

## ANÁLISE DE TENSÕES NA FACA DE CORTE DE UMA COLHEDORA DE FORRAGEM<sup>1</sup>

Ricardo Ferreira Garcia<sup>2</sup>, Daniel M. de Queiroz<sup>3</sup> e Gutemberg Pereira Dias<sup>3</sup>

### RESUMO

Com o objetivo de se avaliar a distribuição de tensões na faca de corte da colhedora de forragem, modelo JF 90 Z 10, desenvolveu-se um modelo matemático usando-se o programa computacional ANSYS, versão 5.3, que funciona baseado na técnica de elementos finitos e cuja verificação foi feita comparando-se os resultados obtidos pelo programa ANSYS com os obtidos por solução analítica para um problema formulado mais simples. Dos resultados, concluiu-se que o modelo desenvolvido usando o programa ANSYS apresentou resultados próximo aos da solução analítica. Para simular a aplicação das forças atuantes na faca de corte, foram consideradas uma rotação do rotor de corte de 1.450rpm e uma potência requerida para acioná-lo, de 29.000W. A tensão equivalente máxima encontrada na faca de corte ocorreu na extremidade de seu fio de corte e teve o valor de 144,6MPa.

**Palavras-chave:** colhedora de forragem, elementos finitos, simulação

### ANALYSIS OF STRESS APPLIED IN A FORAGE HARVESTER KNIFE

### ABSTRACT

The analysis of stress applied in the knife of the JF 90 Z 10-forage harvester was evaluated in this study. A model to analyze the knife stress was developed using ANSYS 5.3, a finite element type software. Model verification was done by comparing ANSYS results to analytical results for a simpler problem. A close agreement was found between the developed ANSYS model and the analytical solution. To simulate the application of the forces applied in the knife, a rotor rotation of 1,450rpm and a rotor cutting power of 29,000W were considered. The maximum equivalent stress found was 144.6MPa and its position was in the knife cut edge.

**Key words:** finite element, forage harvester, simulation

### INTRODUÇÃO

Animais domesticados têm sido usados como fonte de potência e/ou alimento, durante o registro de toda a história da agricultura. Através do pasto, os animais são capazes de fazer uso de gramíneas, leguminosas e outras culturas forrageiras, que o homem não pode consumir diretamente. O clima permite a utilização de pastagem o ano inteiro em várias partes do mundo, mas em diversas regiões as forrageiras devem ser colhidas e armazenadas para alimentação de animais

num período de baixa produção de alimentos (Srivastava et al., 1993).

Segundo Balastreire (1990), o desenvolvimento da mecanização nas operações de colheita e conservação de forragens foi uma das formas encontradas pelos produtores rurais para obter produtos de menor custo e com alto valor nutritivo; as forrageiras mais utilizadas na alimentação de animais são, entre outras, o milho, o sorgo e o capim-elefante, que podem ser utilizados ainda verdes ou podem ser armazenados para serem utilizados posteriormente em outra estação. O principal

<sup>1</sup> Parte da tese de mestrado do primeiro autor

<sup>2</sup> Doutorando em Engenharia Agrícola, DEA, UFV, Viçosa, MG, 36571-000. E-mail: rgarcia@alunos.ufv.br

<sup>3</sup> Prof. Adjunto, Departamento de Engenharia Agrícola, UFV, Viçosa, MG, 36571-000

método de conservação da forragem é a sua ensilagem, que envolve: corte da forragem com 70 a 80% de umidade, permitindo sua secagem no campo para 50 a 60%, dependendo do tipo de forrageira, corte em pequenos pedaços, para obter um armazenamento adequado e preservação por fermentação, numa câmara à prova de ar.

No processo da colheita de forragem há necessidade de corte, carregamento e transporte do produto, daí a importância das colhedoras, que são máquinas destinadas a esse fim.

Grande parte das máquinas colhedoras de forragens em uso no Brasil foram desenvolvidas por tentativas e erros, sem passarem por um processo de otimização de seu projeto. São vários os pontos que merecem atenção por parte dos engenheiros projetistas, entre eles o dimensionamento da faca de corte.

A faca de corte é um dos principais componentes da colhedora, devendo ser capaz de realizar o corte do material de forma uniforme e transmitir energia cinética suficiente para lançá-lo fora da máquina, com o mínimo consumo de energia.

Diversos pesquisadores têm trabalhado visando otimizar o processo de colheita de forragem, a fim de melhorar o desempenho da máquina e a qualidade do produto colhido.

Estudando o projeto e o desempenho de uma colhedora de forragem com rotor tipo volante de corte, Berge (1951) formulou a relação entre os parâmetros ângulo da faca, comprimento de corte, espaçamento das facas e distância entre o centro do eixo do rotor e a extremidade externa da faca de corte. Utilizando quatro facas e uma regulagem de tamanho de corte 1,19cm, o autor realizou testes com milho e, variando a rotação do rotor em 700, 750 e 800rpm, encontrou valores de energia requerida de 0,88, 0,83 e 0,86W.h.kg<sup>-1</sup>, respectivamente.

Saqib (1981) trabalhando com alfafa e milho, também conduziu um experimento de otimização da qualidade e da energia requerida para o corte numa colhedora de forragem com cilindro de corte; variando regulagens da colhedora, o autor chegou à conclusão de que o tamanho da partícula cresce em função da distância entre a faca e a barra de corte, o comprimento do caule e o número de facas dispostas no cilindro de corte, porém o tamanho da partícula decresce com o aumento da pressão dos rolos de compressão e da intensidade de alimentação; já a energia requerida para o corte da forragem decresce com o aumento do número de facas dispostas no cilindro.

Durante um teste para melhorar o lançamento efetivo de uma colhedora de forragem com sistema de corte para cima, Shinnars et al. (1994) introduziram uma placa montada na parte interna e perpendicular à faca; esta placa foi introduzida com a finalidade de evitar que o material cortado escorregasse para a parte posterior da faca, comprimindo o material cortado, para que ele pudesse ser lançado desta placa com uma velocidade maior que a da faca. Foi encontrado, após a realização dos ensaios com a placa montada na faca, um acréscimo no lançamento efetivo do material cortado.

Vários autores têm relatado trabalhos envolvendo a aplicação de programas computacionais específicos que auxiliem no projeto de máquinas, permitindo sua simulação, a fim de otimizar seu projeto, eliminando a tentativa e o erro. O projeto de máquinas com base em técnicas de projeto assistido por computador (CAD) permite a produção de uma

máquina agrícola mais eficiente, segura e barata, além de propiciar sensível redução do tempo de seu desenvolvimento. O método numérico de elementos finitos vem sendo amplamente utilizado na solução de problemas de engenharia e tem-se tornado a base computacional de vários sistemas com técnicas de projeto assistido por computador (CAD).

Segundo Haghghi et al. (1990) a análise por elementos finitos tornou-se popular nos anos recentes, devido a três motivos: 1) os programas comerciais tornaram-se disponíveis a preços mais acessíveis; 2) as interfaces gráficas tornaram-se muito mais realísticas; e 3) a potência dos computadores cresceu com incrível velocidade.

O programa ANSYS, que tem como base matemática o método de elementos finitos é, hoje, largamente aplicado para solucionar os diversos tipos de problemas de engenharia, como análise estrutural, mecânica do contínuo, transferência de calor e fluxo de fluidos.

Um modelo computacional baseado em análise por elementos finitos, para predição e avaliação do desempenho dinâmico de um suporte de montagem de um motor diesel no chassi, foi estudado por Zhu et al. (1989). Utilizando o programa ANSYS, foram analisadas a influência dos furos para os parafusos, para fixação da peça, a posição dos entalhes de reforço e as condições de contorno, como a posição de aplicação de forças, quanto à frequência natural e à forma modal da peça. Foram encontradas relações entre os furos para os parafusos e os entalhes de reforço com a frequência natural da peça. As equações teóricas geradas a partir da resposta da análise harmônica puderam ser usadas para predizer os valores máximos de deslocamento da peça sob a excitação do motor em funcionamento.

Queiroz et al. (1994) desenvolveram um modelo por elementos finitos, para analisar e otimizar o projeto de discos de arado. Este modelo foi validado comparando-se seus resultados com uma solução analítica, concluindo-se que o disco poderia ser reprojetoado com a alteração de seu furo central, reduzindo cerca de 44% da massa; seria possível, também, alterar sua espessura e o raio de curvatura, a fim de reduzir a massa original, em cerca de 23%.

Smith et al. (1989) analisaram o suporte de montagem de um motor diesel no chassi sob condições de cargas estáticas, para simular as máximas cargas de serviço, usando o programa ANSYS. Uma vez encontradas as tensões distribuídas no suporte, alterações no projeto foram feitas, adicionando-se reforços, como covas e faixas, para fortalecer a peça nas áreas de maiores tensões. Os resultados dessas alterações indicaram redução significativa das tensões nas áreas críticas do suporte. Foi avaliada, também, a fadiga do suporte e os resultados para esta nova condição foram aceitáveis.

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um modelo, através de elementos finitos, para se analisar a distribuição de tensões na faca de corte de uma colhedora de forragem.

## MATERIAL E MÉTODOS

A máquina estudada neste trabalho foi a colhedora de forragem (Figura 1) fabricada pela JF Máquinas Agrícolas, modelo JF 90 Z 10, que apresentava, segundo o fabricante, como principais características técnicas, tipo de acoplamento montado,

potência mínima exigida na tomada de potência do trator de 36,8kW, capacidade de produção estimada de 20.000 a 30.000kg.h<sup>-1</sup> e rotação do rotor de corte de 1.450rpm.



Figura 1. Colhedora de forragem JF 90 Z 10

Para se analisar as tensões da faca de corte da colhedora de forragem, foi utilizada uma análise dinâmica transiente, técnica usada para determinar a resposta dinâmica de uma estrutura sob a ação de cargas variáveis com o tempo. Esse tipo de análise pode ser utilizado para determinar a variação da posição, das forças e das tensões a que a estrutura é submetida com o tempo, como resposta a qualquer combinação de cargas estáticas, transientes e harmônicas, uma vez que a faca de corte, ao realizar o corte do material, ultrapassa a contrafaca com um ângulo de 30°, havendo variação da posição de aplicação da força ao longo da faca, com o tempo.

A força aplicada na faca de corte foi calculada em função da rotação do rotor de corte, de 1.450rpm, e da potência requerida para acionar a colhedora, estimada por dois métodos; primeiramente, utilizou-se o índice estabelecido por Berge (1951) de 0,88W.h.kg<sup>-1</sup> e, para uma capacidade máxima de colheita de 30.000kg.h<sup>-1</sup>, obteve-se uma potência de 26.400W; depois, utilizou-se a equação seguinte, apresentada pela Norma ASAE D497 (ASAE, 1990) que estabelece a determinação da potência exigida para uma colhedora de forragem de milho:

$$P = 1.500 + 0,92.F \quad (1)$$

em que:

P - potência demandada, W

F - taxa de alimentação, kg/h

Para uma taxa de alimentação de 30.000kg.h<sup>-1</sup>, obteve-se uma potência demandada de 29.000W.

Na análise do projeto considerou-se, então, o valor de 29.000W, por apresentar maior margem de segurança.

A equação de movimento utilizada na realização da análise dinâmica transiente pelo programa ANSYS é dada por:

$$[M] \cdot \{\ddot{u}\} + [C] \cdot \dot{u} + [K] \cdot \{u\} = \{F(t)\} \quad (2)$$

em que:

[M] - matriz de massa

{ $\ddot{u}$ } - vetor de aceleração dos nós

[C] - matriz de amortecimento

{ $\dot{u}$ } - vetor velocidade dos nós

[K] - matriz de rigidez total, obtida por meio do somatório das matrizes de rigidez dos elementos

{u} - vetor de deslocamento dos nós

{F(t)} - vetor força.

Um modelo paramétrico tridimensional da faca de corte foi desenvolvido em linguagem APDL (ANSYS Parametric Design Language). Na Figura 2 é apresentado um esquema da malha de elementos, gerado na solução do problema.

Foram utilizados o elemento PLANE82, formado por um quadrilátero contendo 8 nós, e o elemento SOLID45, composto por um poliedro de 6 lados, contendo 20 nós e a simulação foi realizada para um intervalo de tempo total de 3,45x10<sup>-3</sup> segundos, que corresponde ao tempo que a faca leva para percorrer a barra de corte.

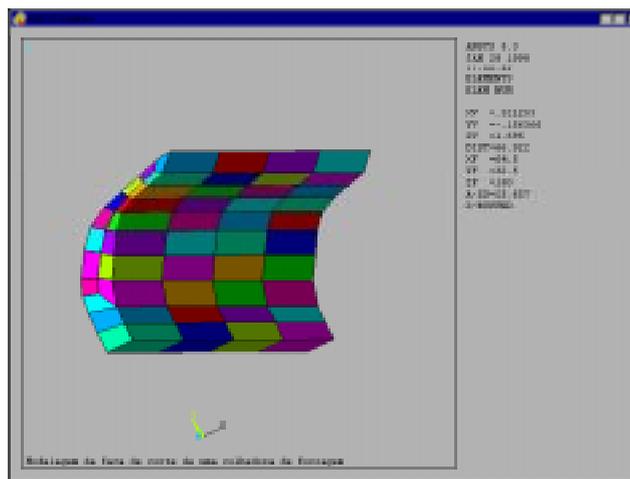


Figura 2. Malha de elementos utilizada na modelagem da faca de corte

Devido à impossibilidade de obtenção de dados experimentais para validação do modelo desenvolvido, utilizando-se elementos finitos, foram empregadas soluções analíticas para um problema mais simples, para se fazer a verificação do modelo implementado. Procurou-se utilizar a mesma malha, o mesmo tipo de elemento, as mesmas propriedades dos materiais e as dimensões aproximadas das usadas no desenvolvimento do modelo da faca de corte da colhedora de forragem.

Para a verificação do modelo de análise de tensões da faca de corte, compararam-se as tensões obtidas utilizando-se o modelo de elementos finitos e se empregando o programa ANSYS, e as obtidas por meio de solução analítica apresentada por Nash (1972). Este autor apresentou a solução analítica para obtenção de tensões em uma viga submetida a momentos fletores. Para simular esta situação no programa ANSYS, gerou-se a mesma malha de elementos utilizada, apresentada na Figura 2. Um dos lados das extremidades da faca foi mantido engastado, enquanto na outra extremidade foi aplicada uma força na direção X de 800N, conforme ilustrado na Figura 3. As tensões na direção Z obtidas com a utilização do programa ANSYS foram comparadas com os valores obtidos pela equação:

$$\sigma_z = \frac{(M_x \cdot I_{yy} + M_y \cdot I_{yx}) \cdot y + (-M_y \cdot I_{zz} - M_x \cdot I_{xy}) \cdot x}{I_{yy} \cdot I_{xx} - I_{xy}^2} \quad (3)$$

em que:

- $\sigma_z$  - tensão normal na direção Z
- $M_x$  - momento fletor na direção X
- $M_y$  - momento fletor na direção Y
- $I_{xx}$  - momento de inércia com relação ao eixo X
- $I_{yy}$  - momento de inércia com relação ao eixo Y
- $I_{xy}$  - produto de inércia com relação ao plano XY
- $x$  - abcissa do ponto de interesse em relação ao centro de gravidade da seção
- $y$  - ordenada do ponto de interesse em relação ao centro de gravidade da seção.

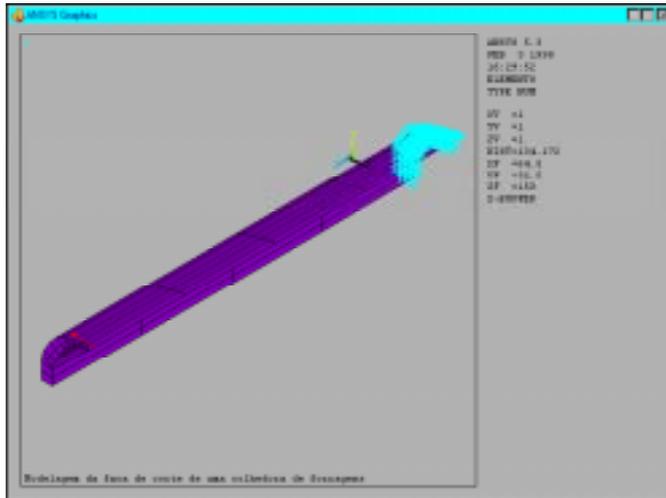


Figura 3. Condições de contorno aplicadas ao modelo de faca usado na verificação

### RESULTADOS E DISCUSSÃO

A verificação do modelo da análise de tensões na faca de corte foi feita comparando-se os valores de tensões normais obtidas na direção Z, calculadas através do programa ANSYS com os valores obtidos por uma solução analítica para a faca de corte engastada, em uma extremidade, e submetida a uma força de 800N na direção X, na outra extremidade. A Figura 4 apresenta os

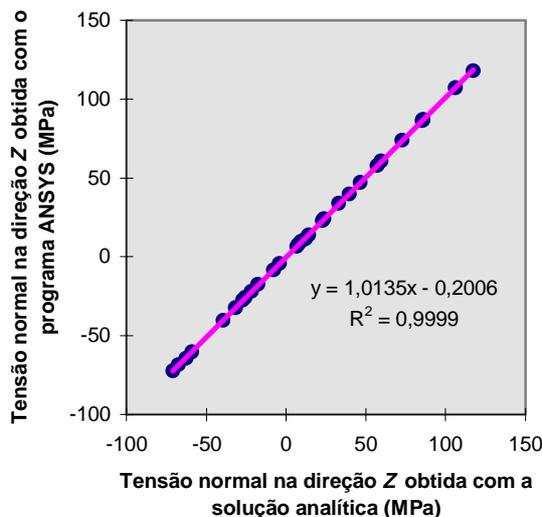


Figura 4. Comparação da tensão normal na faca de corte, obtida com o programa ANSYS e com a solução analítica

resultados desta comparação, numa regressão linear entre os resultados das duas soluções; observa-se que a inclinação da reta gerada pela regressão dos pontos foi próxima a 45°, em que a equação da reta  $y=ax+b$  apresentou  $a = 1,0135$  e  $b = -0,2006$ , mostrando a boa correlação entre os valores obtidos com o programa ANSYS e os encontrados com a solução analítica.

O programa de computador ANSYS, utilizado para a avaliação do projeto da faca de corte da colhedora de forragem, executou com sucesso a análise dinâmica da faca de corte utilizada na colhedora de forragem.

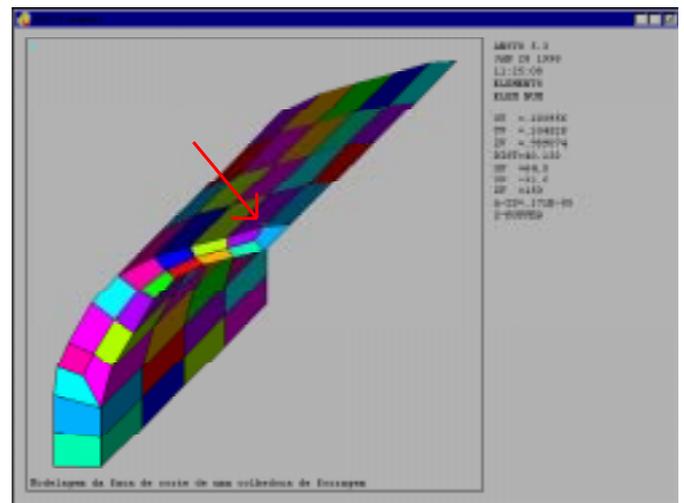


Figura 5. Posição do nó com a maior tensão equivalente na faca de corte

A tensão equivalente máxima encontrada na faca foi de 144,6MPa, localizada no nó 101, elemento 70; a posição deste nó está indicada por uma seta, na Figura 5.

A Figura 6 apresenta um gráfico com a evolução da distribuição de tensões, durante o tempo em que a faca foi exposta a uma força transiente. Foram selecionados três nós ao longo do fio de corte da faca, localizados na extremidade direita da faca, onde se inicia o processo de aplicação da força, no centro da faca e na sua extremidade esquerda. Verificou-se que a tensão equivalente em cada nó foi maior no instante em que a força estava sendo aplicada sobre cada um deles; houve deslocamento da tensão máxima ao longo da faca, de uma extremidade a outra, devido ao ângulo existente entre a faca e a contrafaca.

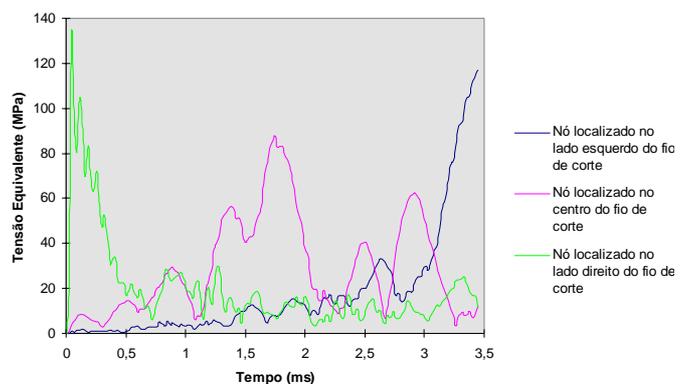


Figura 6. Evolução da distribuição de tensões ao longo de três nós da faca de corte

## CONCLUSÕES

A distribuição de tensões ao longo da faca de corte foi avaliada utilizando-se o programa ANSYS versão 5.3. O modelo foi verificado comparando-se os resultados obtidos pelo programa ANSYS com os obtidos por solução analítica para um problema mais simples. Com base nos resultados encontrados, pode-se concluir que:

1. O modelo desenvolvido usando o programa ANSYS apresentou resultados próximo aos das soluções analíticas, viabilizando a utilização do programa ANSYS para este tipo de análise realizada.

2. A tensão máxima encontrada na faca de corte foi de 144,6MPa e ocorreu na extremidade do fio de corte da faca.

3. A utilização do programa ANSYS tem grande importância na resolução de problemas de grande complexidade, quando comparada com a limitação das soluções analíticas.

## AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa concedida e pelo auxílio à pesquisa.

À Indústria JF Máquinas Agrícolas, pelo suporte financeiro.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASAE. Agricultural machinery management data. ASAE Standard No. D497. **American Society Agricultural Engineers**, St. Joseph, MI: v.37, p.285-291, 1990.

- BALASTREIRE, L.A. **Máquinas agrícolas**. São Paulo, SP: Manole, 1990. 307p.
- BERGE, O.I. Design and performance characteristics of the flywheel-type forage-harvester cutterhead. **Agricultural Engineering**, v.32, n.2, p.85-91, 1951.
- HAGHIGHI, K.; SMITH, M.G.; KRUTZ, G.W. On board testing and shape optimization of an engine mount bracket. **Applied Engineering in Agriculture**, v.6, n.4, p.382-389, 1990.
- NASH, W.A. **Theory and problem of strength of materials**. 2 ed. New York, EUA: McGraw Hill, 1972. 396p.
- QUEIROZ, D.M.; HAGHIGHI, K.; GIBSON, H.G. Finite element analysis and optimization of tillage disks. The **1994 Winter Meeting of American Society Agricultural Engineers**. ASAE, 1994, St. Joseph, MI. (Paper, 94-3540).
- SAQIB, G.S. **Optimization of chopping quality and energy for forage harvesters**. Winsconsin, Madison: UMI, 1981. 193p. Tese Doutorado.
- SHINNERS, K.J.; STELZLE, M.; KOEGEL, R.G. Improving the throwing effectiveness of an upward-cutting forage harvester. **Transactions of the American Society Agricultural Engineers**. v.37, n.4, p.1059-1067, 1994.
- SMITH, M.G.; HAGHIGHI, K.; KRUTZ, G.W.; BENNETT, L.; BUCHANAN, J. Finite element modeling and design of a diesel engine chassis mount. **Applied Engineering in Agriculture**, v.5, n.4, p.527-531, 1989.
- SRIVASTAVA, A.K.; GOERING, C.E.; ROHRBACH, R.P. **Engineering principles of agricultural machines**. St. Joseph, Michigan: ASAE, 1993. 601p.
- ZHU, J.; HAGHIGHI, K.; KRUTZ, G.W.; SMITH, M.G. Harmonic and modal analysis of a diesel engine chassis mount bracket - a finite element approach. **Applied Engineering in Agriculture**, v.5, n.4, p.467-474, 1989.