**Figura 3:** Representação das resistividades superficiais em função de x e dos períodos no modelo com placas cujas condutividades são $\sigma_1 = 60m\Omega \cdot mm$ e $\sigma_2 = 57m\Omega \cdot mm$ .

A partir da análise dos resultados encontrados na modelagem, e representados na Figura (3), observa-se que há maior incidência dos campos nas interfaces de contato das placas.

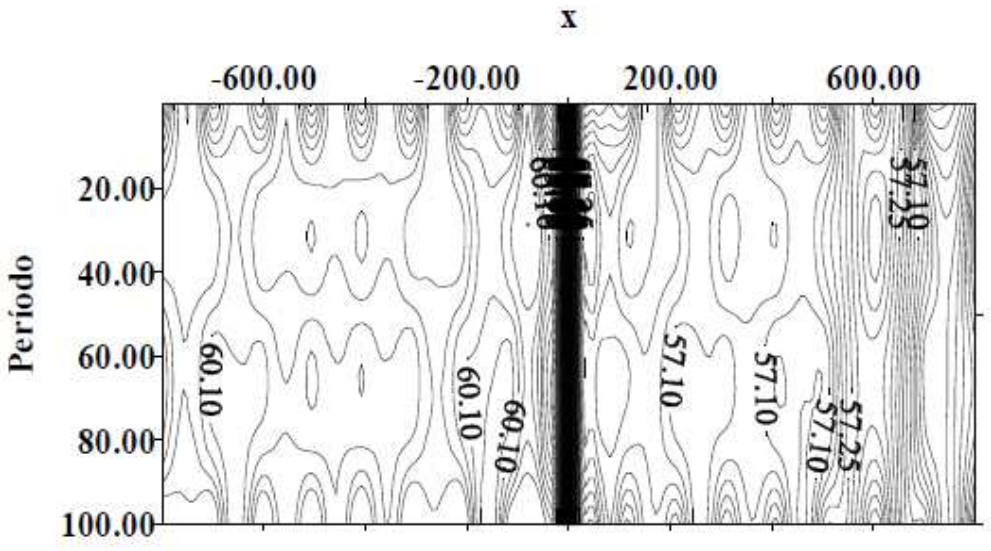


**Figura 4:** Representação das resistividades superficiais em função de x e dos períodos no modelo com placas cujas condutividades são $\sigma_1 = 60 m\Omega \cdot mm$ e $\sigma_2 = 57 m\Omega \cdot mm$ , com presença de uma trinca que se propagou ao decorrer do tempo.

O segundo modelo possui uma trinca que se propagou durante o tempo. A trinca está relativamente próxima à superfície, mas ainda não se tornou uma fratura. O método pode identificá-la, e observa-se que sua interface está próxima a extremidade direita da placa, fato evidenciado pela presença da grande incidência dos campos nessa região, notório na figura (4). Ela pode ser detectada, pois a trinca é caracterizada por uma região de maior resistividade, devido às deformações plásticas acarretadas e concentração de ar na região.

## 6. CONCLUSÕES

A simulação numérica da propagação de campos eletromagnéticos com o método dos elementos finitos é eficaz na detecção trincas que se propagam no decorrer do tempo em estruturas mecânicas. A modelagem possibilita a identificação de falhas no interior de materiais antes do rompimento da estrutura. A trinca é identificada por ter como característica uma região de maior resistividade, devido às deformações plásticas acarretadas e da concentração de ar na região.

Os valores obtidos de resistividade aparente são capazes de revelar se o material apresenta grãos com composição distinta do material da placa. A presença desses grãos em quantidade torna a estrutura suscetível à formação de uma trinca e posteriormente uma fratura, fato que constitui um dano e um risco à segurança. Como no desenvolvimento de estruturas e maquinários se deve visar à confiabilidade e manutenção, é essencial detectar trincas antes da ruptura final.

**AGRADECIMENTOS**

Ao CNPq pelo apoio ao projeto.

**REFERÊNCIAS**

BATISTA, Lurimar S.. **Otimização Computacional da Técnica de Elementos Finitos para o Modelamento Geofísico Eletromagnético.** Belém: Universidade Federal do Pará. 1991.

CAJUHI, Tuanny R. M.; BATISTA, Lurimar S.. **Simulação Numérica de Estrutura Mecânica Sujeita a Tensões com Fontes Controladas.** Campina Grande: VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. 2010.

CALLISTER, William D.. **Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução.** Rio de Janeiro: Editora LTC, 2008.

SADIKU, Matthew N. O.. **Elementos de Eletromagnetismo.** Porto Alegre: Bookman, 2004.

SAOUMA, Victor. **Lecture Notes in: Fracture Mechanics.** Colorado: University of Colorado, 2000.

SHACKELFORD, James F. ; ALEXANDER, W. **Materials Science and Engineering Handbook.** Florida, 2001.