

ESTIMATIVA DE VIDA EM FADIGA EM COMPONENTES DE GEOMETRIA SIMPLES SUJEITOS À APLICAÇÃO DE CARREGAMENTO ESTÁTICO USANDO O MÉTODO DE ELEMENTOS DE CONTORNO

Magalhaes, Ricardo Rodrigues, ricardo.maga@ig.com.br¹
Fontes, Cristiano Hora de Oliveira, cfontes@ufba.br¹
Vieira de Melo, Silvio Alexandre Beisl, sabvm@ufba.br¹

¹ Universidade Federal da Bahia
Rua Professor Aristides Novis, nº 02 – Federação – EP/UFBA
CEP 40.210-630 – Salvador - Bahia

Resumo: *A solução de problemas envolvendo fadiga em componentes de geometria simples, por meio da aplicação de cargas estáticas, pode ser usado na estimativa de vida destes componentes. O método de elementos de contorno (MEC) é uma técnica numérica consolidada, usada na análise de problemas estruturais em engenharia. Porém, o emprego do MEC para a simulação de modelos matemáticos tridimensionais, sobretudo em problemas da indústria automotiva, ainda é pouco investigado. Nesse trabalho, propõe-se o uso de uma metodologia para estimar a vida em fadiga de componentes com geometrias simples, sujeitos à aplicação de cargas estáticas, baseada no método de elementos de contorno. A utilização do MEC para este tipo de aplicação é comparada com dados de vida em fadiga coletados na literatura, apresentando-se resultados coerentes.*

Palavras-chave: *Método dos elementos de contorno, vida em fadiga, cargas estáticas.*

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, há vários estudos que possibilitam prever numericamente os fenômenos de falha em componentes estruturais. Como exemplo, cita-se o trabalho de He et al (2010) que utilizaram o método de elementos finitos (MEF) para prever a vida em fadiga nas torres dos amortecedores de automóveis. Esses estudos geralmente usam métodos matemáticos conhecidos e fazem o uso de ferramentas computacionais para simular ensaios de fadiga. Fourlaris et al (2007) usaram elementos finitos para prever falhas em componentes automotivos soldados, envolvendo braços de suspensão. Lee e Han (2009) propuseram modelos para desenhos de componentes metálicos, a partir de estudos envolvendo elementos finitos. Palma et al (2009) analisaram falhas provenientes de esforços solicitantes em ganchos de reboque, com o auxílio do método de elementos finitos. Wang e Zhang (2010) utilizaram elementos finitos para prever falhas por fadiga em rodas de automóveis.

O método de elementos de contorno (MEC) vem sendo pouco utilizado na indústria, apesar de ser mais eficiente que os demais métodos numéricos, principalmente em situações que envolvem regiões de concentração de tensão. Além disso, o MEC é mais simples na geração de malhas, por necessitar da discretização apenas no contorno do objeto analisado. Há poucos trabalhos publicados sobre elementos de contorno, sobretudo na indústria automobilística, podendo-se citar Citarella et al (2007) que utilizaram uma combinação entre o MEF e o MEC para o tratamento de ruídos em habitáculos de automóveis, porém este trabalho não tratou de regiões de concentração de tensão.

Entre os trabalhos publicados sobre elementos de contorno para a análise de regiões de concentração de tensão em corpos-de-prova e amostras-padrão, verifica-se que há um potencial de pesquisa para a sua aplicação objetivando-se a prevenção do aparecimento de trincas envolvendo fadiga a partir da aplicação de carregamentos estáticos.

2. MODELAGEM DO PROBLEMA E APLICAÇÃO DO MÉTODO DE ELEMENTOS DE CONTORNO

O metodologia aplicada parte da construção da geometria em três dimensões do componente em estudo. A partir daí, gera-se a malha deste componente e exportam-se as coordenadas dos nós e uma matriz de conectividade entre nós e elementos da malha. Além disto, é necessário inserir as propriedades do material, o ponto de aplicação da força e a região de ancoragem do elemento como dados de entrada. O programa executa a leitura dos dados de entrada e calcula valores de tensão no elemento a partir de integrais de contorno.

As integrais de contorno, que constituem a equação integral de contorno para o problema de elasticidade, envolvem integrandos contendo as soluções fundamentais de força de superfície e deslocamento, além dos graus de liberdade (GLs) em força de superfície ou deslocamento. Para estimar o valor numérico desses integrandos, é necessário obter os dados de entrada do problema para avaliar numericamente as soluções fundamentais, tais como o valor da distância entre o ponto de aplicação do carregamento concentrado e o ponto de observação. Isso significa que é preciso discretizar a superfície, que representa o contorno para criar matematicamente os pontos, a fim de se obter as distâncias entre eles e os esforços neles atuantes, necessários para a resolução do problema.

O método dos elementos de contorno é um método integral que, portanto, transforma as equações diferenciais originais, geradas por meio de balanço diferencial de forças, em equações na forma integral. Além disso, o método age somente sobre o contorno de tal forma que a equação integral final se refere ao contorno da geometria estudada.

Cada elemento gerado pela malha, a partir da geometria em estudo, tem forma quadrilateral, de maneira que cada lado possa ser distorcido livremente até que se encontre a melhor forma para adaptar-se à geometria do modelo que está sendo discretizado. Estes elementos apresentam oito pontos de referência cada um, chamados de nós, dispostos em cada vértice da geometria, e um ponto no centro de cada aresta. O elemento é contínuo, ou seja, compartilha seus nós com o elemento vizinho, permitindo que sejam utilizadas funções de forma quadráticas para interpolar valores por meio dos nós do elemento.

As funções de forma determinam como as propriedades variam ao longo do elemento. Para a geometria proposta, qualquer ponto do elemento pode ser encontrado a partir da utilização dessas funções de forma e dos valores nodais do elemento. No caso do elemento quadrilateral contínuo de oito nós, utilizam-se funções de forma quadráticas, e, tanto a geometria quanto as demais grandezas físicas, bem como o comportamento das forças de superfície ou deslocamentos são representadas pelas mesmas funções de forma. Ou seja, o elemento é do tipo isoparamétrico, como evidenciou Ariza et al (1997) em seu trabalho. A figura 1 representa um elemento quadrilateral tridimensional de oito nós, a partir de coordenadas intrínsecas, que são determinadas por meio de um sistema de coordenadas fixado ao elemento.

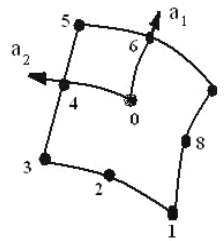


Figura 1 – Elemento quadrilateral tridimensional de oito nós.

As funções de forma que representam o elemento em questão podem ser descritas a partir das equações a seguir:

$$\begin{aligned}
 h^{(1)} &= \frac{1}{4}(1-a_1)(1-a_2)(-a_1-a_2-1) & h^{(5)} &= \frac{1}{2}(1-a_1^2)(1-a_2) \\
 h^{(2)} &= \frac{1}{4}(1+a_1)(1-a_2)(a_1-a_2-1) & h^{(6)} &= \frac{1}{2}(1-a_2^2)(1+a_1) \\
 h^{(3)} &= \frac{1}{4}(1+a_1)(1+a_2)(a_1+a_2-1) & h^{(7)} &= \frac{1}{2}(1-a_1^2)(1+a_2) \\
 h^{(4)} &= \frac{1}{4}(1-a_1)(1+a_2)(-a_1+a_2-1) & h^{(8)} &= \frac{1}{2}(1-a_2^2)(1-a_1)
 \end{aligned} \tag{1}$$

Onde a_1 e a_2 são coordenadas intrínsecas e $h^{(i)}$ são funções de forma.

Com o uso das funções de forma é possível obter a localização de todos os pontos do elemento, bem como sua variação. Nota-se que as funções de forma são válidas num sistema de coordenadas preso ao elemento e são sempre as mesmas para representar todos os elementos que possam ser definidos na malha do contorno. É necessário que os elementos de contorno sejam transformados em elementos equivalentes num sistema de coordenadas parametrizado. Isto significa mapear as coordenadas globais dos elementos, definidas segundo o modelo, para coordenadas paramétricas de um elemento genérico, o que é feito com o auxílio de uma ferramenta de transformação chamada método de Jacobi. Define-se este método pela transformação matemática de uma geometria em um determinado sistema para outra geometria equivalente em outro sistema. No caso dessa aplicação em elementos de contorno, o Jacobiano fará a transformação de uma geometria quadrilateral irregular em um sistema global, utilizado para descrever todos os elementos do problema, para uma geometria quadrilateral regular em um sistema parametrizado, cujas coordenadas estarão distribuídas no domínio de -1 a 1.

A transformação das equações integrais pode ser feita por diversas maneiras, sendo uma delas pelo uso do Teorema da Reciprocidade desenvolvido por Betti (1872). A sua formulação é de fácil compreensão e engloba conceitos mais comuns em problemas de engenharia. O teorema dos trabalhos recíprocos tem sido amplamente utilizado numa variedade de aplicações na mecânica dos meios contínuos, como em Bao-Lian (1989) que utilizou o teorema da reciprocidade no campo da elasticidade linear. Com base neste teorema, considera-se um corpo em equilíbrio em dois

diferentes estados de tensão (σ) e de deformação (ε), sendo o estado final representado por σ_i e ε_i e o estado inicial por σ_i^* e ε_i^* . Conforme o Teorema da Reciprocidade, o trabalho realizado pelas tensões do estado inicial nos deslocamentos do estado final (u_i) é igual ao trabalho realizado pelas tensões do estado final nos deslocamentos do estado inicial (u_i^*). Esta condição é descrita pela equação:

$$\int_{\Omega} \sigma_i^* \varepsilon_i d\Omega = \int_{\Omega} \sigma_i \varepsilon_i^* d\Omega \quad (2)$$

Sendo $\varepsilon_i = \partial u_i / \partial x_j$, pode-se expressar a equação linearizada de tensões pelo uso da seguinte equação:

$$\int_{\Omega} \sigma_i^* \frac{\partial u_i}{\partial x_j} d\Omega = \int_{\Omega} \sigma_i \frac{\partial u_i^*}{\partial x_j} d\Omega \quad (3)$$

Ou ainda

$$\int_{\Omega} \left[\frac{\partial}{\partial x_j} (\sigma_i^* u_i) - \frac{\partial \sigma_i^*}{\partial x_j} u_i \right] d\Omega = \int_{\Omega} \left[\frac{\partial}{\partial x_j} (\sigma_i u_i^*) - \frac{\partial \sigma_i}{\partial x_j} u_i^* \right] d\Omega \quad (4)$$

Aplicando-se a equação generalizada de equilíbrio ($\sigma_i + \rho \cdot g_i = 0$) no primeiro e segundo membros da equação (4) para introduzir as forças de domínio, tem-se:

$$\int_{\Omega} \frac{\partial}{\partial x_j} (\sigma_i^* u_i) d\Omega + \int_{\Omega} \rho \cdot g_i^* u_i d\Omega = \int_{\Omega} \frac{\partial}{\partial x_j} (\sigma_i u_i^*) d\Omega + \int_{\Omega} \rho \cdot g_i u_i^* d\Omega \quad (5)$$

Considerando-se o teorema da divergência em que $\partial / \partial x_j = n_j$, a equação (5) fica:

$$\int_{\Gamma} (\sigma_i^* u_i) n_j d\Gamma + \int_{\Omega} \rho \cdot g_i^* u_i d\Omega = \int_{\Gamma} (\sigma_i u_i^*) n_j d\Gamma + \int_{\Omega} \rho \cdot g_i u_i^* d\Omega \quad (6)$$

Para um dado ponto p_i ($p_i = \sigma_{ij} n_j$), tem-se:

$$\int_{\Gamma} p_i^* u_i d\Gamma + \int_{\Omega} \rho \cdot g_i^* u_i d\Omega = \int_{\Gamma} p_i u_i^* d\Gamma + \int_{\Omega} \rho \cdot g_i u_i^* d\Omega \quad (7)$$

Desconsiderando-se as tensões quando a distância entre p e o ponto de aplicação da carga (Q) tender a infinito de acordo com a condição de Kelvin, tem-se: $u_i^* = u_{ik}^*(X, P)$, $p_i^* = p_{ik}^*(X, P)$ e $b_i = \Delta(X, P) \delta_{ik}$. E, utilizando-se das propriedades da função delta de Dirac, obtém-se equação:

$$u_i(P) = - \int_{\Gamma} p_{ik}^*(X, P) u_k(X) d\Gamma + \int_{\Gamma} u_{ik}^*(X, P) p_k(X) d\Gamma + \int_{\Omega} u_{ik}^*(X, P) b_k(X) d\Omega \quad (8)$$

Aplica-se esta equação para cada elemento de contorno, efetuando-se o cálculo numérico das integrais compostas pela solução fundamental, funções de forma e o Jacobiano. Assim, para cada elemento, a equação integral é avaliada a partir do seu grau de liberdade (GL), podendo ser um deslocamento ou uma força de superfície, conforme expresso pelas equações abaixo:

$$\left[\int_{-1}^1 t_{ik} h^{(n)} J da \right]^{(E)} [u_i^{(n)}]^{(E)} = [H]^{(E)} [u_i^{(n)}]^{(E)} \quad (9)$$

$$\left[\int_{-1}^1 u_{ik} h^{(n)} J da \right]^{(E)} [t_i^{(n)}]^{(E)} = [G]^{(E)} [t_i^{(n)}]^{(E)} \quad (10)$$

$$\text{Onde: } J = \int_{\Gamma(a)} \varphi(u, p) d\Gamma + \int_{\Omega(a)} \psi(\sigma, \varepsilon, u) d\Omega$$

Após a formação das matrizes G e H, o processo de integração das equações integrais de contorno está concluído. A partir daí, faz-se necessário seguir com a substituição das condições de contorno e gerar um sistema de equações representado pelas matrizes obtidas. Isto significa determinar quais são os GLs conhecidos, substituí-los por seus respectivos valores e proceder com os cálculos matriciais, para gerar um vetor com os valores conhecidos. Nesse processo também são agrupados os GLs desconhecidos, cuja determinação será a solução do problema. Uma vez agrupados, os GLs desconhecidos permitem separar as colunas das matrizes G e H pelas quais são multiplicadas. Nesta etapa, forma-se uma matriz quadrada, chamada de matriz dos coeficientes, que são os coeficientes multiplicados por cada um dos GLs desconhecidos em todas as equações do sistema.

A partir do agrupamento dos GLs desconhecidos e conhecidos, tem-se um procedimento denominado de permutação de colunas das matrizes G e H. Neste processo, as colunas correspondentes aos GLs conhecidos são separadas das colunas correspondentes aos GLs desconhecidos, originando duas novas matrizes. Multiplica-se a matriz correspondente aos coeficientes dos GLs conhecidos pelo vetor de seus respectivos graus de liberdade, gerando um vetor de termos numéricos.

Quando o GL desconhecido é um deslocamento, sua permutação é única, o que significa que existe apenas uma coluna a ser trocada por um determinado nó naquele determinado GL. Porém, se o GL desconhecido é uma força de superfície, a permutação pode não ser única, ou seja, para um mesmo nó, numa mesma direção, podem existir duas ou mais forças de superfície diferentes atuando, sendo uma em relação a cada elemento que compartilha o nó. Dessa forma, pode existir mais que uma coluna em G para um mesmo GL de força de superfície desconhecido. Como solução, adota-se a soma algébrica entre as colunas, ou seja, a contribuição de força de superfície de cada elemento é representada pela soma vetorial entre as colunas de um mesmo GL.

Ao aplicar as condições de contorno e agrupar os GLs conhecidos separadamente dos desconhecidos, o resultado é a construção de um sistema de equações lineares no qual a matriz dos coeficientes é composta por elementos globais da matriz H, e os termos independentes são resultantes da multiplicação das condições de contorno por seus respectivos componentes das matrizes de integração.

A partir da solução do sistema matricial, determinam-se as chamadas respostas primárias, que representam os graus de liberdade que eram desconhecidos antes da solução do sistema. Isto significa que são conhecidos todos os valores de força de superfície e deslocamento para todos os GLs do problema. No entanto, na maioria das vezes, somente estes valores não são suficientes, sendo necessários resultados também na forma de tensões nodais ou deformações por meio de respostas secundárias. As respostas secundárias não fazem parte da solução direta do problema, mas são produtos de manipulação das soluções principais. Deste modo, para que seja possível obter qualquer resposta secundária é necessário, primeiramente, obter uma resposta básica, ou seja, o tensor de tensões em cada um dos nós do problema. A partir daí, obtêm-se as tensões geradas pelo modelo, podendo-se visualizar graficamente as regiões de maior concentração de tensão, como dados de saída fornecidos pelo método.

3. A METODOLOGIA PROPOSTA

A técnica usada no desenvolvimento do algoritmo deste trabalho já é de conhecimento científico, com aplicações na engenharia e áreas afins. Dentre elas, cita-se o trabalho desenvolvido por Noritomi (2000) em sua dissertação de mestrado. Em seu trabalho, o autor desenvolveu um código de programa denominado E-Con3D para a análise tridimensional de tensões em estrutura óssea a partir da implementação de algoritmos de otimização na bioengenharia. Além disto, o autor fez uso da técnica RISP, derivada do termo em inglês Reusable intrinsic sample point, para agilizar a obtenção das matrizes necessárias para a solução do problema.

O resultado esperado deste trabalho é a aplicação de uma metodologia para a previsão de falhas em componentes de geometria simples sujeitos a cargas cíclicas. A validação desse método será feita por meio da comparação dos dados gerados na simulação do modelo, resolvido pelas técnicas numéricas de elementos de contorno, e dados coletados na literatura. Para isto, propõe-se a aplicação de uma carga estática unidirecional de tração 21,5 kN em uma das extremidades do componente em análise. Geram-se então, resultados de tensões por meio do método de elementos de contorno. Deve-se ainda levar em consideração que a carga é aplicada em uma direção simples e que seu valor deve representar o comportamento de fadiga do componente em um determinado número de ciclos (n). O esquema utilizado para a obtenção dos resultados é representado pela figura 2.

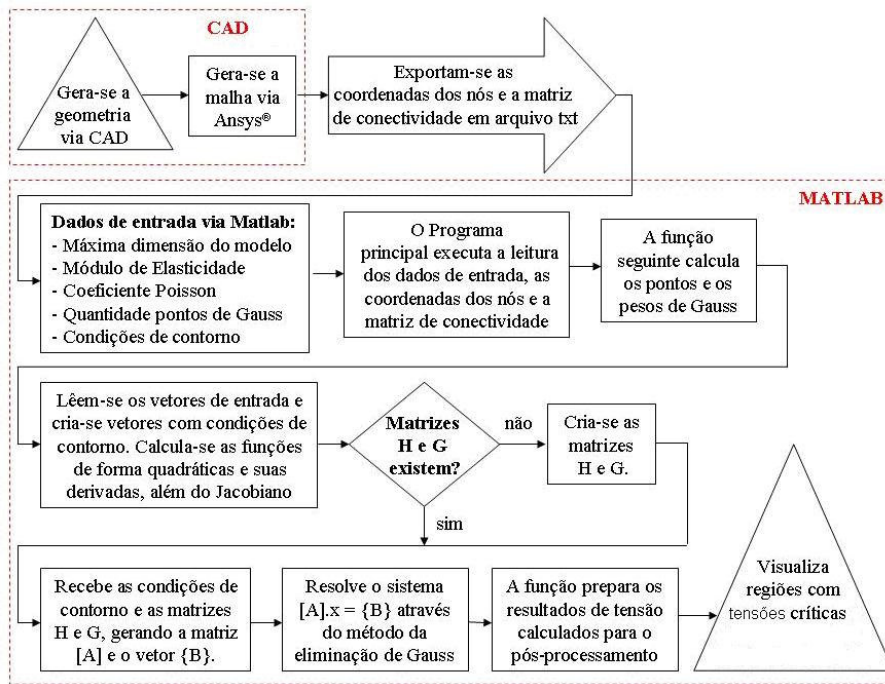


Figura 2 – Fluxograma da metodologia proposta.

3.1. A aplicação do MEC

Para avaliar e validar a metodologia proposta, baseada no MEC, partiu-se de geometrias simples já validadas de forma numérica e experimental por outros autores. Neste sentido, foram tomadas as geometrias propostas por Warhadpande et al (2010). Estes autores utilizaram métodos de elementos finitos (MEF) para análise de fadiga e obtiveram boa coerência entre os resultados experimentais, gerados pelos ensaios de fadiga, a leitura de tensão por captação de imagens digitais, cujo procedimento está descrito no artigo. Além disso, os autores basearam-se inicialmente em duas geometrias diferentes e ambos os corpos-de-prova foram confeccionadas em aço AISI 4142 e submetidos a ensaios de fadiga com aplicação de tração cíclica sob um carregamento unidirecional e razão de carga igual a 0,67. A figura 3 mostra a diferença geométrica entre ambos e o local das fraturas após o teste.

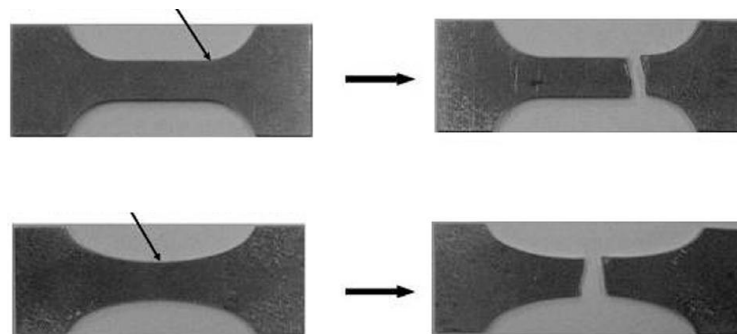


Figura 3 – Corpos-de-prova utilizados em Warhadpande et al (2010).

Nota-se que a região de ruptura dos corpos-de-prova surge em locais diferentes. Este fato é devido à nucleação de trincas de fadiga ser um fenômeno aleatório, o que leva a uma grande dispersão de resultados, não somente de valores de número de ciclos até a fratura como também nos locais de ocorrência do início da trinca. Por este motivo, as propriedades de fadiga dos materiais são consideradas grandezas estatísticas.

Neste trabalho, utilizou-se as mesmas geometrias como referência para validar o método sugerido via elementos de contorno. Primeiramente, as geometrias foram desenvolvidas com o auxílio do programa comercial Catia® V5. Pelo fato do corpo-de-prova de seção variável na região central apresentar-se com maior estabilidade em relação à região de ruptura, optou-se por utilizá-lo como referência para as análises numéricas. A figura 4 apresenta as condições geométricas do corpo de prova utilizado, sendo que as condições de tratamento e acabamento superficial das amostras foram desconsideradas na utilização do MEC.

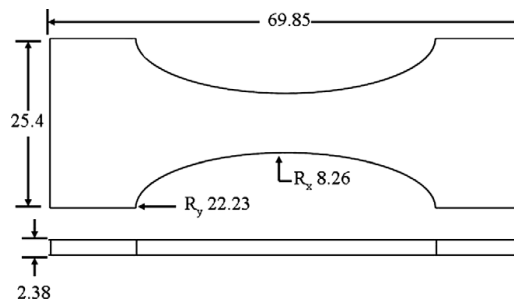


Figura 4 – Condições de geometria do corpo de prova utilizado.

Após a criação das geometrias, gerou-se a malha no aplicativo ANSYS® para a obtenção das coordenadas dos nós (como dados de entrada do algoritmo) para em seguida se efetuar a análise via elementos de contorno. A figura 5 mostra a malha gerada para a geometria com seção variável.

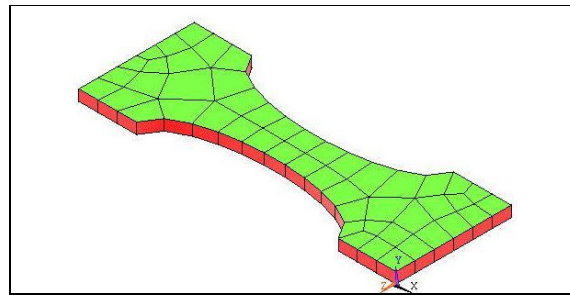


Figura 5. Malha da geometria com seção variável.

Foram gerados 673 nós e 208 elementos a partir da geometria proposta. Verificou-se que o refinamento da mesma implicaria em um esforço computacional elevado para as análises via Matlab®, podendo-se até inviabilizar a leitura dos resultados finais por falta de memória virtual.

Os dados de materiais utilizados foram os mesmos adotados em Warhadpande et al (2010), sendo o módulo de elasticidade de 210 GPa, coeficiente de Poisson igual a 0,3 e tensão de ruptura de 1250 MPa. As características metalúrgicas desse material encontram-se na tabela 3.

Tabela 3 - Composição química do aço AISI 4142

AISI 4142	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu
%	0,40-0,45	0,15-0,35	0,75-1	0,025 máx	0,025 máx	0,80-1,10	0,15-0,25	0,25 máx	0,25 máx

3.2. Resultados obtidos a partir do MEC

Considerando a geometria em análise, os resultados obtidos a partir do MEC foram satisfatórios, mostrando que as tensões críticas podem aparecer com maior intensidade no centro do corpo-de-prova (CP), conforme ilustrado pela região vermelha em destaque na figura 6. Daí o fato de considerar esta região como referência para os cálculos de vida em fadiga do componente.

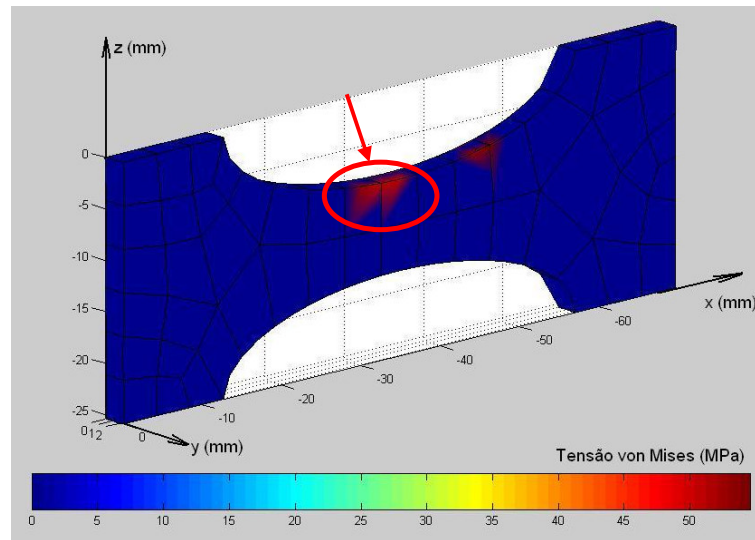


Figura 6 – Resultados de tensões para o CP de seção variável.

Sendo a área da menor seção transversal igual a $21,13 \text{ mm}^2$, e considerando o limite de escoamento do material de 1378 MPa, atribuiu-se uma força de 21,5 kN na direção do eixo X e na outra extremidade do CP simularam-se pontos de fixação. Desta maneira, assegurou-se uma tensão abaixo do limite de escoamento do material ($\sim 1000 \text{ MPa}$) na seção mais crítica do CP, no intuito de se registrar o número de ciclos a que este componente estaria sujeito até o surgimento de algum tipo de falha.

Nota-se, com os resultados de níveis de tensão apresentados pela figura 5, que o valor máximo obtido pelo método foi de aproximadamente 58,14 MPa para a região de menor seção transversal do corpo de prova. Nota-se ainda que, o MEC está sendo utilizado, neste trabalho, somente para a determinação da distribuição de tensão. Para estimar a vida em fadiga do componente, optou-se por utilizar a formulação proposta em ASM (2009). Os parâmetros utilizados foram $b = -0,08$ e $\sigma_f = 1820 \text{ MPa}$, conhecidos como expoente de Basquin e coeficiente de resistência à fadiga, respectivamente, sendo possível obter o número de ciclos a que o componente estará sujeito se submetido a um ensaio de fadiga. Para o cálculo de fadiga por aplicação de carregamento estático, o número de ciclos estimado foi de 30380 ciclos. Este valor apresentou-se coerente com os valores obtidos em Warhadpande et al (2010), que foi de 29794 ciclos para um material isotrópico, homogêneo, linear e sem imperfeições. Para se chegar ao valor final do número de ciclos, que serviu de comparação para os resultados obtidos neste trabalho via MEC, Warhadpande et al (2010) utilizou distribuição estatística de Weibull a partir de 40 amostras do mesmo material.

4. CONCLUSÃO

A partir dos resultados, verificou-se a coerência entre o número de ciclos obtido neste trabalho com valores da literatura, considerando materiais isotrópicos, homogêneos, lineares e sem imperfeições. Este processo inicial possibilitou a aplicação do MEC para o cálculo da estimativa de vida em fadiga, considerando geometrias simples (componentes com espessura constante e sem diferença de planos).

A coerência de resultados entre a metodologia aplicada e os resultados encontrados na literatura para regiões de concentração de tensões mostram que a estratégia desenvolvida, baseada no MEC, possui algumas vantagens em relação a outros métodos devido à simplicidade na geração de malhas e potencialidade de aplicação na previsão de vida em fadiga para componentes com geometria simples.

A metodologia aplicada neste artigo não é inovadora, porém poderá tornar-se a partir de sua aplicação na indústria automotiva, como por exemplo, no uso do MEC para prever falhas estruturais em componentes com geometria complexa. Propõe-se como sugestão para trabalhos futuros, o uso desta metodologia envolvendo análises numéricas para geometrias complexas e a comparação dos resultados com outros métodos numéricos, ressaltando que isto implicaria no aumento do nível de complexidade do modelo e tempo de processamento.

5. REFERÊNCIAS

- Ariza, M. P., Sáez A. and Domínguez, J., 1997, "A singular element for three-dimensional fracture mechanics analysis", Engineering Analysis with Boundary Elements, Vol. 20, pp. 275-285.
- ASM International, 2009. "Parameters for Estimating Fatigue Life". 07 Jun. 2009, <<http://products.asminternational.org/hbk/do/highlight/content/V19/D08/A01/S0052531.html>>.
- Bao-Lian, F., 1989, "The reciprocal theorem and linear elastic variational principles", Applied Mathematics and Mechanics. Vol. 10, pp. 265-270.
- Betti, E., 1872, "Teoria dell'elasticità", Il nuovo ciemento, pp. 7-10.

- Figueiredo, L. G., 2008, O Método dos Elementos de Contorno Dual (DBEM) incorporando um modelo de zona coesiva para análise de fraturas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 169p.
- Fourlaris, G., Ellwood, R. and Jones, T.B., 2007, "The reliability of test results from simple test samples in predicting the fatigue performance of automotive components", *Materials and Design*, Vol. 28, pp. 1198-1210.
- He, B., Wang, S. and Gao, F., 2010, "Failure analysis of an automobile damper spring tower", *Engineering failure analysis*, Vol. 17, pp. 498-505.
- Lee, Dong-Chan, Han and Chang-Soo, 2009, "CAE (computer aided engineering) driven durability model verification for the automotive structure development", *Finite elements in analysis and design*, Vol. 45, pp. 324-332.
- Noritomi, P. Y., 2000, Desenvolvimento de um programa base em elementos de contorno para aplicações a análises mecânicas tridimensionais em bioengenharia. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 145 p.
- Palma E.S., Petracconi C.L. and Ferreira, S.E., 2009, "Fatigue behavior analysis of a rear tow hook pin of a passenger vehicle", *Engineering failure analysis*, Vol. 16, pp. 2408-2416.
- Wang, X. and Zhang, X., 2010, "Simulation of dynamic cornering fatigue test of a steel passenger car wheel" *International Journal of fatigue*, Vol. 32, pp. 434-442.
- Warhadpande, A. *et al*, 2010, "A new finite element fatigue modeling approach for life scatter in tensile steel specimens", *International Journal of fatigue*, Vol. 32, pp. 685-697.

6. SIMBOLOGIA

ρ : a massa específica do sólido;

g : componente do vetor aceleração da gravidade;

u_i : componente de deslocamento;

b_j : Vetores das forças de volume;

n : vetor unitário;

δ : delta de Kronecker;

a_1 e a_2 : coordenadas intrínsecas;

$h^{(i)}$: as funções de forma;

E : erro no procedimento de cálculo para o uso de funções não polinomiais;

$\varphi(u, p)$: função arbitrária contínua de deslocamento e força;

$\psi(\sigma, \varepsilon, u)$: função arbitrária contínua de tensão, deformação e deslocamento;

p_j : trações aplicadas;

ε_j : deformações no sistema de coordenadas local;

σ_i : tensões no sistema de coordenadas local;

$\frac{\partial u_i}{\partial x_j}$: derivada dos deslocamentos nodais no sistema de coordenadas local;

$\frac{\partial \sigma_i}{\partial x_j}$: derivada das tensões nodais no sistema de coordenadas local;

Γ, Ω : Domínio e contorno, respectivamente;

b : expoente de resistência à fadiga determinado por meio de dados experimentais (adimensional).

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.



VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA
VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING
18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil
August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil

FATIGUE LIFE ESTIMATIVE IN COMPONENTS WITH NON COMPLEX GEOMETRY SUBJECTED TO STATIC LOAD APPLICATION USING BOUNDARY ELEMENT METHOD

Magalhaes, Ricardo Rodrigues, ricardo.maga@ig.com.br¹
Fontes, Cristiano Hora de Oliveira, cfontes@ufba.br¹
Vieira de Melo, Silvio Alexandre Beisl, sabvm@ufba.br¹

¹ Universidade Federal da Bahia
Rua Professor Aristides Novis, nº 02 – Federação – EP/UFBA
CEP 40.210-630 – Salvador - Bahia

***Abstract.** The problems solution involving fatigue of components with non complex geometry through the static loads application can be used in the fatigue life estimative. Boundary Element Method (BEM) is a technique used to solve numerical analysis and it is a consolidated method for structural problems in engineering. However, the employment of BEM for 3D model simulation, particularly in the automotive industry issues, still requires investigation. This work main proposal is to use a methodology for fatigue life estimative of components with non complex geometries when subjected to static loads based on BEM. The use of BEM for this kind of application is compared with other data collected from the literature with good agreement.*

***Keywords:** Boundary element method, fatigue life, static load.*

RESPONSIBILITY NOTICE

The author(s) is (are) the only responsible for the printed material included in this paper.