

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

ANÁLISE DE TENSÕES NO BRAÇO DO FREIO DE UMA BICICLETA: COMPARAÇÃO DA SOLUÇÃO ANALÍTICA COM O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS (FEA)

Patrícia da Silva Oliveira, patriciasilva_oliver@hotmail.com¹
Maykon de Santana Almeida, maykonshinoida@hotmail.com¹
Ricardo Cardoso Soares, eng.mec.ricardocardoso@gmail.com¹

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Praça da Liberdade, 1597, 64000-040, Centro, Teresina-PI.

Resumo: Durante muito tempo, engenheiros e cientistas concentraram seus esforços em saber por que as peças falham. Atualmente, compreende-se muito mais sobre vários mecanismos de falha do que algumas décadas atrás, em grande parte devido a testes e técnicas de medições aperfeiçoadas. Hoje, sabe-se que as peças falham porque suas tensões excederam sua resistência. Entretanto, a falha pode ser oriunda de uma tensão de compressão, tração ou cisalhamento, além de depender do material de fabricação do componente e sua respectiva resistência a essas tensões. Também depende do carregamento à qual está submetido (estático ou dinâmico) e da presença ou não de trincas no material. Em virtude disso, existe um interesse particular em determinar as magnitudes das tensões atuantes em um dado projeto de elementos de máquinas, visando verificar se as mesmas não excedem os limites de resistência e, conseqüentemente, venham a provocar possíveis falhas. A intensidade das tensões pode ser calculada através de técnicas clássicas de solução analítica, que se restringem a geometrias simples, o que dificulta sua aplicação em geometrias complexas. Daí a necessidade de empregar-se o método dos elementos finitos (FEA), relativamente fácil de usar, devido ao grande número de softwares comerciais existentes no mercado. Com base nisso, o presente trabalho consiste numa análise das tensões de tração e compressão no braço do freio de uma bicicleta, empregando o método analítico e a análise por elementos finitos, utilizando o software Ansys Mechanical 15.0. Os resultados obtidos foram comparados para ambos os métodos considerados, com a finalidade de mostrar qual método apresenta melhor estimativa para o cálculo das tensões atuantes no braço do freio em estudo.

Palavras-chave: Braço do freio, tensões, método dos elementos finitos

1. INTRODUÇÃO

Na concepção de um projeto de elementos de máquinas, os engenheiros mecânicos têm a preocupação de evitar que os mesmos venham a falhar. Além disso, como normalmente as falhas ocorrem quando a tensão em algum ponto excede certo valor de segurança, torna-se necessário determinar as maiores tensões que ocorrem em qualquer lugar no contínuo do material do elemento de máquina. Isso significa que o interesse em calcular as magnitudes é maior que o de conhecer as direções dessas tensões, contanto que o material possa ser considerado, do ponto de vista macroscópico, como isotrópico, possuindo, portanto, propriedades de resistência uniformes em todas as direções. Grande parte dos metais e outros materiais de engenharia obedecem a esse critério, com exceção de madeira e materiais compósitos.

Em componentes de geometria simples, como cilindros e prismas retangulares, as análises de tensões são normalmente resolvidas com o uso de técnicas de solução analítica. Entretanto, como muitos componentes de máquinas têm formas geométricas complexas, o cálculo de tensões torna-se difícil ou mesmo impossível de ser feito pelo método analítico. Daí a necessidade de se empregar o Método dos Elementos Finitos (FEA), que, segundo Filho (2000), pode ser definido com um método aproximado de cálculo de sistemas contínuos. Além disso, Rivera (1987), ressalta a importância do Método dos Elementos Finitos para a solução de problemas que envolvem mais de um milhão de equações simultâneas. Este método permite obter uma aproximação das tensões em qualquer parte de um componente, para um dado conjunto de condições de contorno e de cargas aplicadas em alguns nós da estrutura, dividindo esse componente em um número finito de elementos discretos conectados pelos seus nós (chamados de malha). O FEA permite ainda melhorar a aproximação pelo aumento do número de elementos de menor tamanho em detrimento do aumento do tempo de processamento computacional.

Com base nisso, foram determinadas as tensões no braço do freio de uma bicicleta nos pontos de falhas mais prováveis, usando as técnicas clássicas de solução analítica e o FEA. Os resultados obtidos em ambos os métodos foram comparados entre si, visando identificar qual método mostra-se mais eficaz.

2. METODOLOGIA

Para o desenvolvimento do presente trabalho, inicialmente determinou-se o carregamento estático tridimensional no braço do freio de uma bicicleta. Posteriormente, calculou-se as tensões atuantes tanto pelo método analítico quanto pelo FEA. A geometria do braço do freio, bem como os dados pressupostos, foram obtidos de Norton (2013).

2.1. Análise de Tensões pelo Método Analítico

O braço do freio considerado no presente trabalho encontra-se disposto na Fig.1, e é fabricado em alumínio fundido, correspondendo a uma viga engastada dupla. O pino, por sua vez, é de aço dúctil e o seu carregamento é tridimensional. A Figura 2 mostra o diagrama de corpo livre do braço do freio.

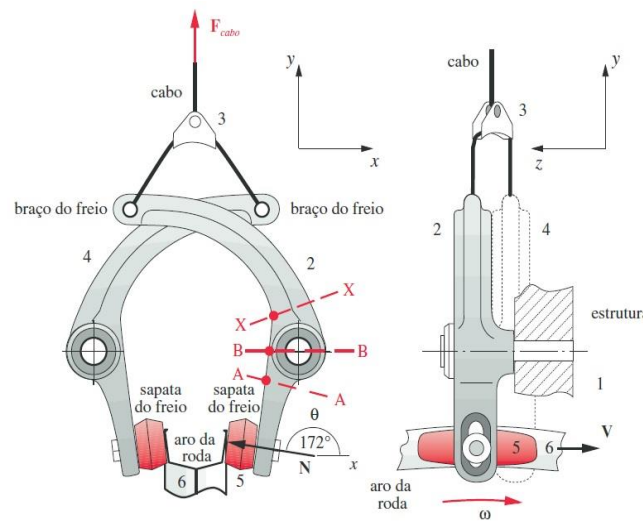


Figura 1. Conjunto de um braço de freio de bicicleta puxado pelo centro.

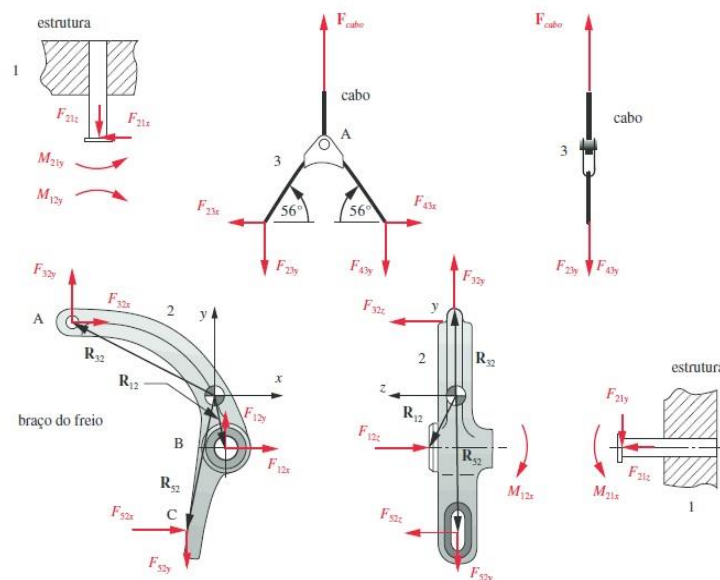


Figura 2. Diagrama de corpo livre do braço do freio.

O braço é acionado por meio de uma força de 1046 N aplicada no cabo. Sabendo que o coeficiente de atrito entre a sapata do freio e o aro da roda vale 0,45 e que as acelerações são desprezíveis, aplicou-se a abordagem Newtoniana para a realização da análise estática e, conseqüentemente, determinar as forças que agem no braço do freio. A Tabela 1 mostra os dados fornecidos e pressupostos necessários para o cálculo das forças internas, e, a Fig. 3, por sua vez, mostra

as matrizes obtidas com o método de dinâmica inversa. Essas matrizes foram solucionadas no software MATLAB R2014a e os resultados obtidos podem ser observados na Fig. 4.

Tabela 1. Dados fornecidos e pressupostos.

Variável	Valor	Unidade
μ	0,4	nenhuma
θ	172,0	deg
R_{12x}	5,2	mm
R_{12y}	-27,2	Mm
R_{12z}	23,1	Mm
R_{32x}	-75,4	Mm
R_{32y}	38,7	Mm
R_{32z}	0,0	Mm
R_{52x}	-13,0	Mm
R_{52y}	-69,7	Mm
R_{52z}	0,0	Mm
F_{32x}	353,0	N
F_{32y}	523,0	N
F_{32z}	0,0	N
M_{12z}	0,0	Nm

$$\begin{bmatrix}
 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & -23,1 & -27,2 & 0 & 0 & -69,7 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
 23,1 & 0 & -5,2 & 0 & 0 & 13 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
 27,2 & 5,2 & 0 & 69,7 & -13 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -0,4 \\
 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,990 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,139 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0
 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} F_{12x} \\ F_{12y} \\ F_{12z} \\ F_{52x} \\ F_{52y} \\ F_{52z} \\ M_{12x} \\ M_{12y} \\ F_f \\ N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -353 \\ -523 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 53095 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Figura 3. Matrizes para o equacionamento.

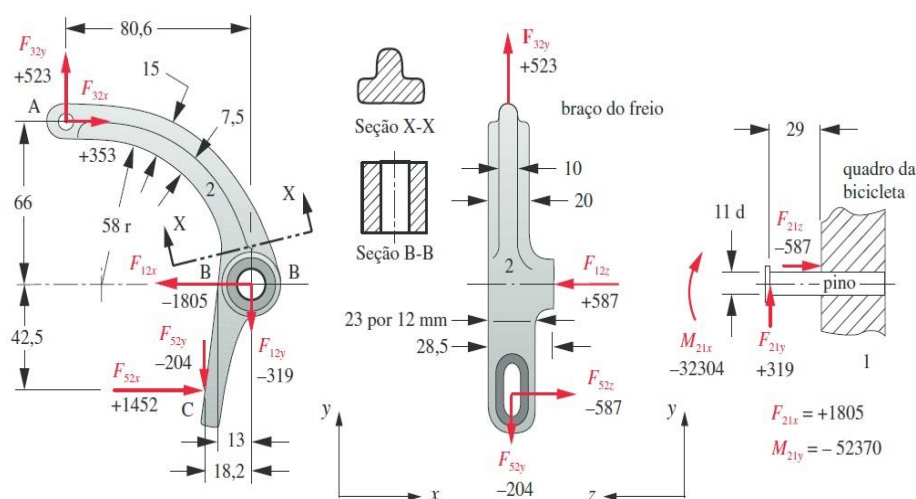


Figura 4. Diagramas de corpo livre do braço do freio, forças em N, momentos em N-mm e dimensões em mm.

Nas seções destacadas na Fig. 4, os pontos de falhas mais prováveis são o braço como uma viga engastada dupla (das quais uma extremidade é curva), por esmagamento do furo no mancal e o pino de conexão por flexão como uma

viga engastada. A concentração de tensões na base será desconsiderada, pois o material é fundido e marginalmente dúctil (5% de elongação na ruptura), o que proporciona um alívio pelo escoamento local.

A seção X-X da Fig. 4 tem uma seção transversal em “T”, e, as tensões nas fibras internas que atuam na mesma foram determinadas aplicando a equações Eq. (1).

$$\sigma_i = + \frac{M}{eA} \left(\frac{c_i}{r_i} \right) \quad (1)$$

Na seção B-B da Fig. 4 existe outro possível local de falha, devido uma combinação de tensões resultantes da flexão e da força normal e ao fato de que o pino remove uma quantidade substancial de material. A tensão de flexão se deve ao máximo momento atuante na raiz da viga curva e a tensão normal de tração se deve à componente y da força em A. A tensão na metade esquerda da seção B-B foi calculada pela Eq. (2) e equivale à soma das tensões que se devem à flexão e à força normal.

$$\sigma_{cubo} = \frac{Mc}{I_{cubo}} + \frac{F_{32y}}{A_{cubo}} \quad (2)$$

A seção A-A da Fig. 1 possui duas tensões normais na direção y, obtidas pelas equações Eq. (3) e Eq. (4), que se somam pelos cantos das duas faces pela Eq. (5).

$$\sigma_{y1} = \frac{Mc}{I} \quad (3)$$

$$\sigma_{y2} = \frac{Mc}{I} \quad (4)$$

$$\sigma_y = \sigma_{y1} + \sigma_{y2} \quad (5)$$

2.2. Análise de Tensões pelo Método dos Elementos Finitos

Devido à simetria do braço do freio, utilizou-se somente um lado da geometria, assim como foi feito no método analítico. No modelo FEA a geometria real será utilizada e uma análise geral das tensões será feita, considerando as propriedades mecânicas do alumínio fundido (material do braço do freio) expressas na Tab. 2.

Tabela 2. Propriedades mecânicas do alumínio fundido.

Tensão limite de escoamento (MPa)	Módulo de elasticidade (MPa)	Coefficiente de Poisson
280	71000	0,33

A determinação da malha é uma das etapas mais importantes do pré-processamento e decisiva na qualidade das soluções numéricas.

Uma malha mais grotesca é desejada quando se quer minimizar o tempo de processamento. Nas regiões da peça onde o gradiente de tensão é pequeno, mesmo uma malha grosseira fornece bons resultados, mas nas regiões onde o gradiente de tensão é alto, como em locais com grande concentração, uma malha mais refinada é necessária para capturar a variação de tensão.

No presente trabalho, inicialmente utilizou-se uma malha mais grotesca formada por elementos maiores, entretanto, com o intuito de se obter a variação das tensões em locais onde existem elevados gradientes de tensão, aplicou-se um refinamento na malha do mecanismo do braço de freio, aumentando o número de elementos em detrimento do seu tamanho. Dessa forma, obteve-se uma malha tetraédrica, com 32853 elementos e 55965 nós, como se pode observar na Fig. 5.



Figura 5. Malha computacional obtida.

Após a definição e geração da malha para o braço de freio, definiu-se as condições de contorno, que representam realisticamente as restrições em um dado componente. As principais restrições usadas para este modelo geométrico foram:

- Utilização da condição de simetria no braço de freio de uma bicicleta;
- O pino de apoio do braço foi totalmente fixado, restringindo seus movimentos em x, y e z;
- A área da sapata do freio foi travada no eixo x;
- Foi aplicada uma força de 523 N na direção y e 353 na direção x.

A simulação numérica foi realizada para as tensões máximas principais e as tensões equivalentes de von Mises, que, segundo Hibbeler (2010), também é chamada de teoria da energia de distorção máxima. Essa teoria afirma que o escoamento em um material dúctil ocorre quando a energia de distorção por unidade de volume do material é igual ou ultrapassa a energia de distorção por unidade de volume do mesmo material quando submetido a escoamento em um ensaio de tração simples.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 3 mostra os resultados obtidos pelo método analítico e pelo FEA para as tensões nas seções X-X, A-A e B-B.

Tabela 3. Resultados obtidos pelo método analítico e pelo FEA.

Localização	Método Analítico (MPa)	FEA (MPa) Equivalente von Mises	FEA(MPa) Tensões Máximas Principais
X-X	162,0	97,9	97,44
B-B	25,4	43,77	42,4
A-A	142,2	121,5	142,1

Como pode ser verificado na Fig. 6, para a seção a A-A o resultado obtido pelo FEA apresentou valores menores que a solução analítica para as tensões de von Mises. Isso se deve ao fato de que a solução analítica ignora o aumento da espessura da seção causada pelos contornos externos do braço.

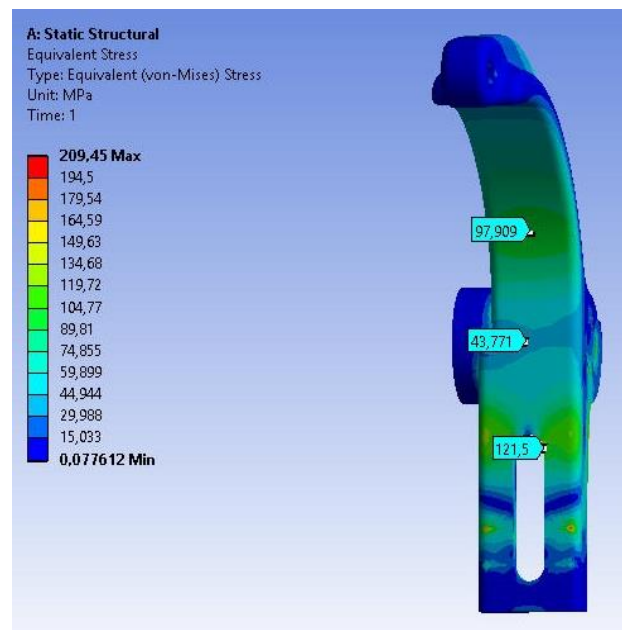


Figura 6. Tensões de von Mises.

A análise das tensões máximas principais, por sua vez, resultou em valores próximos dos encontrados analiticamente, e, em algumas regiões da seção, valores praticamente iguais, o que pode ser constatado na Fig. 7.

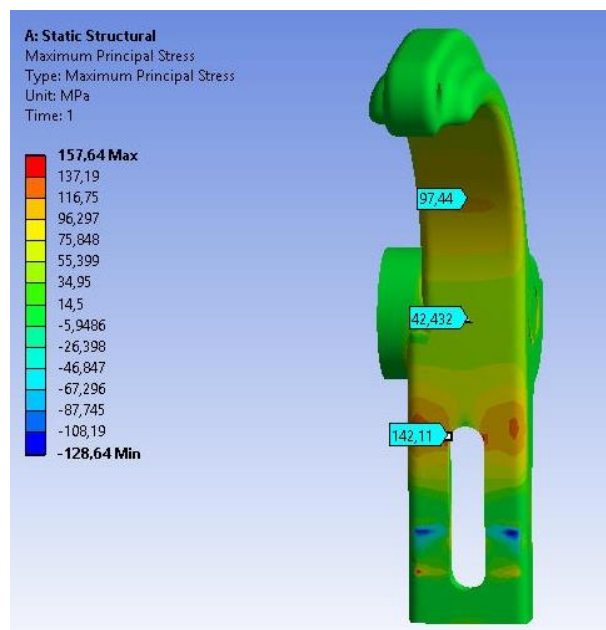


Figura 7. Tensões máximas principais.

Para a seção X-X, conforme se pode verificar na Tab. 3, os valores encontrados pelo FEA foram menores que os obtidos analiticamente, devido às considerações feitas para a determinação das tensões nesta região pelo método analítico. Já na seção B-B, o FEA apresentou valores maiores, quase o dobro dos valores obtidos analiticamente, nesse caso em virtude da geometria complexa que teve que ser simplificada na análise analítica.

4. CONCLUSÃO

Por meio da comparação dos resultados, é possível perceber a facilidade e eficácia da aplicação do Método dos Elementos Finitos na análise de tensões, uma vez que ele limita problemas com geometrias complexas a um conjunto de condições de contorno e uma carga aplicada em um dado nó da estrutura.

A análise estrutural estática do braço do freio foi realizada com o auxílio da ferramenta Mechanical do Ansys Workbench 15.0. A modelagem numérica resultou numa malha tetraédrica, sem, entretanto, exigir um grande esforço computacional.

O uso do modelo numérico permitiu identificar e avaliar as localidades onde as tensões equivalentes de von Mises e as tensões máximas principais são mais acentuadas. Nessas regiões há grande probabilidade de ocorrer um rompimento da estrutura.

A diferença existente entre os valores das tensões obtidos pelo método analítico e pelo FEA para as seções consideradas, a saber: X-X, B-B e A-A, devem-se principalmente às simplificações da geometria do braço do freio, visando à viabilidade de obtenção da solução analítica.

Para finalizar, é importante ressaltar que a ferramenta Mechanical utilizada neste trabalho permite realizar um grande número de análises estruturais para diferentes tipos de geometria, não se limitando à análise de tensões.

5. AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pela força e perseverança que nos tem proporcionado, e a nossos amigos e familiares pela paciência e compreensão.

6. REFERÊNCIAS

- Filho, A.A., 2000, “Elementos Finitos: A Base da Tecnologia CAE”, Ed. Érica, São Paulo, Brasil, 11 p.
Hibbeler, R.C., 2010, “Resistência dos Materiais”, 7ª ed., Ed. Pearson, São Paulo, Brasil, 390 p.
Norton, R.L., 2013, “Projeto de Máquinas: uma abordagem integrada”, 4ª ed., Ed. Bookman, Porto Alegre, Brasil, 110-113 p.
Rivera, A.R., 1987, “Formulación generalizada del proceso de elementos finitos”, Ingeniería e Investigación, Vol. 16, pp. 39-43.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

ANALYSIS OF STRESS IN A BICYCLE BRAKE ARM: COMPARISON OF ANALYTICAL SOLUTION WITH THE METHOD OF FINITE ELEMENTS (FEA)

Patrícia da Silva Oliveira, patriciasilva_oliver@hotmail.com¹
Maykon de Santana Almeida, maykonshinoida@hotmail.com¹
Ricardo Cardoso Soares, eng.mec.ricardocardoso@gmail.com¹

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Praça da Liberdade, 1597, 64000-040, Centro, Teresina-PI.

Abstract. For a long time, engineers and scientists are its efforts to know why the parts fail. Currently, it is understood more of several failure mechanisms than a few decades ago, largely due to improved techniques and testing measurements. Today, it is known that the parts fail because their tensions exceeded their resistance. However, the fault can be derived from a compressive stress, tensile or shear, and depend on the component manufacturing material and their respective resistance to these stresses. It also depends on the load to which it is submitted (static or dynamic) and the presence or absence of cracks in the material. As a result, there is a particular interest in determining the magnitudes of the stresses acting on a given machine design elements to verify whether they do not exceed the endurance limits and thus may cause possible failures. The intensity of the stresses can be calculated using classical techniques of analytical solution, which are limited to simple geometries, which makes its application in complex geometries. Hence the need to employ the method of finite element analysis (FEA), relatively easy to use due to the large number of commercial software on the market. Based on this, the present work is an analysis of the tensile stress and compression on the brake arm of a bicycle, using the analytical method and the finite element analysis using ANSYS Mechanical 15.0 software. The results were compared for both methods considered, in order to show which method provides the best estimate for the calculation of stresses acting on the brake arm study.

Keywords: Brake arm, tension, finite element method