

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**APRIMORAMENTO DE UM DESPALHADOR DE  
COLMOS INTEIROS DE CANA-DE-AÇÚCAR POR ROLOS  
OSCILANTES COM DIFERENCIAL DE VELOCIDADES**

**RONALDO ANTONIO DA SILVA**

CAMPINAS  
ABRIL DE 2003

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**APRIMORAMENTO DE UM DESPALHADOR DE  
COLMOS INTEIROS DE CANA-DE-AÇÚCAR POR ROLOS  
OSCILANTES COM DIFERENCIAL DE VELOCIDADES**

Dissertação submetida à banca examinadora  
para obtenção do título de Mestre em  
Engenharia Agrícola na área de concentração  
em Máquinas Agrícolas.

**RONALDO ANTONIO DA SILVA**

Orientador: Prof. Dr. OSCAR ANTONIO BRAUNBECK

CAMPINAS  
ABRIL DE 2003

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

Si38a Silva, Ronaldo Antonio da  
Aprimoramento de um despalhador de colmos inteiros de  
cana-de-açúcar por rolos oscilantes com diferencial de  
velocidades / Ronaldo Antonio da Silva.--Campinas, SP:  
[s.n.], 2003.

Orientador: Oscar Antonio Braunbeck  
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de  
Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Cana-de-açúcar. 2. Velocidade. 3. Força (Mecânica).  
4. Mecânica. 5. Movimento. 6. Aceleração (Mecânica). I.  
Braunbeck, Oscar Antonio. II. Universidade Estadual de  
Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. III. Título.

## **EPIGRAFE**

*Quando penso nas pessoas que eu amo  
E que muitas delas não caminham mais  
Pelas ruas de nossa cidade  
Nem habitam mais em nossas casas  
E nem ouvem mais o nosso canto  
Mas residem para sempre  
Em nossa saudade*

*Quando penso... Tantas mãos que hoje faltam  
Tantos risos apagados  
Que é em vão guardar pedaços de recordações  
Eu me agarro à esperança de nos vermos  
Caminhando pelas Ruas de Cristal  
Na cidade eterna  
Onde não haverá adeus*

(Ruas de Cristal, Ednelson da silva)

A Deus, a Cristo e ao Espírito Santo,  
**AGRADEÇO**

A minha companheira Mara e minhas filhas Isabella e Mariana,  
**DEDICO**

*In memoriam a Clayton Batista,*  
**OFEREÇO**

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais Antonio e Elena, irmãos José Antonio, Joel e Paulo e irmãs Maria Helena, Rosângela e Rosemeire, pelo apoio;

Aos professores doutores Oscar Antonio Braunbeck e Paulo Sergio G. Magalhães, pelas orientações;

Ao órgão de fomento CAPES, pela bolsa de estudo concedida e FAPESP, pelo financiamento da construção do protótipo do despalhador;

Aos professores doutores Raquel, Mara e Maciel pela atenção e a Faculdade de Engenharia Agrícola / Unicamp, pelo suporte;

Ao professores doutores da Feis/Unesp Malcolm e Vinícios pelo incentivo;

Aos colegas Jesus, Walterley, Adriano, Gilmar, Aristóteles, Bertol, Verusa, Márcia, Nelma, Sueli, Roseli, Lúcia, Celso, Carioca, Marcão, Fausto, Bianchini e Admilson pelo companheirismo;

Ao Carlão, Ariston, Gentil, Jorginho, Omar e Edgar pela grande amizade;

Aos funcionários Aninha, Rô, Marta, Claudinho, Chicão, Luiz, Zé, Leandro, Ivan, André, Sergio e Freire pelo auxílio;

A minha sogra, cunhados, co-cunhados, cunhadas, co-cunhadas, sobrinhos e sobrinhas;

A todos que direta e indiretamente participaram de alguma forma desta realização.

## SUMÁRIO

	Páginas
LISTA DE TABELAS	viii
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE SÍMBOLOS	xi
RESUMO	xiii
ABSTRACT	xiv
1. INTRODUÇÃO	01
2. OBJETIVOS	03
2.1. Objetivo geral	03
2.2. Objetivos específicos	03
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	04
3.1. A planta de cana-de-açúcar	04
3.1.1. A cultura da cana-de-açúcar no Brasil	04
3.1.2. Aspectos econômicos sobre a cana-de-açúcar para o Brasil	05
3.2. Processo de colheita da cana-de-açúcar	05
3.2.1. Colheita manual	05
3.2.2. Sistema de colheita mecanizada	07
3.2.3. Formas de colheita mecânica da cana-de-açúcar	08
3.2.3.1. A cana picada	09
3.2.3.2. A cana inteira	11
3.2.3.3. A cana crua	11
3.2.3.3.1. Matéria estranha presente na cana e sua influência na indústria	12
3.2.3.4. A cana queimada	13
3.2.3.4.1. A queima da cana e o seqüestro de carbono	15
3.2.3.4.2. A legislação ambiental e o cultivo da cana-de-açúcar	15
3.3. Limpeza da cana-de-açúcar sem queimar	16
3.3.1. Ensaio mecânico com folhas de cana-de-açúcar	16
3.3.2. Sistemas de limpeza da cana	17

3.4. Potencial energético dos resíduos vegetais da cultura da cana-de-açúcar	21
3.4.1. Ciclagem de energia	21
4. MATERIAL E MÉTODOS	22
4.1. Material	22
4.1.1. Colmos de cana-de-açúcar	22
4.1.2. Protótipo do despalhador	22
4.1.2.1. Rolos com taliscas retas e taliscas helicoidais	23
4.1.3. Inversor de frequência	24
4.1.4. Ferramentas computacionais	24
4.2. Método	24
4.2.1. Modelagem dinâmica do despalhador	25
4.2.1.1. Bases	25
4.2.1.1.1. Transformação de coordenadas	26
4.2.1.2. Pesos	26
4.2.1.2.1. Peso do conjunto braço-rolô na base inercial e na base local (P1)	26
4.2.1.3. Cargas	27
4.2.1.3.1. Carga dinâmica de despalhamento ( $F_d$ )	27
4.2.1.3.2. Reação no apoio (RR)	27
4.2.1.3.3. Força do amortecedor ( $F_a$ )	27
4.2.1.3.4. Carga estática na mola ( $F_m$ )	28
4.2.1.3.5. Posicionamento inicial do braço ( $\theta_{10}$ )	28
4.2.1.3.5.1. Variação da mola ( $\Delta$ )	29
4.2.1.3.6. Equilíbrio dinâmico de forças (Lei de Newton)	30
4.2.1.3.7. Aceleração do centro de massa ( $a_{G_i}$ )	30
4.2.1.3.8. Equilíbrio dinâmico de momentos (Lei de Euler)	31
4.2.1.3.9. Comportamento mecânico do colmo (Diametral)	32
4.2.1.3.9.1. Deformação do colmo (Def)	32
4.2.2. Análise da carga dinâmica média de despalhamento e deformação dos colmos	34
4.2.3. Substituição dos rolos do despalhador	34

4.2.4. Condições de regulagem do dispositivo de despalhamento para o ensaio de passagem dos colmos	35
4.2.4.1. Obtenção dos diferenciais de velocidades de rotação dos rolos	35
4.2.4.1.1. Obtenção da configuração do diferencial de velocidades	35
4.2.5. Cargas estáticas nas molas helicoidais superiores e inferiores	38
4.2.6. Folga entre os rolos superiores e inferiores	39
4.2.7. Acionamento do dispositivo por meio do Inversor de Frequência	39
4.2.8. Colmos de cana-de-açúcar	40
4.2.9. Ensaio de passagem dos colmos	41
4.2.10. Determinação da velocidade dos colmos durante o ensaio de passagem	43
4.2.11. Avaliação dos danos mecânicos nos colmos	43
4.2.12. Análise estatística do ensaio de passagem dos colmos	44
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
5.1. Características dimensionais dos grupos colmos da variedade de cana-de-açúcar adotada	45
5.2. Simulação das cargas dinâmicas de despalhamento e deformações dos colmos	46
5.2.1. Análise das forças dinâmicas de despalhamento ( $F_y$ )	46
5.2.2. Análise das deformações dos colmos ( $Def$ )	49
5.3. Análise do ensaio de passagem dos colmos pelo dispositivo de despalhamento	52
5.3.1. Análise do despalhamento	52
5.3.2. Análise dos danos nas gemas dos colmos	54
5.3.3. Análise dos danos nos colmos	56
5.3.3.1. Danos na base dos colmos	56
5.3.3.2. Danos no meio dos colmos	57
5.3.3.3. Danos no topo dos colmos	57
6. CONCLUSÕES	60
7. SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	61
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62
ANEXOS	

## LISTA DE TABELAS

	Páginas
Tabela 1. Dados utilizados na simulação do movimento do despalhador.	33
Tabela 2. Diferenciais de velocidade de rotação dos rolos utilizada por TANAKA (1996).	35
Tabela 3. Constantes elásticas médias das molas (PIGNELLI e BRAUNBECK, 2001).	38
Tabela 4. Cargas estáticas nas molas superiores e inferiores e cargas estáticas resultantes.	39
Tabela 5. Velocidades de rotação dos rolos e de passagem dos colmos pelo despalhador.	43
Tabela 6. Avaliação dos danos mecânicos nos colmos (Adaptado de TANAKA, 1996).	43
Tabela 7. Comprimentos médios e diâmetros dos colmos de cana-de-açúcar.	45
Tabela 8. Cargas dinâmicas simuladas na entrada e na saída dos colmos.	48
Tabela 9. Máximas e médias de estabilização das deformações simuladas.	51

## LISTA DE FIGURAS

	Páginas
Figura 1. Colheita manual de cana-de-açúcar.	06
Figura 2. Colheita mecanizada de cana-de-açúcar.	08
Figura 3. Componentes de uma colhedora comercial de cana-de-açúcar.	09
Figura 4. Prática da queima na pré-colheita da cana-de-açúcar.	13
Figura 5. Área de cultivo de cana-de-açúcar próximo a centros urbanos.	14
Figura 6. Seção transversal do modelo limpadora por rolos puxadores (SRIVASTAVA e SINGH, 1990).	18
Figura 7. Seção transversal do modelo desenvolvido por SHUKLA et al. (1991).	18
Figura 8. Vista frontal do despalhador de colmos inteiros (TANAKA, 1996).	19
Figura 09. Despilhador inercial com facas oscilantes (PAGNANO, 1997).	20
Figura 10. Mecanismo de despilhamento de cana por rolos puxadores (OLIVEIRA, 1998).	20
Figura 11. Esquema do despilhador em estudo (Adaptado de TANAKA, 1996).	23
Figura 12. Modelo do rolo despilhador com taliscas retas (a) e do rolo despilhador com taliscas helicoidais (b).	23
Figura 13. Motor (a) e painel de controle do Inversor de Frequência (b).	24
Figura 14. Representação geométrica do braço superior articulado que sustenta o rolo despilhador.	25
Figura 15. Rolo superior oscilante com taliscas helicoidais.	34
Figura 16. Vista lateral do despilhador.	35
Figura 17. Vista frontal do despilhador.	36
Figura 18. Vista posterior do despilhador.	36
Figura 19. Folga “f” entre os rolos superiores e inferiores.	39
Figura 20. Cardan utilizado para acoplar o Inversor ao despilhador.	40
Figura 21. Zona de desponte do colmo.	40
Figura 22. Grupo de colmos antes de ser submetido ao ensaio.	41
Figura 23. Despilhador com a tela e a grade de proteção.	42
Figura 24. Introdução manual e individual dos colmos pelo despilhador.	42

Figura 25. Passagem do colmo pelo despalhador.	42
Figura 26. Simulação das cargas dinâmicas de despalhamento, a partir das cargas estáticas resultantes.	47
Figura 27. Simulação das deformações dos colmos, a partir das cargas estáticas resultantes.	50
Figura 28. Despalhamento dos colmos. Coeficiente de variação de 19,3%.	53
Figura 29. Danos nas gemas dos colmos. Coeficiente de variação de 35,2%.	55
Figura 30. Danos na base dos colmos. Coeficiente de variação de 14,0%.	57
Figura 31. Danos no meio dos colmos. Coeficiente de variação de 40,5%.	58
Figura 32. Danos no topo dos colmos. Coeficiente de variação de 79,5%.	58

## LISTA DE SÍMBOLOS

- 1: Braço articulado;
- 2: Rolo despalhador;
- A: Centro do rolo despalhador;
- B: Ponto de fixação da mola;
- C: Posição da mola;
- D: Ponto de despalhamento;
- Def.: Deformação do colmo;
- $E_{sup}$ : regulagem na mola superior;
- $E_{inf}$ : regulagem na mola inferior;
- $F_m$ : Força da mola;
- $F_x$ : Força horizontal;
- $F_y$ : Força vertical;
- G: Centro de massa do conjunto rolo-braço
- H: Coordenada horizontal do ponto de fixação da mola;
- $K_m$ : constante elástica da mola;
- L: Comprimento genérico da mola;
- $mg_1$ : Peso do conjunto braço-rolo;
- O: Centro de rotação do braço;
- R: Raio do rolo depalhador;
- $R_a$ : Comprimento do braço articulado;;
- $R_c$ : Ponto de aplicação de força da mola;
- $R_g$ : Distancia entre o centro de massa do centro de rotação do braço;
- $RR_x$ : Reação de apoio horizontal;
- $RR_y$ : Reação de apoio vertical;
- V: Coordenada vertical do ponto de fixação da mola;
- X: Base horizontal inercial;
- $X_1$ : Base horizontal solidária ao braço articulado;
- XM: Base horizontal solidária à mola e amortecedor;

Y: Base em vertical inercial

Y<sub>1</sub>: Base vertical solidária ao braço articulado;

YM: Base vertical solidária à mola e amortecedor;

$\theta_1$ : Ângulo inicial do braço articulado;

$\theta_m$ : Orientação angular da base local da mola;

$\dot{\varpi}_1$ : Aceleração angular do braço articulado;

$\mu_d$ : Coeficiente de raspagem.

## RESUMO

A colheita mecanizada da cana-de-açúcar atualmente utilizado no Brasil adota tecnologia de picagem dos colmos, o qual provoca perdas de matéria-prima. Além disso, a prática da queima dos canaviais na pré-colheita, é ainda bastante difundida, desperdiçando um potencial fonte energético para a matriz nacional. A fim de reduzir as perdas e considerando a necessidade de se eliminar a prática da queima, nesta dissertação, objetivou-se aprimorar o protótipo do dispositivo de despalhamento de colmos inteiros, por rolos oscilantes com diferencial de velocidades, desenvolvido no Laboratório de Protótipos da FEAGRI / UNICAMP. Promoveram-se substituições dos rolos originais por outros de diferente configuração e alterações no diferencial das velocidades. Desenvolveu-se a modelagem matemática, por meio do método Newton-Euler, para simulação da carga dinâmica de despalhamento e da deformação dos colmos, geradas a partir de cargas estáticas resultante aplicadas nos rolos superiores. Realizou-se ensaio de passagem dos colmos pelo dispositivo, para avaliação do despalhamento e danos ocorridos nos mesmos. Concluiu-se que o valor de 307 N, com sentido descendente e de 409 N, com sentido ascendente, são parâmetros para ajuste de cargas estáticas aplicadas pelas molas do dispositivo. A frequência natural de oscilação encontra-se próxima da frequência de excitação aplicada pela passagem do colmo, o que contribui para um aumento da amplitude de oscilação da força normal aplicada ao colmo. Deformações próximas de 2 mm, são capazes de provocar fissuras e/ou rupturas dos colmos. A carga estática utilizada no Tratamento 1, apresentou a maior porcentagem de remoção de folhas, 93% de despalhamento; mas apresentou também altos índices de danos nos colmos.

## **ABSTRACT**

The mechanical harvesting system currently adopted in Brazil for sugarcane is in billets, which induces accordingly to the specialized literature, to great losses of row material if compared to the traditional method of whole sugarcane harvesting. Besides that the practices of burning it prior to harvest, which still very present nowadays, causes the wasting of a great potential in the energetic national matrix. Aiming to reduce the sugarcane losses during the harvest process, and considering the necessity of eliminating the practice of burning, the present work, have for objective upgrade the prototype of a detrashing device for whole sugarcane stalk. The prototype design in Prototype Laboratory at FEAGRI/UNICAMP, consist of rotating cylinders with differential angular velocity. The focus of research was the design and evaluation of alternative cylinders configuration and variations in its differential angular velocity. The dynamic force for detrashing and the deformation of the sugarcane stalk; generated from applied loads were simulated using computer software, trough of the methods Newton-Euler. To evaluate the detrashing capacity of the device and damages caused in the sugarcane stalk experimental tests were done. One concluded that the value of 307 N, with descending direction and of 409 N, with ascending direction, is parameters for static load adjustment applied by the springs of the device. The natural frequency of oscillation meets next to the frequency of excitement applied for the ticket of sugarcane stalk, what it contributes for an increase of the amplitude of oscillation of the applied normal force to sugarcane stalk. Deformations next to 2 mm, is capable to provoke fictions and/or ruptures of the sugarcane stalks. The used static load in Treatment 1, presented the biggest percentage of leaf removal, 93% of detrashing; but it also presented high indices of damages in the sugarcane stalks.

## 1. INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar é uma das culturas mais exploradas na agricultura brasileira, assumindo grande importância sócio-econômica, pois gera, direta e indiretamente, mais de 1,3 milhões de empregos e representa cerca de 2,5% do PIB do Brasil. O setor sucroalcooleiro ocupa lugar de destaque no complexo agroindustrial nacional, produzindo açúcar, álcool combustível e outros produtos de relevância para a economia. O Estado de São Paulo é o principal gerador dos produtos provenientes desta cultura e o maior produtor do país, possuindo quase a metade da área total plantada.

No processo de colheita da cana-de-açúcar, o sistema manual emprega um número elevado de trabalhadores, o qual nem sempre se encontra disponível no mercado, devido a outras necessidades agrícolas que ocorrem simultaneamente. Em regiões com alta concentração como a de Ribeirão Preto-SP, a oferta de mão-de-obra, em época de colheita, tem sido insuficiente exigindo um crescimento da colheita mecanizada. Todavia a mecanização da colheita ainda é incipiente e a prática da queima na pré-colheita é bastante difundida, aumentando significativamente os impactos negativos sobre o meio ambiente, além de desperdiçar uma fonte potencial energética considerável para a matriz brasileira.

Nos últimos anos, entretanto, o setor sucroalcooleiro tem passado por profundas mudanças, principalmente nas leis que o regulam. De acordo com MAGALHÃES e BRAUNBECK (1998) a exigência por parte dos ambientalistas, de que a colheita da cana-de-açúcar seja realizada sem queima, tem crescido e encontrado respaldo político, à medida que a demanda por investimentos de capital em outros setores tecnológicos exige um melhor controle da qualidade do ar. Outro motivo, é que o setor sucroalcooleiro passou a valorizar as vantagens econômicas e ecológicas da recuperação do palhicho.

Neste sentido, a colheita mecanizada de cana crua e inteira, além de aliviar os impactos negativos sobre o meio ambiente e disponibilizar uma fonte de energia potencial, também procuraria reduzir perdas de matéria-prima proveniente da picagem dos colmos, parte do processo de limpeza das colhedoras comerciais de cana-de-açúcar utilizados no Brasil. No entanto, um dos problemas encontrado na colheita mecanizada de cana crua e inteira, é a remoção das folhas dos colmos, as quais promovem aumentos nos gastos de transporte da cana do campo até a usina, devido à redução na densidade de carga. Outra implicação é a

diminuição do grau de pureza da matéria-prima, para a obtenção dos produtos comerciais no processo industrial.

Vários países optaram pela colheita de cana-de-açúcar crua, utilizando diferentes métodos que, por razões topográficas, agronômicas e gerenciais, não se adaptam adequadamente às condições brasileira. Quanto à colheita da cana crua e inteira, hoje são poucas as opções para implantação deste método por apresentar problemas operacionais, como os descritos anteriormente que dificultam sua utilização, representando um grande desafio tecnológico.

Em função disto, a Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP, vem desenvolvendo projetos nesta linha de pesquisa, com o intuito de aprimorar o processo de colheita mecanizada de cana-de-açúcar crua e inteira, procurando adequar as condições brasileiras de tecnologia e de campo; o que certamente poderá trazer benefícios de ordens econômica, social e ambiental, justificando os investimentos em pesquisa sobre este método.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo geral**

O presente trabalho de pesquisa teve como objetivo geral aprimorar um despalhador de colmos inteiros de cana-de-açúcar, por rolos oscilantes com diferencial de velocidades, projetado por TANAKA (1996).

### **2.2. Objetivos específicos**

1. Equacionar o modelo dinâmico e simular as cargas dinâmicas de despalhamento e as deformações nos colmos, geradas pelo despalhador;

2. Verificar se as alterações em função do processo de otimização proposto por TANAKA (2001), melhoraram o desempenho do despalhador.

### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1. A planta de cana-de-açúcar**

A planta de cana-de-açúcar é uma gramínea perene, pertence ao gênero *Saccharum*, própria de climas tropicais e subtropicais, possivelmente originária do sudeste da Ásia, talvez das regiões de Assam e Bengala. Há várias espécies do gênero *Saccharum* (*S. officinarum*, *S. spontaneum*, *S. robustum*, etc.), entretanto as variedades em uso são praticamente todas híbridas, sendo denominadas *Saccharum* spp, nas quais procura-se aliar a rusticidade de algumas espécies, como a *S. spontaneum*, às boas qualidades das variedades nobres de *S. officinarum* (PASSOS et al., 1973).

De acordo com ALFONSI et al. (1987) essa planta sofre as influências das condições climáticas no curso do ano. Devido às necessidades de altas taxas de sacarose, a planta precisa encontrar condições de temperatura e umidade adequadas que permitam um desenvolvimento suficiente durante as fases vegetativas, seguidas de um período com restrição hídrica ou térmica para forçar o repouso vegetativo e, conseqüentemente, o enriquecimento em sacarose na época do corte.

##### **3.1.1. A cultura da cana-de-açúcar no Brasil**

A cana-de-açúcar é uma das culturas mais exploradas no Brasil e, em função das dimensões territoriais do país, essa cultura encontra as mais variadas condições climáticas. Possivelmente, é o único país do mundo com duas épocas de colheitas anuais, ou seja, uma em meados de setembro-abril (na região norte-nordeste) e a outra em meados de maio-dezembro (na região centro-sul).

Segundo COLETI (1987) a melhor época para o plantio da cana no Brasil, é entre janeiro e março, iniciando seu desenvolvimento para obter o primeiro corte, caso não seja utilizado produtos químicos para a maturação precoce, em aproximadamente 18 meses (cana de ano e meio). O ciclo da cana-de-açúcar pode variar de seis (5 cortes) a nove anos (oito cortes), dependendo do tipo de solo e das condições de manejo adotadas.

### **3.1.2. Aspectos econômicos sobre a cana-de-açúcar para o Brasil**

No contexto sócio-econômico do Brasil, a cultura da cana-de-açúcar assume um papel de grande relevância para o país. O setor sucroalcooleiro representa um índice por volta de 2,5% do PIB nacional, movimentando cerca de R\$ 12,7 bilhões por ano gerando diretamente mais de 1 milhão de empregos e, indiretamente mais de 300 mil, além de dar suporte a mais de 500 empresas de insumos (CANAWEB/JORNALCANA, 2001).

O mercado brasileiro é o único do mundo a utilizar o álcool em larga escala, como combustível alternativo ao petróleo. Hoje, o álcool é reconhecido mundialmente pelas suas vantagens ambientais, sociais e econômicas; os países desenvolvidos já se mostram interessados nesta tecnologia. Na safra 1999/2000 foram produzidas mais de 306 milhões de toneladas de cana-de-açúcar que, por sua vez, transformaram-se em 20 milhões de toneladas de açúcar e quase 13 bilhões de litros de álcool hidratado (REVISTA GLOBO RURAL, 2001).

O do setor sucroalcooleiro nacional, possui 308 indústrias em atividade, sendo 81 destilarias autônomas e 227 usinas de açúcar e álcool. A previsão do volume para a aquisição de produtos e insumos e a contratação de serviços para 2001, ultrapassa a expressiva soma de R\$ 3 bilhões, mostrando o grande potencial desse mercado (CANAWEB/JORNALCANA, 2001). Segundo o IBGE (2001), atualmente, o Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, com uma área plantada superior a 5,4 milhões de hectares. Na safra 2000 / 2001 o país colheu algo em torno de 317 milhões de toneladas, destinadas a produção de açúcar e álcool combustível.

De acordo com o IDEA (2000), o Estado de São Paulo se destaca como o maior gerador de produtos provenientes da cana-de-açúcar do país, além de ser o maior produtor brasileiro, com uma área cultivada em torno de 2,2 milhões de hectares e produtividade média de 70 toneladas/hectare, atingindo uma produção de 160 milhões de toneladas.

## **3.2. Processo de colheita da cana-de-açúcar**

### **3.2.1. Colheita manual**

A colheita manual de cana-de-açúcar é realizada por meio de golpes de facão

(popularmente conhecidos como “podão”), manuseados por trabalhadores rurais. Um trabalhador colhe, por jornada diária, entre 8 e 9 t/ha de cana queimada. Entretanto, de acordo com MAGALHÃES e BRAUNBECK (1998) o número de trabalhadores dispostos ou aptos a realizar esta tarefa está diminuindo.

No ano de 2000, só no Estado de São Paulo, houve uma queda de 3% na demanda da mão-de-obra em relação a 1999 (SEADE, 2001). Entre as razões pelas quais está ocorrendo este fato, estão a má remuneração desta atividade e as árduas condições de trabalho para o ser humano. Trata-se de uma operação que exige do trabalhador, grande esforço físico o qual lhe traz riscos ergonômicos, devido a posição em que o mesmo tem de trabalhar, como mostra a Figura 1.



**Figura 1.** Colheita manual de cana-de-açúcar.

Embora o setor sucroalcooleiro absorva um grande número de trabalhadores, esta ocupação não é permanente e se restringe, principalmente, na época da colheita. Essa condição impossibilita a fixação do homem na propriedade, fazendo com que os trabalhadores mudem constantemente de regiões produtoras de cana-de-açúcar.

Com a eminente proibição completa de queima na pré-colheita da cana nos próximos anos, a colheita manual torna-se ainda mais inviável, pois os riscos de acidentes com animais peçonhentos e/ou ferimentos provenientes da dificuldade de se promover o corte da cana crua, aumentam consideravelmente. Sem a queima, prática que otimiza a operação da colheita manual, a produtividade de uma jornada diária de um trabalhador cai cerca de 60%.

### 3.2.2. Sistema de colheita mecanizada

Segundo RÍPOLI e SEGALLA (1981) em meados dos anos 50, chegava ao Brasil a primeira cortadora mecânica da marca Thompson, proveniente dos Estados Unidos da América. A partir daí, a empresa SANTAL Equipamentos S/A iniciava projetos de desenvolvimento de máquinas para colheita.

RÍPOLI e VILA NOVA (1992) registraram a iniciativa pioneira de Egidio Artioli, que, no início da década de 60, fornecia uma máquina cortadora-amontodadora de projeto integralmente nacional, denominada de EG-101. Esses autores ainda relatam que, em São Paulo, a mecanização do corte da cana-de-açúcar, tem como marco histórico o ano de 1973, quando iniciou as operações em escala comercial, com a utilização de equipamentos de fabricação nacional e tecnologia importada.

As colhedoras propriamente ditas, começaram a ser usadas no Brasil no começo da década de 70, sofrendo um aumento rápido e significativo de unidades, devido à uma escassez de mão-de-obra e de uma tentativa de redução nos custos da produção. FERNANDES e IRVINE (1986) relatam sobre a introdução no Estado de São Paulo, nesta época, do sistema de colheita mecanizada por colhedoras combinadas que cortam, picam, limpam e carregam a cana-de-açúcar em operações integradas.

Segundo FURLANI NETO et al. (1994) o PROALCOOL, iniciado em 1975, foi o grande propulsor da cultura da cana-de-açúcar no Brasil, abrindo novas fronteiras agrícolas para sua expansão e, conseqüentemente, gerando novas tecnologias voltadas para a implantação da mecanização da cultura no país. A colheita mecanizada tornou-se uma realidade, sendo imprescindível para atender toda a demanda de abastecimento do setor sucroalcooleiro.

No entanto, VOLPATO (2001) diz que, o sistema de colheita mecanizada no Brasil, ainda não atingiu níveis importantes em termos de área colhida quando comparado com outros países como os Estados Unidos da América, África do Sul e Austrália. São Paulo é o estado que exhibe maior potencial de mecanização da colheita da cana-de-açúcar, visto que, é onde se encontram as maiores e o maior número de as indústrias do setor sucroalcooleiro, além do relevo plano a levemente ondulado da maioria dos locais de produção, permitindo assim o emprego com eficiência de colhedoras mecânicas.

Em regiões com alta concentração canavieira como a de Ribeirão Preto-SP, por exemplo, houve um crescimento da colheita mecanizada, representada atualmente por cerca de 31% do total da área canavieira dessa região (CANAWEB / JORNALCANA, 2001).

### 3.2.3. Formas de colheita mecânica da cana-de-açúcar

O sistema completo de mecanização da colheita de cana-de-açúcar inclui o corte, o carregamento, o transporte, como mostra a Figura 2; e ainda, a recepção da matéria-prima pelas usinas (MAGALHÃES e BRAUNBECK, 1998).



**Figura 2.** Colheita mecanizada de cana-de-açúcar.

O mercado brasileiro conta com colhedoras de cana-de-açúcar de dois tipos básicos: para cana picada ou inteira. RIPOLI e PARANHOS (1990) relatam que a tecnologia de colheita de cana picada que o país importou, veio se adaptando as condições nacionais de campo. Entretanto, isso é totalmente contrário ao método tradicional que, até então era empregado no Brasil, isto é, a colheita da cana inteira. Isso obrigou a indústria a investir uma elevada soma de recursos na substituição do sistema, tanto na recepção como no transporte.

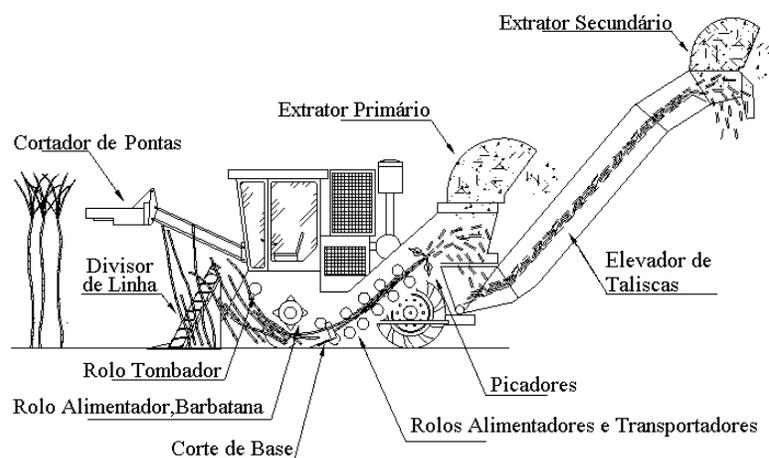
MAGALHÃES e BRAUNBECK (1998) salientam que, tanto a colheita mecanizada de cana-de-açúcar picada como a de cana inteira, utilizam a queima na pré-colheita sendo que, as colhedoras de cana queimada operam também em cana crua, entretanto com um rendimento mais baixo.

SOARES et al. (1994) acrescentam que, o bom desempenho de um sistema mecanizado não depende somente da colhedora, sendo importante que se tenha:

- Talhões devidamente preparados para a colheita mecânica;
- Variedades adequadas;
- Coordenação adequada entre os subsistemas participantes;
- Manutenção adequada, principalmente preventiva;
- Planejamento da colheita;
- Análise da relação custo/benefício do sistema.

### 3.2.3.1. A cana picada

O sistema de colheita mecanizada de cana-de-açúcar atualmente utilizado no Brasil adota colhedora comercial com tecnologia de colheita de cana picada, a qual provoca perdas consideráveis de matéria-prima em função do processamento interno das máquinas, entre eles o de picagem dos colmos em rebolos, como mostra a Figura 3.



**Figura 3.** Componentes de uma colhedora de cana-de-açúcar.

O colmo da cana-de-açúcar, quando picado, aumenta a sua exposição ao ataque de microrganismos, como os fungos, que aceleram o processo de deterioração do mesmo (KROES e HARRIS, 1994). Os colmos podem sofrer uma série de deterioração podendo trazer problemas durante a industrialização.

Existem três formas de deterioração, ou seja, fisiológica, microbiológica e tecnológica. A cana picada proporciona maiores condições para a deterioração microbiológica, uma vez que, a picagem dos colmos em rebolos aumenta as portas de entradas para o desenvolvimento de microrganismo, resultando na formação de compostos de transformação, principalmente em cana queimada, pois após a queima, a exsudação do caldo nos colmos (solução açucarada) torna-se um meio de cultura para microrganismos como fungos, bactérias, leveduras, entre outros.

Estes agentes transformam o açúcar em ácidos (lático e acético) e em gomas (dextrana); estes, por sua vez, interferem no processo industrial. Os ácidos são inibidores do processo de fermentação na matéria-prima e as gomas acarretam problemas nas operações de clarificação, cristalização e centrifugação, comprometendo a qualidade e a estocagem do açúcar.

Nas colhedoras de cana-de-açúcar picada as perdas de açúcar são maiores pois colmos são deixados no solo após a colheita e nos picadores e extratores também ocorrem perdas, embora sejam consideradas pequenas (PAYNE, 1986). Outro problema relacionado a essas colhedoras é a quantidade de matéria estranha agregada aos rebolos, a deterioração e os efeitos ocasionados nas diversas fases da industrialização da matéria prima (STUPIELLO e FERNANDES, 1984).

MAGALHÃES et al. (2002) denominam essas perdas de visíveis e invisíveis, ou seja, aquelas que podem e que não podem ser diagnosticadas no campo. Procurando quantificar as perdas impossíveis de serem levantadas no campo (perdas invisíveis) sob a forma caldo, serragem e estilhaços (lascas) de cana, que ocorrem devido à ação de mecanismos rotativos que cortam, picam e limpam a cana durante a colheita mecanizada, observaram que as essas perdas são significativas da ordem de 2,1 a 5,4% das perdas totais, sendo que as perdas invisíveis em decorrência dos picadores, só ficam atrás das provocadas pelo corte de base.

STUPIELLO e FERNANDES (1984) também observaram a qualidade dos rebolos resultantes dos cortes mecânicos e afirmaram que, um “bom corte” acontece quando uma mínima área do colmo é exposta ao risco de infecção, não apresentando lascas ou esmagamento.

### **3.2.3.2. A cana inteira**

A cana-de-açúcar colhida inteira possui um maior tempo de estocagem e sua deterioração é menor que da cana picada (FURLANI NETO, 1994).

MAGALHÃES e BRAUNBECK (1998) também afirmam que, para o carregamento de cana inteira colhida manualmente, utilizando-se rastelos rotativos, a porcentagem de matéria estranha mineral presente é menor que a cana picada colhida mecanicamente.

Além disto, os autores relatam que no Brasil todas as usinas estão equipadas para operar com cana inteira, o que significa que não haveria necessidade de grandes investimentos nos sistemas de transporte e recepção nas usinas, ao se optar pela colheita mecanizada de cana-de-açúcar crua e inteira.

### **3.2.3.3. A cana crua**

De acordo com RÍPOLI et al. (1990), a colheita mecanizada de cana sem a queima, promove redução da poluição ambiental; redução nos riscos de incêndios florestais; melhorias agronômicas no ecossistema agrícola e proporciona um melhor aproveitamento do potencial energético da palhada.

FURLANI NETO (1994) apresenta uma série de vantagens e desvantagens, sendo as consideradas principais de ambas, identificadas a seguir, acrescidas de algumas considerações:

#### Vantagens

- Redução do impacto das gotas de chuva sobre os solos agrícolas;
- Maior conservação de umidade no solo, pelo efeito da palha sobre o solo;
- A palha em decomposição auxilia uma maior atividade microbiana no solo;
- Auxílio no controle de ervas daninhas promovendo redução do uso de herbicidas;
- Maior incorporação de matéria orgânica aos solos;
- Ausência de exsudação dos colmos, ocasionada pela queima do canavial;
- Diminui o impacto ambiental da queimada e seus efeitos (fumaça e fuligem) nas cidades próximas;
- Dispensa o processo de lavagem dos colmos, ajudando a evitar perdas de matéria-prima e, conseqüentemente, diminuindo os custos industriais.

### Desvantagens

- Diminuição da capacidade operacional das colhedoras;
- Redução da densidade de carga devido ao aumento de material vegetal, necessitando de acréscimo no número de veículos para transporte da matéria prima;
- Maiores desgastes dos componentes ativos da colhedora, pelo efeito abrasivo das folhas;
- A palha favorece a proliferação de pragas (como a cigarrinha que representa um problema para a cultura);
- Favorece a concentração de raízes na superfície, comprometendo a estabilidade da planta na fase adulta;
- Dificuldade de realizar as operações de cultivo;
- Eleva o índice de acidentes de trabalho durante o corte manual;
- Risco constante de incêndios no canavial.

Além destas, promove a diminuição do grau de pureza da matéria-prima, para a obtenção dos produtos comerciais no processo industrial.

#### **3.2.3.3.1. Matéria estranha presente na cana e sua influência na indústria**

A qualidade tecnológica da cana-de-açúcar é determinada por um conjunto de parâmetros que definem seu potencial como matéria prima para a fabricação de açúcar e álcool. Estes parâmetros referem-se também ao teor de matéria estranha que acompanha os rebolos de cana-de-açúcar, aos produtos decorrentes da deterioração e suas influências na qualidade da matéria-prima e nas diversas fases da industrialização.

Matéria estranha refere-se a tudo que não for colmos ou rebolos de colmos maduros que acompanham a matéria-prima, podendo ser dividida em duas categorias, ou seja, vegetal (palha, palmito, folha, colmos secos, etc.) e mineral (pedra, terra, etc.). O teor de matéria estranha é função das condições de cultivo, do comprimento dos colmos, idade e desenvolvimento, da variedade de cana-de-açúcar, da qualidade da queimada, do tipo e do teor de umidade do solo, regulagem da altura do corte de base, da produtividade agrícola e do tipo de máquina e carregamento empregado.

Segundo STUPIELLO e FERNANDES (1984) a cana-de-açúcar picada geralmente não é lavada para retirar as matérias estranhas, pois isto pode causar a perda de 6 a 8 kg de açúcar por tonelada de cana. Esta cana com impurezas vai para os equipamentos que sofrem o

efeito abrasivo da terra e substâncias de alta dureza presente nas folhas. A moagem também é prejudicada pela presença de matérias estranhas que aumentam o teor de fibra industrial reduzindo a capacidade da moagem. Um aumento de 1% de matéria estranha diminui de 2,2 à 3% a capacidade de moagem.

Estes autores acrescentam que, a qualidade do caldo resultante da moagem de cana picada recém cortada resulta em queda da Pol (teor de açúcar), da pureza e do pH quando comparada com colmos inteiros. Isto é devido as pontas e cartuchos de folhas carregados pelas colhedoras. O teor de ácidos no caldo proveniente de cana deteriorada obriga a um consumo extra de cal para neutralizar a acidez. A presença de muito cal provoca a formação de incrustações diminuindo assim a transferência de calor nos aquecedores. O caldo torna-se mais viscoso, ocorrendo também uma maior dificuldade para filtração provocando perda de açúcar através da torta de filtro.

#### **3.2.3.4. A cana queimada**

Há um consenso entre os técnicos e os pesquisadores a respeito da queima da cana-de-açúcar na pré-colheita que, apesar de proporcionar condições favoráveis para a colheita, apresentam problemas de ordem ambiental como a emissão de gás carbônico, de fumaça e fuligem que agravam a poluição atmosférica e, indiretamente, de ordem econômica, por causarem a exsudação nos colmos de cana-de-açúcar, em períodos de pós-queima. A Figura 4 mostra um exemplo dessa prática.



**Figura 4.** Prática da queima na pré-colheita da cana-de-açúcar.

WHALEN, S.A. (1989) discorre sobre problemas causados pelas queimadas, desde os métodos para determinação das emissões impostas a partir da promulgação do “Clean Air Act” em 1970 e a criação da Environmental Protection Agency (EPA), até os estudos sobre a presença de fibras sílica-biogênica associadas às queimadas de cana-de-açúcar, prováveis responsáveis pelas infecções pulmonares, cardiovasculares e efeitos carcinogênicos causados nos trabalhadores da indústria açucareira do Hawaii, Estados Unidos da América.

RIPOLI, et al. (1996) realizaram ensaios preliminares para determinar as perdas de ART (açúcar recuperável teórico) decorrente da exsudação dos colmos e encontraram valores variando de 55,82 a 279,13 litros de álcool por hectare. Essas variações foram em funções das condições climáticas no momento da queima e de outras características correlacionadas com as condições de campo. FURLANI NETO et al. (1996) consideram significativas as perdas de sacarose causadas pela exsudação dos colmos.

HUDSON et al. (1975) citam que a queima na pré-colheita da cana-de-açúcar é muito prejudicial, pois pode causar danos à estrutura do solo, poluição e danos à rede elétrica como incêndios em fios e postes em áreas cultivadas próximas a centros urbanos, como mostra a Figura 5. Além disso, quando a cana-de-açúcar é queimada, deve ser moída o mais rápido possível para não gerar grandes perdas de matéria-prima.



**Figura 5.** Área de cultivo de cana-de-açúcar próximo a centros urbanos.

MAGALHÃES e BRAUNBEK (1998) salientam ainda que, uma queimada descontrolada pode fazer com que o fogo chegue a temperaturas muito elevadas fazendo com

que o colmo da cana-de-açúcar perca sua integridade estrutural, provocando perda de quantidade de açúcar e facilitando a ação dos microrganismos.

#### **3.2.3.4.1. A queima da cana e o seqüestro de carbono**

Na colheita da cana-de-açúcar com a queima, todo o carbono constituinte da planta é liberado para a atmosfera na forma de CO<sub>2</sub>. Na colheita sem a queima, parte do carbono é liberada para a atmosfera e parte é incorporada ao solo enquanto a palha, que permanece sobre a superfície, vai se decompondo, convertendo-se em matéria-orgânica (húmus) que, por sua vez, é fundamental para uma boa estrutura física e química do solo.

LUCA et al. (1999) estudaram o efeito da colheita de cana-de-açúcar no teor e no estoque de carbono no solo, na região nordeste do Estado de São Paulo, adotando-se os seguintes manejos: sistema de colheita com queima (CQ), sistema de colheita sem queima há três anos (SQ3) e sistema de colheita sem queima há cinco anos (SQ5). Concluíram que os teores de carbono na camada 0-50 mm de solo variaram entre 16,8 g kg<sup>-1</sup> (CQ) e uma média de 18,7 g kg<sup>-1</sup> para SQ3 e SQ5, e os estoques entre 10,8 Mg ha<sup>-1</sup> (CQ) e meia de 11,8 Mg ha<sup>-1</sup> (SQ3 e SQ5). Observaram ainda que o carbono da biomassa microbiana do solo (CBM) variou entre 186 e 281 µg g<sup>-1</sup>, e a relação CBM / C do solo variou entre 1,12 e 1,63 %.

Estes valores são equivalentes a outros encontrados na literatura para culturas anuais sob plantio direto.

#### **3.2.3.4.2. A legislação ambiental e o cultivo da cana-de-açúcar**

A preservação do meio ambiente é a questão mais levantada no mundo nestes últimos anos. A queima da cana-de-açúcar na pré-colheita gera muitos problemas, como descrito anteriormente, mas a legislação menciona também outros problemas relacionados à cultura da cana-de-açúcar, como a conservação do solo e as maneiras possíveis de realizá-la (SOUZA, 1999).

A legislação concernente ao emprego do fogo na agricultura sofreu alterações nos últimos anos. No Estado de São Paulo, por exemplo, o decreto Nº 45.869, de 22 de junho de 2001 regulamenta, no que concerne à queima da palha da cana-de-açúcar, a Lei nº 10.547, de

2 de maio de 2000, que define procedimentos, proibições, estabelece regras de execução e medidas de precaução a serem obedecidas quando do emprego do fogo em práticas agrícolas, pastoris e florestais. Este decreto, em seu artigo primeiro estabelece que o emprego do fogo, como método despalhador e facilitador do corte da cana-de-açúcar, deve ser eliminado de forma gradativa, não podendo a redução, a cada período de 5 (cinco) anos, ser inferior a 25% (vinte e cinco por cento) da área de cada unidade agroindustrial ou propriedade não vinculada a unidade agroindustrial.

Esta política pública ambiental se exterioriza como norma geral federal no decreto 2.661/98. Assim, a partir de julho de 2003 somente  $\frac{3}{4}$  da área mecanizável da propriedade poderá utilizar o fogo; em julho de 2008 somente  $\frac{1}{2}$  da área mecanizável; em julho de 2013 somente  $\frac{1}{4}$  da área, encerrando-se o uso do fogo na cultura de cana de açúcar em julho de 2018. Sem embargo dos efeitos nocivos do uso do fogo na agricultura, a administração pública está dando um prazo de tolerância de 20 anos para os proprietários rurais equiparem-se adequadamente (MACHADO, 2001).

### **3.3. Limpeza da cana-de-açúcar sem queimar**

#### **3.3.1. Ensaio mecânico com folhas de cana-de-açúcar**

MIYABE e ABE (1976) realizaram ensaios experimentais para medir a força necessária para a ruptura entre a folha e o colmo. Os autores concluíram que a força de tração para remover a folha do colmo diminui do ápice para a base do colmo. A força média para ruptura da folha na parte mediana do colmo (8ª folha) foi de 62,1 N/folha com desvio padrão de  $\pm 8,8$  N/folha. Esse valor foi encontrado para o ângulo de tração de 45° formado pelo sentido do eixo longitudinal da folha em relação ao colmo. Para um ângulo de tração de 135°, a força foi de 35,4 N/folha com um desvio de  $\pm 7,0$  N/folha. Ainda observaram que a força para remover a folha não pode ser considerada apenas como sendo de tração, mas sim, uma combinação de várias forças.

Parâmetros qualitativos e quantitativos da remoção da folha da cana foram analisados por SRIVASTAVA (1987). Por meio de análise dimensional, o autor chegou a uma equação na qual avalia a força requerida para remover a folha da cana. Os parâmetros abordados para a

elaboração dessa equação, foram: maturidade do colmo, área de inserção da folha ao colmo, configuração do colmo, diâmetro nodal, entre outros. As folhas localizadas no topo do colmo apresentaram maior resistência ao despalhamento quando comparadas com as folhas da base; força requerida para a remoção das folhas verdes e secas da base ficaram em torno de 25,2 N.

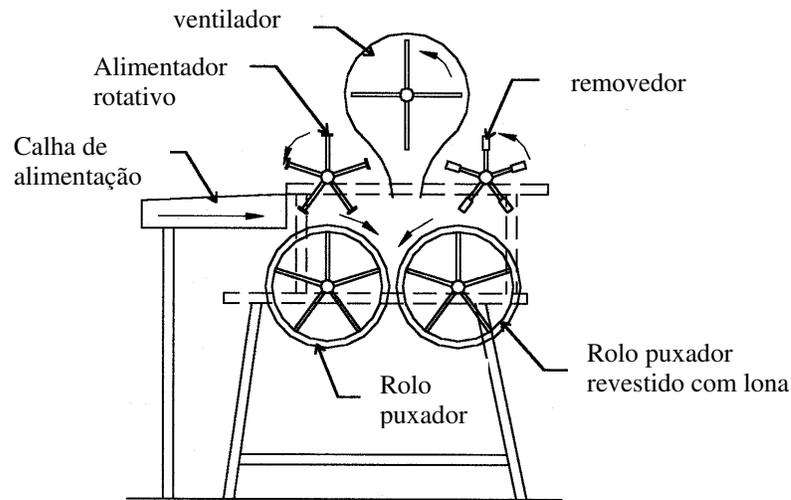
De acordo com o pesquisador, o coeficiente de correlação entre o valor observado da força requerida para o despalhamento e o valor estimado foi de 0,818, mostrando uma consistência entre os resultados calculados e os valores reais da força de despalhamento da cana-de-açúcar. Os ensaios para avaliar as forças necessárias a remoção das folhas foram realizados com um dispositivo de taliscas de 1/4", os quais geram uma força normal e uma força de tração no contato da talisca com a folha inserida no colmo. A força de fricção média para a remoção da folha ao longo do colmo foi de 308,9 N.

PAGNANO (1997) realizou ensaios para determinar as forças necessárias para remover as folhas da cana-de-açúcar crua por fricção. O mecanismo aplicava uma força de tração e compressão simultaneamente ao colmo, permitindo que a cana-de-açúcar deslizasse sobre um raspador. Dentre as variedades testadas, esta autora determinou a força máxima de compressão, sem que houvesse danos significativos ao colmo de 700N, exercida pelo raspador ao longo do rebolo. No ensaio de remoção de folha por meio de forças de atritos, a força média de compressão necessária foi da ordem de 50N.

### **3.3.2. Sistemas de limpeza da cana**

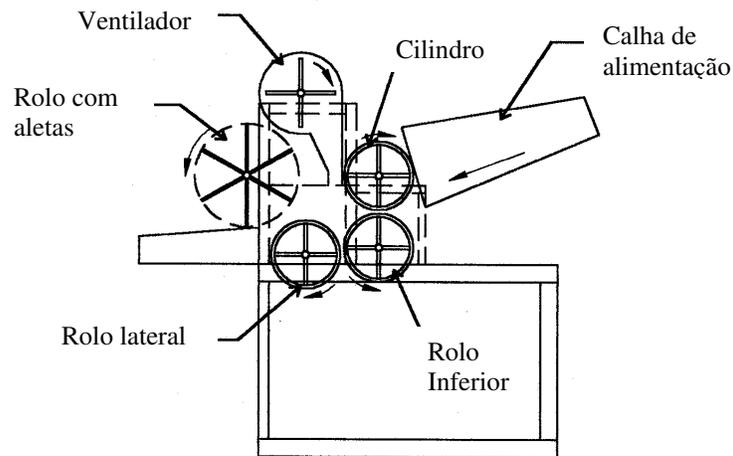
SRIVASTAVA (1987) iniciou as pesquisas a fim de desenvolver um equipamento para limpeza de colmo de cana-de-açúcar. Entretanto, este equipamento, operado manualmente, era muito simples e muitos problemas foram detectados. Desta forma, após testarem vários modelos de dispositivos, SRISVASTAVA e SINGH (1990) chegaram a um modelo (Figura 6) composto de dois cilindros (revestidos por lona) que giram em sentidos opostos, com lâminas giratórias que realizavam a alimentação e retirada do colmo do mecanismo e um ventilador, sendo acionado pelo próprio trator.

SHUKLA et al. (1991) desenvolveram e testaram um modelo que remove os topos e as folhas, semelhante ao desenvolvido pelos pesquisadores anteriormente citados. No entanto, a principal diferença é que neste modelo a lâmina giratória foi substituída por um cilindro



**Figura 6.** Seção transversal do modelo limpador por rolos puxadores (SRIVASTAVA e SINGH, 1990).

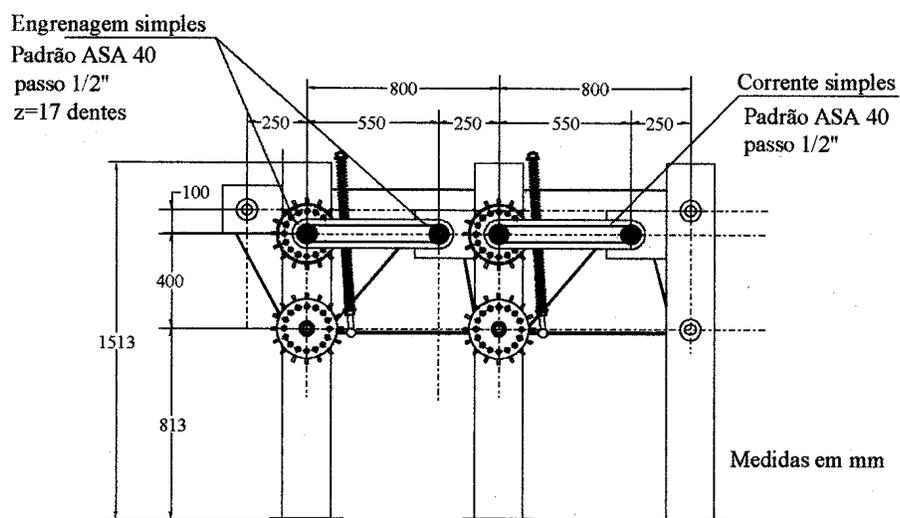
giratório, posicionado para quebrar o topo do colmo em seu ponto fraco natural, além de conter outras pequenas alterações para incrementar o mecanismo, como ilustra a Figura 7.



**Figura 7.** Seção transversal do modelo desenvolvido por SHUKLA et al. (1991).

TANAKA (1996) desenvolveu e avaliou um dispositivo para o despalhamento de colmos inteiros de cana-de-açúcar, acionado por uma unidade hidrostática com velocidade

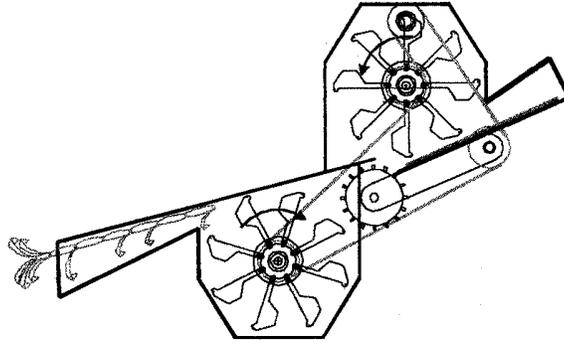
variável. Esse despalhador era composto por rolos oscilantes com diferencial de velocidades entre os rolos superiores e inferiores e entre os pares de rolos adjacentes, possuindo molas helicoidais às quais eram aplicadas pré-cargas iniciais. O diferencial de velocidades era obtido por meio da inversão de montagem das engrenagens motoras e movidas dos rolos. A Figura 8, ilustra este despalhador despalhador.



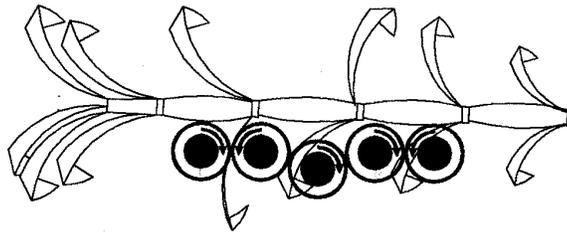
**Figura 8.** Vista frontal do despalhador de colmos inteiros (TANAKA, 1996).

PAGNANO (1997) dimensionou, construiu e avaliou o funcionamento de um despalhador inercial composto por facas oscilantes, a fim de promover a remoção das folhas dos colmos de cana-de-açúcar inteiros. Esta pesquisadora concluiu que a utilização de facas, com massa de 0,828 kg provocam uma pressão maior que a pressão suportada pelo colmo da cana (4,9 MPa), necessitando-se, desta forma, da utilização de facas com massa menor, para este tipo de despalhador. A Figura 9 a seguir ilustra esse despalhador.

OLIVEIRA (1998) estudando as forças necessárias para a remoção das folhas dos colmos de cana-de-açúcar em função de diferentes ângulos de tração, construiu um mecanismo para despalhamento de cana por meio de rolos puxadores, revestidos de borracha, como ilustra a Figura 10. A eficiência de remoção desse mecanismo foi de 5,6%, sendo que a maior eficiência ocorreu com uma velocidade de 0,52 m/s; velocidade esta inferior às condições de trabalho de colhedoras comerciais no campo.



**Figura 9.** Despalhador inercial com facas oscilantes (PAGNANO, 1997).



**Figura 10.** Mecanismo de despalhamento de cana por rolos puxadores (OLIVEIRA, 1998).

PIGHINELLI e BRAUNBECK (2001) realizaram um estudo da metodologia de limpeza da cana-de-açúcar desenvolvida por TANAKA (1996), buscando promover um maior contato dos colmos como os rolos oscilantes por meio de ajustes nas pré-cargas iniciais das molas helicoidais, a fim de aperfeiçoar o processo de remoção das folhas, entretanto, não observou aumento significativo na eficiência de remoção, em relação aos resultados anteriormente obtidos.

SILVA et al. (2002) também realizaram ensaios procurando aprimorar o despalhador desenvolvido por TANAKA (1996) e que vem sofrendo alterações por meio do processo de otimização de TANAKA (2001). Para estes ensaios, promoveu-se a substituição dos rolos com diferente configuração. Os rolos atuais, com taliscas retas dispostas axialmente com bordas ativas onduladas, foram trocados por rolos com taliscas dispostas helicoidalmente com bordas ativas retas. Promoveu-se, também, alteração nas velocidades dos rolos,

aumentando o diferencial entre os pares superiores e inferiores. O melhor resultado, mostrou um despalhamento de colmos de aproximadamente 65%. Essa porcentagem de despalhamento foi inferior a maior obtida por TANAKA (1996).

### **3.4. Potencial energético dos resíduos vegetais da cultura da cana-de-açúcar**

Nos últimos anos, a colheita de cana-de-açúcar sem queimar vem sendo viabilizada, porque o setor sucroalcooleiro passou a valorizar as vantagens econômicas e ecológicas da recuperação do palhico da cana.

#### **3.4.1. Ciclagem de energia**

Estudos para a obtenção de combustível a partir de biomassa de material renovável estão sendo desenvolvidos por pesquisadores da Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP.

De acordo com PEREZ et al. (2002) para conseguir transformar resíduos vegetais da cana-de-açúcar, por exemplo, em combustível, submete-se o material a um processo chamado pirólise lenta de uma grande partícula de biomassa (capim elefante e/ou bagaço de cana-de-açúcar) de densidade igual a  $132 \text{ kg/m}^3$  aquecida na direção axial através de uma resistência elétrica em um reator, ou seja, decompõem as moléculas do resíduo da cana pelo calor, mas sem a presença de oxigênio e, conseqüentemente, combustão.

O bio-óleo, como está sendo denominado, pode vir a ser um substituto do óleo diesel e/ou entrar na composição de vários compostos químicos. Nesta pesquisa, desenvolveu-se um protótipo reator para processamento do bagaço, com capacidade de processar de 100 a 200 kg/h de material, com um aproveitamento (esperado) de 70% (CNPq, 2002).

CORTEZ et al. (1992) acrescentam que, além de se utilizar o palhico da cana-de-açúcar na geração de vapor em caldeiras, as usinas estão atentas a valorização atual do bagaço da cana, por meio da política de compra do excedente de energia elétrica, produzida pelas usinas de açúcar e destilarias de álcool e para outros fins mais nobres.

## **4. MATERIAL E MÉTODOS**

### **4.1. Material**

#### **4.1.1. Colmos de cana-de-açúcar**

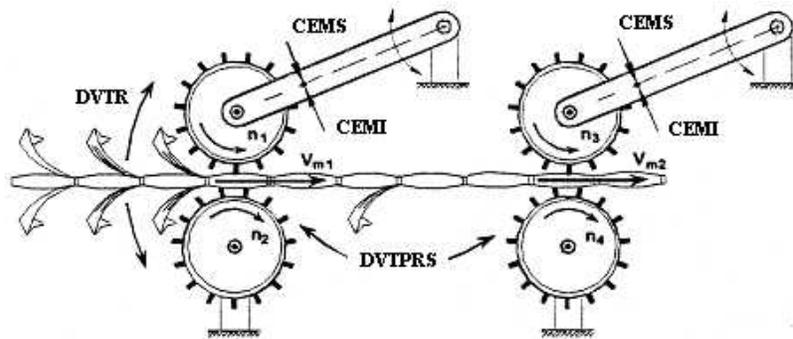
Utilizaram-se colmos de cana-de-açúcar da variedade comercial RB72454, no seu quinto corte, cujas características agrônômicas são: produção elevada, maturação média a tardia, boa brotação de soqueira, velocidade rápida de crescimento, sem florescimento e baixa exigência hídrica. Outra característica observada nesta variedade e interessante para este trabalho é a dificuldade de se destacarem as folhas dos colmos.

A área que forneceu os colmos desta variedade de cana-de-açúcar, foi a do Campo Experimental da Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP, cujas coordenadas geográficas são: latitude de 22° 49'07" S, longitude 47° 03'43" W e altitude média de 629 m, a temperatura média anual de 21,6°C e a precipitação média anual de 1350 mm.

#### **4.1.2. Protótipo do despalhador**

O protótipo de laboratório do despalhador de colmos de cana-de-açúcar inteiros, projetado por TANAKA (1996), esquematizado na Figura 11 é, basicamente, composto por 4 rolos com diferencial de velocidades tangencial entre rolos (DVTR) superiores e inferiores e diferencial de velocidades tangencial entre pares rolos subsequentes (DVTPRS). Os rolos são sustentados por braços constituídos de mancais de rolamento e por molas helicoidais superiores e inferiores, às quais são aplicadas cargas estáticas superior (CEMS) e inferior (CEMI).

Os rolos superiores ( $n_1$ , e  $n_3$ ) e os inferiores ( $n_2$  e  $n_4$ ) possuem sentidos de rotação opostos e os braços são articulados, permitindo que os rolos superiores assumam movimentos oscilatórios, durante a passagem dos colmos pelo despalhador em funcionamento. Essa oscilação é necessária para que os rolos possam percorrer a superfície do colmo, mantendo uma força adequada para provocar o atrito necessário à remoção das folhas do colmo, danificando-o, superficialmente, o mínimo possível. Os rolos inferiores possuem, somente, movimentos giratórios.



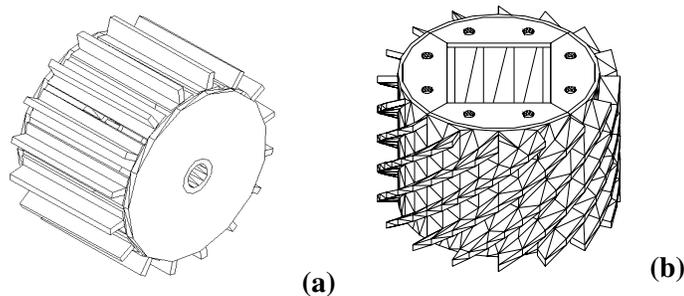
**Figura 11.** Esquema do despalhador em estudo (Adaptado de TANAKA, 1996).

As cargas estáticas aplicadas aos rolos superiores são provenientes da deformação das molas helicoidais, duas superiores e duas inferiores, montadas em hastes com roscas dotadas de porcas para regulagem das cargas estáticas nas molas.

A transmissão de movimento entre os rolos é feita por correntes simples e um conjunto de engrenagens. Quando o colmo de cana-de-açúcar é introduzido no despalhador, em funcionamento, passa com velocidade média denominada  $V_{m1}$  para o primeiro par e,  $V_{m2}$  para o segundo par de rolos.

#### 4.1.2.1. Rolos com taliscas retas e taliscas helicoidais

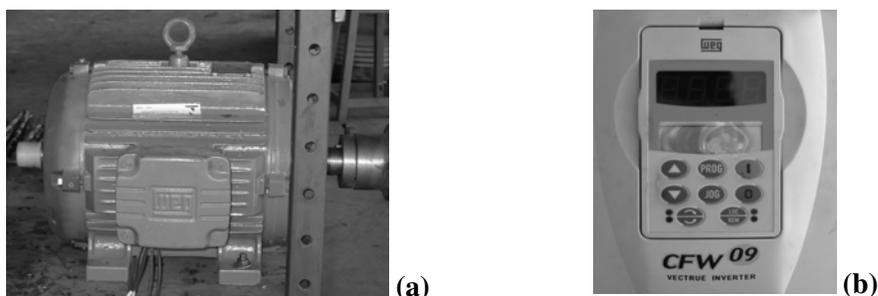
O modelo original dos rolos está ilustrado na Figura 12a, possuem taliscas retas dispostas axialmente, e o modelo dos rolos com taliscas dispostas helicoidalmente com bordas ativas retas com ângulos de hélice de  $45^\circ$  que foram utilizados nesta pesquisa está ilustrado na Figura 12b.



**Figura 12.** Modelo do rolo despalhador com taliscas retas (a) e do rolo despalhador com taliscas helicoidais (b).

### 4.1.3. Inversor de frequência

O protótipo de laboratório do despalhador, foi acionado por um motor da marca WEG (Figura 13a), série CFW-09, com potência de 3,0 kW a 870 rpm, controlado por um Inversor de Frequência no Laboratório de Protótipos. A Figura 13b mostra o painel de controle do Inversor.



**Figura 13.** Motor (a) e painel de controle do Inversor de Frequência (b).

O Inversor permitiu o controle da velocidade de rotação do despalhador, conforme o exigido para realização dos ensaios.

### 4.1.4. Ferramentas computacionais

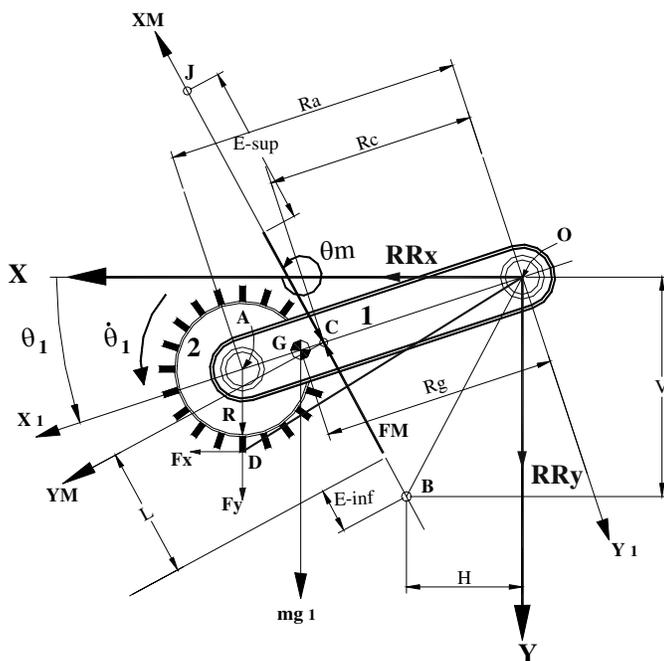
As ferramentas computacionais utilizadas neste trabalho foram, o Excel, o MechanicalDesktop 4.0 e o MatLab 6.1.

## 4.2. Método

Para a execução e avaliações da metodologia desta dissertação, foram utilizados recursos do Laboratório de Projeto de Máquinas Agrícolas, Laboratório de Protótipos e o Laboratório de Instrumentação e Controle.

### 4.2.1. Modelagem dinâmica do despalhador

O modelo dinâmico desenvolvido para simulação das cargas dinâmicas médias e deformações nos colmos gerados pelo despalhador, via programa computacional em Linguagem MATLAB 6.1., utiliza o método Newton-Euler (SANTOS, 2001), de acordo com o esquema da Figura 14. Vale ressaltar que, apesar do rolo ser composto por taliscas, para a modelagem foi considerado o rolo como “liso”.



**Figura 14.** Representação geométrica do braço superior oscilante que sustenta o rolo despalhador.

#### 4.2.1.1. Bases

Foram definidas três bases de referência para a representação vetorial das variáveis necessárias para a simulação dinâmica do despalhador. A base X-Y representa base inercial utilizada como referência para as outras bases.

#### 4.2.1.1.1. Transformação de coordenadas

Base 1: solidários ao braço (AO).

$$T\theta_1 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & \text{sen}(\theta_1) & 0 \\ -\text{sen}(\theta_1) & \cos(\theta_1) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (01)$$

Base M: solidários à mola e amortecedor.

$$T\theta_m = \begin{bmatrix} \cos(\theta_m) & \text{sen}(\theta_m) & 0 \\ -\text{sen}(\theta_m) & \cos(\theta_m) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (02)$$

O ângulo  $\theta_{10}$  corresponde à posição estática inicial do braço oscilante apoiado sobre os batentes.

$$T\theta_{10} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{10}) & \text{sen}(\theta_{10}) & 0 \\ -\text{sen}(\theta_{10}) & \cos(\theta_{10}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (03)$$

#### 4.2.1.2. Pesos

##### 4.2.1.2.1. Peso do conjunto braço-rolo na base inercial e na base local (P1)

$$P1_i = \begin{bmatrix} 0 \\ g(m_1 + m_2) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (04)$$

$$P1_1 = T\theta_1 * P1_i \quad (05)$$

onde,

$m_1$ : massa do braço e os mancais;

$m_2$ : massa de rolo, corrente e eixo da roda dentada.

#### 4.2.1.3. Cargas

##### 4.2.1.3.1. Carga dinâmica de despalhamento ( $F_d$ )

$$F_{d_i} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ 0 \end{bmatrix} \quad (06)$$

$$F_{d_1} = T\theta_1 * F_{d_i} \quad (07)$$

##### 4.2.1.3.2. Reação no apoio ( $RR$ )

$$RR_i = \begin{bmatrix} RR_x \\ RR_y \\ 0 \end{bmatrix} \quad (08)$$

$$RR_1 = T\theta_1 * RR_i \quad (09)$$

##### 4.2.1.3.3. Força do amortecedor ( $F_a$ )

$$F_a = c * R_c * \theta_1' \quad (10)$$

onde,

$c$  = coeficiente de amortecimento viscoso (determinado em laboratório).

$$Fa_m = \begin{bmatrix} Fa \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} * Ka \quad (11)$$

O fator Ka define o sentido da carga do amortecedor de acordo com o sinal da velocidade angular do braço.

$$Ka = \frac{\dot{\theta}_1}{|\dot{\theta}_1|} \quad (12)$$

$$Fa_i = T\theta_m^T * Fa_m \quad (13)$$

$$Fa_1 = T\theta_1 * Fa_i = T\theta_1 T\theta_m^T Fa_m \quad (14)$$

#### 4.2.1.3.4. Carga estática na mola (Fm)

$$Fm_m = \begin{bmatrix} Fm \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$Fm_i = T\theta_m^T * Fm_m \quad (16)$$

$$Fm_1 = T\theta_1 * Fm_i = T\theta_1 T\theta_m^T * Fm_m \quad (17)$$

#### 4.2.1.3.5. Posicionamento inicial do braço ( $\theta_{10}$ )

$$OC_1 = \begin{bmatrix} OC \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$OC_i = T\theta_1^T * OC_1 \quad (19)$$

$$OC_{10} = T\theta_{10}^T * OC_1 \quad (20)$$

O vetor OB que define a posição do ponto fixo (B), está definido pela configuração estrutural do despalhador.

$$OB_i = \begin{bmatrix} H \\ V \\ 0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$BC_i = OC_i - OB_i \quad (22)$$

$$BC_{10} = OC_{10} - OB_i \quad (23)$$

onde,

$OC_1$ : vetor posição do ponto C na Base 1;

$\theta_{10}$ : posição inicial de referência do braço;

$OC_{10}$ : vetor posição do ponto C na posição inicial (referência).

#### 4.2.1.3.5.1. Variação da mola ( $\Delta$ )

$$\Delta = BC_{10} - BC_i \quad (24)$$

$$F_{inf} = R (E_{inf} + \Delta) \quad (25)$$

$$F_{sup} = R (E_{sup} - \Delta) \quad (26)$$

O sinal da carga da mola  $F_m$  é definido pela base local (XM, YM).

$$F_{\text{inf}} + F_{\text{sup}} = R (E_{\text{inf}} + \Delta - E_{\text{sup}} - \Delta) \quad (27)$$

$$F_m = R (E_{\text{inf}} - E_{\text{sup}} + 2\Delta) \quad (28)$$

onde,

km: constante elástica da mola;

L: comprimento genérico do mola (variável no tempo);

L<sub>0</sub>: comprimento da mola na posição inicial de referência (constante);

L<sub>L</sub>: comprimento livre da mola (constante);

F<sub>m</sub>: carga da mola representada na base local (XM, YM).

#### 4.2.1.3.6. Equilíbrio dinâmico de forças (Lei de Newton)

$$\Sigma F = m_1 * a_{G_i} \quad (29)$$

$$\Sigma F = Fd_1 + P1_i + Fm_i + Fa_i + RR_i \quad (30)$$

#### 4.2.1.3.7. Aceleração do centro de massa ( $a_{G_i}$ )

$$a_{G_i} = \varpi_1 \wedge \varpi_1 \wedge OG_i + \dot{\varpi}_1 \wedge OG_i \quad (31)$$

onde,

G: centro de massa do conjunto braço-rolô.

$$\varpi_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_1 \end{bmatrix} \quad (32)$$

$$\dot{\varpi}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \theta_1 \end{bmatrix} \quad (33)$$

$$OG_1 = \begin{bmatrix} Rg \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (34)$$

$$OG_i = T\theta_1^T * OG_1 \quad (35)$$

#### 4.2.1.3.8. Equilíbrio dinâmico de momentos (Lei de Euler)

$$\Sigma M_{o1} = I_{o1} \wedge \dot{\varpi}_1 \quad (36)$$

O tensor de inércia de massa ( $I_{o1}$ ) do conjunto braço-rolô oscilantes, é obtido a partir do desenho tridimensional das peças, utilizando a função “AMMASSPROP” do programa MechanicalDesktop 4.0, prévio posicionamento do sistema de coordenadas no ponto e direção adotadas nas equações de modelagem dinâmica.

$$AD_1 = T\theta_1 * AD_i \quad (37)$$

$$OD_1 = OA_1 + AD_1 \quad (38)$$

$$OA_1 = \begin{bmatrix} Ra \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (39)$$

$$AD_i = \begin{bmatrix} 0 \\ R \\ 0 \end{bmatrix} \quad (40)$$

$$\sum M_{O1} = OG_1 \wedge P1_1 + OC_1 \wedge Fm_1 + OC_1 \wedge Fa_1 + OD_1 \wedge Fd_1 \quad (41)$$

Das equações vetoriais (29) e (36) surgem três equações algébricas independentes por meio das quais são calculadas as 3 incógnitas do caso:

- Incógnitas:  $RR_x$ ,  $RR_y$  e  $\ddot{\theta}_1$ .

Sendo que a componente tangencial  $F_x$  da carga dinâmica de despalhamento surge da equação (47).

$$OA_{10} = T\theta_{10}^T * OA_i \quad (42)$$

$$OD_{10} = OA_{10} + AD_i \quad (43)$$

$$OD_i = T\theta_1^T * OD_1 \quad (44)$$

#### 4.2.1.3.9. Comportamento mecânico do colmo (Diametral)

##### 4.2.1.3.9.1. Deformação do colmo (Def)

$$Def = OD_i(Y) - OD_{10}(Y) \quad (45)$$

Quando o rolo está em contato com o colmo, sem apoiar sobre o batente, a força normal ( $F_y$ ) é uma função da deformação ( $Def$ ) dada pela equação (46). Desta forma, pode-se ajustar um  $F_y = Def$  (TANAKA, 2001).

$$F_y = 9,81 * (4,54487 * 10^{-5} + 6,52576 * 10^4 * Def - 1,60114 * 10^7 * Def^2 + 8,97404 * 10^8 * Def^3) \quad (46)$$

Como a força de raspagem é dada pelo produto do coeficiente de raspagem ( $\mu_d$ ) com a força normal, tem-se, então, que.

$$F_x = -\mu_d * F_y \quad (47)$$

As variáveis básicas que foram utilizadas na resolução numérica da modelagem para as simulações, estão apresentadas na Tabela 1.

**Tabela 1.** Dados utilizados na simulação do movimento do despalhador.

Variável	Definição	Valor numérico
TT	Tempo total de simulação	1,5s
Dt	Incremento de tempo	0,002s
G	Aceleração da gravidade	9,82m/s <sup>2</sup>
$\mu_d$	Coeficiente de raspagem	0,6104*
C	Coeficiente de amortecimento	522N*s/m**
R	Raio do rolo	0,15m
Ra	Comprimento do braço articulado	0,375m
Km	Constante da mola	12785N/m***
LL	Comprimento livre da mola	0,32m
OC	Braço de aplicação (Cargas de molas e amortecedor)	0,22m
H	Coordenada horizontal do ponto fixo da mola	0,15m
V	Coordenada vertical do ponto fixo da mola	0,45m
Rg	Braço de localização do centro de gravidade (Braço + rolo)	0,25m
m1	Massa do braço	15,38kg
m2	Massa do rolo	26,73kg
IO1	Momento de inércia de massa (braço + rolo)	1,075 kgm <sup>2</sup> *
$\theta_m$	Orientação angular da base local da mola	288 graus
$\theta_{10}$	Ângulo do braço na posição de equilíbrio estático	12,7 graus

\* TANAKA (2001); \*\*Determinado em laboratório; \*\*\*PIGNELLI e BRUANBECK (2001).

#### **4.2.2. Análise da carga dinâmica média de despalhamento e deformação dos colmos**

Efetou-se uma analogia entre a carga dinâmica média de despalhamento e deformação dos colmos gerada a partir da simulação por meio da modelagem e os resultados obtidos no ensaio de passagem dos colmos. Para a demonstração dos resultados obtidos neste ensaio, foram confeccionadas figuras e tabelas das cargas e deformações dos colmos em função do tempo.

#### **4.2.3. Substituição dos rolos do despalhador**

A Figura 15 mostra um dos rolos superiores, com taliscas helicoidais. A massa média dos rolos é de 19,0 kg, e de 27 kg para o conjunto rolo helicoidal com os discos de sustentação, o eixo, os parafusos e as porcas. O uso deste tipo de rolo teve como finalidade promover um movimento giratório do colmo ao ser introduzido no despalhador, procurando proporcionar um maior contato perimetral entre o mesmo e as taliscas; aumentando, desta forma, os pontos de aplicação da carga de raspagem gerada pelo sistema.



**Figura 15.** Rolo superior oscilante com taliscas helicoidais.

Para uma melhor visualização do despalhador com rolos helicoidais, a Figura 16 ilustra uma vista de extremo por onde os colmos são introduzidos.



**Figura 16.** Vista lateral do despalhador

#### 4.2.4. Condições de regulagem do despalhador para o ensaio de passagem dos colmos

##### 4.2.4.1. Obtenção dos diferenciais de velocidades de rotação dos rolos

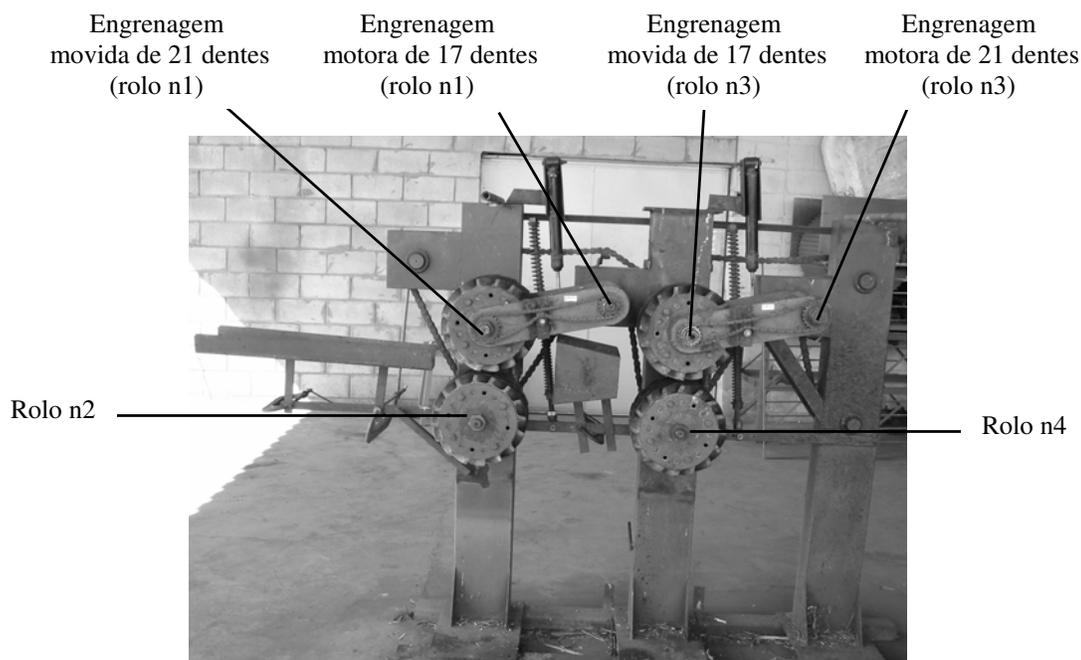
A configuração do diferencial de velocidades de rotação dos rolos para a execução do ensaio de passagem dos colmos pelo despalhador, foi de 43% para DVTR e 19% entre pares de rolos subseqüentes (DVTPRS). Essa configuração foi obtida por meio de alterações nas posições das engrenagens de acionamento dos rolos. É uma combinação não testada por TANAKA (1996), sendo que as combinações utilizadas por este autor, estão demonstradas na Tabela 2.

**Tabela 2.** Diferenciais de velocidade de rotação dos rolos utilizada por TANAKA (1996).

Combinações	Diferencial (%)	
	DVTR	DVTPRS
I	43	29
II	29	19
III	0	19

##### 4.2.4.1.1. Obtenção da configuração do diferencial de velocidades

Figura 17 mostra a vista frontal e a 18, a vista posterior do despalhador, onde fica o conjunto de engrenagens acionadoras dos rolos. No rolo  $n_4$ , foi o ponto referencial de rotação obtido por meio do Inversor de Freqüência. Trata-se do mesmo referencial utilizado por TANAKA (1996).



**Figura 17.** Vista frontal do despalhador.



**Figura 18.** Vista posterior do despalhador.

Sendo assim, as relações de velocidades (motoras/movidas) para obtenção dos diferenciais de velocidades nesta configuração foram:

$$n_4: 263 \text{ rpm}; \quad (48)$$

$$n_1: 263 * \frac{21}{21} * \frac{17}{21} = 213 \text{ rpm}; \quad (49)$$

$$n_2: 263 * \frac{21}{15} = 368 \text{ rpm e}; \quad (50)$$

$$n_3: 263 * \frac{21}{15} * \frac{21}{17} = 455 \text{ rpm}. \quad (51)$$

A relação de velocidades entre os rolos do par de entradas (DVTR $n_1/n_2$ ) é dada pela equação (52), utilizando os valores dados pelas equações (49) e (50).

$$DVTR \frac{n_1}{n_2} : \frac{213}{368} = 0,57 \text{ ou seja, } 1 - 0,57 = 0,43 \text{ portanto } 43\% \quad (52)$$

A relação de velocidades entre os rolos do par de saídas (DVTR $n_4/n_3$ ) é dada pela equação (53), utilizando os valores dados pelas equações (48) e (51).

$$DVTR \frac{n_4}{n_3} : \frac{263}{455} = 0,57 \text{ ou seja, } 1 - 0,57 = 0,43 \text{ portanto } 43\% \quad (53)$$

Sendo as rotações médias dos pares de rolos de entrada e saída, dadas pelas equações (54) e (55).

$$\frac{n_1 + n_2}{2} = 290 \text{ rpm e}; \quad (54)$$

$$\frac{n_3 + n_4}{2} = 356 \text{ rpm}. \quad (55)$$

A relação de velocidades entre os paras de rolos de entrada e saída (DVTPRS), é dada pela equação (56), utilizando os valores dados pelas equações (54) e (55).

$$DVTPRS: \frac{290}{356} = 0,81 \text{ ou seja, } 1 - 0,81 = 0,19 \text{ portanto } 19\% \quad (56)$$

#### 4.2.5. Cargas estáticas nas molas helicoidais superiores e inferiores

As cargas estáticas superiores (CEMS) e inferiores (CEMI) foram definidas a partir da combinação dos três níveis diferentes de deformações nas molas helicoidais superiores dos rolos superiores (04, 14 e 24 mm para  $E_{sup}$ ) e 3 níveis da inferior (0, 21 e 36 mm para  $E_{inf}$ ). Os valores das cargas estáticas nas molas foram obtidos por meio da equação (57) considerando as deformações e as constantes elásticas médias ( $K_{sup}$ ) e ( $K_{inf}$ ) das molas efetuadas pelo sistema de regulem por porcas das molas como mostra a Tabela 3.

**Tabela 3.** Constantes elásticas médias das molas (PIGNELLI e BRAUNBECK, 2001).

Molas Superiores (N/mm)		Molas Inferiores (N/mm)	
$K1_{sup}$	$K2_{sup}$	$K1_{inf}$	$K2_{inf}$
12,82	12,78	12,77	12,77
<b>Médias</b>	12,80		12,77

$$Ce = Km * E \quad (57)$$

onde:

Ce: Carga estática (N);

Km: Constante elástica das molas (N/mm);

E: regulagens das molas (mm).

Consideraram-se como tratamentos as cargas estáticas resultantes, em ordem decrescente (Tabela 4), das cargas estáticas provenientes da combinação entre os 3 níveis de deformações da mola helicoidal superior ( $E_{sup}$ ) e 3 níveis da inferior ( $E_{inf}$ ), somando-se um total de 9.

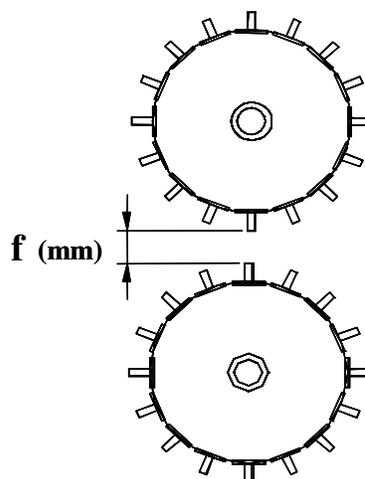
**Tabela 4.** Cargas estáticas nas molas superiores e inferiores e carga estática resultante.

Tratamentos	Cargas Estáticas (N)		
	CEMS*	CEMI**	Resultantes
1	307	0	307
2	179	0	179
3	51	0	51
4	307	-268	39
5	179	-268	-89
6	307	-460	-153
7	51	-268	-217
8	179	-460	-281
9	51	-460	-409

\* Descendente e; \*\* Ascendente.

#### 4.2.6. Folga entre os rolos superiores e inferiores

Durante a execução dos ensaios, foi deixada entre os rolos superiores e inferiores, uma folga “f” ilustrada na Figura 19, de 15mm, por meio da regulagem dos batentes que sustentam os braços articulados.

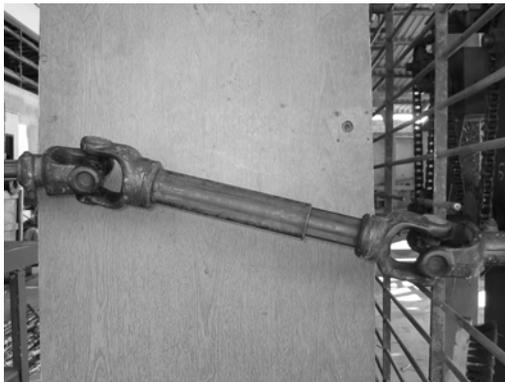


**Figura 19.** Folga “f” entre os rolos superiores e inferiores.

#### 4.2.7. Acionamento do despachador por meio do Inversor de Frequência

A fonte das velocidades de rotação dos rolos foi obtida por meio do acionamento dos mesmos pelo Inversor de Frequência. Um cardan foi utilizado para fazer a conexão entre o

despalhador e o Inversor, como mostra a Figura 20.

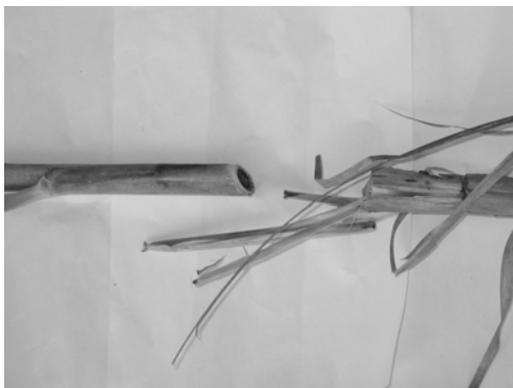


**Figura 20.** Cardan utilizado para acoplar o Inversor ao despalhador.

Há dois pontos de acoplamento, no  $n_4$  e  $n_2$ . O  $n_4$  foi utilizado para definição dos diferenciais de velocidade de rotação e a acoplamento do cardan rolo  $n_2$ , onde o Inversor foi acionado com uma velocidade de rotação de 368 rpm.

#### **4.2.8. Colmos de cana-de-açúcar**

A cana-de-açúcar foi cortada manualmente, utilizando os colmos inteiros, com palha e sem os ponteiros para simular as condições de alimentação da colhedora no campo. A Figura 21 mostra a zona de desponte do colmo.



**Figura 21.** Zona de desponte do colmo.

Os colmos foram divididos em 9 grupos contendo 15 unidades de colmos de cana-de-açúcar para cada um dos tratamentos, a fim de serem submetidos ao ensaio de passagem dos colmos pelo despalhador. A Figura 22 mostra um desses grupos.



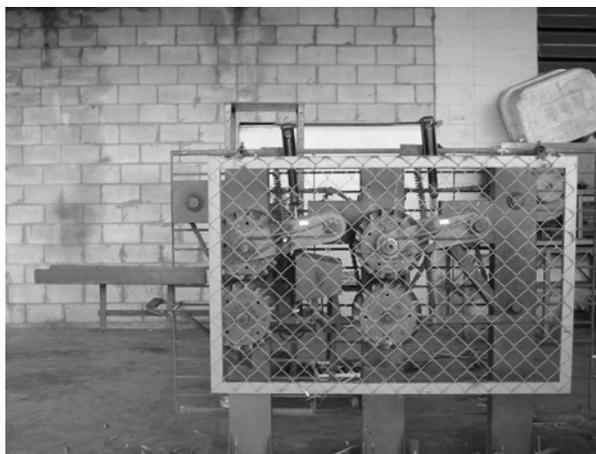
**Figura 22.** Grupo de colmos antes de ser submetido ao ensaio.

#### **4.2.9. Ensaio de passagem dos colmos**

Por questões de segurança de trabalho, o despalhador é posto em funcionamento, somente se estiver com a tela (parte frontal) e a grade (parte posterior) de proteção, como mostra a Figura 23.

Cada um dos colmos de cana-de-açúcar teve seu comprimento e diâmetros (base, meio e topo) medidos. Foram contadas as folhas e as gemas dos colmos antes do ensaio de passagem dos colmos pelo despalhador. Os colmos foram introduzidos manual e individualmente, a partir da base, sendo conduzidos por uma calha para o despalhador, como mostra a Figura 24, efetuando-se duas passagens por colmo. A Figura 25 mostra o momento da passagem do colmo pelo despalhador.

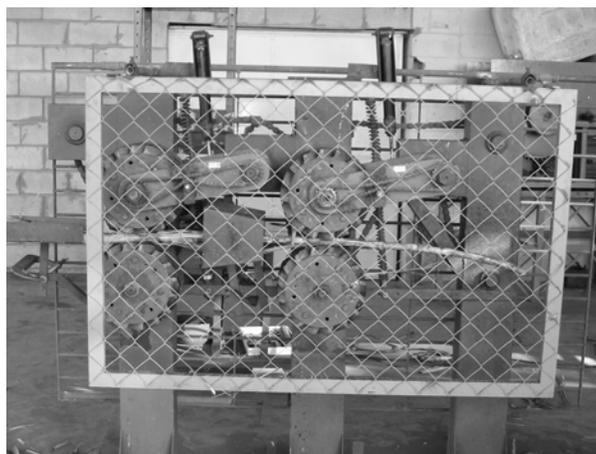
Foram verificadas, posteriormente, as folhas remanescentes no colmo; as gemas visivelmente danificadas e os danos mecânicos visíveis no topo, na porção média e na base dos colmos, após cada passagem.



**Figura 23.** Despalhador com tela e grade de proteção.



**Figura 24.** Introdução manual e individual dos colmos pelo despalhador.



**Figura 25.** Passagem do colmo pelo despalhador

#### 4.2.10. Determinação da velocidade dos colmos durante o ensaio de passagem

A velocidade média  $V_{m1}$  do colmo quando passa pelo primeiro par de rolos ( $n_1$  e  $n_2$ ) e a  $V_{m2}$ , quando passa pelo segundo par de rolos ( $n_3$  e  $n_4$ ), determinadas por meio da equação (58), estão da Tabela 5.

$$V_m = \omega * R \quad (58)$$

onde:

$V_m$ : velocidade média de passagem do colmo (m/s);

$\omega$ : média de velocidade de rotação entre os rolos superiores e inferiores (rd/s);

R: raio do rolo.

**Tabela 5.** Velocidades de rotação dos rolos e de passagem dos colmos pelo despalhador.

rpm				m/s	
$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$V_{m1}$	$V_{m2}$
188	368	515	263	4,36	6,11

#### 4.2.11. Avaliação dos danos mecânicos nos colmos

Para avaliação dos danos mecânicos serão atribuídas notas conforme a Tabela 6 abaixo, adaptada de TANAKA (1996).

**Tabela 6.** Avaliação dos danos mecânicos nos colmos (Adaptado de TANAKA, 1996).

Nota	Tipo de dano mecânico observado / Comprimento
0	Sem danos
1	Fissuras / 00 a 50 mm
2	Fissuras / 50 a 100 mm
3	Fissuras / 100 a 200 mm
4	Fissuras / 200 a 300 mm
5	Fissuras maiores que 300 mm
6	Rupturas e/ou Esmagamentos

#### **4.2.12. Análise estatística do ensaio de passagem dos colmos**

As análises estatísticas dos dados levantados durante os ensaios foram baseadas em GOMES (1973), utilizando-se os pacotes estatísticos dos programas SANEST e SISVAR. Foi efetuada análise de variância segundo delineamento experimental inteiramente casualizado (DIC), em esquema fatorial 3x3 para 9 tratamentos, com 15 repetições.

Havendo diferenças significativas pelo Teste F, será aplicado o Teste Tukey a 5% de probabilidade, para comparação das médias obtidas; sendo confeccionadas tabelas e figuras demonstrativas dos resultados.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados das simulações das cargas dinâmicas de despalhamento, das deformações médias dos colmos e as análises estatísticas dos níveis de despalhamento, levantados no ensaio de passagem dos colmos pelo despalhador, serão apresentados e discutidos de tal forma que se possa justificar o desempenho de despalhamento em função das variáveis do projeto do despalhador.

### 5.1. Características dimensionais dos grupos de colmos da variedade de cana-de-açúcar utilizada

As dimensões dos colmos utilizados nos ensaios estão relacionadas na Tabela 7 de acordo com os tratamentos. Os diâmetros médios dos grupos utilizados para execução dos ensaios nos tratamentos 1, 5 e 6, apresentam os menores valores, oscilando entre 22,7 e 24,8 mm. Os maiores diâmetros, com valores entre 26,4 e 29 mm, correspondem aos tratamentos 2,3,4 e 8. Um maior destaque, merece a diferença entre os diâmetros dos grupos utilizado no tratamento 4 com 29 mm e no tratamento 6 com 22,7 mm.

**Tabela 7.** Comprimentos médios e diâmetros dos colmos de cana-de-açúcar.

Tratamentos	Comprimento	Diâmetros (mm)			Médio
		Base	Meio	Topo	
1	2116,60	39,53	27,46	18,00	24,80
2	2308,60	32,00	26,53	20,06	26,40
3	2396,00	36,86	28,20	16,66	27,13
4	2032,00	37,53	28,73	20,40	29,00
5	2212,60	28,80	26,06	19,73	24,80
6	2224,60	26,53	24,13	17,53	22,73
7	2451,30	31,80	27,80	18,33	26,00
8	2373,30	35,53	29,80	18,60	27,86

## **5.2. Simulação das cargas dinâmicas de despalhamento e das deformações dos colmos**

A simulação efetuada utilizando um modelo dinâmico do despalhador, permitirá simular o comportamento das forças normais ( $F_y$ ) aplicadas pelos rolos e as deformações nos colmos, conforme as equações 45 e 46. Foram estimadas as cargas máximas que estão associadas com os danos mecânicos, ocorridos nos ensaios de passagens dos colmos. Foram observados os valores mínimos de  $F_y$ , que permitiu identificar as condições de operação associadas com afastamento dos rolos dos colmos e, conseqüente, anulação da ação de despalhamento.

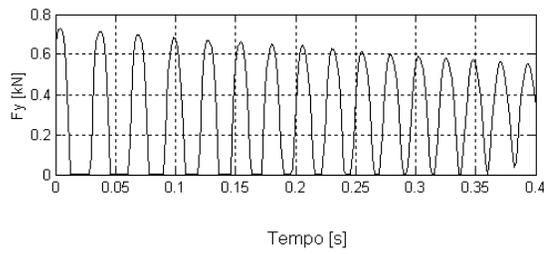
As simulações permitiram também, determinar a freqüência natural de oscilação do braço de sustentação do rolo oscilante; freqüência essa que pode ser adotada como função objetivo, em um processo de otimização orientado a aumentar o tempo ou o número de pontos de contato, entre os rolos com os colmos.

### **5.2.1. Análise das cargas dinâmicas de despalhamento ( $F_y$ )**

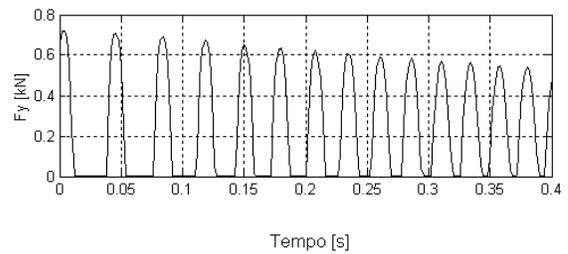
Os comportamentos das cargas dinâmicas de despalhamento, simuladas em todos os tratamentos estão apresentadas na Figura 26, com exceção do Tratamento 9, para o qual a carga ficou muito próxima da apresentada pelo Tratamento 8, e, portanto, fora desconsiderado. O tempo de simulação adotado foi de aproximadamente 0,4s, o qual corresponde ao tempo em que o colmo leva para percorrer pelo despalhador, já que o comprimento médio dos mesmos é pouco maior que 2 m e a velocidade média de passagem, próxima de 5 m/s.

As cargas estáticas resultantes aplicadas pelas molas, juntamente com as cargas dinâmicas simuladas estão indicadas na Tabela 8. As cargas dinâmicas incluem valores máximos, tanto no tempo de entrada como no tempo de saída dos colmos, e os médios, os quais correspondem aos diâmetros maiores e menores dos mesmos, respectivamente.

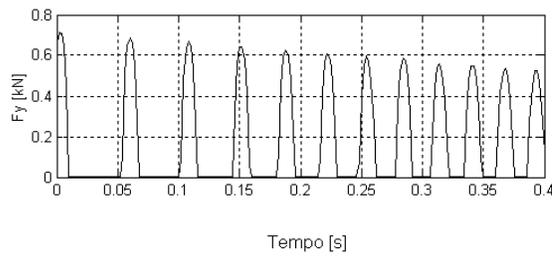
As cargas estáticas aplicadas pelas molas, oscilam entre um valor máximo de 307 N com sentido descendente no Tratamento 1, até um valor de -281 N com sentido ascendente no Tratamento 8. Essas cargas devem ser consideradas como um parâmetro de ajuste do despalhador, já que as mesmas correspondem a uma condição sem presença de colmos entre os rolos e com o braço oscilante apoiado no batente.



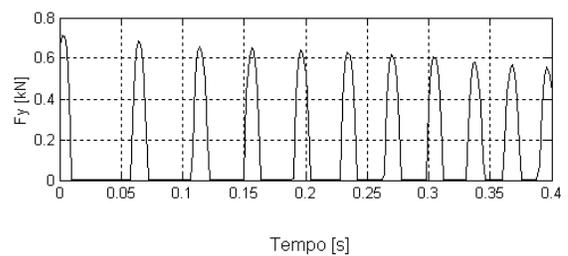
**307 N (Tratamento 1)**



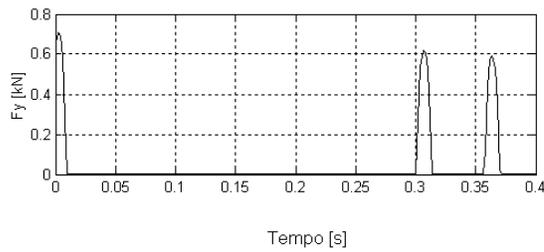
**179 N (Tratamento 2)**



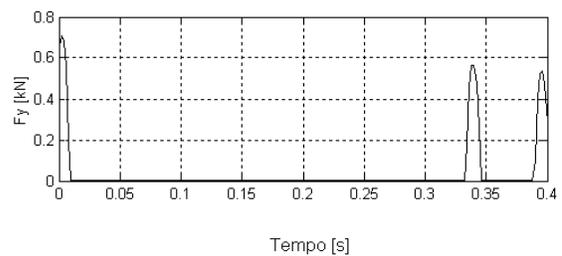
**51 N (Tratamento 3)**



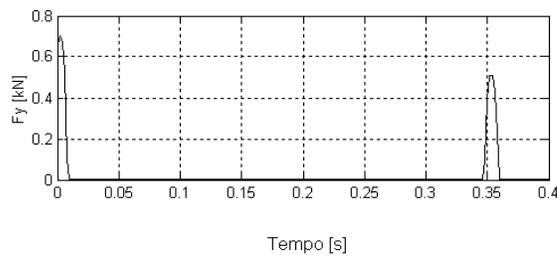
**39 N (Tratamento 4)**



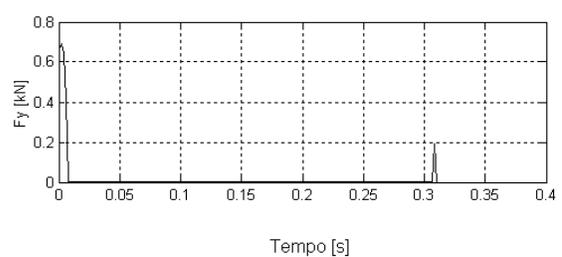
**-89 N (Tratamento 5)**



**-153 N (Tratamento 6)**



**-217 N (Tratamento 7)**



**-281 N (Tratamento 8)**

**Figura 26.** Simulação das cargas dinâmicas de despalhamento, a partir das cargas estáticas resultantes.

**Tabela 8.** Cargas dinâmicas simuladas na entrada e na saída dos colmos.

Tratamentos	Cargas Dinâmicas Simuladas (N)			Média
	Resultantes	Entrada*	Saída*	
1	307	732	550	309
2	179	721	543	241
3	51	714	537	179
4	39	712	529	164
5	-89	708	600	44
6	-153	705	518	38
7	-217	702	506	24
8	-281	700	200	14

\*Base do colmo; \*\*Topo do colmo.

A amplitude decrescente das curvas das cargas surge, em função do amortecimento do sistema e da redução do diâmetro do colmo, desde a base até o topo. Cabe destacar que os ensaios foram realizados com colmos individuais, situação essa pouco freqüente na operação normal de colheita mecanizada, onde existe uma solução de continuidade na alimentação sucessiva de colmos e, portanto, essa condição inicial de maior amplitude da força  $F_y$ , seria menos freqüente.

As cargas dinâmicas simuladas variam em consonância com a carga estática; analisando os valores da carga dinâmica média, verifica-se que a mesma é sempre superior à carga estática. Esta diferença surge do peso próprio do mecanismo, o qual está contido no valor da carga simulada, mas não faz parte da carga das molas. A natureza oscilante da carga aplicada pelos rolos aos colmos é uma propriedade física do mecanismo que não pode ser eliminada, mas pode ser alterada visando melhorar o desempenho do despalhador.

As curvas de carga dinâmica no Tratamento 1, mostra uma freqüência natural de oscilação do braço articulado de 32,5 Hz. Este valor é muito próximo à freqüência de 35 Hz registrada por TANAKA (2001). Esta proximidade é conseqüência do processo de otimização, incorporado pelo pesquisador ao mecanismo, procurando um maior contato entre os rolos e colmos, como forma de melhorar o desempenho do despalhador. Vale ressaltar que a referida freqüência natural de oscilação, encontra-se próxima também da freqüência de excitação, aplicada pela passagem do colmo com nós espaçados de, aproximadamente, 150 mm. Considerando que a velocidade de avanço dos colmos é cerca de 5 m/s, resulta uma freqüência de excitação de 33 Hz.

Essa condição contribui para aumentar a amplitude de oscilação da força  $F_y$  e, dessa forma podem prejudicar o desempenho do despalhador, por meio dos danos mecânicos gerados pela carga máxima e por meio das deficiências de despalhamento, associadas com o valor mínimo de  $F_y$ . Os tratamentos 5 ao 8 ilustram esta condição, mostrando um afastamento entre os rolos e os colmos, com valores nulos para a força  $F_y$ . A velocidade de passagem dos colmos pelo despalhador deve, portanto, ser contemplada como variável do projeto do desempenho de despalhamento.

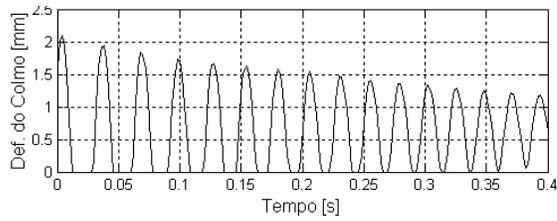
### **5.2.2. Análise das deformações dos colmos (Def)**

As simulações efetuadas utilizaram a constante elástica do comportamento mecânico diametral dos colmos, obtidos por TANAKA (2001). As deformações diametraes geradas pela simulação estão apresentadas na Figura 27; as deformações máximas e médias de estabilização estão relacionadas na Tabela 9.

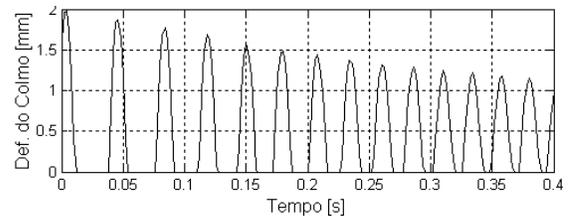
Os valores médios de deformação oscilam entre 0,0 e 0,7 mm, para todos os tratamentos; deformações essas que não correspondem com as fissuras, rupturas e/ou esmagamentos ocorridas nos colmos durante os ensaios, e nem com as rupturas observadas por TANAKA (1996). No entanto, pode-se observar na Tabela 9 que, as deformações máximas correspondentes aos tratamentos 1 e 2, encontram-se próximas de 2 mm; deformação essa sim, capaz de provocar os referido danos nos colmos.

O Tratamento 1 apresentou maior carga dinâmica média e, conseqüentemente, a maior deformação nos colmos. Observa-se que a deformação máxima, ficou um pouco acima de 2 mm. Isso ocorreu no momento inicial de introdução dos colmos no despalhador. Nota-se que, lentamente, essa deformação tende a se estabilizar, mas para tempos muito superiores ao tempo de residência do colmo no despalhador.

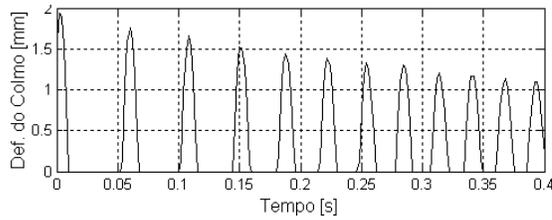
A deformação média de estabilização neste tratamento ficou em 0,70 mm, valor esse bem superior aos simulados para os outros tratamentos. No que se refere às máximas, o comportamento observado no Tratamento 2 foi similar ao 1. Essa similaridade se deu, em função das maiores cargas dinâmicas médias, 309 e 241 N aplicadas nos tratamentos 1 e 2.



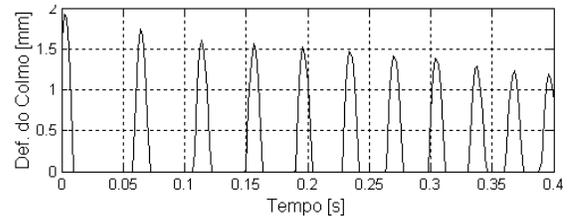
**307 N (Tratamento 1)**



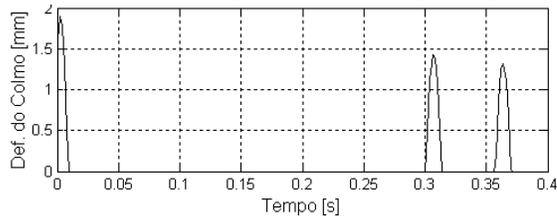
**179 N (Tratamento 2)**



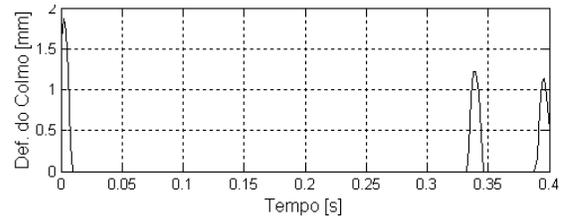
**51 N (Tratamento 3)**



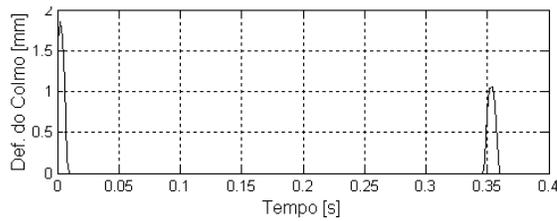
**39 N (Tratamento 4)**



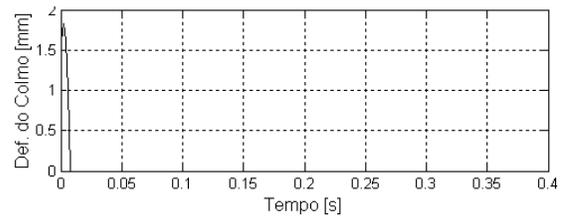
**-89 N (Tratamento 5)**



**-153 N (Tratamento 6)**



**-217 N (Tratamento 7)**



**-281 N (Tratamento 8)**

**Figura 27.** Simulação das deformações dos colmos, a partir das cargas estáticas resultantes.

**Tabela 9.** Máximas e médias de estabilização das deformações simuladas.

Tratamento	Carga Estática		Deformações (mm)	
	Resultante (N)	Carga Dinâmica Média Simulada	Máxima*	Média de Estabilização
1	307	309	2,10	0,70
2	179	241	2,00	0,50
3	51	179	1,90	0,50
4	39	164	1,90	0,40
5	-89	44	1,90	0,17
6	-153	38	1,90	0,15
7	-217	24	1,80	0,10
8	-281	14	1,80	0,00

\* Entrada do colmo.

A média no Tratamento 2, foi de 0,50 mm; é um valor menor que o do Tratamento 1, no entanto, na análise dos danos, em quase todas as regiões dos colmos, observou-se altos índices de danos nos colmos em ambos os casos. As maiores deformações indicadas pela simulação para os tratamentos 1 e 2, correspondem adequadamente aos danos verificados nos colmos durante os ensaios.

Da observação da figura de deformação dos colmos para todos os tratamentos, verifica-se que existe um valor máximo das curvas de deformação, no tempo inicial de entrada do colmo no despalhador e um valor médio estabilizado de deformação, para um tempo muito maior que o tempo de residência do colmo no despalhador.

Tanto a deformação máxima quanto a média estabilizada, diminuem do Tratamento 1 ao 8, como conseqüência da redução na carga estática aplicada. Observa-se, nos tratamentos 5 a 8, a presença de um “salto” inicial, provocado pela entrada da base do colmo no interstício existente entre os rolos fixos inferiores e os oscilantes superiores. Observa-se ainda que, a duração do salto é da ordem de magnitude de tempo, próximo ao tempo de residência do colmo no despalhador.

A grande perturbação inicial, gerada pela entrada do colmo, provoca um afastamento do rolo durante, aproximadamente, 0,35s, no Tratamento 5. Existe, portanto, a possibilidade de um colmo passar pelo despalhador sem ação de despalhamento. Deve-se salientar que, este tipo de perturbação inicial é pouco provável em condição de alimentação com fluxo contínuo de colmos, como ocorre em colhedoras comerciais de cana-de-açúcar.

### **5.3. Análise dos ensaios de passagem dos colmos pelo despalhador**

O fato de se efetuar duas passagens por colmo pelo despalhador, teve a intenção de simular um conjunto de quatro pares de rolos. Entretanto, isso não significa que se chegaria, necessariamente, ao mesmo resultado se os ensaios tivessem sido realizados nesse conjunto. As figuras seguintes mostrarão os resultados obtidos na segunda passagem e os resultados da primeira passagem, encontram-se em anexo.

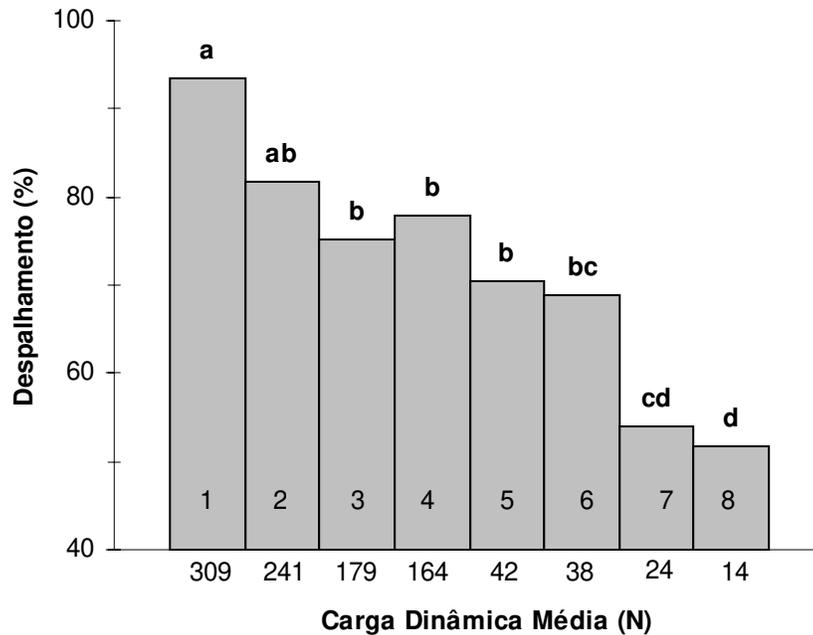
#### **5.3.1. Análise do despalhamento**

As porcentagens médias de despalhamento, obtidas nos ensaios estão apresentadas na Figura 28, em função das cargas dinâmicas médias simuladas, para as quais correspondem as cargas estáticas resultantes relacionadas na Tabela 8. Letras distintas diferem entre si, ao nível de significância de 5%, pelo teste Tukey.

O Tratamento 1 apresentou uma média de despalhamento 93 %, sendo a mais alta entre os tratamentos aplicados. Este desempenho corresponde a uma carga estática das molas de 307 N e carga dinâmica média simulada de 309 N, cargas estas também as mais altas entre os tratamentos aplicados e não há diferença estatística em relação ao Tratamento 2, que atingiu uma média superior aos 81% de despalhamento.

Essas porcentagens são superiores a considerada a maior obtida por TANAKA et al. (1997) que, utilizando o mesmo despalhador só que com rolos de taliscas retas, atingiu cerca de 80% de despalhamento, utilizando colmos de cana-de-açúcar da variedade SP701143, sob condição de carga a 360 N nas molas e diferenciais de velocidades de 43%, para DVTR e 29%, para DVTPRS. Também é superior aos 64,5% que SILVA et al. (2002) alcançaram, utilizando o mesmo despalhador sob outras condições de cargas aplicadas e diferente configuração do diferencial de velocidades dos rolos.

Pôde-se observar que, as porcentagens de despalhamento estão diretamente associadas ao nível de carga dinâmica média aplicada sobre os colmos. O despalhamento aumenta de 50%, com carga dinâmica média de 14 N no Tratamento 8, para mais de 90%, com carga dinâmica média de 309 N no Tratamento 1. Há uma particularidade, entretanto, entre os tratamentos 3 e 4, ou seja, apesar da carga dinâmica média simulada ser maior em 3,



**Figura 28.** Despalhamento dos colmos. Coeficiente de variação de 19,3 %.

houve uma maior porcentagem de despalhamento em 4. Esse fato se deu devido ao diâmetro médio do grupo de colmos utilizado no Tratamento 4, ser superior ao grupo utilizado no Tratamento 3, como mostrou a Tabela 7.

Os tratamentos 7 e 8, apresentam despalhamentos de 54 % e pouco mais que 51%, respectivamente. Esta última é a porcentagem menor entre todas analisadas, bem como apresenta a menor carga dinâmica média, ou seja, 141 N. Estes dois tratamentos, estatisticamente, diferem de forma significativa dos demais, mas quase não há diferença entre si, mostrando-se os tratamentos menos eficientes no despalhamento.

Ainda assim, estas baixas porcentagens de despalhamento, ficam acima da menor registrada por TANAKA (1996), que foi de 45,6%, mas sem diferencial de velocidades, entre os rolos superiores e inferiores e 19%, entre os pares de rolos subsequentes do despalhador. Vale ressaltar que, a carga utilizada por este autor para se chegar a este valor, foi de 412 N na mola inferior e nula na superior.

Essa condição de carga é semelhante à da carga estática resultante (-409 N) do Tratamento 9, inicialmente previsto para fazer parte desta dissertação; reforçando, portanto, a decisão de desconsiderar os dados do ensaio deste tratamento.

O aprimoramento do desempenho de despalhamento, por meio de aumento de carga dinâmica aplicada pelos rolos sobre os colmos é limitado pelos danos mecânicos, proporcionados por maiores cargas, principalmente na base dos colmos. Embora a carga dinâmica de despalhamento tenha mostrado efeito significativo sobre o desempenho do despalhador, pôde-se observar na Figura 28 que, reduções bastante importantes de carga, podem resultar em efeitos estatisticamente não significativos.

Nessa condição, encontram-se os tratamentos de 2 a 6, onde uma redução superior a 80% na carga dinâmica média simulada, não provocou efeito significativo no desempenho do despalhador. Consideração similar, pode-se fazer comparando os tratamentos 1 e 2, ou 6 e 7, ou 7 e 8, onde as reduções nas cargas dinâmicas médias, não tiveram efeitos significativos no desempenho de despalhamento.

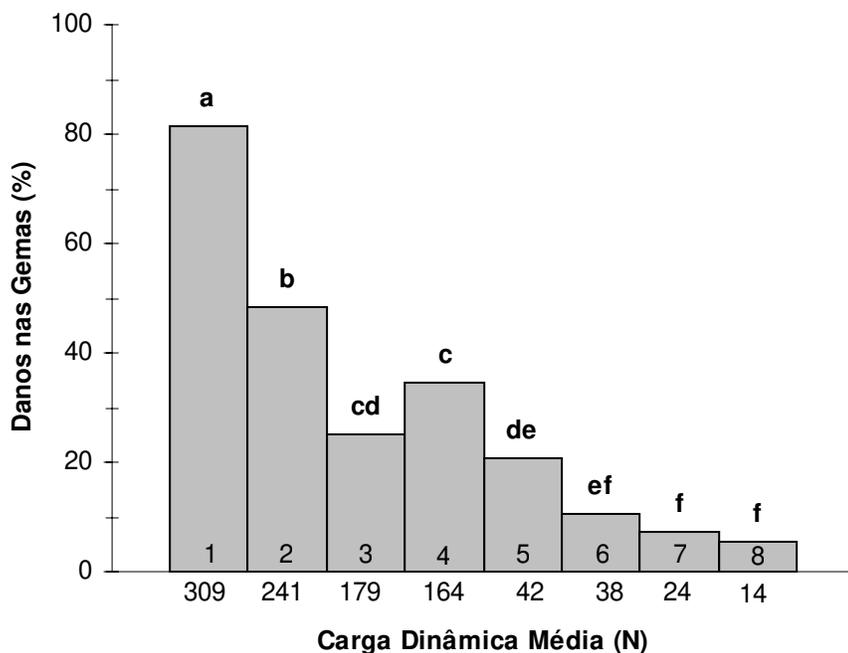
A carga dinâmica média não é o único parâmetro, com efeito, bem definido sobre o desempenho do despalhador. Os parâmetros abaixo relacionados têm mostrado também efeitos significativos no desempenho de despalhamento:

- Número de pares de rolos em cascata;
- Diferença de velocidades entre rolos justapostos e entre pares sucessivos;
- Freqüência de oscilação do braço articulado que sustenta o rolo.

O efeito da freqüência de oscilação, do braço articulado, está embutido na diferença do desempenho descrita entre o presente trabalho e o realizado por TANAKA (1996). Entre ambos trabalhos, existem diferença no comprimento dos braços superiores do despalhador, que passaram de 0,55 m para 0,375 m, após ter sido submetido ao processo de otimização por TANAKA (2001).

### **5.3.2. Análise dos danos nas gemas dos colmos**

Os índices de danos nas gemas dos colmos, submetidos aos ensaios, foram mais altos nos tratamentos que apresentaram cargas dinâmicas médias simuladas, entre 200 e pouco acima de 300 N, como mostra a Figura 29.



**Figura 29.** Danos nas gemas dos colmos. Coeficiente de variação de 35,2 %.

Os danos provocados nestes tratamentos inviabilizam os colmos, para fins de plantio. Há uma diferença bem acentuada nas gemas danificadas, entre as cargas dinâmicas médias de 309 e 241 N, apesar de serem bastante semelhantes. Nota-se que, embora a simulação das deformações dos colmos nos tratamentos 3 e 4, mostraram-se bem próximas, 0,5 e 0,40 mm, em função das cargas 179 e 164 N, respectivamente, os diâmetros médios podem ajudar a explicar o fato dos danos ocorridos no Tratamento 3, serem menores que em 4.

Uma tendência de equilíbrio entre a carga de despalhamento, adequada para retirar o máximo de folhas danificando o mínimo de gemas, pode estar sendo indicada entre os tratamentos 3 e 4 e o Tratamento 5, onde apresentaram índices satisfatórios de remoção de folhas, ocasionando pouco mais que 20 % de danos nas gemas.

Entretanto, TANAKA (1996) registrou, no mesmo tratamento que alcançou o melhor desempenho, em termos de remoção de folhas, uma porcentagem de 26,5% de danos nas gemas, ou seja, bem abaixo dos ocorridos no Tratamento 1. Ainda assim, essa porcentagem é considerada pelo autor, inviável para utilização de colmos para fins de plantio.

A porcentagem de danos nas gemas do Tratamento 6, ficou um pouco acima dos 10%, mas apesar deste valor ser praticamente a metade da alcançada no Tratamento 5, há

pouca diferença estatística ao nível de 5% de probabilidade, demonstrando que o ajuste das cargas estáticas nas molas deste tratamento é mais adequada que a adotado em 5. As porcentagens de danos nos tratamentos 7 e 8 foram bem baixas; este último, inclusive, foi inferior a menor registrada por TANAKA (1996).

### **5.3.3. Análise dos danos nos colmos**

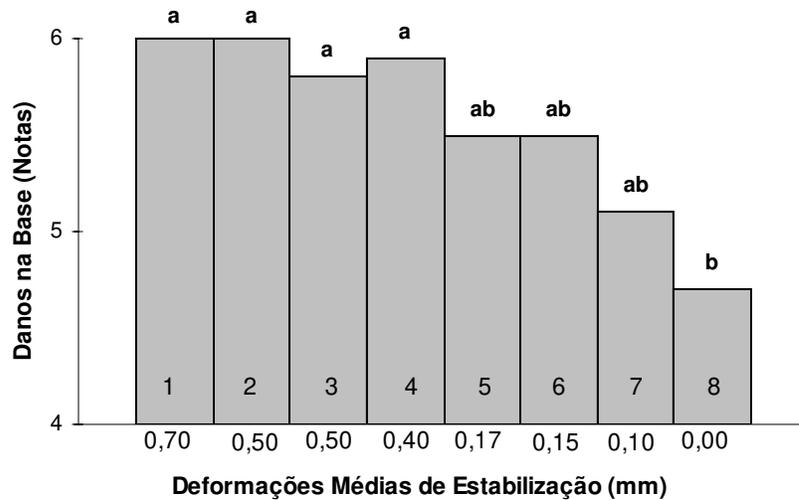
A análise dos danos nos colmos auxilia no estudo da intensidade das cargas dinâmicas de despalhamento, aplicadas pelo rolo nos colmos. Cargas excessivas provocam fissuras, rupturas e/ou esmagamentos que, por sua vez, promovem separação de fragmentos menores, na forma de estilhaços, os quais resultam em perdas quando arrastados pelo ar, no processo de limpeza; ou, simplesmente, provocam deterioração da matéria-prima quando expostos à ação de fungos, bactérias e oxidação, se o tempo entre a colheita e a moagem for grande.

#### **5.3.3.1. Danos na base dos colmos**

As bases dos colmos foram altamente danificadas em todos os tratamentos analisados, como apresenta a Figura 30.

Considerando a Tabela 6, que apresenta as notas para avaliação dos danos mecânicos nos colmos, em quase todos houve rupturas e/ou esmagamentos nas bases dos colmos. É possível se fazer uma relação entre as cargas médias de despalhamento e os diâmetros médios dos colmos. Nos tratamentos 1 e 2, por exemplo, as diferenças dos diâmetros médios, sendo maior em 2, foi o que mais contribuiu para os danos nas bases, em ambos tratamentos, não apresentaram diferença significativas entre si.

A alta média de nota de danos no Tratamento 4, deve-se ao fato do grupo de colmos utilizados no ensaio, possuir um diâmetro médio de 29mm. As diversas considerações sobre as variações diametraais dos colmos, indicam que as mesmas também podem se tornar uma variável de projeto do mecanismo, criando mais um ponto de auxílio na análise do desempenho do despalhador, principalmente, quanto aos danos ao longo dos colmos.



**Figura 30.** Danos na base dos colmos. Coeficiente de variação de 14,0 %.

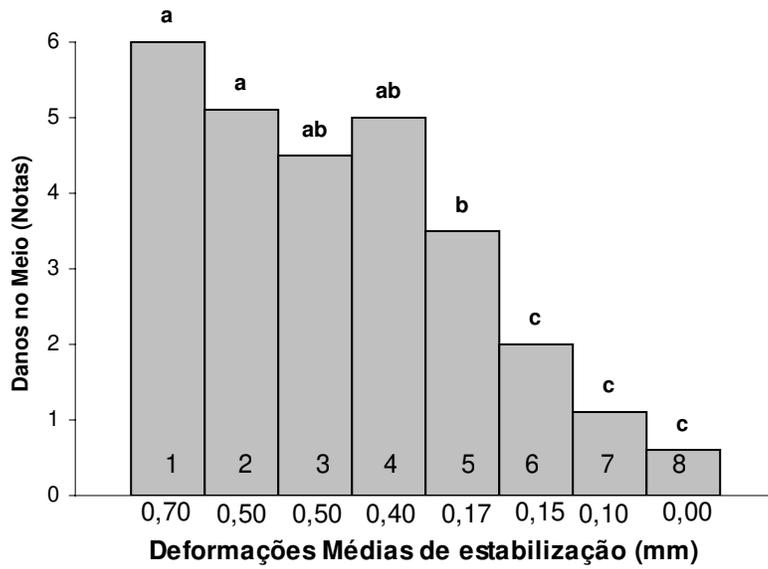
### 5.3.3.2. Danos no meio dos colmos

Observa-se, na Figura 31, uma variação dos danos entre todos os tratamentos, no meio dos colmos. No Tratamento 1 que apresenta, na simulação, a maior carga dinâmica média de despalhamento e maior deformação nos colmos, houve rupturas e/ou esmagamentos no meio dos colmos.

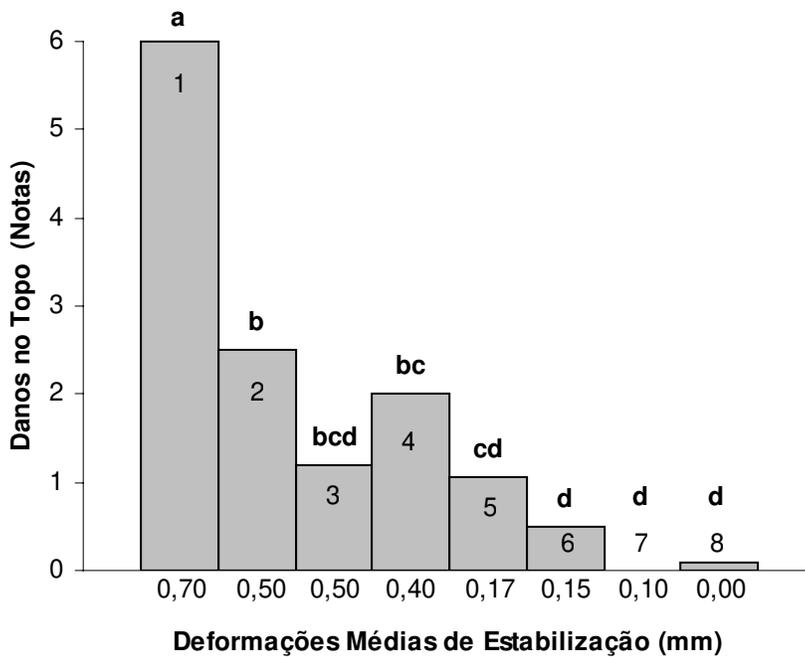
As variações nos diâmetros médios dos colmos destes grupos, no entanto, não interferiram significativamente nas deformações das regiões intermediárias dos mesmos.

### 5.3.3.3. Danos no topo dos colmos

Considerando as demais partes, analisadas anteriormente, o Tratamento 1 apresentou em média esmagamentos em toda extensão dos colmos, dos grupos utilizados nos ensaios de passagens dos colmos, como mostra a Figura 32. Provavelmente, este fato se deu em função da alta média de carga dinâmica de despalhamento e, principalmente, a alta deformação dos colmos, em relação aos demais, geradas na simulação.



**Figura 31.** Danos no meio dos colmos. Coeficiente de variação de 40,5 %.



**Figura 32.** Danos no topo dos colmos. Coeficiente de variação de 79,5 %.

Em termos de perdas, os índices de danos nos colmos dos tratamentos 7 e 8, podem estar dentro das estimativas de perdas, visíveis e invisíveis, durante a colheita mecanizada, verificadas por MAGALHÃES et al. (2002) .

Da observação dos colmos utilizados nos ensaios de passagem pelo despalhador, notou-se que o despalhamento é mais completo na base que no topo dos colmos. Esta verificação indica que, as cargas aplicadas pelos rolos são maiores na base, em função do maior diâmetro dos colmos nessa região.

Na medida em que a distância entre os rolos fixo e oscilante (Figura 19) é aumentada ou diminuída, consegue-se diminuir ou aumentar, respectivamente, o despalhamento e os danos mecânicos na base dos colmos. No entanto, essa regulagem proporciona pouca melhoria no meio e quase nenhuma mudança, no desempenho do despalhador na região próxima do topo.

## 6. CONCLUSÕES

1. A simulação dinâmica das cargas e deformações aplicadas pelos rolos sobre os colmos, mostrou ser ferramenta importante no processo de análise e do desempenho do despalhador e do diagnóstico das mudanças a serem efetuadas para seu aprimoramento;

2. A natureza oscilante da carga aplicada pelos rolos sobre os colmos, pode promover ruptura dos mesmos, por meio de seu valor máximo e, eventualmente, afastamento entre a rolo e o colmo, durante o movimento ascendente do braço do despalhador. O aumento da carga estática aplicada pelas molas contribui para evitar a perda deste contato, mas paralelamente, provocam maiores picos de cargas, associadas com danos mecânicos;

3. O processo de otimização aplicado por TANAKA (2001) ao despalhador, gerou uma maior frequência natural de oscilação, aumentando o número de pontos de contato dos rolos com os colmos; efeito esse que seguramente, teve contribuição positiva no melhor desempenho de despalhamento, observado nesta pesquisa;

4. O despalhador mostrou um desempenho de despalhamento bem diferenciado entre a base e o topo dos colmos. A regulagem dos batentes, requerida para evitar danos mecânicos excessivos na base dos colmos, prejudica o desempenho de despalhamento no extremo superior dos colmos, em função do seu menor diâmetro. A simulação da carga dinâmica mostra uma diminuição significativa da mesma entre a base e o topo do colmo, o que justifica o referido desempenho de despalhamento.

## **7. SUGESTÃO PARA FUTURAS PESQUISAS**

O despalhador deveria incorporar no seu projeto, uma concepção que permitisse fazer com que a ação da raspagem das taliscas, atingisse mais eficientemente a região próxima ao topo, sem se tornar excessivamente agressiva na região da base dos colmos.

Considerando que a melhoria do despalhamento, pelo aumento da carga estática, está limitada pelo surgimento de danos mecânicos, torna-se necessário lançar mão das outras variáveis, tais como o comprimento do braço articulado de sustentação do rolo, a constante elástica das molas, o coeficiente de amortecimento dos amortecedores, o número de taliscas, a velocidade de rotação dos rolos, o número de pares de rolos dispostos seqüencialmente, as variações diametrais dos colmos.

A partir desta consideração, aprimorar o equacionamento e a modelagem, implementar novas simulações e direcionar o estudo para a otimização do despalhador.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALFONSI, R.R.; PEDRO, Jr., M.J.; BRUNINI, O.; BARBIERI, V. Condições climáticas para a cana-de-açúcar. Cana-de-açúcar – cultivo e utilização. **Fundação Cargill**, v.1, p.42-54, 1987.

CANA WEB/ JORNALCANA. Colhedora é usada em 280mil hectares de cana.  
<<http://www.canaweb.com.br/Noticias/>>, 11/05/2001.

CANA WEB/ JORNALCANA. Indicadores de produtividade de cana-de-açúcar.  
<<http://www.canaweb.com.br/Noticias/>>, 11/05/2001.

CONSELHO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO CIENTÍFICO E TECNOLÓGICO.  
Pesquisadores de Campinas desenvolvem combustível biológico.  
<<http://www.cnpq.br/noticias/190802.htm>>, 02/09/02.

COLETI, J.T. Técnica cultural de plantio. Cana-de-açúcar – cultivo e utilização. **Fundação Cargill**, v.1, p.284-328, 1987.

CORTEZ, L.A.; MAGALHÃES, P.S.G.; HAPP, J. Principais subprodutos da agroindústria canavieira e sua valorização. **Revista Brasileira de Energia**, v.2, n.2, p.111-146, 1992.

FERNANDES, A.C.; IRVINE, J.E. Comparação da produtividade da cana-de-açúcar por colheita mecanizada e por corte manual. **Revista STAB**, Piracicaba, p.112-117, 1986.

FUNDAÇÃO SISTEMA ESTADUAL DE ANÁLISE DE DADOS. Senso Rural: boletim de acompanhamento da demanda da força de trabalho agrícola no Estado de São Paulo e no Brasil. <<http://www.seade.gov.br/>>, 14/05/2001.

FURLANI NETO, V.L.; RIPOLI, T.C.; VILLA NOVA, N.A. Avaliação do desempenho operacional de colhedora em canaviais com e sem queima prévia. **Revista STAB**, Piracicaba,

v.15, n.2, p.18-23, 1996.

FURLANI NETO, V.L. Colheita mecanizada da Cana-de-açúcar. **Revista STAB**, Piracicaba, p.89, 1994.

GARCIA, J.C. **Mecanização na lavoura canavieira recebe crítica.**

<<http://www.udop.com.br>>, 08/04/02.

GARDANHA JÚNIOR, C.D.; MOLIN, J.P.; COELHO, J.L.D.; YAHN, C.H.; TOMIMORI, S.M.A.W. **Máquinas e Implementos Agrícolas do Brasil.** Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. São Paulo: IPT, 1991. 468 p.

GOMES, P. F. **Curso de Estatística Experimental.** Piracicaba: Nobel, 1973. 430 p.

HUDSON, J.C.; BOYCOTT, C.A.; SCOTT, D.A. Sugarcane harvesting – a new method. **The south african sugar journal**, Edgehill, Barbados. Ludlow, England, p.457-465, 1975.

IBGE. Estimativas da produção agrícola. <<http://www.ibge.gov.br/>>, 04/02/2002.

IDEA. **Indicadores de desempenho da agroindústria canavieira (safra 98/99).** Ribeirão Preto: IDEA, 2000. 181 p.

LUCA, E.F.; CAMPOS, D.C.; CERRI, C.C.; FELLER, C.; FEIGL, B.J.; PICCOLO, M.C.; MANECHINI, C.; DONZELLI, J.L.; CHAPLOT, V. Efeito da colheita sem queima de cana-de-açúcar na acumulação de resíduos vegetais em superfície – estoque de carbono e propriedades do solo. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 27. Brasília: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1999. 26 p.

MACHADO, P.A. **O uso do fogo na floresta e demais formas de vegetação.**

<<http://www.merconet.gov.br/>>, 04/02/2002.

KROES, S.; HARRIS, H.D. Effects of cane harvester basecutter parameters on quality of cut. In: Australian Society of Sugar Cane Technologists, 16, 1994, Townsville. **Proceedings...** p.169-177, 1994.

MAGALHÃES, P.S.G.; BRAUNBECK, O.A. A colheita de cana-de-açúcar: atualidades e perspectiva. In: Congreso Ingeniería Rural , 1998, La Plata. **Anais...** Ingeniería Rural y Mecanización Agraria en Ámbito Latino Americano, p. 262-271, 1998.

MAGALHÃES, P.S.G.; NEVES, J.L.; MARCHI, A.S. Avaliação de perdas invisíveis de cana-de-açúcar nos sistemas da colhedora de cana picada. **Congresso de Engenharia Agrícola**. 31, Salvador: SBEA, jul. 2002, CD-Rom.

MIYABE, Y.; ABE, M. Fundamental studies on the development of a leaf stripping machine for sugarcane. I – On the pulling – force of a leaf-detachment. **Bulletin of the Faculty of Agriculture**, Kagoshima University Japan, n.26,p.271-276, 1976.

OLIVEIRA, C.A.A. **Estudo das características de ruptura da folha da cana-de-açúcar (*saccharum spp.*) para desenvolvimento de despalhadores de rolos**. 67p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, 1998.

PAGNANO, N.B. **Despilhador inercial de facas oscilantes para cana-de-açúcar (*Saccharum ssp.*)**. 77p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, 1997.

PASSOS, S.M.G.; CANECHIO FILHO, V.; JOSÉ, A. Principais culturas. **Instituto Campineiro de Ensino Agrícola**, Campinas, v.1, p.305-351, 1973.

PAYNE, J.H. Sugar and energy losses in burned cane. **International Sugar Journal**, London, v.88, n.1054, p.191-192. 1986.

PÉREZ, J.M.M.; CORTEZ, L.A.B.; GÓMEZ, E.O.; ROCHA, J.D.; GONZÁLEZ, L.E.B.; NUNHES, J.R.; PÉREZ, L.E.B. Pirólise lenta unidimensional de uma grande partícula de capim elefante e bagaço de cana-de-açúcar em um reator de leito fixo. **Encontro de Energia no Meio Rural**. 4. Campinas: UNICAMP, out. 2002, CD-Rom.

PIGHINELLI, A.L.M.T.; BRAUNBECK, O. Limpeza mecânica de colmos inteiros de cana-de-açúcar sem queimar. **Congresso de Iniciação Científica da Universidade de Campinas**. 9. Campinas: UNICAMP, set. 2001, CD-Rom.

REVISTA GLOBO RURAL. **Cana-de-açúcar: safra renovada**. Ed. Globo, ano 16, n.187, 2001. p.14.

RIPOLI, T.C.; STUPIELLO, J.P.; J.G.B.; ZOTELLI, H.; AMARAL, J.R. Efeito da queima na exsudação dos colmos: resultados preliminares. In: Congresso Nacional da Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil, Maceió. **Anais...** p.63-70, 1996.

RIPOLI, T.C.; MIALHE, L.G. Evaluation of some performance parameters of three combine harvester of sugar cane (*sacharum* ssp.) in Alagoas, Brazil. In: Congress of the ISSCT, 17, Manilla. **Proceedings...**, 1987.

RIPOLI, T.C.; MIALHE, L.G.; BRITO, J.O. Queima de canavial: o desperdício não mais admissível. **Álcool & Açúcar**, São Paulo, n.54, p.18-23, 1990.

RIPOLI, T.C.; VILA NOVA, N.A. Colheita mecanizada de cana-de-açúcar: novos desafios. **STAB**, Piracicaba, v.11, n.1, p.28-31, 1992.

ROPOLI, T.C.; PARANHOS, S.B. **Máquinas para corte e carregamento de cana**. Piracicaba: Departamento do Centro Acadêmico Luiz de Queiroz – Departamento Editorial, 1990. 46 p.

RÍPOLI, T.C.; SEGALLA, A.L. O “push-rake” chega ao Brasil. **Revista Brasil Açucareiro**, Rio de Janeiro, v.XCVII, n.1, p.34-40, 1981.

SANTOS, I.F. **Dinâmica de sistemas mecânicos**: modelagem – simulação – visualização – verificação. São Paulo: Makron Books, 2001. 272 p.

SILVA, R.A.; MAGALHÃES, P.S.G.; BRAUNBECK, O.A.; ATARASSI, M.E.; CASTALDIM, V.A. Despalhe mecânico de colmos inteiros de cana-de-açúcar. **Congresso de Engenharia Agrícola**. 31, Salvador: SBEA, jul. 2002, CD-Rom.

SOARES, G.C., BALGO, L., PINTO, R.A. Colheita mecânica da cana picada. **Revista STAB**, Piracicaba, v.12, n.3, 1994.

SOUZA, J.C.R. Legislação Ambiental e a Cana-de-Açúcar. In: SECAPI, 4, 1999, Rio de Janeiro. **Anais...** p.33-35, 1999.

SRIVASTAVA, A.C. An investigation of Sugarcane Detrashing. Indian institute of sugarcane research. Lucknow, India. **American Society of Agricultural Engineers**, 1987. 16p. Paper n.87-5054.

SRIVASTAVA, A.; SINGH, K. Development of a Power-driven Sugarcane Detrasher. **Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America**, Tokyo, v. 21, n 2, p.49-52, 1990.

STUPIELLO, J.P.; FERNANDES, A.C. Qualidade da matéria-prima proveniente das colhedoras de cana picada e seus efeitos na fabricação de álcool e açúcar. **Revista STAB**, Piracicaba, p.45-49, 1984.

SHUKLA, L.N.; SANDHAR, N.S.; SINGH., I. Design, development and testing of a sugarcane cleaner. **Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America**, Tokyo, v.22, n 3, p.55-58 , 1991.

TANAKA, F.O. **Despalhamento de colmos de cana-de-açúcar inteira (*Saccharum spp.*) por rolos oscilantes com diferencial de velocidades.** 130p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, 1996.

TANAKA, F.O. **Otimização de um despalhador por rolos para colhedoras de cana-de-açúcar inteira.** Tese (Plano de Pesquisa submetido à banca examinadora do exame de Qualificação de Doutorado em Engenharia Agrícola) Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, 2001.

TANAKA, F.O.; MAGALHÃES, P.S.G.; BRAUNBECK, O.A. Dispositivo para remoção de palha de cana-de-açúcar inteira durante a colheita. **Congresso de Engenharia Agrícola.** 26, Campina Grande: SBEA, jul. 1997, CD-Rom.

VOLPATO, C.E.S. **Otimização de um cortador de base flutuante para segmento do perfil de solo em colhedoras de cana-de-açúcar.** 185p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, 2001.

WELLS, D.A. **Theory and problems of Lagrangian dynamics.** University of Cincinnati. Schaum's Outline Series. McGraw Hill Book, 1967.

WHALEN, S.A. Cane burning: environmental and health impacts. In: THE HAWAIIAN SUGARCANE TECHNOLOGIST ANNUAL CONFERENCE, 1989, Honolulu. **Proceedings...** p. A1-A5, 1989.

## **ANEXOS**

## ANEXO I

**Programa desenvolvido no MatLab para as simulações das cargas dinâmicas de deslocamento e deformações dos colmos.**

```
clear all
global Teta1 Teta1P mid Fy Tetam km LL OC H V m1 m2 g Ra ca IO1 R Rg Einf Esup

Esup = ( )/1000 ; % Defor. da mola sup. na posição de apoio no batente [m]
Einf = ( )/1000 ; % Defor. da mola inf. na posição de apoio no batente [m]
%-----
TT = 1.5 ; % Tempo total de simulação [s]
Dt = .002 ; % Incremento de tempo [s]
Teta10 = (12+40/60)*pi/180 ; % Angulo do braço na posição de apoio no batente [graus]
g = 9.8 ; % Aceleração da gravidade [m/s2]
mid = 0.6104 ; % Coeficiente de raspagem
ca = 522 ; % Coeficiente de amortecimento [N*s/m]
R = 0.15 ; % Raio do rolo [m]
Ra = 0.375 ; % Comprimento do braço articulado [m]
km = 12780 ; % Constante da mola [N/m]
LL = 0.32 ; % Comprimento livre da mola [m]
OC = 0.22 ; % Braço de aplicação da carga da mola [m]
H = 0.15 ; % Coordenada horizontal do ponto fixo da mola [m]
V = 0.45 ; % Coordenada vertical do ponto fixo da mola [m]
Rg = 0.25 ; % Braço de localização do c.g. do (braço + rolo)
m1 = 15.38 ; % Massa do braço [kg]
m2 = 26.73 ; % Massa do rolo [kg]
IO1 = 1.075 ; % Momento de inércia de massa do conjunto braço + rolo
Tetam = 288 * pi/180 ; % Orientação angular da base local da mola
```

```

% Incógnitas RRx RRY Teta1PP - FORCASI = [RRx RRY Teta1PP]

FORCASI = [360 ; 600 ; 10] ; % Estimativa inicial
Teta1 = 1.02 * Teta10 ;
Teta1P = 1 ;
n = 0 ;
for t = 0 : Dt : TT ;
n = n + 1 ;
DEF = sin(Teta1)*(Ra + sin(Teta1)* R) + cos(Teta1)^2 * R - sin(Teta10) * Ra - R ;
if DEF < 0
DEF = 0 ;
end
% Forca de reação do colmo
Fy = -9.81*( 4.54487e-5 + 6.52576e4 * DEF - 1.60114e7 * DEF^2 + 8.97404e8 * DEF^3 );
if DEF > .006
Fy = 0 ;
end
Fy
FORCAS = fsolve(@despalhasolve, FORCASI) ;
RRx = FORCAS(1) ;
RRy = FORCAS(2) ;
Teta1PP = FORCAS(3) ;
Teta1P = Teta1P + Teta1PP * Dt ;
Teta1 = Teta1 + Teta1P * Dt ;
TETA1(n) = Teta1 * 180/pi ;
Tempo(n) = t ;
FY(n) = Fy ;
DEFOR(n) = DEF ;

```

```

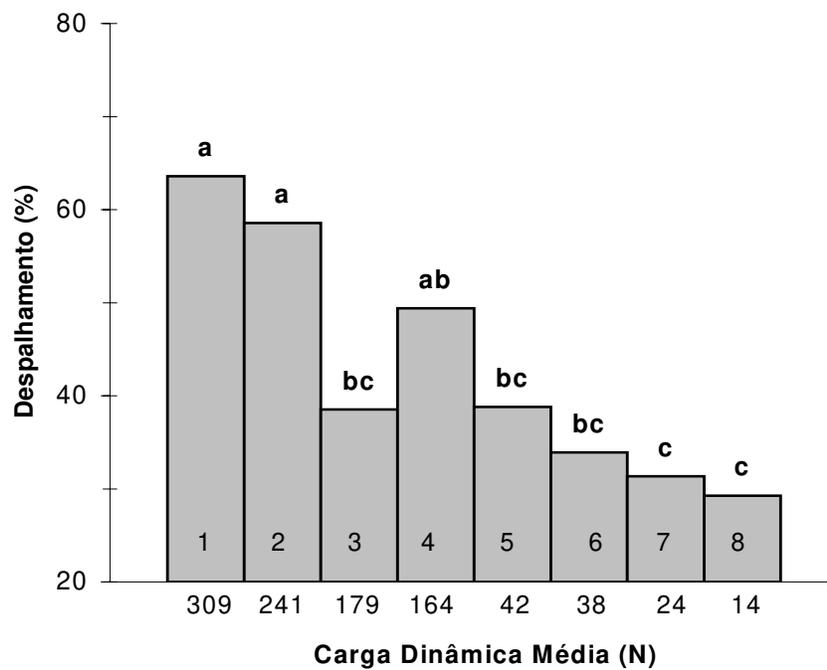
end
R = [ mean(FY) , max(FY) ] ;
R = [ mean(DEFOR) , max(DEFOR) ] ;
disp('Fymedio, Fymax entrada =')
disp(R)
disp('DEFORmedio, DEFORmax entrada =')
disp(R)

figure(1)
subplot(2,1,1) , plot( Tempo , (FY/1000) , 'k-')
ylabel('Fy [kN]' )
grid
subplot(2,1,2) , plot( Tempo , DEFOR*1000, 'k-')
xlabel('Tempo [s]', 'fontsize', 12) ; ylabel('Def. do Colmo [mm]', 'fontsize', 12)
grid
saveas(1, 'Nome da Figura', 'bmp')

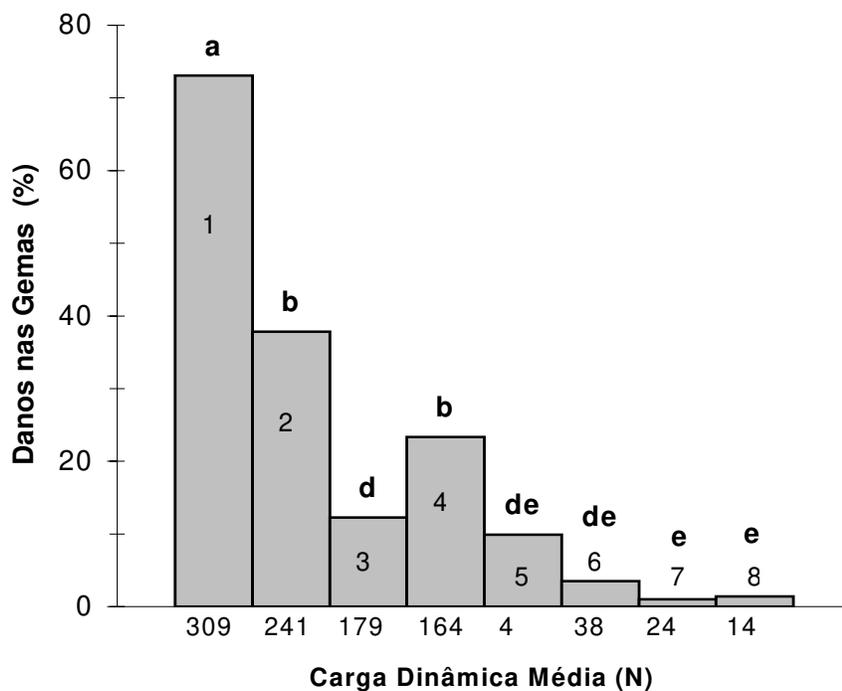
```

## ANEXO II

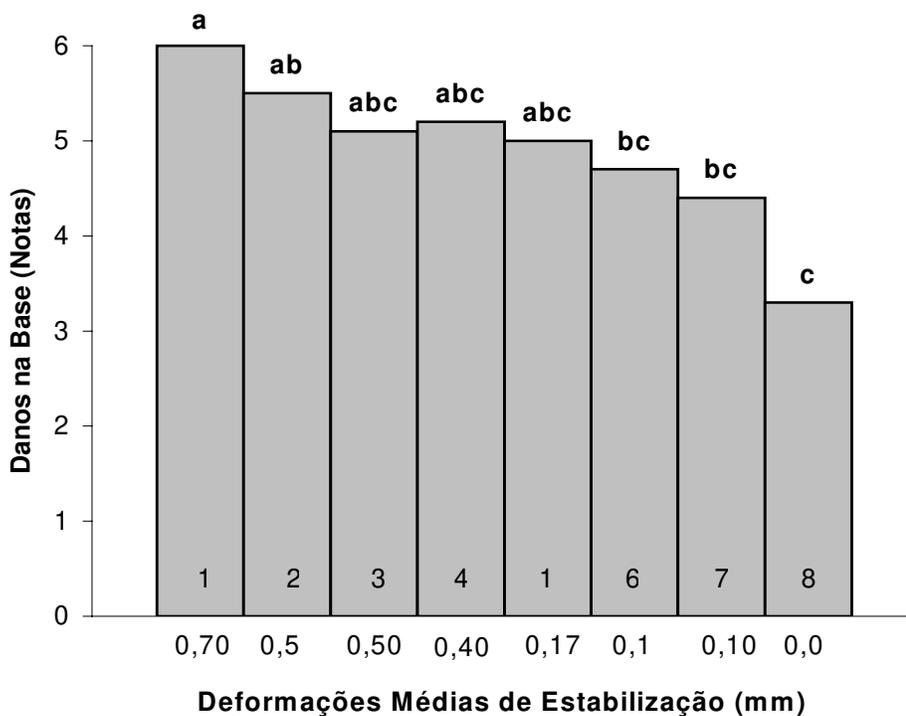
Figuras dos resultados do ensaio de passagens dos colmos pelo despalhador, após uma passagem. Letras distintas diferem entre si a 5%, pelo teste Tukey.



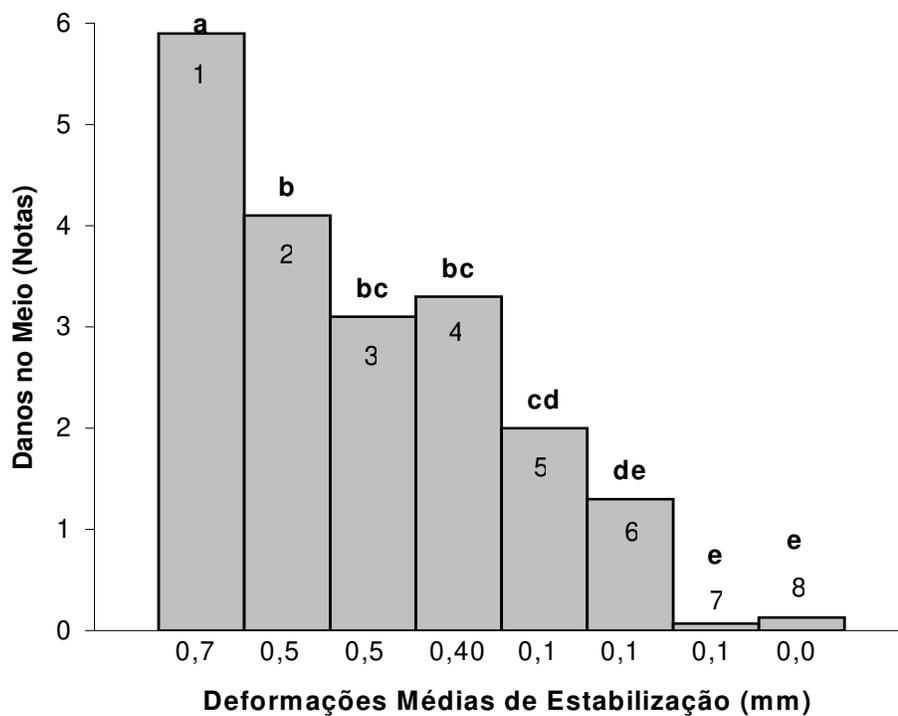
**Figura 1.** Porcentagem de despalhamento após a primeira passagem dos colmos.



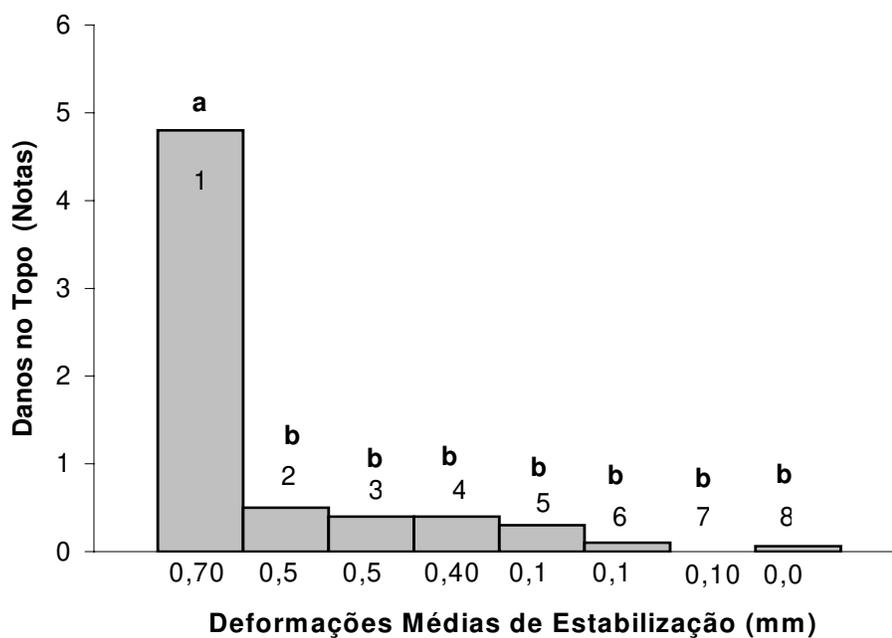
**Figura 2.** Porcentagem de gemas danificadas após a primeira passagem dos colmos.



**Figura 3.** Média das notas de danos na base dos colmos após a primeira passagem.



**Figura 4.** Média das notas de danos no meio dos colmos após a primeira passagem.



**Figura 5.** Média das notas de danos no topo dos colmos após a primeira passagem.

### ANEXO III

#### Tabelas de Análises de Variância das Variáveis Submetidas à Análise Estatística.

**Tabela 1.** Análise de variância da % despalhamento, sem transformação (Y).

<b>FV</b>	<b>GL</b>	<b>SQ</b>	<b>QM</b>	<b>Fc</b>	<b>Pr&gt;Fc</b>
Tratamento	8	27229.570290	3403.696286	19.102	0.0000
Erro	126	22451.464013	178.186222		
Total corrigido	134	49681.034304			
CV (%) = 19.32					
Média geral: 69.0785185					

Número de observações: 135;

Teste Tukey para a FV Tratamentos;

DMS: 15,3872731533418;

NMS: 0,05;

Média harmônica do número de repetições (r): 15;

Erro padrão: 3,4466043417451.

**Tabela 2.** Análise de variância da % gemas danificadas, sem transformação (Y).

<b>FV</b>	<b>GL</b>	<b>SQ</b>	<b>QM</b>	<b>Fc</b>	<b>Pr&gt;Fc</b>
Tratamento	8	75818.957961	9477.369745	107.646	0.0000
Erro	126	11093.267587	88.041806		
Total corrigido	134	86912.225548			
CV (%) = 35.21					
Média geral: 26.6462963					

Número de observações: 135;

Teste Tukey para a FV Tratamentos;

DMS: 10,8160596829217;

NMS: 0,05;

Média harmônica do número de repetições (r): 15;

Erro padrão: 2,4226955544515.

**Tabela 3.** Análise de variância das notas de danos na base dos colmos, sem transformação (Y).

<b>FV</b>	<b>GL</b>	<b>SQ</b>	<b>QM</b>	<b>Fc</b>	<b>Pr&gt;Fc</b>
Tratamento	8	23.614815	2.951852	4.801	0.0000
Erro	126	77.466667	0.614815		
Total corrigido	134	101.081481			

CV (%) = 14.08  
Média geral: 5.5703704

Número de observações: 135;

Teste Tukey para a FV Tratamentos;

DMS: 0,903850838085991;

NMS: 0,05;

Média harmônica do número de repetições (r): 15;

Erro padrão: 0,20245407953654.

**Tabela 4.** Análise de variância das notas de danos no meio dos colmos, sem transformação (Y).

<b>FV</b>	<b>GL</b>	<b>SQ</b>	<b>QM</b>	<b>Fc</b>	<b>Pr&gt;Fc</b>
Tratamento	8	493.466667	61.683333	35.739	0.0000
Erro	126	217.466667	1.725926		
Total corrigido	134	710.933333			

CV (%) = 40.49  
Média geral: 3.2444444

Número de observações: 135;

Teste Tukey para a FV Tratamentos;

DMS: 1,5143828383864;

NMS: 0,05;

Média harmônica do número de repetições (r): 15;

Erro padrão: 0,339207500499417.

**Tabela 5.** Análise de variância das notas de danos no topo dos colmos, sem transformação (Y).

<b>FV</b>	<b>GL</b>	<b>SQ</b>	<b>QM</b>	<b>Fc</b>	<b>Pr&gt;Fc</b>
Tratamento	8	437.214815	54.651852	38.571	0.0000
Erro	126	178.533333	1.416931		
Total corrigido	134	615.748148			
CV (%) = 79.55					
Média geral: 1.4962963					

Número de observações: 135;

Teste Tukey para a FV Tratamentos;

DMS: 1,37214177717471;

NMS: 0,05;

Média harmônica do número de repetições (r): 15;

Erro padrão: 0,307346841741944.

**Tabela 6.** Análise de variância da % de despalhamento após a primeira passagem, sem transformação (Y).

<b>FV</b>	<b>GL</b>	<b>SQ</b>	<b>QM</b>	<b>Fc</b>	<b>Pr&gt;Fc</b>
Tratamento	8	19290.732966	2411.341621	10.599	0.0000
Erro	126	28665.294867	227.502340		
Total corrigido	134	47956.027833			
CV (%) = 36.30					
Média geral: 41.5565926					

Número de observações: 135;

Teste Tukey para a FV Tratamentos;

DMS: 17,3867150806096;

NMS: 0,05;

Média harmônica do número de repetições (r): 15;

Erro padrão: 3,89446051216032.

**Tabela 7.** Análise de variância da % de gemas danificadas após a primeira passagem, sem transformação (Y).

<b>FV</b>	<b>GL</b>	<b>SQ</b>	<b>QM</b>	<b>Fc</b>	<b>Pr&gt;Fc</b>
Tratamento	8	68887.732641	8610.966580	108.742	0.0000
Erro	126	9977.548947	79.186896		
Total corrigido	134	78865.281588			
CV (%) = 48.84					
Média geral: 18.2202963					

Número de observações: 135;

Teste Tukey para a FV Tratamentos;

DMS: 10,2577300116001;

NMS: 0,05;

Média harmônica do número de repetições (r): 15;

Erro padrão: 2,2976349637851.

**Tabela 8.** Análise de variância das notas de danos na base dos colmos após a primeira passagem, sem transformação (Y).

<b>FV</b>	<b>GL</b>	<b>SQ</b>	<b>QM</b>	<b>Fc</b>	<b>Pr&gt;Fc</b>
Tratamento	8	68.192593	8.524074	10.812	0.0000
Erro	126	99.333333	0.788360		
Total corrigido	134	167.525926			
CV (%) = 17.97					
Média geral: 4.9407407					

Número de observações: 135;

Teste Tukey para a FV Tratamentos;

DMS: 1,02349761557841;

NMS: 0,05;

Média harmônica do número de repetições (r): 15;

Erro padrão: 0,229253831427058.

**Tabela 9.** Análise de variância das notas de danos no meio dos colmos após a primeira passagem, sem transformação (Y).

<b>FV</b>	<b>GL</b>	<b>SQ</b>	<b>QM</b>	<b>Fc</b>	<b>Pr&gt;Fc</b>
Tratamento	8	493.466667	61.683333	42.829	0.0000
Erro	126	181.466667	1.440212		
Total corrigido	134	674.933333			
CV (%) = 53.47					
Média geral: 2.2444444					

Número de observações: 135;

Teste Tukey para a FV Tratamentos;

DMS: 1,38336811492572;

NMS: 0,05;

Média harmônica do número de repetições (r): 15;

Erro padrão: 0,309861435721586.

**Tabela 10.** Análise de variância das notas de danos no topo dos colmos após a primeira, sem transformação (Y).

<b>FV</b>	<b>GL</b>	<b>SQ</b>	<b>QM</b>	<b>Fc</b>	<b>Pr&gt;Fc</b>
Tratamento	8	283.466667	35.433333	64.767	0.0000
Erro	126	68.933333	0.547090		
Total corrigido	134	352.400000			
CV (%) = 100.86					
Média geral: 0.7333333					

Número de observações: 135;

Teste Tukey para a FV Tratamentos;

DMS: 0,852616966190671;

NMS: 0,05;

Média harmônica do número de repetições (r): 15;

Erro padrão: 0,190978174510413.