

---

**NOTA TÉCNICA:****ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS DE BARRAS ACIONADORAS E SEGUIDORAS DE UMA SEMEADORA-ADUBADORA**

Carlos Eduardo Silva Volpato<sup>1</sup>, Ricardo Rodrigues Magalhães<sup>2</sup>, Jackson Antonio Barbosa<sup>3</sup>, Wanielle Resende Carvalho<sup>4</sup>

**RESUMO**

Para determinar a durabilidade de um sistema de máquinas agrícolas, deve-se primeiramente entender o nível de tensões em que os componentes estão sujeitos. O nível de tensões pode ser obtido experimentalmente, o que demanda custo elevado de protótipos e instrumentação, ou por meios analíticos, o que demanda tempo e na maioria dos casos, os cálculos tornam-se inviáveis pela complexidade geométrica. Uma alternativa que tem auxiliado engenheiros agrícolas no cálculo de tensões é o Método dos Elementos Finitos, porém o seu uso ainda é incipiente em mecanismos de corta-palhas de semeadora-adubadoras. Este trabalho propõe o uso do Método dos Elementos Finitos para avaliar o nível de tensões nas barras acionadoras e seguidoras de uma semeadora-adubadora, análogo a um mecanismo real, usado no corte de palhada de uma semeadora. Tensões de von Mises foram extraídas e analisadas em um programa comercial e os resultados mostraram coerência quando comparados com valores analíticos, levando-se em consideração que não foi adotado método estatístico para comparação dos resultados. Valores inferiores a 275 N mm<sup>-2</sup> (tensão de escoamento do material adotado nas simulações) foram encontrados, o que demonstra a potencialidade na aplicação do Método dos Elementos Finitos em projetos de mecanismos de corta-palhas de semeadora-adubadoras.

**Palavras-chave:** Análise de tensões, Máquinas agrícolas, Modelagem geométrica

**ABSTRACT****FINITE ELEMENT ANALYSIS OF TRIGGER AND FOLLOWER BARS OF A SEEDER**

In order to determine the durability of agricultural machines, it must firstly understand stresses level of the components in analysis. The level of stresses can be obtained by experimental tests which demand high costs for prototypes and instrumentation, or analytically which demands timing and most of cases, calculations become unfeasible due to geometry complexity. An alternative which helps agriculture engineering for the stresses calculation is the Finite Element Method, but the use of this method for straw cutting seeder is still incipient. This work proposes finite element analysis of a four bars mechanism, similar to a real one, used in straw cutting seeder, for stresses evaluation. Von Mises stresses were extracted and analyzed from commercial software. Results demonstrated consistent when compared to analytical data, taking in consideration that statistical methods for comparing the results were not adopted. Values lower than 275 N mm<sup>-2</sup> (yield strength of the material adopted in the simulations) were found, which showed the potentiality on the Finite Element Method application for straw cutting seeder projects.

**Keywords:** Agricultural machines, Geometric modeling, Stress analysis

---

**Recebido para publicação em 24/11/2015. Aprovado em 19/08/2016.**

1 - Engenheiro Florestal, Professor Doutor da UFLA/Lavras/MG, volpato@deg.ufla.br

2 - Engenheiro Florestal, Professor Doutor da UFLA/Lavras/MG, ricardorm@deg.ufla.br

3 - Engenheiro Agrícola, Professor Doutor da UFLA/Lavras/MG, jackson@deg.ufla.br

4 - Engenheiro Agrícola, Profissional Liberal, waniellecarvalho@minasverde.com.br

## INTRODUÇÃO

O estudo dos esforços que atuam sobre as máquinas e implementos agrícolas vem a ser um dos parâmetros que maior contribuição promove para a solução dos problemas com mecanização no meio rural (SANTO *et al.*, 2010). No estudo de um problema deste tipo, a modelagem geométrica e a definição apropriada dos aspectos relevantes a serem considerados são pontos importantes, tal como as tensões máximas atuantes nos componentes. Assim, é necessário discutir qual deve ser o modelo utilizado, levando-se em consideração a complexidade desejada e sua aproximação com o modelo real (VOLPATO *et al.*, 2005). Com isso, o uso de uma ferramenta computacional que permita uma modelagem rápida e completa, levando-se em consideração seus vários subsistemas, é fundamental (PASQUINI Jr. & COSTA NETO, 1996).

A modelagem virtual combinada com técnicas de otimização de sistemas mecânicos são alternativas para soluções de problemas de engenharia na área de projeto de máquinas agrícolas. A partir disso, surgiram propostas do uso de ferramentas computacionais para ajudar na construção de projetos mais seguros sem que isso dependa recursos onerosos na construção de protótipos, como em Andrade *et al.* (2001).

Trabalhos envolvendo a aplicação de programas computacionais específicos que auxiliem o projeto vem sendo desenvolvidos utilizando otimização, como em Cazacu & Grama (2014), que usaram algoritmos genéticos em conjunto com o Método dos Elementos Finitos para otimização de estruturas de aço. Alguns métodos computacionais têm sido desenvolvidos para calcular deformações, tensões e deslocamentos, dentre outros, e um desses métodos é chamado de Método dos Elementos Finitos (MEF). O MEF é a simulação de sistemas físicos (geometria e carregamento) por uma aproximação matemática do sistema real, produzindo resultados satisfatórios quando comparado com outros métodos (MAGALHAES *et al.*, 2015).

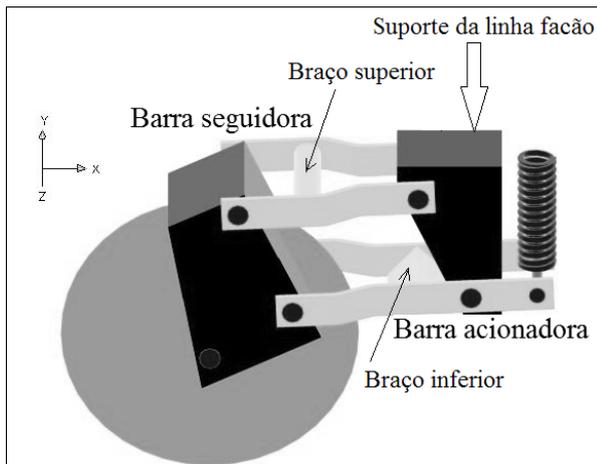
Este método é utilizado principalmente na análise de tensões e vibrações, bem como em problemas

envolvendo transferência de calor, mecânica dos fluidos e outras aplicações na prevenção de falhas (MENG *et al.*, 2015). É baseado na suposição de que o deslocamento de cada um dos elementos pode variar dentro de uma estrutura analisada e tem apresentado concordância razoável com resultados experimentais (MAGALHAES *et al.*, 2012). Além disso, tem sido utilizado na Engenharia Agrícola (MAGALHAES *et al.*, 2006), inclusive para a predição do comportamento estrutural de máquinas agrícolas (SILVA *et al.*, 2014), porém seu uso em mecanismos de corta-palhas de semeadora-adubadoras ainda é incipiente.

A hipótese de se utilizar o conceito do Método dos Elementos Finitos na estrutura de uma máquina agrícola, constituída por um mecanismo responsável pelo corte da palhada de superfície, utilizado em semeadoras-adubadoras adotadas em semeadura direta na palha, em uma situação de máximo esforço (carregamento máximo atuante em cada ponto da estrutura em função das cargas de trabalho) foi considerada. O objetivo deste trabalho foi validar a aplicação do MEF na avaliação de projetos de máquinas agrícolas, especificamente, em barras acionadoras e seguidoras de uma semeadora-adubadora utilizada em semeadura direta.

## MATERIAL E MÉTODOS

A máquina agrícola analisada consiste em um sistema de quatro barras de uma semeadora-adubadora, responsável por manter o disco de corte da palhada e abertura de sulcos de adubo, acompanhando o relevo do terreno. O mecanismo de quatro barras foi modelado geometricamente, levando-se em consideração o modelo SHM 11/13. O modelo virtual do mecanismo foi executado utilizando o programa comercial Mechanical Desktop® da Autodesk, no qual o conjunto também foi ensaiado virtualmente. As informações dos materiais de construção dos elementos foram inseridas no programa comercial e o dimensionamento do mecanismo foi realizado, conforme vista isométrica do conjunto representado pela Figura 1.



**Figura 1.** Vista isométrica do modelo virtual.

O primeiro passo na análise de elementos finitos consiste na criação de malhas a partir do modelo virtual, chamado de discretização. Esse processo consiste na subdivisão do modelo virtual em pequenos volumes, formados por nós e elementos. A partir daí, carregamentos são aplicados na estrutura (nós ou elementos), os quais são estabelecidos pela Equação (1), obtida a partir da aplicação da Mecânica Lagrangiana (RAO, 2010).

$$\{F\} = [m]\{\ddot{x}\} + [c]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} \quad (1)$$

em que,

$\{F\}$  = carregamentos aplicado;  
 $[m]$  = matriz de massa;  
 $[c]$  = matriz de amortecimento;  
 $[K]$  = matriz de rigidez;  
 $\{x\}$  = vetor deslocamento;  
 $\{\dot{x}\}$  = vetor velocidade; e  
 $\{\ddot{x}\}$  = vetor aceleração.

Admitindo-se um sistema estático e sem nenhum tipo de amortecimento, a Eq. (1) pode ser reescrita na forma da Equação (2) (RAO, 2010).

$$\{F\} = [K]\{x\} \quad (2)$$

Assim, conhecendo-se os carregamentos e a matriz de rigidez, que neste caso é representada pelas propriedades mecânicas do material (módulo de elasticidade), obtém-se os deslocamentos da estrutura, que darão origem às deformações das barras e consequentemente aos valores de tensões de von Mises.

O aço utilizado nas simulações foi o SAE-1025 com tensão de escoamento ( $\sigma_e$ ) de  $275 \text{ N mm}^{-2}$  e propriedades mecânicas próximas aos aços (Módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson) mais indicados na indústria agrícola (CARDARELLI, 2008). Para análise das máximas tensões as quais o mecanismo suportaria, foi proposto que o mesmo fosse submetido a um obstáculo durante o funcionamento normal, na operação de sementeira a  $1,39 \text{ m s}^{-1}$  ( $5,00 \text{ km h}^{-1}$ ). Tal obstáculo faria com que o mecanismo sofresse a ação, além da força de tração e penetração para realização do corte do terreno. Ainda para proporcionar maior sollicitação do elemento analisado, a sementeira foi estudada utilizando-se a sollicitação máxima ao mecanismo. O trator utilizado como parâmetro para ensaio tem potência máxima no motor de  $48 \text{ kW}$  ( $65,2 \text{ CV}$ ), sendo este o modelo recomendado pelo fabricante para a tração da sementeira-adubadora, a qual possui 4 linhas e um fuso para acoplamento e nivelamento, capacidade de massa para aduto de  $414 \text{ kg}$  e capacidade de massa para semente de  $238 \text{ kg}$ .

Segundo Ortiz-Cañavate (1995), a força de tração necessária para tracionar cada linha de sementeira de uma sementeira-adubadora, com todos os seus elementos, é de  $1500 \text{ N}$ . Já a ASAE (1999) especifica que esta força varia de  $900 \text{ N} \pm 25\%$  por linha. Sendo assim, a potência necessária para a sementeira-adubadora realizar o corte do terreno, em função do mecanismo estudado, foi de  $33\%$  da potência total necessária, levando-se em consideração que sementeira utilizada também foi tracionada.

A força de penetração no solo foi obtida efetuando-se simulação virtual da mola que compõe o sistema. Visto as dificuldades e variações no procedimento para determinação da força de penetração no solo, pelo mecanismo, optou-se neste trabalho por adotar a força de compressão da mola sobre o terreno, no intuito de se obter o melhor parâmetro para os esforços verticais. Para tal, foi simulada a compressão da mola de sua posição natural de repouso, até a posição exigida pelo mecanismo em condições de trabalho normal, em regulação normal para sementeira sobre restos da cultura anterior de milho. A quantidade de palhada na área foi estimada em  $10 \text{ t ha}^{-1}$ , o que poderia influenciar o corte de palha e a resistência ao rolamento do disco. A mola simulada obedeceu à norma DIN 17223-C (DIN, 1984). Na posição de trabalho, a mola é comprimida aproximadamente  $21 \text{ mm}$ , exercendo sobre o mecanismo uma força de  $1368 \text{ N}$ .

A validação do modelo virtual do mecanismo

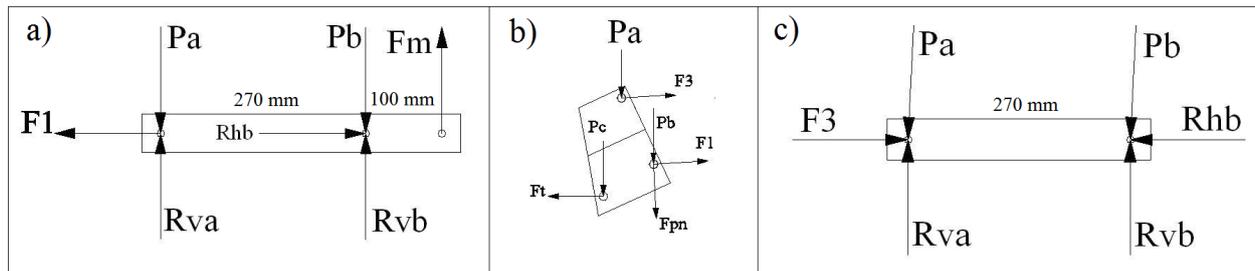
em questão foi realizada procedendo-se a análise de propriedades de massa. Para tal, as barras inferior e superior foram pesadas em balança digital com resolução de 0,10 kg, visto que se trata de mecanismos de peso elevado e que qualquer desgaste promoveria uma alteração desprezível, se comparado ao peso total do elemento.

**RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Com auxílio da análise de massa, os pesos

das barras em cada ponto,  $Pa$ ,  $Pb$  e  $Pc$ , segundo diagrama de corpo livre, representado pela Figura 2, foram adquiridos com o auxílio do programa Mechanical Desktop®. Os resultados estão apresentados na Quadro 1.

Executando-se os cálculos das equações de equilíbrio, foram obtidos valores de reações, tração e compressão nas barras, representados na Quadro 2, bem como as tensões de von Mises obtidas pelo MEF (Figuras 3 e 4).



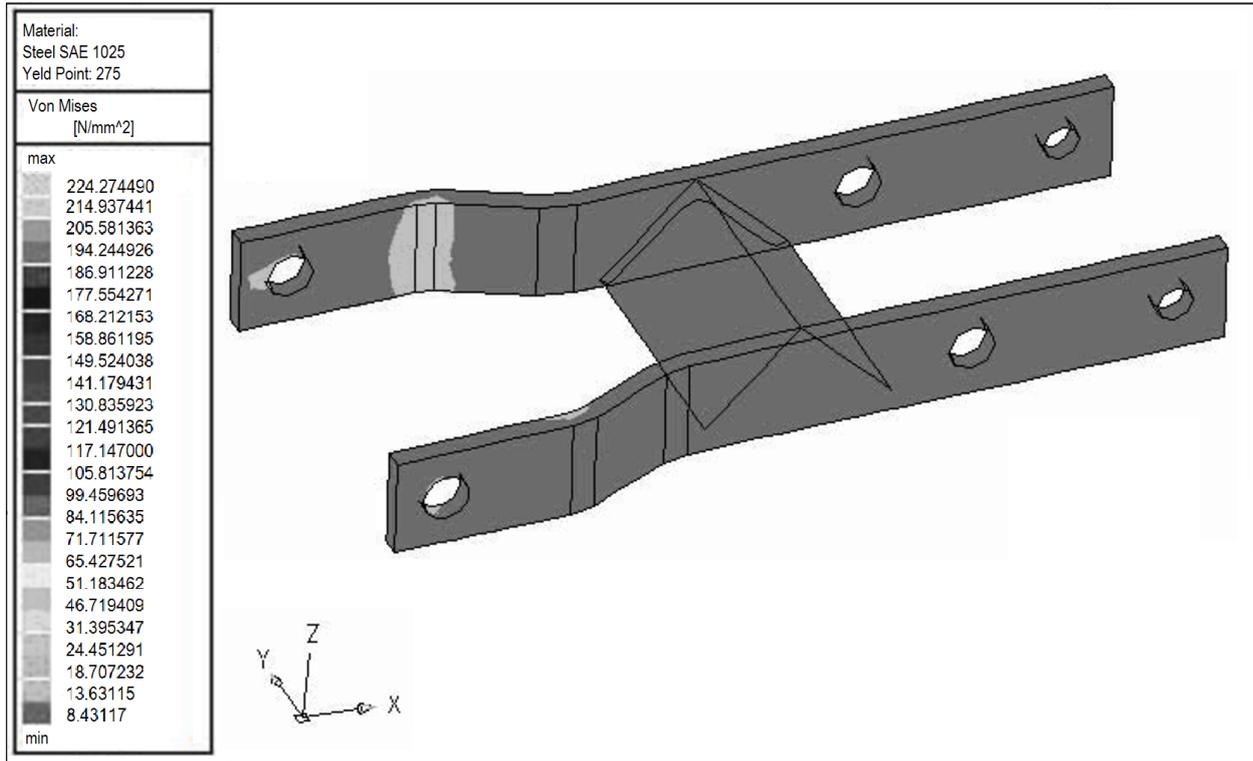
**Figura 2.** a) Diagrama de corpo livre para a barra acionadora, onde  $F1$  é a força de tração da barra acopladora sobre a barra acionadora;  $Pa$  é o peso da barra acionadora sobre o ponto A;  $Pb$  é o peso da barra acionadora sobre o ponto B;  $Fm$  é a força de compressão da mola;  $Rva$  é a reação vertical no ponto A;  $Rvb$  é a reação vertical no ponto B;  $Rhb$  a reação horizontal no ponto B. b) Diagrama de corpo livre para a barra acopladora; onde  $F1$  é a força de tração da barra acionadora sobre a barra acopladora;  $F3$  é a força de compressão da barra seguidora sobre a barra acopladora;  $Ft$  é a força de reação a tração do mecanismo;  $Fpn$  é a força de penetração no solo, reação de  $Fm$ ;  $Pa$  é o peso da barra acopladora sobre o ponto A;  $Pb$  é o peso da barra acopladora sobre o ponto B;  $Pc$  é o peso da barra acopladora sobre o ponto C. c) Diagrama de corpo livre para a barra seguidora, onde  $F3$  é a força de compressão da barra acopladora sobre a barra seguidora;  $Pa$  é o peso da barra seguidora sobre o ponto A;  $Pb$  é o peso da barra seguidora sobre o ponto B;  $Rva$  é a reação vertical no ponto A;  $Rvb$  é a reação vertical no ponto B;  $Rhb$  é a reação horizontal no ponto B.

**Quadro 1.** Análise de massa em cada ponto das barras

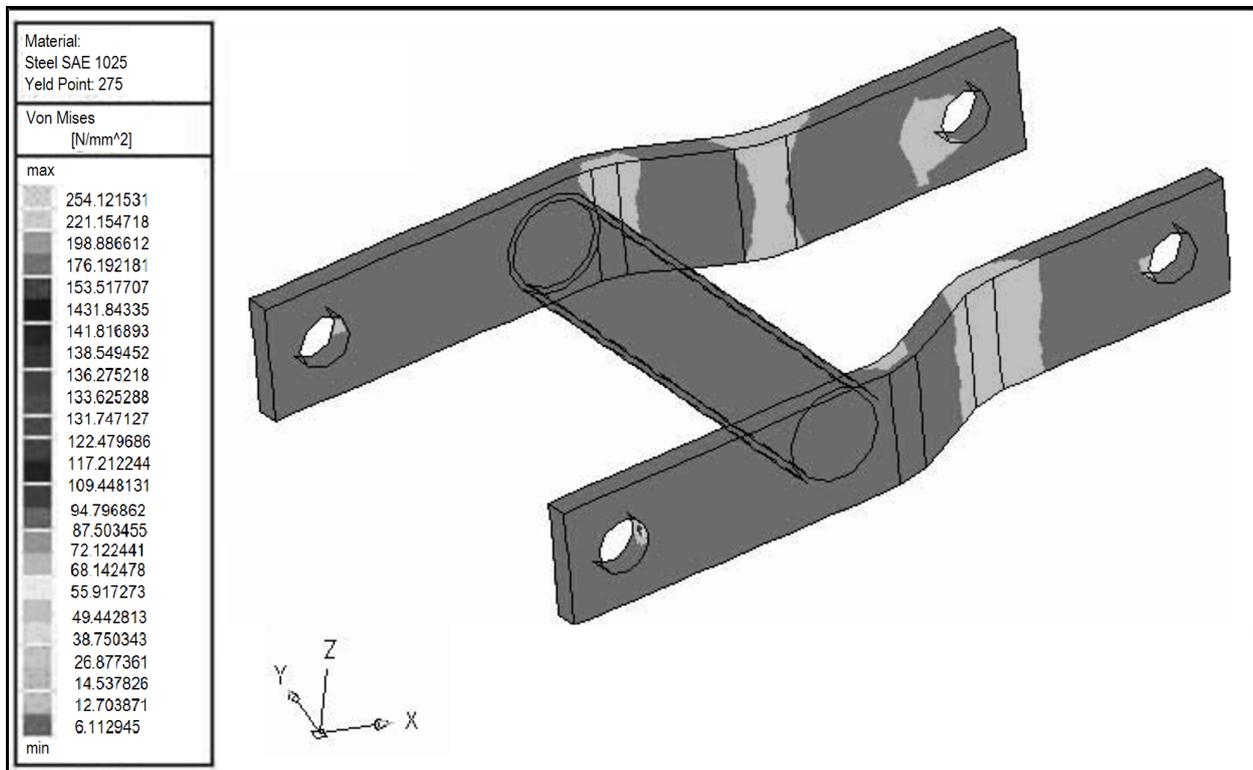
| Mecanismo        | Força atuante em cada ponto (N) |       |        |        |
|------------------|---------------------------------|-------|--------|--------|
|                  | Pa                              | Pb    | Pc     | Total  |
| Barra acionadora | 11,20                           | 26,60 |        | 37,80  |
| Barra acopladora | 92,00                           | 72,00 | 130,00 | 294,00 |
| Barra seguidora  | 14,80                           | 14,00 |        | 28,80  |

**Quadro 2.** Forças atuantes nas barras acionadora, acopladora e seguidora

| Mecanismo        | Forças (N) |      |        |        |       | Tensões (N mm <sup>-2</sup> ) |
|------------------|------------|------|--------|--------|-------|-------------------------------|
|                  | F1         | Fm   | Rva    | Rvb    | Rhb   | Ruptura                       |
| Barra acionadora | 21793      | 1368 | 517,90 | - 1848 | 21795 | 475                           |
| Barra acopladora | F3         |      |        |        |       |                               |
|                  | - 6966,40  |      |        |        |       |                               |
| Barra seguidora  |            |      | Rva    | Rvb    |       | Compressão                    |
|                  |            |      | 14,80  | 6.965  |       | 70                            |



**Figura 3.** Tensões de von Mises simuladas na barra acionadora



**Figura 4.** Tensões de von Mises simuladas na barra seguidora.

Como pode ser observado nas Figs. 3 e 4, a análise de tensões por elementos finitos se mostrou satisfatória, sendo que as tensões de von Mises apresentaram valores inferiores à tensão de escoamento do material ( $275 \text{ N mm}^{-2}$ ). Estes resultados se mostraram coerentes com a literatura, como em Niemczewski *et al.* (2014), que obtiveram resultados de tensões de von Mises inferiores a  $227 \text{ N mm}^{-2}$  na análise por elementos finitos do chassi de uma semeadora de quatro linhas. Rocha *et al.* (1992) e Santos *et al.* (2008) compararam diferentes semeadoras-adubadoras e concluíram que os mecanismos de plantio das máquinas estudadas não apresentaram diferenças significativas de eficiência, o que comprova que este estudo pode ser expandido para outros tipos e modelos de semeadoras-adubadoras.

## CONCLUSÕES

- Simulações foram realizadas nas barras acionadoras e seguidoras de uma semeadora-adubadora e regiões de maior tensão foram analisadas, não sendo necessária a criação de novos modelos geométricos, excluindo-se os pinos e parafusos, os quais não foram avaliados.
- Em nenhuma região do mecanismo analisado, as tensões simuladas excederam a tensão de escoamento do material ( $275 \text{ N mm}^{-2}$ ), levando-se em consideração que não foi adotado método estatístico para comparação dos resultados. Além disso, notou-se o super dimensionamento de algumas partes do projeto original, com tendência de se prevenir a quebra do mecanismo.
- Levando-se em conta que a situação das forças em condições de campo não foram analisadas, pode-se considerar que a modelagem e simulação das barras acionadoras e seguidoras de uma semeadora-adubadora, por meio do método de elementos finitos, apresentaram resultados satisfatórios.

## AGRADECIMENTOS

À FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, E.T.; COUTO, S.M.; QUEIROZ, D.M. Distribuição da pressão estática em uma coluna de canola: análise por elementos finitos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.5, n.2, p.288-295, 2001.
- AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. Agricultural machinery management. **ASAE standards 1999: Standards Engineering Practices Data**, 1999, p.359-66.
- CARDARELLI, F. **Materials Handbook: A Concise Desktop Reference**. Springer Science & Business Media, 2008. 1378p.
- CAZACU, R.; GRAMA, L. Steel Truss Optimization Using Genetic Algorithms and FEA. **Procedia Technology**, v.12, p.339-346, 2014.
- DIN. Deutsches Institut für Normung - DIN 17223. **Round steel wire for springs**, 1984. 12p.
- MAGALHAES, A.C.; TEIXEIRA, M.M.; COUTO, S.M.; RESENDE, R.C. Modelagem de máquina pneumática recolhadora de frutos de café em terreiro usando análise por elementos finitos. **Engenharia Agrícola**, v.26, n.2, p.483-492, 2006.
- MAGALHAES, R.R., BRAGA JR. R.A., BARBOSA, B.H.G. Young's Modulus evaluation using Particle Image Velocimetry and Finite Element Inverse Analysis. **Optics and Lasers in Engineering**, v.70, p.33-37, 2015.
- MAGALHAES, R.R.; FONTES, C.H.M.; VIEIRA, S.A.B. Failure analysis and design of a front bumper using finite element method along with durability and rig tests. **International Journal of Vehicle Design**, v.60, n.1/2, p.71-83, 2012.
- MENG, M.; LE, H.R.; RIZVI, M.J.; GROVE, S.M. 3D FEA modelling of laminated composites in bending and their failure mechanisms. **Composite Structures**, v.119, p.693-708, 2015.
- NIEMCZEWSKI, B.K.; REIS, A.V.; MACHADO, R.L.T.; MACHADO, A.L.T. Validação de um

modelo de cálculo por elementos finitos do chassi de uma semeadora de quatro linhas. **Engenharia Agrícola**, v.34, n.1, p.161-170, 2014.

ORTIZ-CAÑAVATE, J. **Las maquinas agrícolas y su aplicación**. Mundi-Prensa, Agricultural machinery, México, 1995. 526p.

PASQUINI JR, J.; COSTA NETO, A. Determinação das características de handling de veículos automotivos. In: Encontro de Usuários do Programa ADAMS, 15, 1996, São Paulo. **Anais...** São Paulo: USP, 1996, p.13-17.

RAO, S.S. The Finite Element Method in Engineering, 5th Edition, **Elsevier**, 2010, 726p.

ROCHA, F.E.C.; MANTOVANI, E.C.; BERTAUX, S.; GARCIA, J.C. Comparação de semeadora-adubadoras de milho com relação a preços de aquisição e eficiência operacional. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.27, n.5, p.751-757, 1992.

SANTO, A.C.E, REIS, A.V., MACHADO, A.L.T, BATISTA, V.J.; OLDONI, A. Desenvolvimento de um dispositivo para medição de esforços em hastes de semeadoras de plantio direto. **Engenharia Agrícola**, v.30, n.2, p.288-298, 2010.

SANTOS A.P.; VOLPATO, C.E.S.; TOURINO, M.C.C. Desempenho de três semeadoras-adubadoras de plantio direto para a cultura do milho. **Ciência & Agrotecnologia**, v.32, n.2, p.540-546, 2008.

SILVA, E.P., SILVA, F.M.; MAGALHÃES, R.R. Application of Finite Elements Method for Structural Analysis in a Coffee Harvester. **Engineering**, v.6, n.3, p.138-147, 2014.

VOLPATO, C.E.S.; BRAUNBECK, O.A.; OLIVEIRA, C.A.A. Modelo dinâmico de simulação e otimização da força normal de reação do solo para um mecanismo de corte basal. **Engenharia Agrícola**, v.25, n.2, p.436-446, 2005.