
ANÁLISE DE TENSÕES NO MECANISMO DE CORTE DE UM PROTÓTIPO DE COLHEDORA DE CANA-DE-AÇÚCAR

Ricardo Ferreira Garcia¹, Jose Francisco Sá Vasconcelos Junior²

RESUMO

Com o objetivo de se avaliar a distribuição de tensões no mecanismo de corte de um protótipo de colhedora de cana-de-açúcar acoplável a tratores de rabiças, desenvolveu-se um modelo matemático usando-se o programa computacional ANSYS, versão 10.0, 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 próximos aos da solução analítica. Para simular a aplicação das forças atuantes na faca de corte, foram consideradas uma rotação do rotor de corte de 1.830 rpm e uma potência requerida para acioná-lo, de 24,5 kW. A tensão equivalente máxima encontrada na faca de corte ocorreu na extremidade de seu fio de corte e teve o valor de 138,6 MPa, inferior ao limite de ruptura do material.

Palavras-chave: colheita mecanizada, elementos finitos, força, *Saccharum* spp., simulação

ABSTRACT

STRESS ANALYSIS APPLIED AT A CUTTER MECANISM OF SUGARCANE HARVESTER PROTOTYPE

The analysis of stress applied at the cutting mechanism of a sugarcane harvester prototype attachable to a small tractor was evaluated in this work. A model to analyze the knife stress was developed using ANSYS 10.0 finite element type software. Models verification was done by comparing ANSYS results to analytical results for simpler problems. A close agreement was found between the developed ANSYS models and analytical solutions. To simulate the application of the forces applied in the knife, a rotor rotation of 1,830 rpm and a rotor power for cutting of 24.5 kW were considered. The maximum equivalent stress found was 138.6 MPa, lower than the breaking point of the material, and its position was at the knife cut border.

Keywords: finite element, force, mechanized harvesting, *Saccharum* spp., simulation

Recebido para publicação em 10/04/2015. Aprovado em 03/11/2015.

1 - Engenheiro Agrícola, Professor da UENF/Campos dos Goytacazes-RJ, garcia@uenf.br

2 - Engenheiro Agrônomo, Professor da FAETEC/Campos dos Goytacazes-RJ, juniorferrete@yahoo.com.br

INTRODUÇÃO

No desenvolvimento de máquinas para colheita da cana-de-açúcar, sabe-se que o mecanismo de corte é uma dos um dos seus principais componentes, já que, um sistema mal projetado pode proporcionar grandes perdas de colmos. Segundo Mello & Harris (2003), a deflexão e o corte basal são responsáveis por grandes perdas na cana colhida e danos na de soqueira, uma vez que possibilita o ataque de fungos e doenças às plantas.

Pesquisadores têm trabalhado visando otimizar o processo de colheita da cana-de-açúcar e outras espécies da mesma família, a fim de melhorar o desempenho da máquina e a qualidade do produto. Berge (1951), avaliando o projeto de uma colhedora de forragem com rotor tipo volante de corte, formulou a relação entre os parâmetros ângulo e espaçamento da faca, comprimento de corte e distância entre o centro do eixo do rotor e a extremidade externa da faca. Utilizando quatro facas e uma regulagem de tamanho de corte (1,19 cm), o autor realizou testes em plantas de milho e, variando a rotação do rotor de 700 a 800 rpm, obteve valores de energia requerida de 0,83 a 0,88 W h kg⁻¹.

Toledo et al. (2013), utilizando cinco configurações de mecanismos de corte, avaliaram a qualidade da cana-de-açúcar crua cortada na colheita mecanizada. Observaram menor índice de dano nos tratamentos que utilizaram lâminas inclinadas e, em relação à altura de corte, o uso de lâminas serrilhadas e discos normais gerou o melhor resultado.

Mello & Harris (2003), em estudo sobre avaliação do desempenho de cortadores de base para colhedoras de cana-de-açúcar com lâminas serrilhadas e inclinadas, comparando os danos causados na cana e a energia gasta para cada corte, observaram que as lâminas inclinadas para frente, com passo serrilhado de 3 mm, foram as que apresentaram os melhores resultados.

Estudando o comportamento da palha da cana-de-açúcar quanto ao corte, em função do seu conteúdo de água e espessura e do ângulo oblíquo da lâmina, Bianchini & Magalhães (2004) observaram diferença significativa na força de corte quando se variou o ângulo e tendência linear de variação da força a ser aplicada, com o aumento na quantidade de palha, entre 4 e 16 t ha⁻¹. Além disso, verificaram comportamento exponencial do requerimento de força e a demanda de energia como função do conteúdo de água, até o limite de 28%, em base seca.

O projeto de máquinas com base em técnicas de projeto assistido por computador (CAD) permite produzir uma máquina mais eficiente, segura e barata, além de redução no tempo de seu desenvolvimento. Desta forma, pesquisadores têm relatado trabalhos envolvendo a aplicação de programas computacionais que auxiliem no projeto de máquinas, possibilitando sua simulação, a fim de otimizar seu projeto, eliminando o processo de adequação por tentativa e o erro. Garcia et al. (1998) realizaram análises de tensões do rotor e da faca de corte de uma colhedora de forragem utilizando o ANSYS, baseado no método de elementos finitos, e concluíram que o volume do rotor poderia ser reduzido em 58,32%.

Queiroz et al. (1994) também utilizando o método de elementos finitos, desenvolveram um modelo para analisar e otimizar o projeto de discos de arado, concluindo que o disco poderia ser reprojetoado com cerca de 44% menos de massa.

Oliveira et al. (2007), com objetivo de desenvolver um protótipo de corte de cana-de-açúcar, criaram um modelo de simulação para determinar os deslocamentos angulares do segmento no plano vertical, da faca no plano horizontal e da força de interação do segmento com a superfície. Concluíram que recursos virtuais de simulação se apresentam como poderosa ferramenta na tomada de decisões e no desenvolvimento de novos mecanismos.

Gray et al. (2009) desenvolveram uma suspensão pantográfica para o cortador basal de cana-de-açúcar para ser aplicado em sistema semimecanizado de colheita. Também trabalhando no desenvolvimento de um protótipo de cortador de base para o seguimento pantográfico do perfil em colhedoras, Volpato et al. (2002) observaram que, utilizando-se técnicas de otimização, poderiam melhorar o desempenho de flutuação do protótipo sobre perfis.

O projeto, desenvolvimento e avaliação de uma máquina envolvem etapas importantes e permitem a criação de um implemento para atender uma demanda. Trabalhando com o desenvolvimento de uma colhedora acionada por microtrator, Forcellini (1989) criou um protótipo de colhedora de forragens destinada a pequenos produtores, obtendo uma máquina robusta, de peso e dimensões reduzidas, de fácil acionamento e que tiveram as falhas observadas no equipamento corrigidas com a reconstrução de partes do protótipo.

Gupta et al. (1996) desenvolveram uma colhedora de cana-de-açúcar acionada por

um trator de rabiças de 6 kW. Esta reduziu as exigências de trabalho para cortar e tombar os caules de cana-de-açúcar e apresentou capacidade operacional de 0,13 ha h⁻¹ e eficiência de campo de 71%. Também nesta área de concepção, Adarsh *et al.* (2013) desenvolveram uma pequena colhedora de cana-de-açúcar com capacidade de 3,75 ton h⁻¹, observando redução de 34, 50 e 60% do custo, tempo e mão-de-obra, respectivamente, em relação à forma manual.

Sendo assim, objetivou-se com o presente trabalho analisar a distribuição de tensões no mecanismo de corte de um protótipo de uma colhedora de cana-de-açúcar acoplável a tratores de rabiças.

MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi realizado no Laboratório de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF).

A máquina estudada neste trabalho foi um protótipo de uma colhedora de cana-de-açúcar desenvolvido para ser acoplado a um trator de rabiças, com a função de cortar e tombar lateralmente à linha de corte, uma linha de cana-de-açúcar, com potência estimada mínima exigida na tomada de potência do trator, de 24,5 kW, capacidade de produção estimada de 20.000 a 25.000 kg h⁻¹ e rotação do rotor de corte de 1.830 rpm.

Para se analisar as tensões da faca de corte do protótipo de colhedora, foi utilizado o método de elementos finitos com auxílio do programa computacional ANSYS 10.0. Utilizou-se a análise dinâmica transiente 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 este com um ângulo de 35°, 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 1.830 rpm, e da potência requerida para acionar a colhedora, estimada por dois métodos. Primeiramente, utilizou-se o índice estabelecido por Berge (1951) de 0,88 W h kg⁻¹ para uma capacidade máxima de colheita de 25.000 kg h⁻¹, considerando-se uma produtividade de 50 t ha⁻¹, velocidade de

deslocamento de 3,6 km h⁻¹ e distância entre linhas de 1,2 m, obtendo-se uma potência demandada de 22 kW. Depois, utilizou-se a Eq. 1, apresentada pela Norma ASAE D497 (ASAE, 1990), na qual está estabelecido que a determinação da potência demandada para uma colhedora de forragem deve ser obtida utilizando-se a Eq. 1:

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

em que,

P = potência demandada (W);

F = taxa de alimentação (kg h⁻¹).

Considerando uma taxa de alimentação de 25.000 kg h⁻¹, obteve-se uma potência demandada de 24,5 kW. Na análise do projeto, considerou-se, então, o valor de 24,5 kW, por apresentar maior margem de segurança.

A equação de movimento utilizada na realização da análise dinâmica transiente pelo programa ANSYS é apresentada pela Eq. 2.:

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

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 1, é apresentado um esquema do modelo da faca de corte do protótipo de colhedora utilizado na solução do problema.

Foram utilizados o elemento PLANE82, formado por um quadrilátero contendo oito nós, e o elemento SOLID45, composto por um poliedro de seis lados, contendo 20 nós e a simulação foi realizada para um intervalo de tempo total de 3,45·10⁻³ s, que corresponde ao tempo que a faca

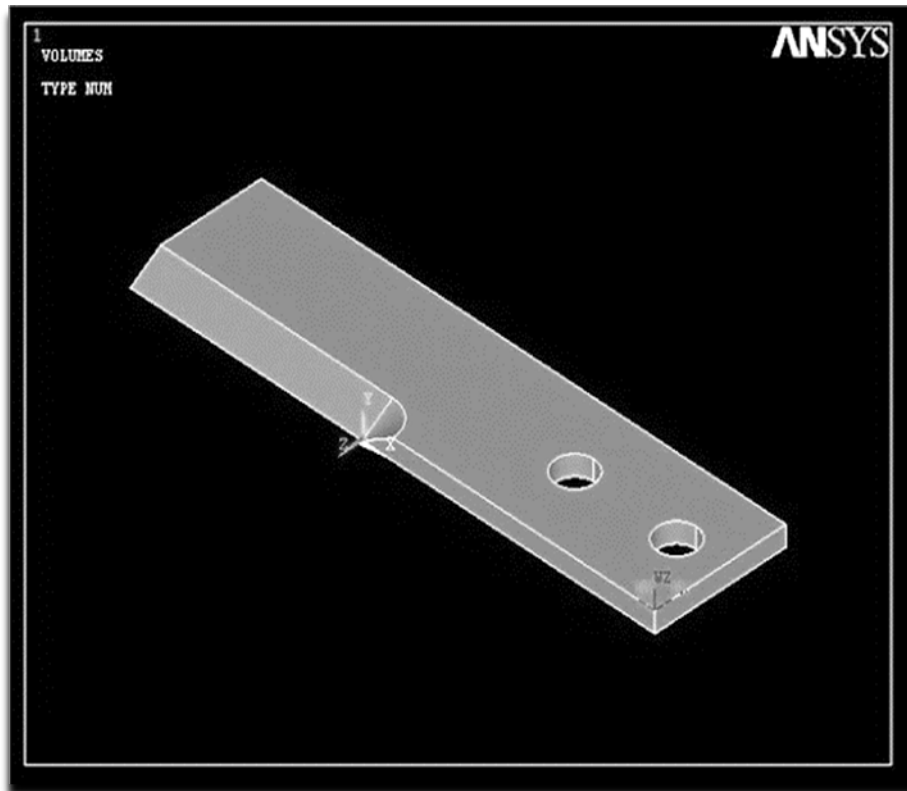


Figura 1. Modelo da faca de corte utilizado na solução do problema.

leva para percorrer toda a seção transversal de material a ser cortado, considerando a frequência do disco de corte de 1.830 rpm e oito facas dispostas no disco. Na Figura 2, é apresentado um esquema da malha de elementos da seção de corte da faca gerada na solução do problema.

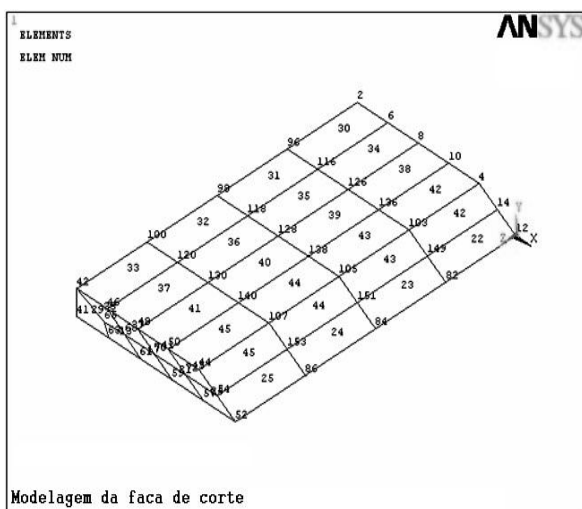


Figura 2. Malha de elementos utilizada na modelagem da seção de corte da faca.

Foram empregadas soluções analíticas para um problema mais simples utilizando-se elementos finitos, para realizar a verificação do modelo implementado, devido à impossibilidade de obtenção de dados experimentais para validação dos modelos desenvolvidos. Desta forma, utilizou-se a mesma malha, tipo de elemento, propriedades dos materiais e as dimensões aproximadas das usadas no desenvolvimento do modelo da faca de corte do protótipo de colhedora de cana-de-açúcar.

Para se realizar a verificação do modelo de análise de tensões da faca de corte, compararam-se as tensões obtidas utilizando o modelo de elementos finitos, 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 o mesmo elemento utilizado, apresentado na Figura 1. Um dos lados das extremidades da faca foi mantido engastado, enquanto na outra extremidade foi aplicada uma força na direção X

de 583 N, de acordo com a potência demandada e frequência de corte. Em trabalho de avaliação da influência do formato e velocidade da lâmina nas forças de corte para cana-de-açúcar, considerando uma lâmina serrilhada com ângulo de 75° para trás, a 600 rpm, Mello (2005) observou uma força de corte aproximada de 225 N, porém, em trabalho de análise do efeito das dimensões de caules de cana sobre a força e energia requerida para o corte, Taghinezhad et al. (2012) observaram forças médias de corte de 313,75; 425,03 e 529,74 N, para caules de diâmetro pequeno, médio e largo, respectivamente. Samaila et al. (2012), com o objetivo de calcular a demanda de energia para o corte de cana-de-açúcar em máquinas acionadas por trator, determinaram força inercial, energia de corte e potência de 572,27 N, 23,83 J e 2.254,86 W, respectivamente.

As tensões na direção Z obtidas com a utilização do programa ANSYS foram comparadas com os valores obtidos utilizando-se a Eq. 3.:

$$\sigma_z = \frac{(M_x \cdot I_y + M_y \cdot I_x) \cdot y + (-M_y \cdot I_z - M_x \cdot I_y) \cdot x}{I_y \cdot I_x - I_x^2} \quad (3)$$

em que,

σ_z = tensão normal na direção Z (N m⁻²);
 M_x = momento fletor na direção X (N m);
 M_y = momento fletor na direção Y (N m);
 I_{xx} = momento de inércia com relação ao eixo X (m⁴);
 I_{yy} = momento de inércia com relação ao eixo Y (m⁴);
 I_{xy} = produto de inércia com relação ao plano XY (m⁸);
 x = abcissa do ponto de interesse em relação ao centro de gravidade da seção (m);
 y = ordenada do ponto de interesse em relação ao centro de gravidade da seção (m).

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 utilizando-se o 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 583 N na direção X, na outra extremidade. Na Figura 3, são apresentados os resultados desta comparação, numa regressão linear entre os resultados das duas soluções.

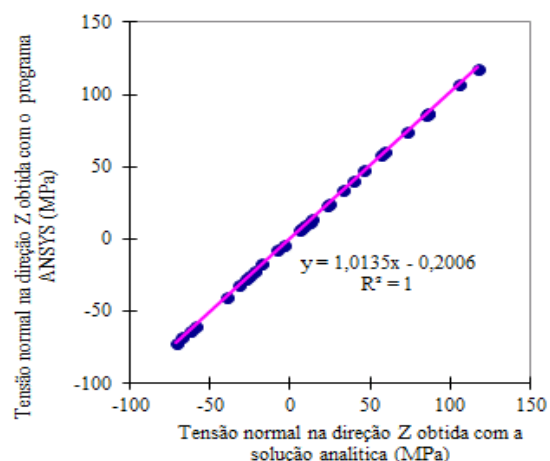


Figura 3. Comparação da tensão normal na faca de corte, obtida com o programa ANSYS e com a solução analítica.

Pode-se observar, na Figura 3, 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, executou, com sucesso, a análise dinâmica da mesma. A tensão máxima equivalente (von Mises) encontrada na faca foi de 138,6 MPa, localizada na extremidade de corte da faca, no ponto de início do corte, e está abaixo da tensão de ruptura do aço SAE 1020, sendo considerado na simulação o valor de 250 MPa para a tensão de cisalhamento e 450 MPa para as tensões de tração e compressão.

Em trabalho de avaliação de uma colhedora de forragem, modelo JFZ10, Garcia et al. (1998) observaram tensão equivalente máxima encontrada na faca de 144,6 MPa, próxima a observada neste trabalho. Taghinezhad et al. (2012) observaram

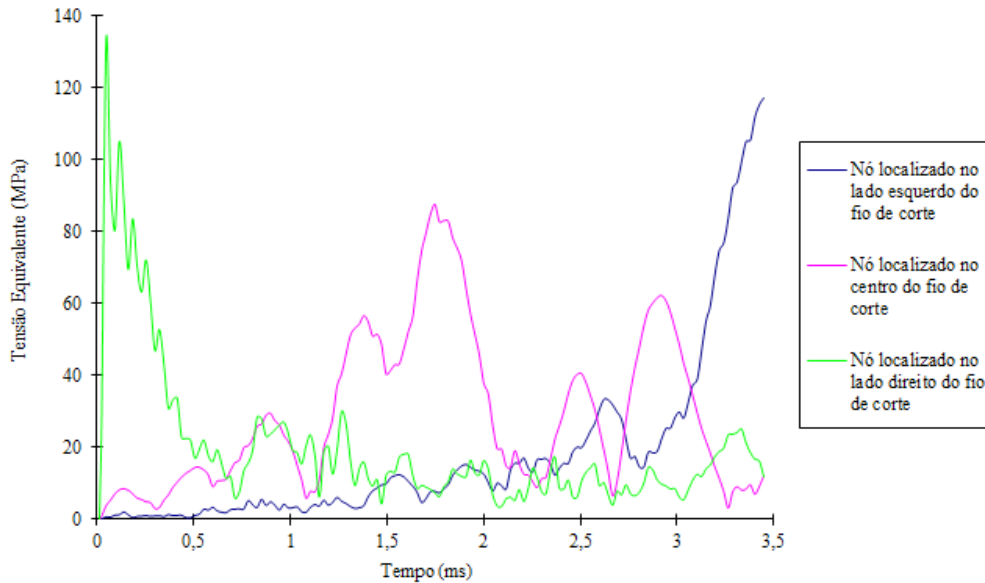


Figura 4. Evolução da distribuição de tensões ao longo de três nós da faca de corte.

tensões de ruptura de 1,33; 1,21 e 0,98 MPa, respectivamente, para colmos de cana-de-açúcar com diâmetros pequeno, médio e largo, sendo estes valores muito inferiores à tensão máxima equivalente observada para a faca.

Na Figura 4, é apresentado um gráfico com a evolução da distribuição de tensões, durante o tempo em que a faca foi exposta a uma força transiente. Foram selecionados nós ao longo do fio de corte da faca, localizados da extremidade direita da faca, onde se inicia o processo de aplicação da força, passando pelo centro da faca até 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 do comprimento da faca, de uma extremidade a outra, devido ao ângulo existente entre a faca e o material de corte, evento também observado por Garcia et al. (1998). Toledo et al. (2013) também observaram melhor rendimento de corte com uso de lâminas inclinadas em ensaios com lâminas em diferentes ângulos de ataque, determinando menor índice de danos nas soqueiras. Mello (2005), em avaliação de diferentes angulações de lâminas de corte para a cana-de-açúcar, observou que houve redução nas

forças de corte com o aumento da velocidade de lâminas inclinadas em relação à lâmina reta.

CONCLUSÕES

- O modelo desenvolvido usando o programa ANSYS apresentou resultados próximos aos das soluções analíticas, viabilizando a utilização do programa ANSYS para o tipo de análise realizada;
- A tensão máxima encontrada na faca de corte foi de 138,6 MPa e ocorreu na extremidade do seu fio de corte;
- A utilização do programa ANSYS é de grande importância na resolução de problemas de grande complexidade, podendo ser considerada ótima alternativa em relação às soluções analíticas.

AGRADECIMENTOS

À Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo auxílio à pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADARSH, J.J.; SHASHANK, K.; SRINIVAS, R.L.; VINAY, N.T.; KIRAN, P. Design and fabrication of small scale sugarcane harvesting machine. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, Rowland Heights, v.2, n.3, p.204-210, 2013.

ASAE - American Society for Agricultural Engineers. Agricultural machinery management data. St. Joseph: ASAE. 37ed., p.285-291, 1990. ASAE Standard n. D497.

BIANCHINI, A.; MAGALHÃES, P.S.G. Comportamento da palha de cana-de-açúcar submetida ao corte por meio de ensaios de bancada. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.8, n.2/3, p.304-310, 2004.

BERGE, O.I. Design and performance characteristics of the flywheel-type forage-harvester cutterhead. *Agricultural Engineering*, St. Joseph, v.32, p.85-91, 1951.

FORCELLINI, F.A. Desenvolvimento do protótipo de colhedora de forragens acoplável a tratores de rabiças. 1989. 119f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, 1989.

GARCIA, R.F.; QUEIROZ, D.M.; DIAS, G.P. Análise de tensões na faca de corte de uma colhedora de forragem. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.2, p.219-223, 1998.

GRAY, G.R.; MAGALHÃES, P.S.G.; BRAUNBECK, O.A. Suspensão pantográfica para corte de base de cana-de-açúcar. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.39, p.766-771, 2009.

GUPTA, C. P. LWIN, L. KIATIWAT, T. Development of a self-propelled single-axle sugarcane harvester. *Applied Engineering in Agriculture*, St. Joseph, v.12, n.4, p. 427-434, 1996.

MELLO, R.C. Influência do formato e velocidade da lâmina nas forças de corte para cana-de-açúcar. *Acta Scientiarum Agronomy*, Maringá, v.27, p.661-665, 2005.

MELLO, R.C.; HARRIS, H. Desempenho de cortadores de base para colhedoras de cana-de-açúcar com lâminas serrilhadas e inclinadas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.7, p.355-358, 2003.

NASH, W.A. Theory and problem of strength of materials. 2 ed. New York: McGraw Hill, 1972. 396p.

OLIVEIRA, C.A.A.; BRAUNBECK, O.A.; VOLPATO, C.E.S. Análise do movimento e desenvolvimento de um protótipo de cortador basal com discos bi-articulados. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.11, p.230-234, 2007.

QUEIROZ, D.M.; HAGHIGHI, K.; GIBSON, H.G. Finite element analysis and optimizations of tillage disks. In: 1994 International Winter Meeting, 1994, Atlanta. Anais... Atlanta: ASAE, 1994. 17f. ASAE Paper No. 94-3540.

SAMAILA, S.; AL-SHARIEF, H.M.; ABDULKADIR, S.A. Development of a tool to determine the energy required to cut and top sugarcane. *AU Journal of Technology*, Bangkok, v.16, p.59-62, 2012.

TAGHINEZHAD, J.; ALIMARDANI, R.; JAFARI, A. Effect of sugarcane stalks' cutting orientation on required energy for biomass products. *International Journal of Natural and Engineering Sciences*, Ankara, v.6, p.47-53, 2012.

TOLEDO, A.; SILVA, R.P.; FURLANI, C.E.A. Quality of cut and basecutter blade configuration for the mechanized harvest of green sugarcane. *Scientia Agrícola*, Piracicaba, v.70, p.384-389, 2013.

VOLPATO, C.E.S.; BRAUNBECK, O.A.; OLIVEIRA, C.A.A.; Desenvolvimento e avaliação de um protótipo de cortador de base para colhedoras de cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.6, p.345-348, 2002.