

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

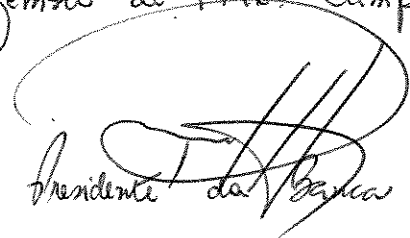
DESPALHE DE COLMOS DE CANA-DE-AÇÚCAR INTEIRA
(*SACCHARUM SPP*) POR ROLOS OSCILANTES
COM DIFERENCIAL DE VELOCIDADES

AUTOR

FÁBIO OKAMOTO TANAKA

Paran

Este exemplar corresponde a redação final da dissertação de Mestrado defendida por Fábio Okamoto Tanaka e aprovada pela Comissão Julgadora em 13 de dezembro de 1996, Campinas, 01 de abril de 1997.


Presidente da Banca

Campinas - SP
Dezembro de 1996

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**DESPALHE DE COLMOS DE CANA-DE-AÇÚCAR INTEIRA
(*SACCHARUM SPP*) POR ROLOS OSCILANTES
COM DIFERENCIAL DE VELOCIDADES**

Autor: FÁBIO OKAMOTO TANAKA

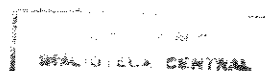
Orientador:

Prof. Dr. PAULO S. GRAZIANO MAGALHÃES

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP, em
cumprimento parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola.
Área de concentração: Máquinas Agrícolas.

Campinas - SP
Dezembro de 1996

94216420



UNIDADE	BC
N.º CHAMADA:	T1153d
V.	Ex.
TCMBO BC	32.209
PROC.	28.1/97
C	☐
D	☒
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	25/11/97
N.º CPD	

CM-00103240-0

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

T153d Tanaka, Fábio Okamoto
Despalhe de colmos de cana-de-açúcar inteira
(saccharum spp) por rolos oscilantes com diferencial de
velocidades / Fábio Okamoto Tanaka.--Campinas, SP:
[s.n.], 1996.

Orientador: Paulo S. Graziano Magalhães..
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Cana-de-açúcar. 2. Limpeza. 3. Colheita. 4.
Agricultura - Mecanização. 5. Máquinas agrícolas.
I. Magalhães, Paulo S. Graziano. II. Universidade
Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola.
III. Título.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**

Título: **DESPALHE DE COLMOS DE CANA-DE-AÇÚCAR INTEIRA**

**(*SACCHARUM SPP*) POR ROLOS OSCILANTES COM
DIFERENCIAL DE VELOCIDADES**

Autor: Fábio Okamoto Tanaka

Orientador: Prof. Dr. Paulo Sérgio Graziano Magalhães

Aprovado em: 13/12/1996.



Prof. Dr. Paulo S. Graziano Magalhães

- **FEAGRI / UNICAMP**



Prof. Dr. Oscar A. Braunbeck

- **FEAGRI / UNICAMP**



Prof. Dr. Tomaz Caetano Rípoli

- **ESALQ / USP**

Campinas, 13 de Dezembro de 1996.

*Este trabalho é dedicado à minha sempre
amada esposa Carmen e ao nosso filho
Caique que, mesmo antes de vir à luz, já nos
dá muitos motivos de alegrias e felicidades.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus, por toda saúde e bênção que nos dá diariamente;

À minha querida esposa Carmen, por todo amor e compreensão que me deu durante todo esse tempo, aceitando e incentivando-me a realizar mais essa tarefa, às custas de longas noites sem sono e finais de semana enfiados nesse agradável trabalho;

Ao meu pai, o Professor Tanaka, que tantas portas deixou abertas para que eu pudesse continuar trilhando por esse caminho da atividade docente;

À empresa Sul Brasil Engenharia Ltda., pelo suporte financeiro, utilização de seus equipamentos e instalações e tempo dispensado para a realização deste trabalho;

À Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas (FEAGRI / UNICAMP), por me receber e acolher para que eu pudesse aumentar meus conhecimentos, tanto técnicos e científicos quanto sociais;

Aos Professores da FEAGRI, principalmente os professores Paulo Magalhães, Oscar Braunbeck e Antônio Carlos que, com suas intermináveis e proveitosas discussões e sugestões, por diversas vezes achei que este trabalho seria impossível de ser concluído;

Aos funcionários e alunos da FEAGRI, nas pessoas de Aninha, Marta, Mara, José Maria, Luiz, Fubá, Claudinho, Paola, Volpato, André, Symona, Gilberto, Edgar, Natasha, Fábio, Ivan, Juninho e os demais que sempre me ajudaram nesse período, explicando-me programas, trabalhando na oficina, levantando dados e outras atividades que acabamos por desenvolver juntos;

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pela liberação de verba para construção da bancada de ensaios;

À Usina União São Paulo, pela cana-de-açúcar cedida para a realização dos ensaios;

Ao Prof. Dr. Paulo Guimarães, do Departamento de Estatística do Instituto de Matemática da UNICAMP, pela auxílio na análise estatística dos dados;

Aos membros da banca examinadora, Professores Doutores Paulo Magalhães, Oscar Braunbeck, Caetano Ripoli e Franco Giuseppe Dedini, pelos conselhos, críticas e elogios feitos a esse trabalho;

Ao meu grande amigo e sempre Mestre Franco Brunetti que, desde a época da Graduação, sempre incentivou-me a seguir por este caminho, que é o da Engenharia, e sempre me ajudou e encaminhou na didática que aprendi e adotei para as minhas próprias aulas;

À Universidade de Mogi das Cruzes (UMC) e sua Administração que, com seu Programa de Apoio à Qualificação Docente (PAQD), consegue estimular seu corpo docente à periódicas reciclagens e atualizações;

À Faculdade de Engenharia da Fundação Armando Álvares Penteado (FEFAAP) e sua Diretoria, por seu programa de Reeducação, que em muito auxilia e apoia o seu corpo docente a tomar decisões criativas e atualizadas;

Aos alunos, professores e funcionários da Universidade de Mogi das Cruzes (UMC), da Fundação Armando Álvares Penteado (FAAP) e da Universidade Paulista (UNIP) que, direta ou indiretamente, sempre incentivaram-me a continuar neste caminho do ensino e da pesquisa, com atividades mais amenas, como as longas conversas, os churrascos, as viagens, os atoleiros, etc., principalmente o Alemão, Sérgio Lopes, Cláudia Brunetti, Gerson de Faria, Adriana Rodrigues, Helena e outros, que se forem enunciados aqui, tomarão boa parte deste trabalho;

Aos formandos das turmas de Engenharia Mecânica da FAAP dos anos de 1993 e 1995 que, dentre tantos ilustres professores, escolheram-me com carinho para ser Paraninfo destas turmas;

À todos os nossos amigos, principalmente à querida Rose, que sempre esteve presente nos difíceis momentos, ajudando em muito a organizar nossas vidas, dando-nos tranquilidade para realizar nossos ideais.

À todos, espero que este trabalho seja de agradável leitura e possa ser utilizado em benefício da Pesquisa e Desenvolvimento da Engenharia.

O Autor

SUMÁRIO

1.- INTRODUÇÃO	1
2.- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1.- Sistema de colheita mecanizada de cana-de-açúcar	6
2.1.1.- Colheita de Cana-de-Açúcar Inteira	8
2.1.2.- Sistema de Colheita de Cana-de-Açúcar Picada	10
2.2.- Cana-de-Açúcar Crua e Inteira	17
2.3.- Condições dos Canaviais Brasileiros	21
2.4.- Sistema de Limpeza de Cana-de-Açúcar	25
3.- MATERIAL E MÉTODOS	32
3.1.- Material	32
3.1.1.- Cana-de-Açúcar	32
3.1.2.- Bancada de Ensaios	32
3.2.- Métodos	40
3.2.1.- Cana-de-açúcar	40
3.2.2.- Ensaio para avaliação do dispositivo limpador	40
3.2.3.- Ensaio para determinação dos esforços gerados pelo rolo superior oscilante	45
4.- MODELAGEM MATEMÁTICA DO FENÔMENO DE GERAÇÃO DA FORÇA VERTICAL ATRAVÉS DO ROLO SUPERIOR OSCILANTE	48

4.1.- Desenvolvimento das Equações de Lagrange	49
4.2.- Valores Numéricos para as Equações de Lagrange	56
5.- ANÁLISE DO ENSAIO PARA AVALIAÇÃO DO DISPOSITIVO LIMPADOR	58
5.1.- Entre Tratamentos	58
5.1.1.- Porcentagem de remoção de folhas	62
5.1.2.- Porcentagem de gemas danificadas	63
5.1.3.- Danos mecânicos visíveis nos colmos	64
5.2.- Entre Configurações	66
5.2.1.- Porcentagem de remoção de folhas	70
5.2.2.- Porcentagem de gemas danificadas	70
5.2.3.- Danos mecânicos visíveis nos colmos	71
5.3.- Entre Cargas	74
5.3.1.- Porcentagem de remoção de folhas	78
5.3.2.- Porcentagem de gemas danificadas	78
5.3.3.- Danos mecânicos visíveis nos colmos	79
6.- RESULTADOS E DISCUSSÕES DA ANÁLISE ESTATÍSTICA	83
7.- ANÁLISE DO ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DOS ESFORÇOS	92
8.- CONCLUSÕES	99
9.- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104
10.- ANEXOS	
A.1 - Determinação dos Momentos Polares de Inércia	1
A.1.1.- Elemento 1 - Braço oscilante	1
A.1.2.- Elemento 2 - Rolo superior	4
A.1.3.- Elemento 3 - Mancais de rolamento	11
A.2 - Análise Estatística entre Tratamentos	13
A.3 - Análise Estatística entre Configurações	22
A.4 - Análise Estatística entre Cargas	29
A.5 - Simulação do Modelo Matemático pelo software Mathematica for Windows - v. 2.2.3	37

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Resumo cronológico das máquinas fabricadas e/ou introduzidas no Brasil, segundo Ripoli e Segalla (1981)	7
Tabela 2 - Avaliação do desempenho operacional de colhedoras realizado por Ripoli e Mialhe (1980)	15
Tabela 3 - Avaliação do desempenho operacional de colhedoras combinadas, realizado por Ripoli e Berto (1981)	16
Tabela 4 - Distribuição por regiões, marcas e modelos de colhedoras combinadas no Brasil, segundo Ripoli e Berto (1981)	24
Tabela 5 - Avaliação dos sistemas de limpeza realizada por Abe, M.; Kojima, S. e Miyabe, Y. (1979)	27
Tabela 6 - Percentual de danificação visível de gemas observado no ensaio de Berto e Mialhe (1981).....	30
Tabela 7 - Valores numéricos de cada configuração da máquina	42
Tabela 8 - Valores numéricos das pré-cargas aplicadas pelas molas	42
Tabela 9 - Classificação dos danos mecânicos visíveis sofridos pelas amostras durante os ensaios	43
Tabela 10 - Quadro sintético dos resultados da análise estatística entre os 9 tratamentos, através do teste ANOVA	61

Tabela 11 - Quadro sintético dos Testes de Tukey com $\alpha = 0,05$, para os 9 tratamentos	61
Tabela 12 - Quadro sintético dos resultados da análise estatística entre as 3 configurações, através do teste ANOVA	69
Tabela 13 - Quadro sintético dos Testes de Tukey com $\alpha = 0,05$, para as 3 configurações	69
Tabela 14 - Quadro sintético dos resultados da análise estatística entre as 3 cargas, através do teste ANOVA	77
Tabela 15 - Quadro sintético dos Testes de Tukey com $\alpha = 0,05$, para as 3 cargas	77
Tabela 16 - Forças obtidas no ensaio com a condição de Carga 1 ($d_i = 0,040$ m)	93
Tabela 17 - Forças obtidas no ensaio com a condição de Carga 2 ($d_i = 0,035$ m)	93
Tabela 18 - Resultados com a condição de Carga 1 ($d_i = 0,040$ m)	95
Tabela 19 - Resultados com a condição de Carga 2 ($d_i = 0,035$ m)	95
Tabela 20 - Comparação entre os resultados determinados pelo modelo matemático e os obtidos através dos ensaios	96
Tabela 21 - Momento torsor determinado pelo modelo matemático	98

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Colhedora de cana-de-açúcar picada - mod. Amazón (Santal)	13
Figura 2 - Colhedora de cana-de-açúcar picada - E-16000 (Brastoft)	13
Figura 3 - Colhedora de cana-de-açúcar picada (Cameco)	14
Figura 4 - Protótipo de colhedora de cana-de-açúcar inteira - Convênio UNICAMP-MOTOCANA	23
Figura 5 - Detalhe dos rolos transportadores do protótipo desenvolvido pelo convênio UNICAMP-MOTOCANA	24
Figura 6 - Seção transversal do “Limpador de cana-de-açúcar” construído por Srivastava e Singh (1990)	28
Figura 7 - Vista Superior da Unidade Limpadora	35
Figura 8 - Vista Posterior da Unidade Limpadora (Vista de A)	35
Figura 9 - Vista Frontal da Unidade Limpadora (Vista de B)	36
Figura 10 - Detalhe do Conjunto do Rolo Inferior	36
Figura 11 - Detalhe do Conjunto do Rolo Superior	37
Figura 12 - Vista Lateral da Unidade Hidrostática	38
Figura 13 - Vista Lateral da Unidade Hidrostática	38
Figura 14 - Vista Posterior do Dispositivo Limpador	39
Figura 15 - Esquema dos diferenciais de velocidades tangenciais e das pré-cargas aplicadas pelas molas helicoidais	42

Figura 16 - Disposição dos rolos durante o ensaio para aquisição dos dados de forças	46
Figura 17 - Montagem do suporte da célula de carga para aquisição de dados das forças verticais	47
Figura 18 - Montagem do suporte da célula de carga para aquisição de dados das forças horizontais	47
Figura 19 - Modelo geométrico do braço superior oscilante	49
Figura 20 - Diâmetros dos topos, das porções médias, das bases e diâmetros médios dos colmos de cana-de-açúcar em cada tratamento	58
Figura 21 - Quantidade inicial de folhas e gemas nos colmos de cana-de-açúcar em cada tratamento	59
Figura 22 - Porcentagem de remoção das folhas da cana-de-açúcar com 1 e com 2 passagens dos colmos pelo dispositivo	62
Figura 23 - Porcentagem de gemas visivelmente danificadas com 1 e com 2 passagens dos colmos pelo dispositivo	63
Figura 24 - Danos mecânicos visíveis nos topos dos colmos de cana-de-açúcar com 1 e com 2 passagens pelo dispositivo	64
Figura 25 - Danos mecânicos visíveis nas porções médias dos colmos de cana-de-açúcar com 1 e com 2 passagens pelo dispositivo	65
Figura 26 - Danos mecânicos visíveis nas bases dos colmos de cana-de-açúcar com 1 e com 2 passagens pelo dispositivo	66
Figura 27 - Diâmetros dos topos, das porções médias, das bases e diâmetros médios dos colmos de cana-de-açúcar em cada configuração do dispositivo	67
Figura 28 - Quantidade inicial de folhas e gemas nos colmos de cana-de-açúcar em cada configuração do dispositivo	68
Figura 29 - Porcentagem de remoção das folhas da cana-de-açúcar com 1 e com 2 passagens dos colmos pelo dispositivo	70
Figura 30 - Porcentagem de gemas visivelmente danificadas com 1 e com 2 passagens dos colmos pelo dispositivo	71

Figura 31 - Danos mecânicos visíveis nos topos dos colmos de cana-de-açúcar com 1 e com 2 passagens pelo dispositivo	72
Figura 32 - Danos mecânicos visíveis nas porções médias dos colmos de cana-de-açúcar com 1 e com 2 passagens pelo dispositivo	73
Figura 33 - Danos mecânicos visíveis nas bases dos colmos de cana-de-açúcar com 1 passagem e com 2 passagens pelo dispositivo	74
Figura 34 - Diâmetros dos topos, das porções médias, das bases e diâmetros médios dos colmos de cana-de-açúcar em cada condição de carga	75
Figura 35 - Quantidade inicial de folhas e gemas nos colmos de cana-de-açúcar em cada condição de carga	76
Figura 36 - Porcentagem de remoção das folhas da cana-de-açúcar com 1 e com 2 passagens dos colmos pelo dispositivo	78
Figura 37 - Porcentagem de gemas visivelmente danificadas com 1 e com 2 passagens dos colmos pelo dispositivo	79
Figura 38 - Danos mecânicos visíveis nos topos dos colmos de cana-de-açúcar com 1 e com 2 passagens pelo dispositivo	80
Figura 39 - Danos mecânicos visíveis nas porções médias dos colmos de cana-de-açúcar com 1 e com 2 passagens pelo dispositivo	81
Figura 40 - Danos mecânicos visíveis nas bases dos colmos de cana-de-açúcar com 1 e com 2 passagens pelo dispositivo	82
Figura 41 - Lote de cana-de-açúcar antes da passagem pelo dispositivo limpador	86
Figura 42 - Lote de cana-de-açúcar após a passagem pelo dispositivo limpador	86
Figura 43 - Lote de cana-de-açúcar após a passagem pelo dispositivo limpador	87
Figura 44 - Detalhe da ruptura do colmo da cana-de-açúcar causada por esforços de tração	87
Figura 45 - Monte de colmos após a passagem dos mesmos pelo dispositivo limpador	88
Figura 46 - Detalhe dos colmos após a passagem pelo dispositivo limpador	89

Figura 47 - Vista do eito amontoado formado dos 9 lotes de colmos após a passagem pelo dispositivo limpador	8
Figura 48 - Detalhe de fissura típica causada por esmagamento na base do colmo	
Figura 49 - Detalhe das marcas provenientes da raspagem das taliscas na porção média do colmo após a passagem pelo dispositivo limpador	4
Figura 50 - Detalhe das marcas provenientes da raspagem das taliscas na base do colmo após a passagem pelo dispositivo	4
Figura 51 - Detalhe de um trecho de colmo onde não houve o efeito da raspagem das taliscas após a passagem pelo dispositivo	4
Figura 52 - Gráfico da força vertical em função do tempo, para o rolo superior oscilante	
Figura 53 - Gráfico da força horizontal em função do tempo, para o rolo superior oscilante	
Figura 54 - Ângulo de rotação dos rolos limpadores $\theta_2(t) = \dot{l}(t)$	

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo o estudo de um dispositivo para despa de cana-de-açúcar crua e inteira por rolos oscilantes com diferencial de velocidades, bem como a construção de um modelo desse dispositivo, para avaliação do mesmo. A construção do dispositivo limpador foi feita de maneira extremamente simples, visando facilitar a produção e manutenção do mesmo nas condições de campo. A porcentagem de remoção de folhas variou de 45,6% a 82,5%, e a porcentagem de gemas visivelmente danificadas variou de 6,6% a 29,6%. Com o diferencial de velocidades entre rolos superiores e inferiores de 43%, e entre pares de rolos adjacentes de 29%, a eficiência de remoção de folhas foi de 82,5%, após 2 passagens dos colmos pelo dispositivo, embora a quantidade de gemas visivelmente danificadas mecanicamente, tenha-se apresentado relativamente alta (26,5%), inviabilizando a utilização deste dispositivo na colheita de cana-semente. Os danos mecânicos observados ao longo dos colmos não foram muito elevados, com danos leves, tipo fissuras de 0,05 a 0,10 m de comprimento, nas porções médias e nas bases dos colmos, sem apresentar perdas na qualidade da matéria-prima. Sem diferencial de velocidades entre rolos superiores e inferiores, e com diferencial de 19% entre pares de rolos adjacentes, a eficiência de remoção de folhas foi de 45,6%, com 6,6% de gemas visivelmente danificadas.

Nessa condição, não houveram danos mecânicos ao longo dos colmos de cana-de-açúcar, embora o diâmetro médio dos mesmos tenha-se apresentado inferior aos demais (22,5 mm). Com o modelo matemático desenvolvido, consegue-se determinar os esforços gerados pelo dispositivo com rolos oscilantes, observando-se que o mesmo subestima as forças geradas pelo mesmo: -9,1% nas forças geradas com pré-carga inicial nas molas helicoidais de 360,5 N, e -39,8% nas forças com pré-carga inicial de 412,0 N, em relação aos valores obtidos nos ensaios. Essas variações das forças geradas pela modelagem matemática deveram-se ao fato da existência dos nós e internódios irregulares ao longo dos colmos, que causaram pequenas, mas significantes oscilações no movimento dos rolos, fazendo com que o contato entre as superfícies dos colmos e das taliscas não fosse uniforme. Com a carga de 412,0 N na mola helicoidal, o rolo ficou mais sensível às oscilações causadas pelas superfícies dos colmos, fazendo com que o contato entre as superfícies dos mesmos e das taliscas não fosse muito uniforme, conduzindo a maiores diferenças entre as forças obtidas nos ensaios e as determinadas pelo modelo. Nessa condição, as forças horizontais apresentaram-se maiores, também devido às maiores oscilações do rolo superior, fazendo com que o coeficiente de raspagem fosse mais elevado (0,6104). Com a carga de 360,5 N nas molas helicoidais, o movimento do rolo superior ficou mais uniforme, conduzindo a menores diferenças entre as forças obtidas nos ensaios e as determinadas pelo modelo matemático. Nessa condição de carga, as forças horizontais foram menores, resultando em um menor coeficiente de raspagem entre as superfícies dos colmos e das taliscas (0,3461).

ABSTRACT

The objective of this work was the development of a detrashing device for cleaning unburned sugarcane stalks from its leaves, with a process of differential velocities between upper and lower rollers, and between sequential pairs of rollers. The construction of the machine was extremely simple, aiming the easy production and maintenance in the field. The efficiency of stripping leaves from sugarcane stalks varied from 45,6% to 82,5% and the percentage of visible damaged gems varied between 6,6% and 29,6%.

The device with 43% differential velocities between upper and lower rollers and 29% between sequential pairs of rollers performed 82,5% of efficiency on stripping leaves, although this configuration had presented a greater quantity of visible damaged gems (26,5%), making this device not suitable for harvesting sugarcane seeds. The mechanical damages observed among sugarcane stalks weren't much significant, with light damages like cracks with 0,05 to 0,10 meters length, without presenting losses on the quality of the raw material.

Without different velocities between upper and lower rollers and with 19% on the tangencial velocities differential between sequential pairs of rollers, the efficiency on stripping leaves was 45,6% with 6,6% of visible damaged gems. In this condition, there

weren't mechanical damages observed on the stalks, although the mean diameter of the stems was a few smaller than on the other conditions (22,5 mm).

The mathematical model developed for this oscillating rollers device brought good results, generating smaller forces than those observed during tests for the determination of these ones: -9,1% on forces generated with 360,5 N helical springs preload, and -39,8% on forces generated with 412,0 N springs preload, in comparison with the results obtained on tests. These variations on the forces generated by the mathematical model were caused by the irregular surface on sugarcane stems (node and internode locations), that caused small but significant oscillations on the movement of the upper rollers, resulting in non-uniform contact between stalks and rollers surface.

With 412,0 N preload on the helical springs, the rollers became more liable to the oscillations caused by the surface of the stems, leading to a non-uniform contact between stalks and rollers surface, and to greater differences between mathematical model's forces and the ones obtained during tests. On this condition, the scrapping coefficient was higher (0,6104), caused by the greater horizontal forces that appeared, because of the more intensive oscillating motion of the upper rollers.

With 360,5 N preload on the springs, the upper rollers' motion became more uniform, leading to smaller differences between forces obtained during tests and the ones generated by the model. On this condition, the horizontal forces were smaller, leading to a smaller scrapping coefficient between stalks and rollers surface (0,3461).

Cane harvesting presents many difficulties to both men and machines. It was written "It is probably true that no other crop presents such a diverse challenge to the whole

field of engineering as does sugarcane. No other crop either presents engineering with such an array of interacting factors, constraints and demands ... in no other crop is there such a range of land use patterns” . Traditionally, sugarcane stalks are cut by the most wonderful of all machines - the human being. (Hudson, 1975).

1.- INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar é uma gramínea perene, pertencente 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.), mas as variedades hoje em uso são quase todas híbridas. Nelas procuram-se aliar a rusticidade de umas espécies, como a *S. spontaneum*, às boas qualidades das variedades nobres de *S. officinarum*. Atualmente, a cana-de-açúcar é cultivada em todas as regiões tropicais e subtropicais, estendendo-se de ambos os lados do Equador até, aproximadamente, 35° de latitude Norte e Sul. (Passos et al, 1973).

No Brasil, a cultura de cana-de-açúcar ocupou na safra de 93/94, uma área de, aproximadamente, 4 milhões de hectares, sendo que 2,7 milhões de hectares estavam no Estado de São Paulo. Em termos do valor da produção agrícola, a atividade da cana-de-açúcar ocupou o 1º lugar no total das principais atividades agrícolas do Estado, nessa safra, participando com 27% do valor dos produtos vegetais e animais, e com 38% dos vegetais, representando US\$ 1,4 bilhões, atualizados pelo câmbio médio de 1994. Segundo a Secretaria de Agricultura e Abastecimento do Estado de São Paulo (outubro/1996), na safra de 95/96, a produção de açúcar do Estado de São Paulo foi de 7,1 toneladas (cerca de 30% para o mercado interno do Estado, 35% para outros estados e 35% para o mercado externo) e a produção de álcool foi de 8 bilhões de litros (60% consumido no próprio estado e 40%

exportado para outros estados da Federação), com uma produção de 160 milhões de toneladas de cana-de-açúcar. (Veiga Filho et al, 1996).

Na safra de 1993, da área do Estado de São Paulo, apenas 20% foram colhidas por máquinas, sendo que este percentual tende a aumentar rapidamente nos próximos anos devido a vários fatores, tais como custo de colheita e escassez de mão-de-obra. Nessa safra, em algumas usinas, como São Martinho, o índice de mecanização atingiu 70%, em outras, como Santa Elisa e São Francisco, o índice variou entre 20 e 40%, sendo que a totalidade destas colhedoras disponíveis eram para cana-de-açúcar queimada, com exceção de pequenas áreas experimentais, com colhedoras de cana-de-açúcar crua devido, principalmente, a um fator legislativo, do que econômico ou mesmo ambiental. (Magalhães, 1994).

As exigências agro-industriais limitam a produção de álcool, pois a celulose, que constitui a maior fonte de energia da cana-de-açúcar, é queimada no campo e nas fornalhas das indústrias. Somente o caldo rico em açúcar é utilizado na produção de álcool, e isto constitui-se um grande desperdício. Com o aproveitamento da celulose da cana-de-açúcar, é possível triplicar o volume de álcool produzido por hectare/ano. (Tokeshi, 1985).

Apenas recentemente, alguns investimentos têm sido realizados no sentido de viabilizar-se a colheita de cana-de-açúcar crua, mesmo porque a indústria de processo não visualizou as vantagens econômicas e ecológicas deste método. Hoje, com a proposta da Companhia Energética do Estado de São Paulo (CESP), de valorização do bagaço da cana-de-açúcar através da política de compra do excedente de energia elétrica produzida pelas usinas de açúcar e álcool, e sua utilização para outros fins mais nobres, as usinas analisam a

possibilidade de se utilizar a palha da cana-de-açúcar para complementar o bagaço nas caldeiras. Estimativas indicam que o potencial da palha, considerando-se que apenas 50% seria recolhido às indústrias, seria hoje, o equivalente a 1,5 vezes o bagaço excedente. (Magalhães, 1994).

Do ponto de vista energético, a contribuição da agro-indústria da cana-de-açúcar deverá expandir-se significativamente nos próximos anos pois, além do álcool, a produção de energia elétrica de cogeração deverá atender à parcela substancial do crescimento da demanda do Estado de São Paulo. Estima-se que o potencial da geração adicional de energia elétrica no setor sucro-alcooleiro em São Paulo, com tecnologias atualmente em desenvolvimento, alcance cerca de 3.000 MW de potência, correspondendo a 30% do total da atual potência instalada no Estado. (Veiga Filho et al, 1996).

Isso sem mencionar as vantagens ecológicas, como a redução da emissão de CO₂ para a atmosfera, a eliminação de fumaça e fuligem que prejudicam a saúde do homem, e as quedas de energia elétrica devido a interrupções causadas por queimadas sob as linhas de transmissão.

Vários países, já a algum tempo, optaram pela colheita de cana-de-açúcar crua, utilizando diferentes métodos que, por razões como as condições topográficas, agrônômicas e gerenciais, não se adaptam adequadamente às condições brasileiras.

Os órgãos governamentais também têm discutido junto aos empresários do setor, quais seriam as possíveis soluções para este dilema, e de como poderiam viabilizar a colheita de cana-de-açúcar crua. Entre esses órgãos está a Secretaria de Agricultura e Abastecimento do Estado de São Paulo que, através de algumas reuniões com técnicos e

empresários, vem tentando encontrar parâmetros para definir sua política para o setor. A Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB), também tem realizado reuniões periódicas para discutir os problemas ambientais relacionados com o setor sucro-alcooleiro, e a colheita de cana-de-açúcar ocupa um espaço importante nestas reuniões. Dentro destes debates, outro fator polêmico que vem sendo abordado é de como a cana-de-açúcar crua deve ser colhida: inteira ou picada. A tecnologia que o Brasil importou nos últimos anos, e que agora vem se adaptando às nossas condições de campo, é a colheita de cana-de-açúcar picada, obrigando a indústria a investir uma soma elevada na substituição do sistema, tanto a nível de transporte como de recepção da matéria-prima na usina. Atualmente, esse investimento é estimado pela Secretaria de Agricultura e Abastecimento do Estado de São Paulo (SAA-SP), em aproximadamente R\$ 1,778 bilhões, levando-se em conta os investimentos necessários na recepção na indústria, preparo e moagem, sistematização de terrenos, melhoramento de variedades, pesquisa e desenvolvimento, equipamentos de colheita, preparo, plantio e tratos. (Veiga Filho et al, 1996).

Apesar das vantagens da colheita de cana-de-açúcar inteira, poucas são hoje as opções por este método mecanizado de colheita de cana-de-açúcar, e estas apresentam alguns problemas operacionais que dificultam sua utilização em cana-de-açúcar crua.

Baseado no anteriormente descrito, e visando diminuir o impacto ambiental das queimadas e seus efeitos indiretos nas cidades próximas, e procurando manter todo o potencial energético da planta, esta pesquisa teve como objetivos:

1.- Realizar um estudo analítico de um sistema de remoção das folhas dos colmos da cana-de-açúcar crua e inteira, através de um sistema de fricção causado por pares de rolos com diferentes velocidades tangenciais, com o rolo superior oscilante, capaz de adaptar-se às diferentes condições de abastecimento das cortadoras.

2.- Construção de um modelo do sistema, em escala 1:1, para verificação e avaliação do princípio de funcionamento do mesmo, análise dos colmos de cana-de-açúcar após a passagem pela unidade limpadora e determinação dos esforços gerados pelo rolo oscilante, com diferentes velocidades tangenciais e pré-cargas iniciais aplicadas aos rolos superiores.

2.- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1.- Sistema de colheita mecanizada de cana-de-açúcar

A colheita de cana-de-açúcar apresenta muitas dificuldades, tanto para o homem quanto para as máquinas. Foi escrito que “é provável que nenhuma cultura apresente tantas alternativas na área da engenharia como a da cana-de-açúcar. Nenhuma outra cultura apresenta à engenharia tantas variáveis interativas, dificuldades e alternativas ... e nenhuma outra cultura é feita em tantos tipos diferentes de solo”. Tradicionalmente, a cana-de-açúcar é cortada pela mais perfeita das máquinas - o ser humano - com implementos e técnicas utilizadas para abrir picadas em florestas. Nos últimos tempos, houve uma redução dos trabalhadores dispostos ou aptos a cortar a cana-de-açúcar, além do que, existe o problema das queimadas, a maneira tradicional de limpar a cana-de-açúcar das folhas e dos animais nocivos, antes da colheita, para aumentar a produtividade da mesma. Existe, portanto, uma necessidade de máquinas para a colheita de cana-de-açúcar crua, e muitos desenvolvimentos em relação a essa necessidade estão em pauta, já a algum tempo, em várias partes do mundo. (Hudson et al, 1975).

O sistema de mecanização completo de colheita de cana-de-açúcar, inclui o corte, o carregamento, o transporte e a recepção da matéria-prima. Existem dois tipos básicos de colhedoras: para colheita de cana-de-açúcar picada ou para colheita de cana-de-açúcar inteira, ambas utilizadas para cana-de-açúcar queimada, embora existam alguns modelos que também colhem cana crua. As perdas de açúcar são maiores nas colhedoras de

cana-de-açúcar picada, quando pedaços de colmo são deixados no campo junto à palha, perdas invisíveis ocorrem nos picadores e extratores, é perdido suco durante os processos de corte e limpeza, além de existir uma deterioração rápida da cana após o corte. Geralmente, os materiais estranhos são removidos através de fluxo de ar. (Magalhães, 1994).

No que diz respeito a sistemas mecanizados de colheita de cana-de-açúcar, em 1956 chegava ao Brasil a primeira cortadora mecânica de marca Thompson, proveniente dos EUA. A partir daí, a empresa SANTAL Equipamentos S/A iniciava projetos de desenvolvimento de máquinas para colheita. Em 1962, Egídio Artioli partia para o desenvolvimento de máquinas cortadoras-amontoadoras. (Ripoli e Segalla, 1981).

A Tabela 1 apresenta, resumidamente, a cronologia das máquinas fabricadas e/ou introduzidas no Brasil, segundo Ripoli e Segalla (1981).

Tabela 1 - Resumo cronológico das máquinas fabricadas e/ou introduzidas no Brasil, segundo Ripoli e Segalla (1981).

Ano	Tipo de máquina
1958-61	Cortadora-carregadora de colmo inteiro, sem desponte dos colmos, montada sobre trator de esteira (Santal).
1961-66	Cortadora-amontoadora, sem desponte, montada sobre trator de pneus (Santal-CTD).
1962-67	Cortadora-amontoadora, com desponte, montada sobre trator de pneus (Artioli EG101).
1966-71	Cortadora-enleiradora, com desponte, montada sobre trator de pneus (Santal CTE).
1969	Cortadora-amontoadora, de maior capacidade operacional, com desponte, montada sobre trator de pneus (Artioli EG102).
1972	Colhedora combinada autopropelida, com 25% de nacionalização (Santal-Don).
1973	Chegam ao país colhedoras combinadas autopropelidas, marcas Toft R300, Massey Ferguson 201, Claas Libertadora 1200, importadas.
1975	Cortadora-amontoadora com desponte e sistema de levantamento de colmos deitados e acamados, montada sobre trator de pneus (Artioli EG103).

1977	Início de fabricação no país de cortadora-amontoadora, com desponte, posicionando feixes longitudinalmente ao sulco, montada em trator (Toft I-200).
1978	Colhedora combinada autopropelida, totalmente nacional (Santal 115).
1979	Início da fabricação de colhedora combinada autopropelida (Dedini-Toft-600); Lançamento no mercado de colhedora combinada autopropelida, sem correntes e rolos transportadores (Santal Rotor). Ambas de maior capacidade operacional.
1980	Lançamento de cortadora-amontoadora autopropelida, com desponte, levantamento de colmos acamados e deitados, de maior capacidade operacional (Artioli EG 500 103).

2.1.1.- Colheita de Cana-de-Açúcar Inteira

2.1.1.1.- Em Barbados

Hudson et al (1975), após uma análise das colhedoras existentes no mercado, concluiu que os sistemas disponíveis não eram adequados para as condições de Barbados, que necessitava de uma colhedora de cana-de-açúcar inteira e crua. Destaca as dificuldades de se colher cana-de-açúcar crua mecanicamente, e propõe uma máquina de dois estágios que seria acoplada ao trator. O projeto, construído em conjunto entre a Associação dos Produtores de Açúcar de Barbados e a indústria F. W. McConnel Ltd., de Ludlow, Inglaterra, consiste basicamente de, num primeiro estágio, cortar o colmo e deitá-lo ao solo. No segundo estágio, a cana-de-açúcar é alimentada na máquina pela parte superior do colmo, que é limpo através de rolos e ventiladores, sendo uma pequena quantidade armazenada na parte posterior da máquina. Este modelo apresentou algumas limitações, como o trabalho em linhas irregulares ou com espaçamento muito reduzido, áreas com variedades de alta produtividade, áreas muito inclinadas e para o trabalho em solos de baixa sustentação.

2.1.1.2.- Nos Estados Unidos da América

Nos Estados da Flórida e Lousiana, são utilizadas as colhedoras de cana-de-açúcar inteira e crua. O sistema constitui-se de facas montadas sobre discos giratórios, que cortam os colmos ao nível do solo e os conduzem, em posição vertical, para a parte posterior da máquina, depositando-os ao solo no sentido transversal; a remoção dos ponteiros é realizada simultaneamente a esse processo. Essa colhedora, embora seja capaz de colher cana-de-açúcar crua, não dispõe de um sistema de limpeza, o que obriga uma queima posterior da cana-de-açúcar na leira, sem a possibilidade de aproveitamento da palha. A grande desvantagem desta colhedora reside no fato dela colher apenas cana ereta.

2.1.1.3.- No Brasil

No Brasil, encontra-se disponíveis alguns modelos de colhedoras de cana-de-açúcar inteira queimada, como a Motocana CM-500i, a Engeagro E-7000 e E-14000, que utilizam-se do mesmo sistema de alimentação, corte de base e remoção de ponteiros das colhedoras de cana picada descrito no item 2.1.2.1., a seguir, mas não apresentam o sistema de picagem e limpeza. Um pequeno depósito de colmos na sua parte posterior permite acumular certa quantidade de matéria prima, que é descartada ao solo no sentido longitudinal do deslocamento.

Uma outra versão semelhante de colhedora de Lousiana vem sendo desenvolvida pela Copersucar, a DUNCAN-2, que encontra-se atualmente em testes em algumas usinas. Esta colhedora apresenta as mesmas desvantagens do modelo americano.

Outros modelos de colhedoras de cana-de-açúcar queimada e inteira são as

versões fabricadas pela ARTIOLI e MCC-300, que cortam uma linha de cana, sem apresentar um sistema de limpeza, e apta apenas para colher cana-de-açúcar ereta.

2.1.2.- Sistema de Colheita de Cana-de-Açúcar Picada

2.1.2.1.- Em Cuba e Austrália

As colhedoras australianas e cubanas apresentam as seguintes características:

i.- São autopropelidas, com sistemas hidrostáticos e mecânicos para seu deslocamento.

ii.- Um mecanismo para levantar a cana-de-açúcar deitada.

iii.- Mecanismo de corte de base; um disco de, aproximadamente, 1000 mm de diâmetro, flutuante, de modo a cortar a cana-de-açúcar em sua base, cerca de 1 a 2 cm acima do nível do solo.

iv.- Sistema de alimentação forçada.

v.- Picador de colmos, com capacidade de cortar 95% dos colmos entre 300 e 400 mm.

vi.- Sistemas de limpeza; composto em uma primeira fase, de um ventilador, e na fase secundária, de um extrator situado no extremo superior da esteira transportadora.

vii.- Esteiras transportadoras, capazes de girar de um ângulo de 180°, permitindo que a combinada possa cortar sempre o mesmo lado do talhão.

viii.- Eliminador de ponteiros; este dispositivo é colocado na parte frontal superior da máquina e só é eficiente para cana-de-açúcar ereta.

Em Cuba, o sistema utiliza-se ainda de estações intermediárias de limpeza, chamadas “centro de acopio”, no campo, para melhorar a limpeza realizada pela máquina. (Magalhães, 1994).

Fuelling et al (1978) avaliaram o desempenho de várias colhedoras de cana-de-açúcar picada, na região Norte de Queensland, Austrália. Foram testados os modelos Massey Ferguson MF 205, Toft 4000, Toft 6000, Toft 6100 e Claas 1400, num total de 15 máquinas. Cada máquina trabalhou em determinadas condições de plantações, com diferentes variedades de cana-de-açúcar e com modificações mecânicas diferentes, sendo que foram colhidas tanto cana queimada quanto cana crua. Os testes foram realizados com 3 velocidades de deslocamento diferentes, conforme as condições do terreno. Nos testes onde foram colhidas cana crua e cana queimada no mesmo campo, os índices de colheita (ton/ha) obtidos para cana-de-açúcar crua foram de 60 a 70% do que fora conseguido com a cana queimada, devido à menor velocidade de operação causada pela má visibilidade do operador. A eficiência de limpeza não foi avaliada devido à grande diversidade entre as condições das plantações.

2.1.2.2.- No Brasil

Além do sistema australiano de colheita de cana-de-açúcar picada, no Brasil existem também as colhedoras Santal Rotor, que substituíram as esteiras transportadoras

por rotores lançadores de rebolos de cana-de-açúcar e os sistemas de limpeza, que constam somente de extratores. Os demais itens de alimentação e corte de base permanecem basicamente os mesmos.

Suas principais limitações são o corte de base com discos duplos posicionados na entrelinha, não adaptado para o sistema de plantio no sulco (extremamente difundido no Brasil), e não apresentam recursos de flutuação. O seu sistema de limpeza, de baixa capacidade, inviabiliza operar a colhedora em velocidade economicamente viável, mantendo o nível de impurezas vegetais abaixo de 5%. (Magalhães, 1994).

Dos modelos estrangeiros, os mais comuns nas usinas brasileiras são o CLAAS CC-2000, da Alemanha, o CAMECO dos EUA e o AUSTOFT 7000, da Austrália.

Os três modelos apresentam as limitações já descritas para o cortador de base e sistema de limpeza. (Magalhães, 1994).

Algumas usinas no Brasil estão implantando o sistema cubano de centro de limpeza, para melhorar a qualidade da matéria prima que se destina às moendas, eliminando as impurezas por um sistema de ventilação e remoção.

As Figuras 1, 2 e 3 ilustram exemplos de colhedoras de cana-de-açúcar picada existentes no mercado brasileiro.



Figura 1 - Colhedora de cana-de-açúcar picada - mod. Amazônia (Santal).



Figura 2 - Colhedora de cana-de-açúcar picada - mod. E-16000 (Brastoft).

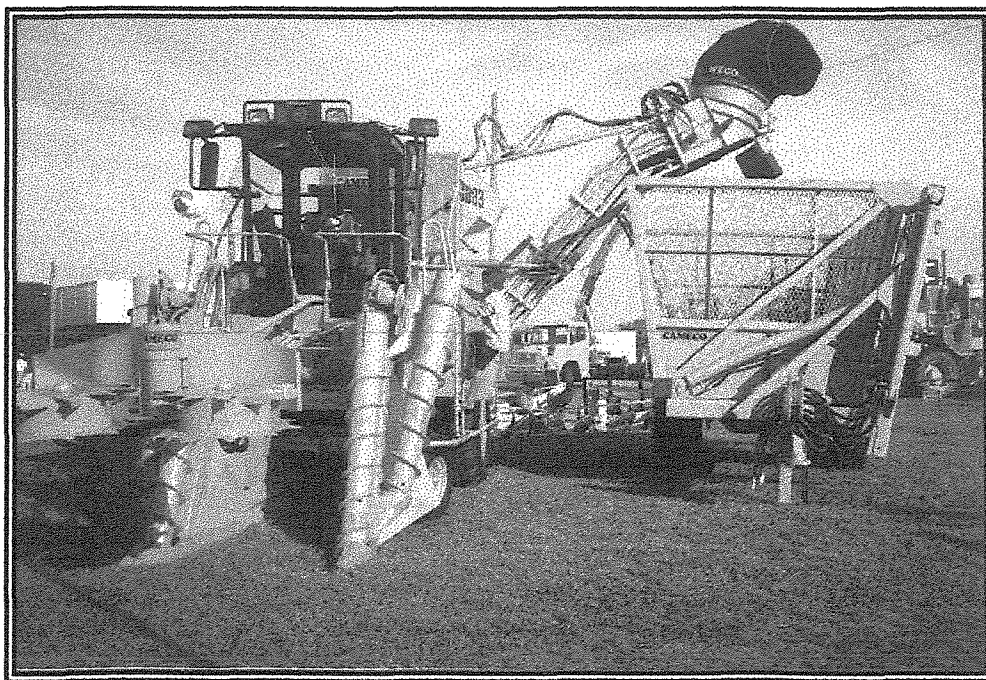


Figura 3 - Colhedora de cana-de-açúcar picada (Cameco).

Rípoli e Mialhe (1980) realizaram um estudo visando a definição e avaliação de parâmetros de desempenho operacional, com relação à qualidade do material colhido por três colhedoras de cana-de-açúcar mais utilizadas no Brasil, na safra 77/78, sob condições operacionais de campo similares. Foram testadas três colhedoras para cana-de-açúcar queimada e picada, a saber: SANTAL-115, TOFT R-300 e MASSEY FERGUSSON-201, sendo que foram avaliados os seguintes parâmetros, em relação à carga total colhida e carregada no caminhão:

- a.) índice de matéria estranha total (ponteiros, folhas e palhas, terra, raízes e material não selecionado) presente na carga colhida e picada - TEI %;
- b.) índice de ponteiros presente na carga - TI %;
- c.) índice de folhas e palhas presente na carga - LI %;

- d.) índice de raízes presente na carga - RI %;
- e.) índice de terra presente na carga - SI %;
- f.) índice de material não selecionado presente na carga - NI %;
- g.) eficácia de manipulação (EM%) - relação entre a quantidade de colmos existentes na linha de cana e a quantidade de colmos cortados, fracionados e carregados pela máquina;
- h.) capacidade efetiva (EC) - relação entre a carga total colhida e o tempo de colheita na linha de cana.

A Tabela 2 sintetiza os resultados obtidos nesse estudo.

Tabela 2 - Avaliação do desempenho operacional de colhedoras realizado por Rípoli e Mialhe (1980).

	SANTAL-115	TOFT R-300	MF-201
TEI %	9,64	7,71	9,93
TI %	4,61	4,61	6,74
LI %	1,43	1,26	1,78
RI %	0,68	0,41	0,32
SI %	1,28	0,61	0,59
NI %	0,92	0,82	0,49
EM %	84,64	84,59	84,98
EC (t/h)	36,18	49,54	47,63

Rípoli e Berto (1981) avaliaram o desempenho de duas colhedoras combinadas de cana-de-açúcar (Santal, modelos 115, normal e com super-redução), na região de Campos, no Estado do Rio de Janeiro, avaliando a eficácia de manipulação (EM%), a capacidade efetiva (CE), o índice matéria estranha total (IT%), o índice de ponteiros (IP%), o índice de folhas e palhas (IF%), o índice de raízes (IR%), o índice de

terra (IR%) e o índice de material não selecionado (IW%). A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos nessa avaliação.

Tabela 3 - Avaliação do desempenho operacional de colhedoras combinadas, realizado por Rípoli e Berto (1981).

	Santal 115 normal	Santal 115 com super-redução
EM %	94,67	95,97
CE (ton/h)	30,73	35,46
IT %	5,67	5,83
IP %	0,92	0,90
IF %	0,92	0,90
IR %	0,41	0,45
IS %	0,40	0,50
IW %	0,51	0,60

2.1.2.3.- África do Sul

Com auxílio da Santal/Brasil, foi desenvolvido na África do Sul, uma colhedora de cana-de-açúcar acoplada ao trator, chamada Mini Rotor. Utilizando os princípios básicos da Rotor, a colhedora apresentou um desempenho fraco. Necessitando de um espaçamento entre linhas superior a 1,5 m, com um cortador de base não projetado para colher no sulco (1º, 2º corte) e capacidade de campo em condições ideais, ficou abaixo de 25 ton/hora.

De Beer e Boevey (1979) fizeram um estudo para determinar as perdas de uma plantação de cana-de-açúcar, quando colhida mecanicamente com duas colhedoras diferentes, em comparação com as ocorridas quando colhidas manualmente, na Companhia de Açúcar Mhlume, África do Sul. Verificaram que a quantidade de material estranho foi de 3,1% para a colheita manual e 6,1% e 7,0% para as duas colhedoras mecânicas, respectivamente.

2.2.- Cana-de-Açúcar Crua e Inteira

Em algumas plantações, a queimada não é prejudicial se houver a abundância de umidade relativa do ar ou em regiões atingidas por geadas; mas na maioria dos casos, ela torna-se prejudicial devido a:

- perda de produtividade em áreas que utilizam o efeito da palha sobre o solo para conservação da umidade;
- custos extras para controle de ervas daninhas, causadas pela falta de palha sobre o solo;
- prejuízos à estrutura do solo, a longo prazo, devido à alta temperatura que o solo é exposto, podendo causar, em alguns casos, a erosão do mesmo;
- poluição desagradável e perigos do fogo para as propriedades, plantações, etc.;
- organização perfeita imposta aos produtores e usinas, pois a cana-de-açúcar queimada deve ser moída o mais rápido possível; as condições variam, mas grandes perdas podem ocorrer se o tempo de espera for maior que 24 horas. (Hudson et al, 1975).

Whalen, S. A. (1989) discorre sobre todos os problemas causados pelas queimadas, desde os métodos para determinação das emissões impostos à 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-biogênicas associadas às queimadas de cana-de-açúcar, prováveis responsáveis pelas afecções pulmonares, cardiovasculares e efeitos carcinogênicos causados nos trabalhadores da indústria açucareira do Hawaii, Estados Unidos da América.

Furlani Neto, V. L. (1994) apresenta uma série de vantagens e desvantagens da colheita de cana-de-açúcar crua. As vantagens são:

- 1.- redução do impacto das gotas de chuva sobre os solos agrícolas;
- 2.- maior conservação de umidade no solo, pelo efeito da palha sobre o solo;
- 3.- controle das ervas daninhas, dispensando o uso de herbicidas em pré ou pós-emergência;
- 4.- poder-se-á reduzir os terraços e/ou curvas de nível nas áreas de colheita da cana-de-açúcar crua, onde os restos de colheita permanecem sobre o terreno;
- 5.- maior incorporação de matéria orgânica aos solos;
- 6.- com a adoção da técnica de colheita de cana-de-açúcar crua, há a possibilidade de redução da população de nematóides devido ao acréscimo de matéria orgânica ao solo;
- 7.- os restos do palhço em decomposição auxiliam em uma maior atividade microbiana do solo;
- 8.- o processo de colheita de cana-de-açúcar crua diminui o impacto ambiental da queimada e seus efeitos indiretos nas cidades próximas (fuligem);
- 9.- ausência de exsudação dos colmos, ocasionada pela queima do canavial;
- 10.- a colheita mecânica da cana-de-açúcar crua dispensará o processo de lavagem dos colmos, diminuindo consideravelmente, os custos industriais e, principalmente, evitando as perdas de açúcar dos exsudados do colmo pela lavagem;
- 11.- durante um período de clima desfavorável, uma parada industrial não ocasionaria perdas consideráveis na deterioração da matéria prima queimada no campo (cortada ou não);

12.- o sistema de cana-de-açúcar crua resultaria para a indústria, um volume maior de bagaço, devido aos aumentos nas impurezas vegetais (folhas e palmitos) nas cargas cortadas mecanicamente;

13.- melhoria da qualidade industrial da matéria prima entregue para fabricação;

14.- o cultivo das soqueiras poderá ser realizado com um trator de menor potência;

15.- o sistema de cana-de-açúcar crua dispensa o uso de enleiração de palha.

As desvantagens da cana crua são dadas a seguir:

1.- diminuição da capacidade operacional das colhedoras;

2.- maior dificuldade de cortar canaviais sem queimar, utilizando o corte manual, principalmente os de maior produtividade agrícola (1º corte, áreas de fertirrigação com vinhaça, canaviais tombados, etc.), reduzindo, aproximadamente, em 70% os rendimentos operacionais do homem;

3.- o corte manual de cana-de-açúcar crua ocasionará um maior índice de acidentes de trabalho, pois demandará do cortador um golpe de facão com maior potência para vencer a resistência oferecida pelas folhas da cana-de-açúcar verde, ocasionando cortes nos pés e/ou canelas. Outro ponto de ferimento são os olhos, devido ao contato com os bordos serrilhados das folhas verdes;

4.- ligeiro aumento das perdas de matéria prima no campo, nos processos manuais de colheita (corte de base);

5.- aumentos significativos nas impurezas vegetais da carga, originando acréscimos no número de veículos para o transporte da matéria prima, devido à redução da densidade de carga;

6.- o perigo de incêndios no palhiço, durante a fase de desenvolvimento inicial da cultura até o fechamento das entrelinhas é iminente;

7.- maior desgaste de componentes ativos da colhedora, pelo efeito abrasivo das folhas de cana-de-açúcar;

8.- a palha propicia um ambiente favorável à proliferação de pragas (por exemplo cigarrinhas, broca do colmo, etc.) na cana-de-açúcar;

9.- retirando-se parte do palhiço depositado sobre o terreno após a colheita de cana-de-açúcar crua, as ervas daninhas conseguem transpor a camada de palha e desenvolver-se normalmente sobre a cultura, necessitando-se de uma aplicação química com herbicidas de pós-emergência.

A cana-de-açúcar picada contém ponteiros, folhas, pedras e uma quantidade de solo e raízes em um grau superior aos colmos carregados mecanicamente, e apresentam os seguintes problemas:

- ponteiros - com um baixo grau de sacarose, seu suco de baixa pureza e alto grau de não-açúcares, afetam o processamento.
- folhas - removem a sacarose do suco, aumentam a quantidade de fibras e ajudam a polir os rolos.
- pedras - causam excessivo dano aos rolos de moagem.

- solo - tende a inflar o processo de extração; aumenta o volume de lama, que é outra fonte de perdas, e dificulta a clarificação.

A cana-de-açúcar inteira, por sua vez, possui um maior tempo de estocagem; sua deterioração ocorre, mas a uma velocidade bem menor. Durante o carregamento mecânico utilizando rastelos rotativos, a porcentagem de matéria estranha presente é menor que na cana-de-açúcar picada. (Furlani Neto, 1994).

Outra vantagem de se operar com cana-de-açúcar inteira é que hoje, 80% das usinas estão equipadas para operar somente com este tipo de matéria prima, o que significa que não há necessidade de grandes investimentos nos sistemas de transporte e recepção nas usinas, para se optar pela colheita mecanizada de cana-de-açúcar crua e inteira. (Magalhães, 1994).

2.3.- Condições dos Canaviais Brasileiros

Os canaviais brasileiros, na sua grande maioria (80%), operam com um sistema de corte, carregamento, transporte e recepção predominantemente de cana-de-açúcar inteira. O plantio é realizado no sulco, a uma profundidade de, aproximadamente 30 cm, com nivelamento precário que, normalmente, dificulta muito a operação das colhedoras existentes. Este sistema de preparo de solo exige alta potência do cortador de base, incorporando volumes significativos de terra à matéria prima, sendo que, normalmente, não se obtém um corte rente ao solo. O espaçamento de plantio, predominantemente, é de

1,4m, mas com grande diversidade de espaçamentos menores; são observados espaçamentos na faixa de 0,9 a 1,5 m. (Magalhães, 1994).

A média de produtividade no 1º corte da cana-de-açúcar é de até 150 t/ha, em algumas plantações, com variedades não desenvolvidas para colheita mecânica em termos de facilidade de despalhe, porte ereto e maior teor de fibras. Paralelamente, produtividades baixas, de até 60 t/ha, são freqüentes no último corte do ciclo, o que demanda equipamentos adaptados a operarem satisfatoriamente em velocidades maiores e de preferência com corte de 2 linhas, para obter-se custos aceitáveis (R\$/t). (Magalhães, 1994).

Topografia ondulada, com declividades freqüentes de 15%, sujeita sempre a algum grau de erosão, ainda que sob condições adequadas de conservação do solo, são geralmente observadas no estado de São Paulo. Os talhões são freqüentemente irregulares, com comprimento médio inferior a 400 m, com sistemas de terraços, com presença de ruas mortas ou com sulcação atravessando os terraços. Carreadores e estradas abaixo do nível do talhão são normais.

O período de safra vai de maio a novembro, pois a capacidade industrial é insuficiente para concentrar a safra exclusivamente nos meses secos do inverno.

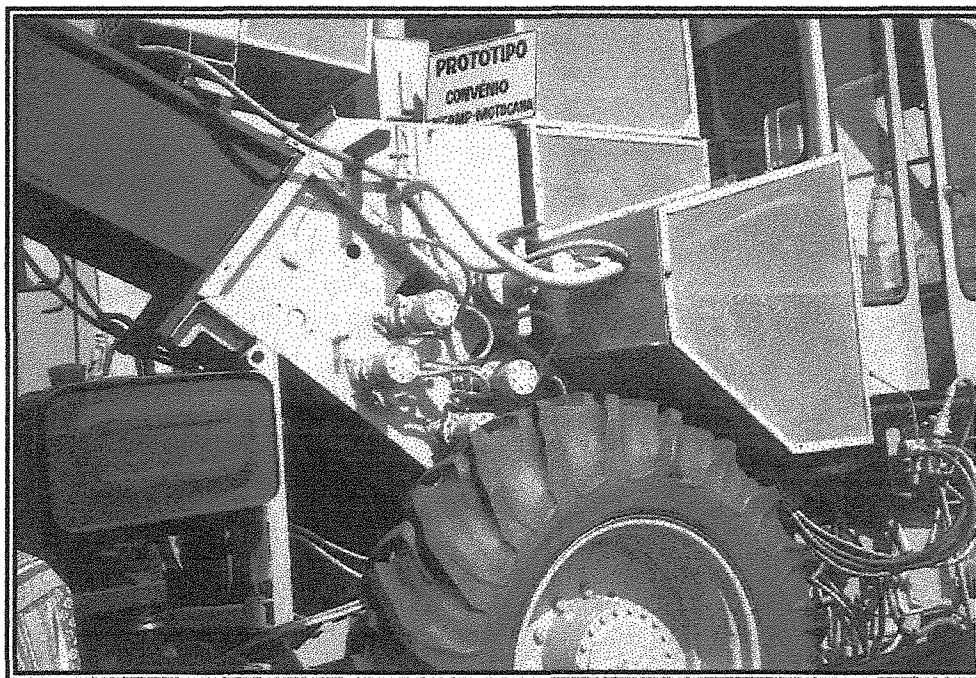
Diversas das condições acima relacionadas podem ser melhoradas significativamente, pelo gerenciamento agrônomo das áreas. Contudo, tem-se observado, historicamente, que esse processo de adaptação é lento e freqüentemente mal sucedido.

O equipamento deve, portanto, ter capacidade para enfrentar essas condições, com desempenho aceitável, de forma a permitir sua implantação num processo

gradativo de aprimoramento de todo o sistema relacionado com a cana-de-açúcar. (Magalhães, 1994).

A indústria nacional tem tentado, por vários anos, o desenvolvimento de colhedoras de cana-de-açúcar sem suficiente agressividade e domínio tecnológico, para conseguir uma colhedora adaptada às condições topográficas, agrônômicas e de técnicas culturais agrícolas brasileiras.

As Figuras 4 e 5 ilustram o protótipo desenvolvido em convênio pela Universidade Estadual de Campinas e a empresa Motocana (UNICAMP-MOTOCANA), para colheita de cana-de-açúcar inteira.



**Figura 4 - Protótipo de colhedora de cana-de-açúcar inteira.
- Convênio UNICAMP-MOTOCANA.**

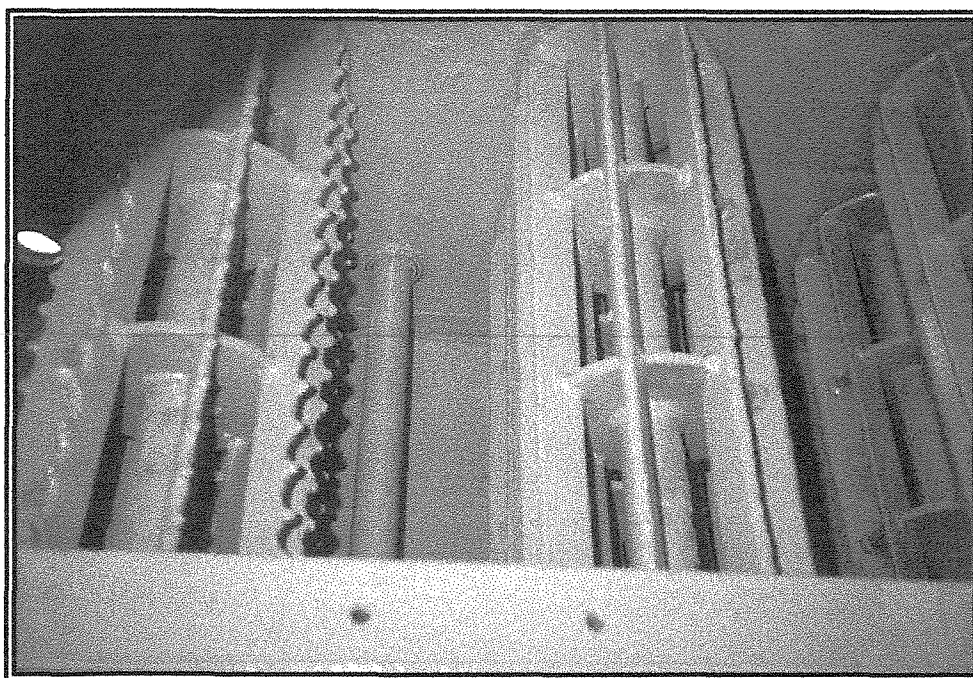


Figura 5 - Detalhe dos rolos transportadores do protótipo desenvolvido pelo convênio UNICAMP-MOTOCANA.

Rípoli e Berto (1981) apresentam a distribuição por regiões, marcas e modelos das 456 colhedoras combinadas em uso no Brasil, até julho de 1980, conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 - Distribuição por regiões, marcas e modelos de colhedoras combinadas no Brasil, segundo Rípoli e Berto (1981).

Região	Marcas e Modelos						
	Santal 115	Santal Rotor	MF 201*	MF 102*	Toft R-300*	Toft 6000	Claas Lib*
São Paulo	149	--	42	28	29	--	--
Nordeste	46	--	15	--	11	--	--
Paraná	29	--	--	--	--	--	9
Rio de Janeiro	11	34	2	2	5	37	--
M. T. do Sul	18	--	--	--	--	--	--
M. T. do Norte	4	--	--	--	--	--	--
Pará	2	--	--	--	--	--	--
Total	259	34	59	30	45	37	9
* Importadas							

2.4.- Sistema de Limpeza de Cana-de-Açúcar

Ridge e Dick (1987) desenvolveram uma bancada de ensaios na Austrália, em conjunto com fabricantes de colhedoras de cana-de-açúcar, para realizar testes nos sistemas de limpeza dos equipamentos com maior precisão e possibilidade de ulteriores ajustes. A instalação de testes é composta de um transportador de esteira de 12 m de comprimento, que permite a pesagem da quantidade de colmos que alimentam a colhedora, acionado por um motor hidráulico de velocidade variável. A cana-de-açúcar foi colhida manualmente no campo e pesada com precisão de $\pm 0,2$ kg, em uma plataforma montada sobre células de carga. A colhedora foi alimentada com amostras de 200 a 300 kg e, após a passagem pela mesma, a cana-de-açúcar foi recolhida e pesada novamente.

Verificou-se que a precisão das medições de perdas de cana-de-açúcar e de materiais estranhos é melhor nas instalações de testes, em comparação com os testes feitos no campo, e esse processo permite melhores ajustes do sistema de limpeza e avaliações de modificações das máquinas para colheita de cana-de-açúcar. Os resultados comparativos de perdas de cana-de-açúcar foram de 1,9~2,3 % com a bancada de testes, e 2,7~13,0 % no campo. Esses resultados foram obtidos com 4~5 repetições na bancada, em comparação com 6~14 repetições no campo. Nas medições de presença de materiais estranhos, obteve-se 1,0~1,5 % na bancada e 0,6~2,3 % no campo.

Miyabe e Abe (1976) realizaram ensaios experimentais para determinação da força de tração, energia de tração e tensão necessária para a remoção das folhas da cana-de-açúcar, em função de diferentes ângulos de remoção em relação ao colmo, e em função da

posição das folhas nos diferentes nós, ambos no sentido crescente do ápice para a raiz. O valor médio da força de tração necessária para o arrancamento da 8ª folha foi de 6,33 kg/folha, com desvio padrão de 0,90 kg/folha, com 45° de inclinação em relação ao colmo, e foi de 3,61 kg/folha, com desvio padrão de 0,71 kg/folha com 135° de inclinação; o valor máximo da força de tração na 8ª folha foi de 11,94 kg/folha, com desvio padrão de 1,94 kg/folha, com 45° de inclinação, e de 7,70 kg/folha, com desvio padrão de 1,53 kg/folha com 135° de inclinação em relação ao colmo. Os autores concluíram que a força de tração necessária para o destacamento das folhas da cana-de-açúcar tende a decrescer quando o ângulo da força de tração aumenta em relação ao colmo, e quando a posição das folhas tende aos nós inferiores, ou seja, em direção à raiz. Também concluíram que, se um sistema de tração simples for utilizado para arrancar as folhas da cana-de-açúcar, deve-se procurar tracioná-las no sentido contrário ao seu crescimento ao longo do colmo, para melhor eficiência do sistema, embora outros esforços também devam ser aplicados para um melhor desempenho do mecanismo supra.

Abe et al (1979) realizaram uma série de ensaios com diferentes sistemas para a remoção das folhas da cana-de-açúcar, onde avaliaram a eficiência da limpeza, o índice de refugos, as perdas de cana-de-açúcar, a eficiência do trabalho, a potência efetiva da remoção e os danos causados tanto no colmo quanto nos elementos do sistema de limpeza. A Tabela 5 a seguir, apresenta os resultados desses ensaios.

Tabela 5 - Avaliação dos sistemas de limpeza realizada por Abe, M., Kojima, S. e Miyabe, Y. (1979).

	Sistema de limpeza avaliado	Eficiência da limpeza (%)	Índice de refugos (%)	Perdas de cana (%)	Eficiência do trabalho (kg/homem-hora)
1.-	Corte/fricção com lâminas cilíndricas	77,3 ~ 90,1	0,6 ~ 1,2	0,0	150 ~ 313
2.-	Fricção forçada com fios de aço e correias em "V"	76,6 ~ 89,8	0,6 ~ 1,0	0 ~ 1,1	156 ~ 190
3.-	Impacto/fricção com correntes de elos	90,3 ~ 91,3	0,6 ~ 0,8	0,6 ~ 1,4	162 ~ 178

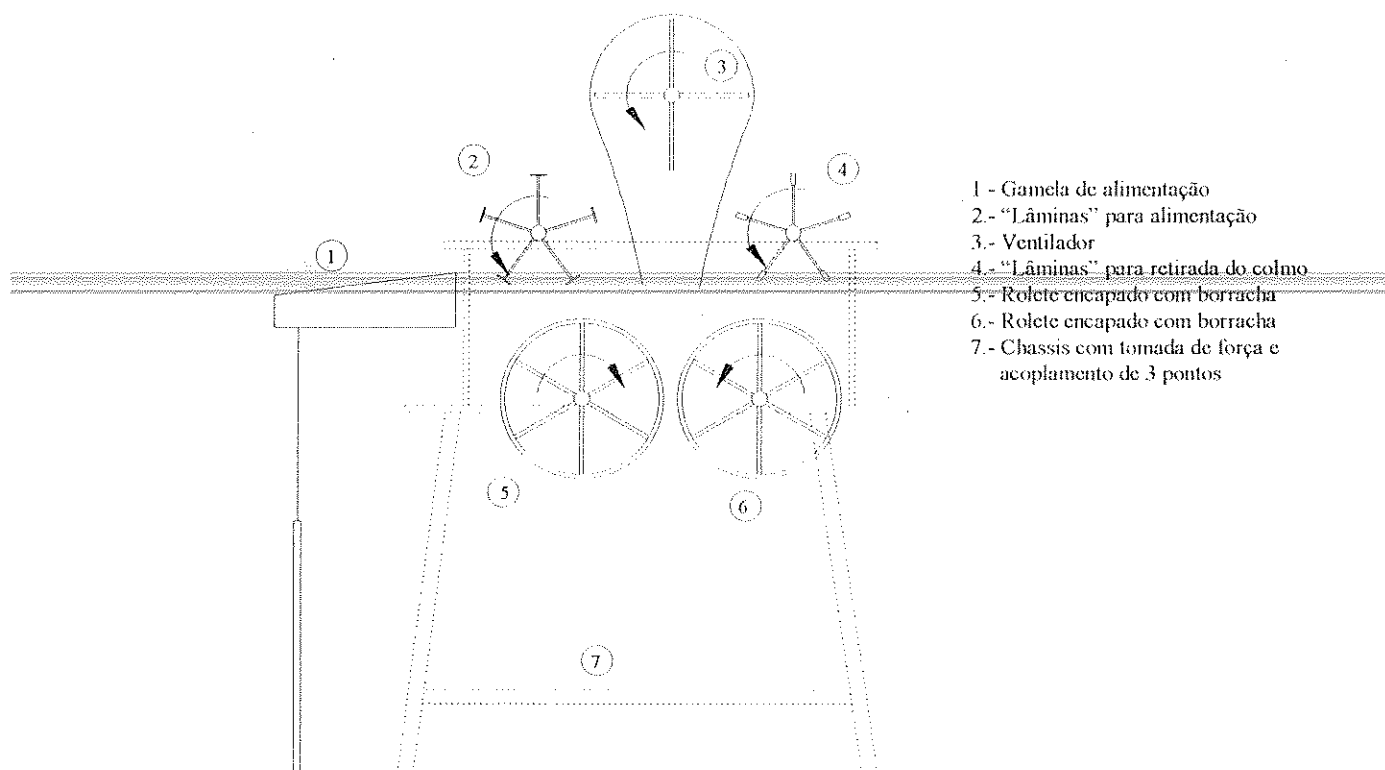
Kojima et al (1979), Miyabe et al (a) (1979), Miyabe et al (b) (1979), Abe et al (1984) também realizaram outros ensaios, como o estudo estatístico da retenção do

colmo de cana-de-açúcar entre rolos, em função do diâmetro dos rolos, espaço entre os rolos, rotação de cada um dos rolos, diâmetro do colmo de cana-de-açúcar e do ângulo de corte da base do colmo; determinação das resistências à penetração, ao dobramento e flexão, ao corte e ao esmagamento por compressão do colmo de cana-de-açúcar; ensaio de impacto para verificar as características ao longo do colmo de cana-de-açúcar.

Miyabe et al (1984) avaliaram o sistema de limpeza da cana-de-açúcar por impacto/fricção através de correntes de elos giratórios, verificando os danos causados aos colmos com diferentes tipos de elos e com diferentes rotações; um estudo da velocidade do ar necessária para a limpeza da cana-de-açúcar foi realizado, em função do comprimento dos toletes e da distância dos mesmos em relação à saída do duto de ar.

Srivastava e Singh (1990), após testarem vários sistemas para a limpeza da cana-de-açúcar crua, como placas com entalhes em "V", dispositivos rotativos com lâminas

com as extremidades dobradas e retas, dispositivos rotativos para remover as folhas com perfis quadrados e em forma de engrenagens, cilindros rotativos com escovas de aço na sua periferia, dispostos verticalmente e horizontalmente, chegaram a um sistema para a remoção das folhas composto de dois cilindros que giram em sentidos opostos, revestidos com lona, “lâminas” giratórias para alimentação e retirada do colmo do mecanismo, e um ventilador. A Figura 6 ilustra esse mecanismo.



**Figura 6 - Seção transversal do “Limpador de cana-de-açúcar”
 construído por Srivastava e Singh (1990).**

A unidade é acionada pelo próprio trator, que pode transportá-la (aproximadamente 350 kg), e a transmissão é feita para os vários elementos do sistema

através de correntes dentadas, engrenagens e correias em “V”. O ventilador gira três vezes mais rápido do que o resto do sistema e a velocidade periférica dos cilindros varia de 10 a 12,7 m/s, dependendo da rotação fornecida pelo trator. Note-se que a velocidade periférica obtida é muito maior que a necessária, de 2,0 m/s, para esse tipo de remoção de folhas da cana-de-açúcar (Srivastava e Singh, 1990). As lâminas giratórias, basicamente, são placas de aço com as extremidades revestidas com, pelo menos, 1,0 cm de espessura de lona para evitar danos ao colmo. Os cilindros principais são revestidos com cintas de 10 cm de largura e 1,0 cm de espessura de lona emborrachada, e têm 45 cm de diâmetro. A cana-de-açúcar é introduzida por dois operários e a eficiência do sistema depende da velocidade periférica dos cilindros e da taxa de alimentação, que pode ser maior que 1 ton/hora, conforme a frequência com que os operários alimentam a máquina.

Shuka et al (1991) projetaram, desenvolveram e testaram um sistema para limpeza de cana-de-açúcar que remove os topos e as folhas, semelhante ao executado por Srivastava e Singh (1990). Basicamente, a lâmina giratória para alimentação da cana-de-açúcar foi substituída por um cilindro giratório, disposto de maneira a quebrar o topo do colmo em seu ponto fraco natural, e outras pequenas alterações com relação à disposição dos cilindros foram realizadas, para incrementar o funcionamento do sistema.

Pagnano (1994) realizou ensaios para determinação das forças necessárias para remoção da palha da cana-de-açúcar crua por fricção, através de um dispositivo que permitia a aplicação de uma força de compressão e uma força de tração, simultâneas, ao colmo da cana-de-açúcar. O dispositivo permitia que a cana-de-açúcar deslizesse sobre um raspador (talisca de ¼”), localizado sobre uma célula de carga. Dentre as variedades

testadas, a autora determinou a força máxima de compressão, sem que houvessem danos visíveis à cana-de-açúcar de 700 N, exercida pelo raspador ao longo do tolete de cana-de-açúcar, enquanto que, no ensaio de remoção de palha através de forças de atrito, a força média máxima de compressão necessária foi da ordem de 50 N, quando o nó passa pelo raspador a uma velocidade de 1,87 mm/s, com uma força média de compressão da ordem de 300 N.

Berto e Mialhe (1981), realizaram um estudo da danificação mecânica de gema de colmos de cana-semente, comparando-se o efeito de vários métodos de colheita e picamento. Foram analisadas as danificações mecânicas visíveis através de contagens das gemas intactas e das gemas danificadas mecanicamente (cortadas, amassadas, arrancadas, etc.), e a avaliação de danos mecânicos não perceptíveis visualmente foi feita através de testes de germinação em caixas de areia. A tabela a seguir, mostra os resultados obtidos durante os ensaios, e concluiu-se que a contagem de gemas é suficiente para detectar o efeito de injúria mecânica.

Tabela 6 - Percentual de danificação visível de gemas observado no ensaio de Berto e Mialhe (1981).

	Tratamento	% de danificação visível de gemas
1.-	Corte manual + picamento manual dos colmos	1,9350
2.-	Corte manual + picamento mecanizado através de máquina Martins PCM-02	5,2350
3.-	Corte com colhedora de cana em toletes Massey Ferguson-201	22,2350
4.-	Corte com colhedora de cana em toletes Toft Robot 300	24,7700
5.-	Corte com colhedora de cana em toletes Santal 115	32,9170

Baseado no anteriormente descrito, o presente trabalho teve como proposta a construção e a avaliação de um dispositivo para remoção das folhas do colmo da cana-de-açúcar crua e inteira, através de forças de atrito geradas por pares de rolos com diferentes velocidades periféricas, com um sistema oscilante dos rolos superiores para permitir que o dispositivo consiga processar diferentes lotes de cana-de-açúcar que possam ser introduzidos na cortadora. A disposição dos rolos também visou uma construção mais compacta, bem diferente do sistema proposto por Srivastava e Singh (1990), bem como permitir que o mesmo funcionasse como um sistema de transporte de cana-de-açúcar, simultaneamente à remoção das folhas.

3.- MATERIAL E MÉTODOS

3.1.- Material

3.1.1.- Cana-de-Açúcar

A variedade da cana-de-açúcar utilizada para os ensaios experimentais foi a SP70-1143, plantada em 21.06.95 e, portanto, no 1º corte com 1 ano e meio. Este material foi cedido pela Usina União São Paulo, sendo que foi colhido manualmente de maneira aleatória, sem o despalhe, com o corte realizado rente ao solo. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Protótipos do Departamento de Máquinas Agrícolas da Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas (DMA-FEAGRI / UNICAMP).

3.1.2.- Bancada de Ensaios

Para testar e validar o dimensionamento teórico apresentado, foi projetada e construída uma bancada de testes, acionada por uma unidade hidrostática com velocidade de rotação continuamente variável, com torque máximo de 500 N×m, existente no DMA-FEAGRI, constituída de um motor hidráulico acionado por um motor elétrico marca WEG 132M, potência nominal 11 kW a 1755 rpm, 60 Hz - IP/IN 8,3 - CAT N - FS 1,15.

O sistema de aquisição de dados era composto de um microcomputador com processador 386 SX, programa de aquisição de dados AqDados - versão 4.0 - revisão 5, desenvolvido pela empresa Lynx Tecnologia Eletrônica Ltda., um condicionador de sinais HBM MVD 2405A de 225 Hz e duas células de carga BERG CELL LB - uma com capacidade 1000 N e outra com capacidade 500 N, ambas com sensibilidade 2,0 mV/V.

A análise dos dados e a modelagem matemática foram feitas com auxílio do software Mathematica for Windows - v. 2.2.3, sendo este executado em um microcomputador com processador Pentium 133 MHz, com 24 Mbytes de memória RAM e 1.4 Gbytes de memória em disco rígido. (Blanchman, 1992), (Wolfram, 1993).

3.1.2.1.- Projeto da Bancada de Ensaios

As figuras a seguir mostram a bancada de ensaios que foi projetada e construída especialmente para a finalidade deste trabalho.

Essa bancada de ensaios é constituída por 2 pares de rolos de 0,250 m de diâmetro, dotados de 16 taliscas onduladas de 0,025 m de altura na sua periferia, totalizando um diâmetro de 0,300 m. Os pares de rolos foram montados a 0,800 m de distância, sobre colunas compostas por chapas de aço dobradas e soldadas em uma estrutura fixa ao solo, conforme mostrado na Figura 9.

Os rolos superiores eram montados sobre braços oscilantes, apoiados em mancais de rolamentos, dotados de um sistema de regulagem de carga vertical composto por uma mola helicoidal, de constante 10.300 N/m, montada em um eixo dotado de uma porca

para regulagem da pré-carga inicial aplicada pela mesma. O acionamento desses rolos era feito por uma sistema de corrente simples e engrenagem de passo $\frac{1}{2}$ " - ASA-40, conforme mostrado na Figura 7.

A sincronização e o acionamento dos rolos foi através de um conjunto de engrenagens e corrente de passo 1" - ASA-80, sendo que este sistema permitia a mudança dos diferenciais de velocidades entre pares de rolos e entre rolos superiores e inferiores, através da inversão da montagem das engrenagens, conforme mostrado nas Figuras 8 e 14.

A velocidade de passagem dos colmos de cana-de-açúcar pelo dispositivo limpador foi da ordem de 4,0 a 6,0 m/s, conseguida pela regulagem da rotação do motor hidráulico da unidade hidrostática. Esta unidade era acoplada ao dispositivo por um eixo cardan, com juntas universais em suas extremidades.

Nas páginas a seguir, as Figuras 10 e 11 mostram os detalhes da montagem dos rolos superiores e rolos inferiores, com as respectivas peças utilizadas nessas montagens, e as Figuras 12 e 13 mostram detalhes da unidade hidrostática utilizada como fonte de potência.

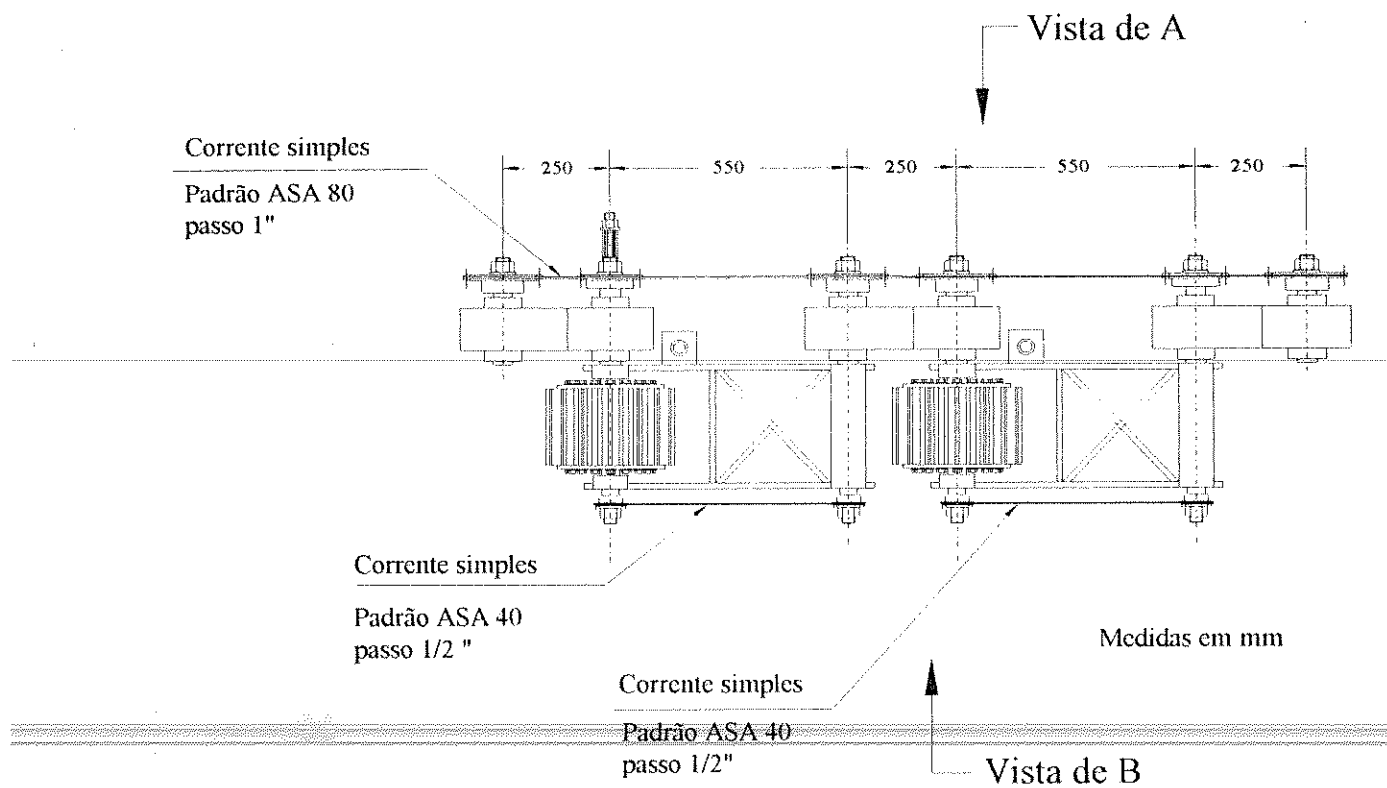


Figura 7 - Vista Superior da Unidade Limpadora

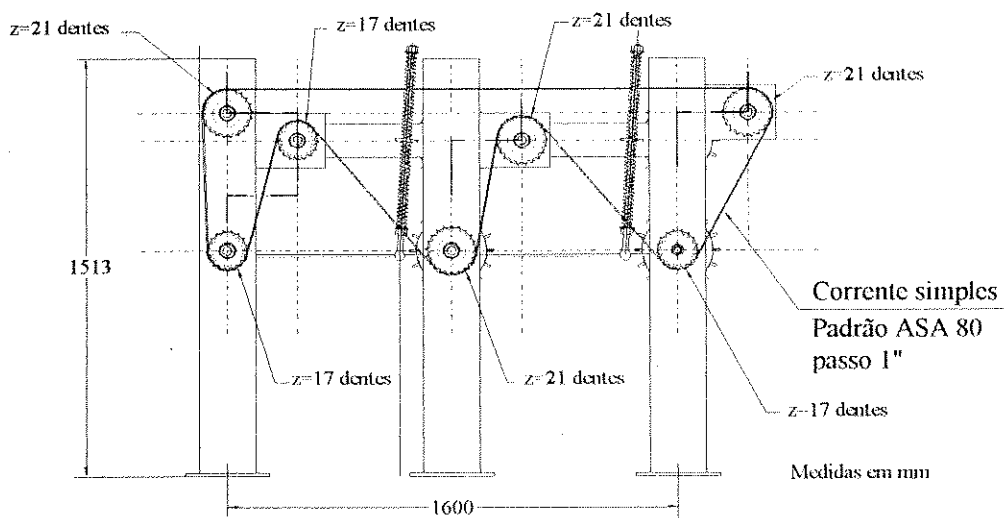


Figura 8 - Vista Posterior da Unidade Limpadora (Vista de A)

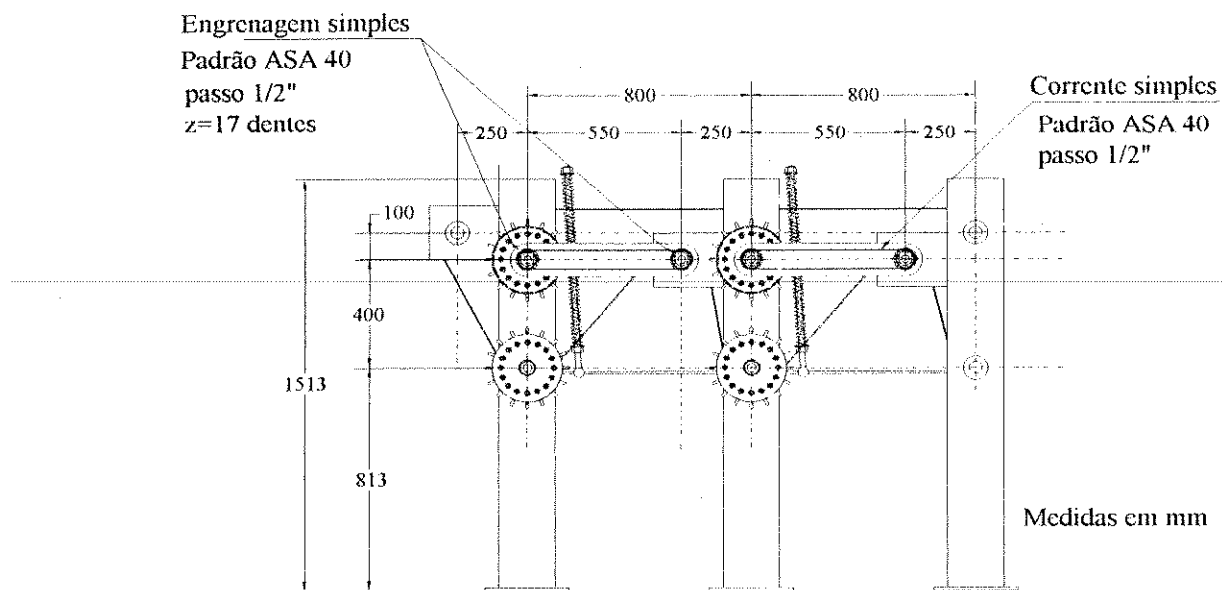


Figura 9 - Vista Frontal da Unidade Limpadora (Vista de B)

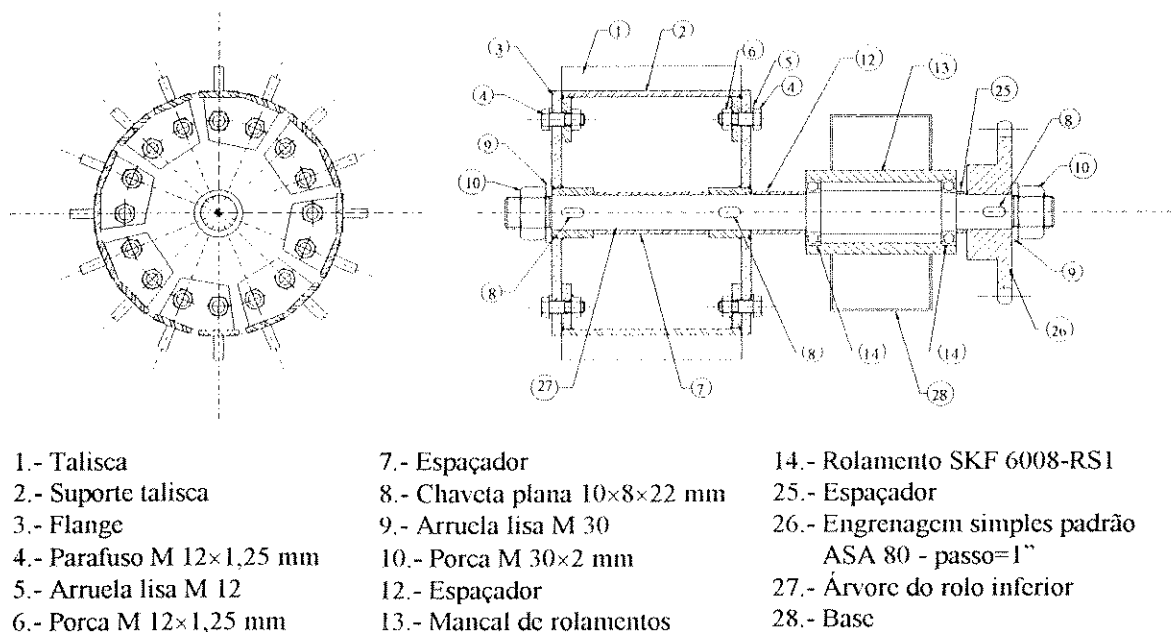
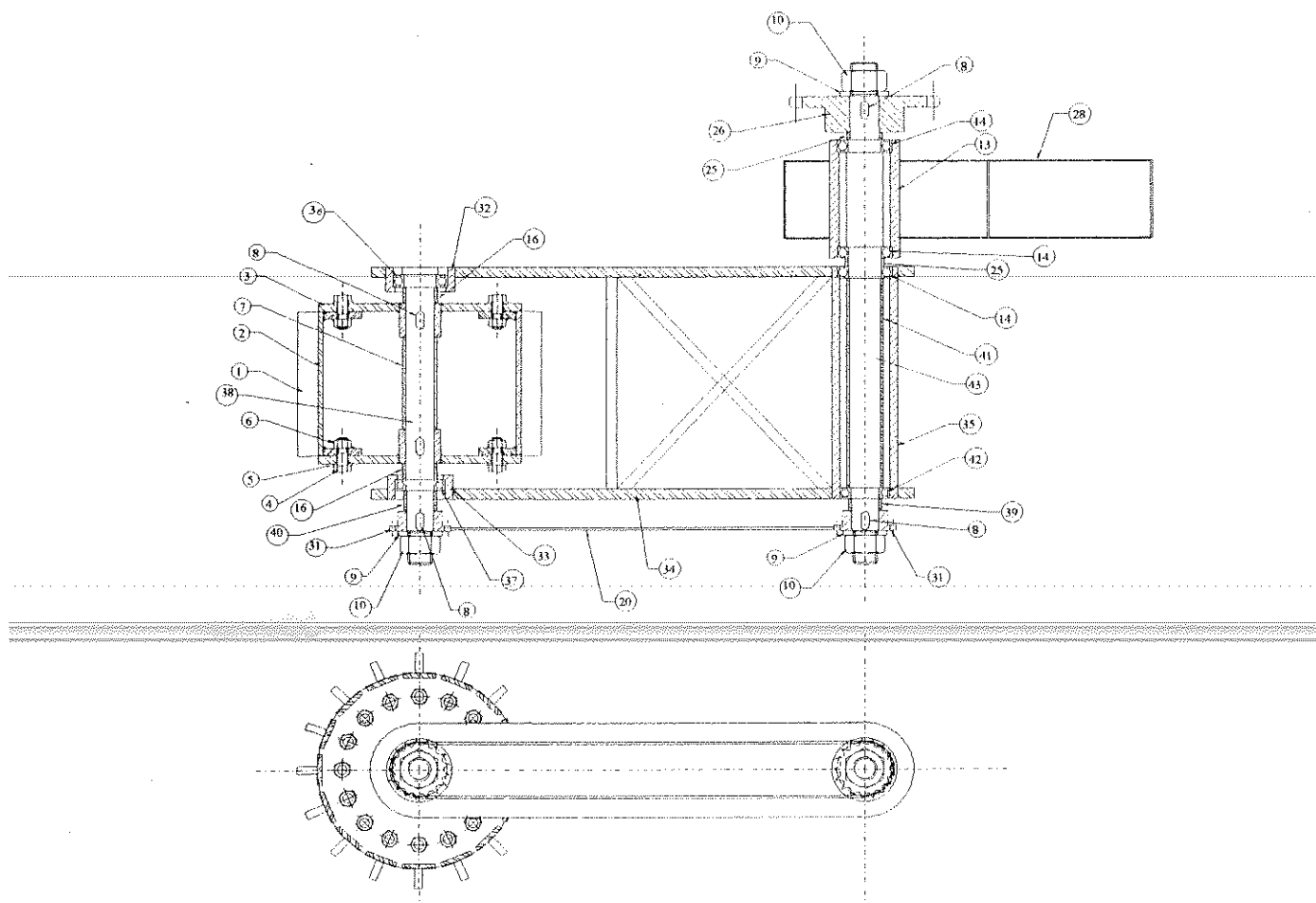


Figura 10 - Detalhe do Conjunto do Rolo Inferior



- | | | |
|------------------------------|---------------------------------------|---|
| 1.- Talisca | 13.- Mancal de rolamentos | 34.- Conjunto do braço oscilante |
| 2.- Suporte talisca | 14.- Rolamento SKF 6008-RS1 | 35.- Mancal de rolamentos oscilante |
| 3.- Flange | 16.- Espaçador | 36.- Rolamento SKF 6008-2RS1 |
| 4.- Parafuso M 12x1,25 mm | 20.- Corrente simples padrão ASA-40 | 37.- Rolamento SKF 6007-2RS1 |
| 5.- Arruela lisa M 12 | 25.- Espaçador | 38.- Eixo do rolo superior |
| 6.- Porca M 12x1,25 mm | 26.- Engrenagem simples padrão ASA-80 | 39.- Espaçador |
| 7.- Espaçador | 28.- Base | 40.- Espaçador |
| 8.- Chaveta plana 10x8x22 mm | 31.- Engrenagem simples padrão ASA-40 | 41.- Espaçador |
| 9.- Arruela lisa M 30 | 32.- Mancal de rolamentos | 42.- Rolamento SKF 6007-RS1 |
| 10.- Porca M 30x2 mm | 33.- Mancal de rolamentos | 43.- Árvore de acionamento do rolo superior |

Figura 11 - Detalhe do Conjunto do Rolo Superior

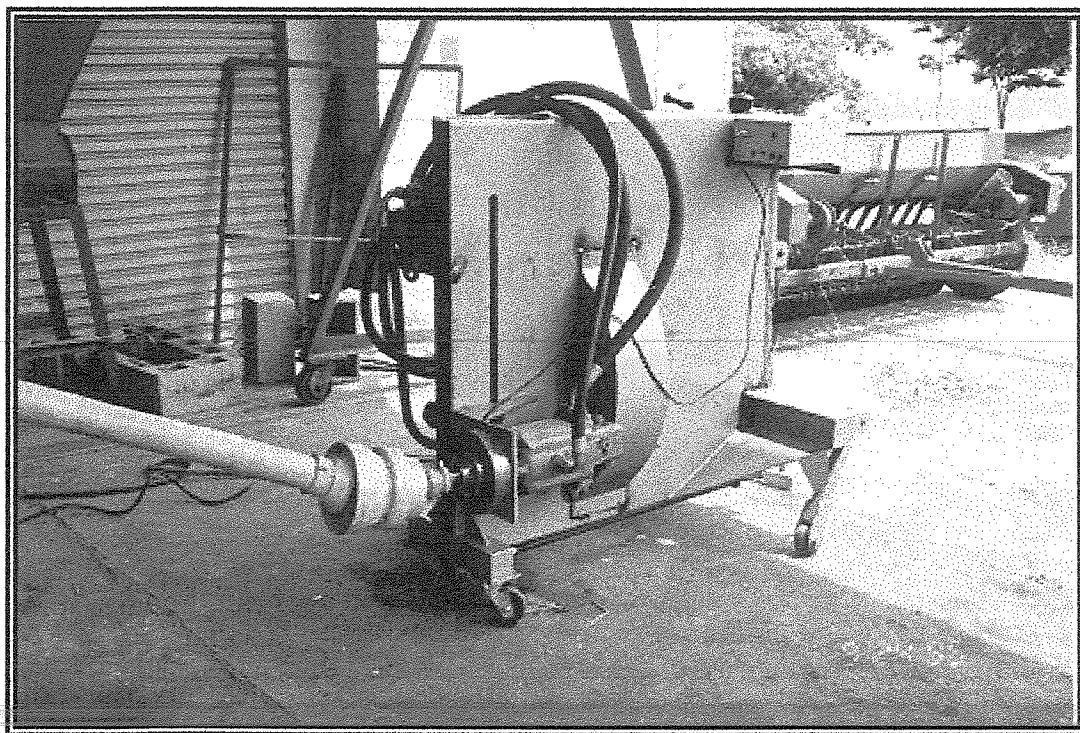


Figura 12 - Vista Lateral da Unidade Hidrostática.

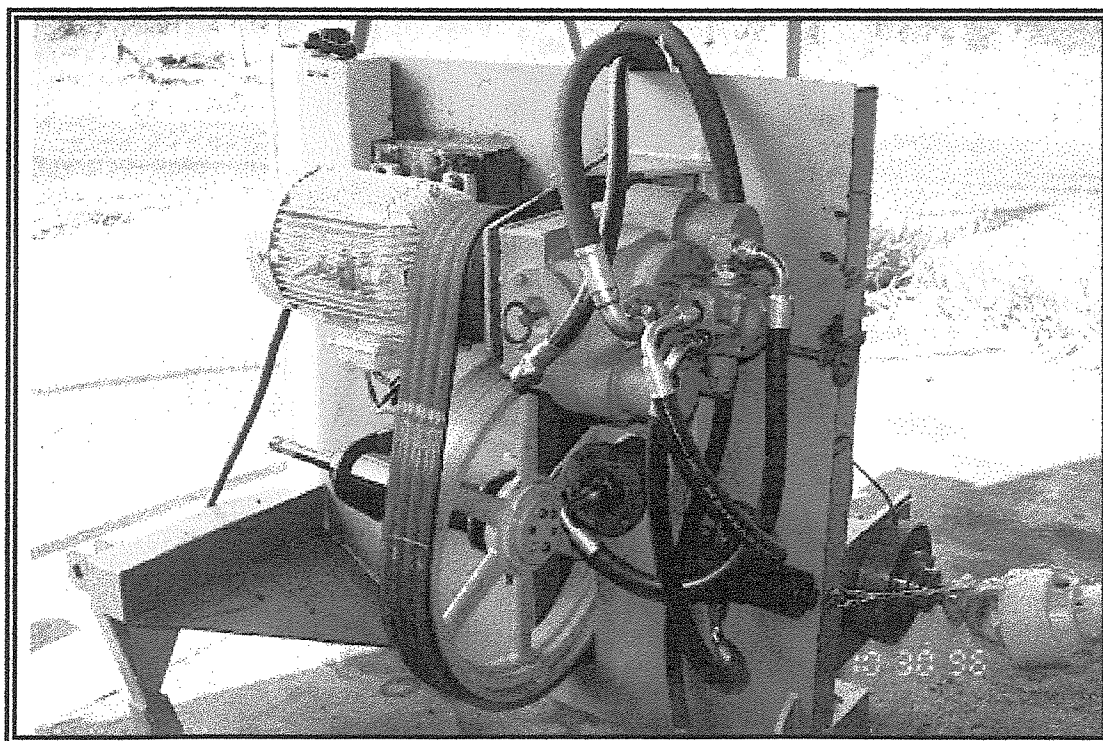


Figura 13 - Vista lateral da Unidade Hidrostática.

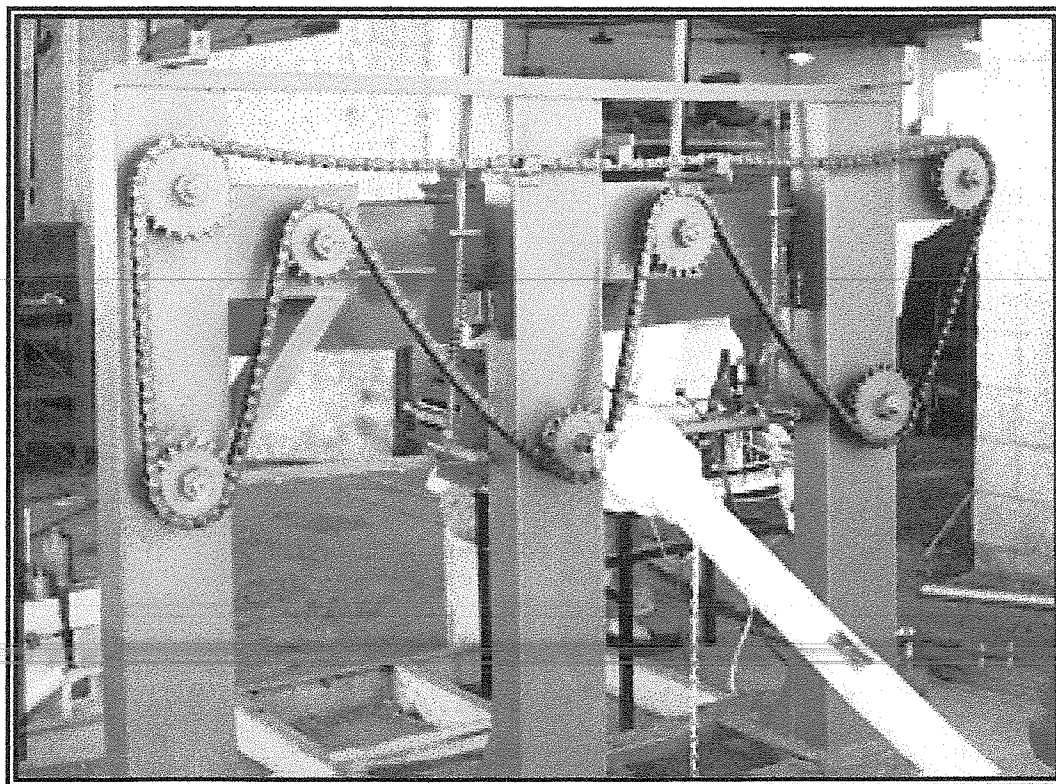


Figura 14 - Vista Posterior do Dispositivo Limpador.

3.2.- Métodos

3.2.1.- Cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar foi recebida com palha e sem ponteiros, para simular-se as condições de alimentação da cortadora, após o desponte das mesmas, depois de, cerca de 17 horas do corte manual realizado na usina.

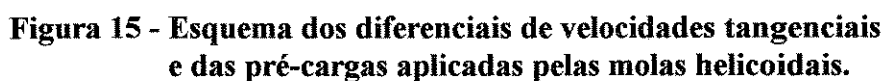
O lote foi subdividido em 9 sub-lotes, com 30 colmos de cana-de-açúcar cada um, sendo que cada sub-lote foi utilizado em um tratamento. Cada um dos colmos teve seu comprimento e diâmetro medidos, e contadas as folhas e as gemas presentes em cada um, antes da realização dos ensaios.

3.2.2.- Ensaio para avaliação do dispositivo limpador

Durante o ensaio foram levantados dados com três configurações diferentes da unidade limpadora, bem como três níveis diferentes de pré-cargas nas molas dos rolos superiores. Cada uma das combinações foi considerada como um tratamento, somando-se um total de 9 tratamentos, descritos como se segue:

- Tratamento 1 - Configuração I / Carga na mola 1
 - Tratamento 2 - Configuração I / Carga na mola 2
 - Tratamento 3 - Configuração I / Carga na mola 3
 - Tratamento 4 - Configuração II / Carga na mola 1
 - Tratamento 5 - Configuração II / Carga na mola 2
-
- Tratamento 6 - Configuração II / Carga na mola 3
 - Tratamento 7 - Configuração III / Carga na mola 1
 - Tratamento 8 - Configuração III / Carga na mola 2
 - Tratamento 9 - Configuração III / Carga na mola 3

Cada uma das configurações do dispositivo possui um diferencial de velocidades tangencial entre rolos (DVTR) superiores e inferiores, e um diferencial de velocidades tangencial entre pares de rolos subsequentes (DVTPRS). Em cada configuração do dispositivo, foram ensaiados três níveis de tensão inicial nas molas helicoidais (pré-carga na mola superior e inferior - PCMS e PCMI, respectivamente). A Figura 15 sintetiza os vários tratamentos utilizados durante os ensaios, e as Tabelas 7 e 8 apresentam os valores numéricos de DVTR, DVTPRS, rotações de cada um dos rolos, velocidades médias de passagem da cana-de-açúcar pelos pares de rolos, PCMS e PCMI.



Configuração	DVTR	DVTPRS	n ₁ (rpm)	n ₂ (rpm)	n ₃ (rpm)	n ₄ (rpm)	V _{m1} (m/s)	V _{m2} (m/s)
I	43 %	29 %	186	325	459	263	4,00	5,67
II	29 %	19 %	371	263	459	325	4,98	6,15
III	0,0 %	19 %	263	263	325	325	4,13	5,10

Pré-carga aplicada	PCMS (N)	PCMI (N)
Carga na mola 1	-----	412,0
Carga na mola 2	-----	360,5
Carga na mola 3	103,0	412,0

Os diferentes DVTR e DVTPRS foram obtidos através de alterações das posições das engrenagens de acionamento dos rolos, e as diferentes PCMS e PCMI foram proporcionadas por um sistema de pré-carga nas molas.

Os colmos de cana foram introduzidos individualmente e manualmente no dispositivo por duas vezes consecutivas, sendo que após cada passagem, foram contadas as folhas remanescentes no colmo da cana-de-açúcar, as gemas visivelmente danificadas e os danos mecânicos visíveis no topo, na porção média e na base dos colmos. A estes últimos, foram atribuídas notas, de acordo com a tabela seguir.

Tabela 9 - Classificação dos danos mecânicos visíveis sofridos pelas amostras durante os ensaios.

Nota	Comprimento/Tipo de dano mecânico observado
0	sem danos
1	Esmagamentos ou fissuras de 0 a 0,05 m de comprimento
2	Esmagamentos ou fissuras de 0,05 a 0,10 m de comprimento
3	Esmagamentos ou fissuras de 0,10 a 0,20 m de comprimento
4	Esmagamentos ou fissuras de 0,20 a 0,30 m de comprimento
5	Esmagamentos ou fissuras maiores que 0,30 m
6	Ruptura do colmo por tração ou flexão

Com os resultados obtidos, procedeu-se à análise estatística do ensaio, avaliando:

- a.) Porcentagem de remoção de folhas com 1 passagem;
- b.) Porcentagem de remoção de folhas com 2 passagens;

- c.) Porcentagem de gemas danificadas com 1 passagem;
 - d.) Porcentagem de gemas danificadas com 2 passagens;
 - e.) Danos mecânicos visíveis nos topos dos colmos após 1 passagem;
 - f.) Danos mecânicos visíveis nos topos dos colmos após 2 passagens;
 - g.) Danos mecânicos visíveis nas porções médias dos colmos após 1 passagem;
-
- h.) Danos mecânicos visíveis nas porções médias dos colmos após 2 passagens;
 - i.) Danos mecânicos visíveis nas bases dos colmos após 1 passagem;
 - j.) Danos mecânicos visíveis nas bases dos colmos após 2 passagens.

Para cada efeito estudado, foi feito um delineamento inteiramente casualizado (DIC), analisando-se os diferentes tratamentos, as diferentes configurações do limpador e as diferentes pré-cargas aplicadas pelas molas helicoidais, independentemente.

Havendo diferenças significativas pelo Teste F, procedeu-se ao Teste de Tukey para comparação das médias obtidas. As análises foram efetuadas ao nível de 5% de significância ($\alpha=0,05$), pois os coeficientes de variação foram relativamente altos. (Gomes, 1987).

Teste de Tukey:

$$\Delta = q \cdot \sqrt{\frac{QM_{RES}}{r}}$$

onde: - $q_{5\%}$ = amplitude total estudentizada, ao nível de 5% de probabilidade;

- QM_{RES} = quadrado médio do resíduo;

- $r = n^o$ de repetições.

Como método de avaliação do desempenho do dispositivo de limpeza, além da análise por tratamentos, decidiu-se também pela realização da análise das configurações utilizadas e dos níveis de pré-cargas aplicadas nas molas helicoidais, independentemente.

3.2.3.- Ensaio para determinação dos esforços gerados pelo rolo superior oscilante

Na realização do ensaio para determinação dos esforços gerados pelo rolo superior oscilante, para validação do modelo matemático descrito no próximo capítulo, o primeiro rolo inferior do dispositivo foi retirado, para proceder-se à montagem do suporte da célula de carga para aquisição de dados das forças verticais e horizontais.

Durante esse ensaio, a rotação do 1º par de rolos era de 263 rpm, e foram ensaiados dois níveis de pré-cargas aplicadas nas molas helicoidais - PCMI=412,0 N (Carga 1) e PCMI=360,5 N (Carga 2).

Para cada carga aplicada, foram passados 5 rebolos de cana-de-açúcar, com as dimensões previamente medidas, tanto para aquisição das forças verticais quanto para aquisição das forças horizontais. Através desses resultados experimentais, determinou-se o coeficiente de raspagem entre as superfícies dos colmos de cana-de-açúcar e das taliscas dos rolos, para determinação das forças através do modelo matemático.

A Figura 16 ilustra a disposição dos rolos durante a aquisição dos dados de forças, e as Figuras 17 e 18 ilustram a montagem do suporte da célula de carga para determinação das forças verticais e horizontais, respectivamente.

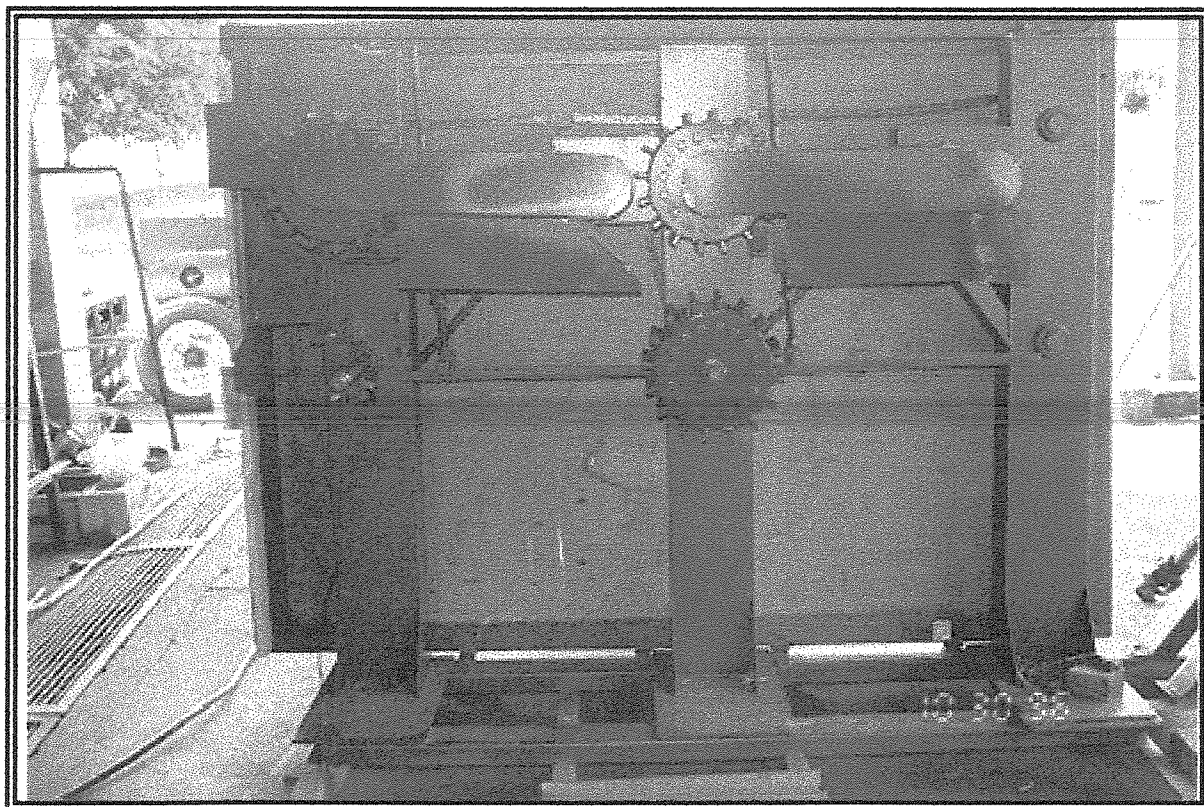


Figura 16 - Disposição dos rolos durante o ensaio para aquisição dos dados de forças.

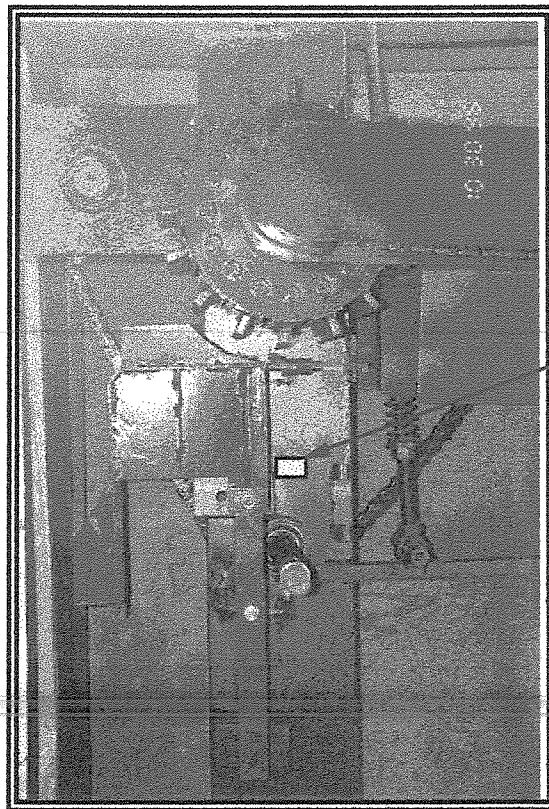


Figura 17 - Montagem do suporte da célula de carga para aquisição de dados das forças verticais.

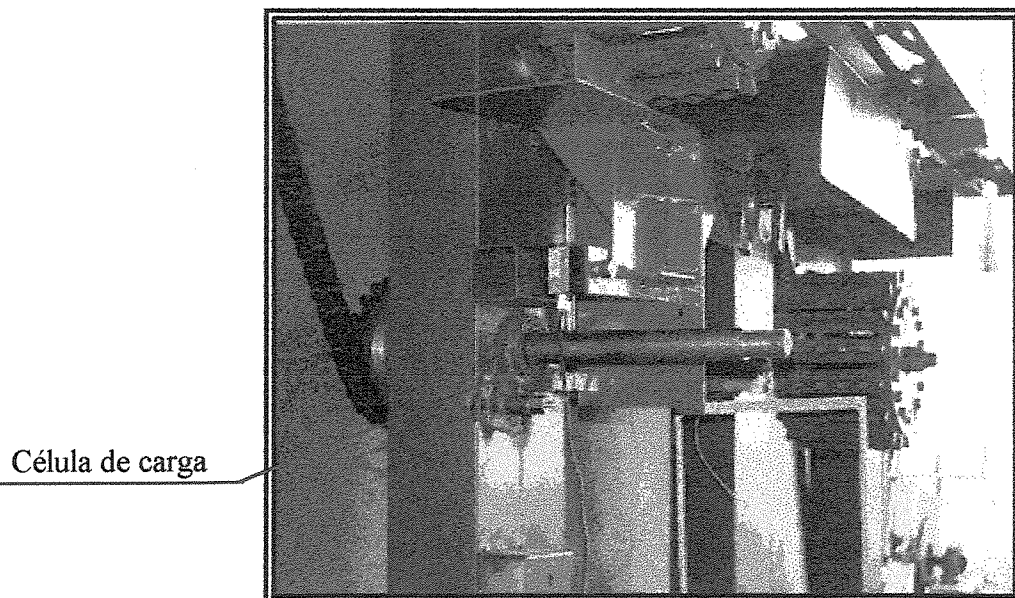


Figura 18 - Montagem do suporte da célula de carga para aquisição de dados das forças horizontais.

4.- MODELAGEM MATEMÁTICA DO FENÔMENO DE GERAÇÃO DA FORÇA VERTICAL ATRAVÉS DO ROLO SUPERIOR OSCILANTE

O sistema de limpeza proposto, cujo estudo analítico é apresentado a seguir, é composto por pares de rolos que giram com velocidades diferentes, de maneira a proporcionar uma força de atrito suficiente para remover as folhas dos colmos da cana-de-açúcar, sem danificá-los superficialmente.

Os rolos superiores possuem um movimento de oscilação, em torno da articulação, por onde passa a corrente de acionamento dos mesmos. Essa oscilação é necessária para que os rolos superiores possam acompanhar o feixe de cana-de-açúcar que penetra no mecanismo, mantendo uma força vertical suficiente para proporcionar o atrito sobre eles.

Como trata-se de um mecanismo com esforços dinâmicos ao longo de seu funcionamento, serão utilizadas as equações de Lagrange para gerar as equações de movimento.

4.1.- Desenvolvimento das Equações de Lagrange

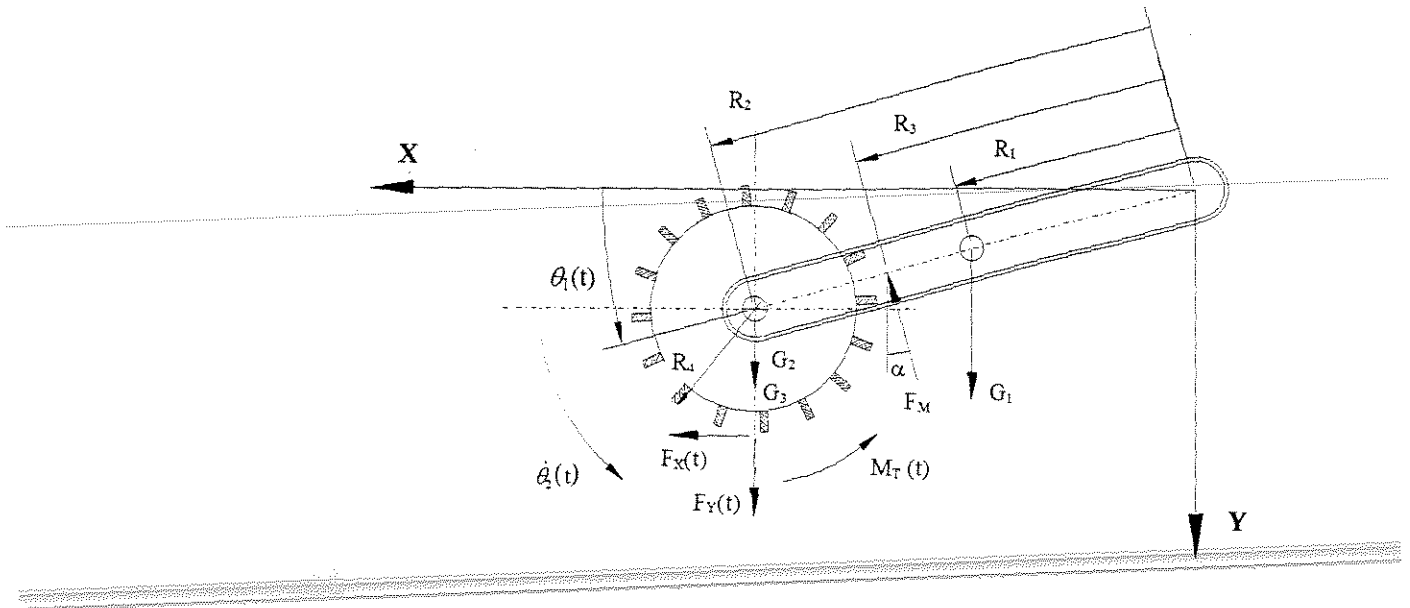


Figura 19 - Modelo geométrico do braço superior oscilante.

O modelo geométrico da máquina é composto por três elementos. O 1º elemento (elemento 1 - braço oscilante) possui massa m_1 e tem o seu centro de gravidade distante de R_1 da origem do sistema inercial de coordenadas X-Y, fixo no centro de rotação do mesmo. O 3º elemento (elemento 3 - mancais de rolamento) possui massa m_3 , e seu centro de gravidade dista de R_2 da origem do sistema inercial de coordenadas X-Y. O 2º elemento (elemento 2 - rolo superior) possui massa m_2 e seu centro de gravidade, coincidente com seu centro de rotação, está distante de R_2 da origem do sistema inercial e possui velocidade angular $\dot{\theta}_2(t)$ em torno de seu centro de rotação. A força resultante do movimento do rolo está aplicada na periferia do mesmo, no ponto de contato com o colmo

da cana-de-açúcar, distante de R_4 do centro do rolo. A força aplicada pela mola helicoidal F_M está aplicada a uma distância R_3 do centro de rotação do braço oscilante.

Conforme Wells (1967), as equações de Lagrange para sistemas parcialmente conservativos e parcialmente não-conservativos são dadas por:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_r} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_r} = F_{q_r} \quad (1)$$

onde a função Lagrangeana L é definida por:

$$L = T - V \quad (2)$$

sendo: T = energia cinética do sistema;

V = energia potencial do sistema;

q_r = coordenada generalizada;

F_{q_r} = força generalizada correspondente à coordenada q_r .

Admite-se que as forças de atrito sejam suficientemente pequenas, para não serem consideradas.

O sistema possui duas coordenadas generalizadas, θ_1 e θ_2 , fazendo com que as equações de Lagrange tomem a forma:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_1} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_1} = F_{\theta_1} \quad (3)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_2} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_2} = F_{\theta_2} \quad (4)$$

As cargas e massas atuantes no sistema são dadas a seguir, com as respectivas coordenadas do ponto de aplicação das mesmas:

- Braço oscilante (elemento 1):

$$G_1 = m_1 \cdot g \quad (5)$$

$$x_1 = R_1 \cdot \cos \theta_1(t)$$

$$y_1 = R_1 \cdot \sin \theta_1(t) \quad (6)$$

- Rolo superior (elemento 2):

$$G_2 = m_2 \cdot g \quad (7)$$

$$x_2 = R_2 \cdot \cos \theta_1(t)$$

$$y_2 = R_2 \cdot \sin \theta_1(t) \quad (8)$$

- Mancal de rolamento (elemento 3):

$$G_3 = m_3 \cdot g \quad (9)$$

$$x_3 = R_2 \cdot \cos \theta_1(t)$$

$$y_3 = R_2 \cdot \sin \theta_1(t) \quad (10)$$

- Mola helicoidal:

$$F_M = k \cdot d_i - k \cdot 2 \cdot R_3 \cdot \sin\left(\frac{\theta_1(t) - \theta_1(0)}{2}\right) \quad (11)$$

k = constante da mola = 10.300 N/m

d_i = deformação inicial da mola helicoidal

$$x_4 = R_3 \cdot \cos \theta_1(t)$$

$$y_4 = R_3 \cdot \sin \theta_1(t) \quad (12)$$

- Força de limpeza: $F(t)$

$$x_5 = R_2 \cdot \cos \theta_1(t)$$

$$y_5 = R_2 \cdot \sin \theta_1(t) + R_4 \quad (13)$$

A energia cinética do sistema é dada por:

$$T = T_1 + T_2 + T_3 \quad (14)$$

sendo: T_1 = energia cinética do braço oscilante (elemento 1)

T_2 = energia cinética do rolo superior (elemento 2)

T_3 = energia cinética do mancal de rolamento (elemento 3)

onde:

$$T_1 = \frac{1}{2} \cdot m_1 \cdot (\dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2) + \frac{I_{p_{CG1}} \cdot \dot{\theta}_1^2(t)}{2} \quad (15)$$

$$T_2 = \frac{1}{2} \cdot m_2 \cdot (\dot{x}_2^2 + \dot{y}_2^2) + \frac{I_{p_{CG2}} \cdot \dot{\theta}_2^2(t)}{2} \quad (16)$$

$$T_3 = \frac{1}{2} \cdot m_3 \cdot (\dot{x}_3^2 + \dot{y}_3^2) + \frac{I_{p_{CG3}} \cdot \dot{\theta}_1^2(t)}{2} \quad (17)$$

sendo: $I_{p_{CG1}}$ = momento polar de inércia do braço oscilante, em relação ao seu centro de massa;

$I_{p_{CG2}}$ = momento polar de inércia do rolo superior, em relação ao seu centro de massa;

$I_{p_{CG3}}$ = momento polar de inércia do mancal de rolamento, em relação ao seu centro de massa.

Das coordenadas dos pontos 1, 2 e 3, temos:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -R_1 \cdot \dot{\theta}_1(t) \cdot \sin\theta_1(t) \\ \dot{y}_1 = R_1 \cdot \dot{\theta}_1(t) \cdot \cos\theta_1(t) \end{cases} \quad (18)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_2 = -R_2 \cdot \dot{\theta}_1(t) \cdot \sin\theta_1(t) \\ \dot{y}_2 = R_2 \cdot \dot{\theta}_1(t) \cdot \cos\theta_1(t) \end{cases} \quad (19)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_3 = -R_2 \cdot \dot{\theta}_1(t) \cdot \sin \theta_1(t) \\ \dot{y}_3 = R_2 \cdot \dot{\theta}_1(t) \cdot \cos \theta_1(t) \end{cases} \quad (20)$$

Portanto, a energia cinética do sistema será:

$$\begin{aligned} T = & \frac{1}{2} \cdot m_1 \cdot R_1^2 \cdot \dot{\theta}_1^2(t) \cdot (\sin^2 \theta_1(t) + \cos^2 \theta_1(t)) + \frac{I_{p_{CG1}} \cdot \dot{\theta}_1^2(t)}{2} + \\ & + \frac{1}{2} \cdot m_2 \cdot R_2^2 \cdot \dot{\theta}_1^2(t) \cdot (\sin^2 \theta_1(t) + \cos^2 \theta_1(t)) + \frac{I_{p_{CG2}} \cdot \dot{\theta}_2^2(t)}{2} + \\ & + \frac{1}{2} \cdot m_3 \cdot R_2^2 \cdot \dot{\theta}_1^2(t) \cdot (\sin^2 \theta_1(t) + \cos^2 \theta_1(t)) + \frac{I_{p_{CG3}} \cdot \dot{\theta}_1^2(t)}{2} \end{aligned} \quad (21)$$

A energia potencial do sistema é dada por:

$$U = U_1 + U_2 + U_3 + U_4 \quad (22)$$

sendo: U_1 = energia potencial do braço oscilante (elemento 1)

U_2 = energia potencial do rolo superior (elemento 2)

U_3 = energia potencial do mancal de rolamento (elemento 3)

U_4 = energia potencial da mola helicoidal

U_5 = energia de limpeza

onde:

$$U_1 = m_1 \cdot g \cdot y_1 \quad (23)$$

$$U_2 = m_2 \cdot g \cdot y_2 \quad (24)$$

$$U_3 = m_3 \cdot g \cdot y_3 \quad (25)$$

$$U_4 = \frac{1}{2} \cdot k \cdot \left[d_i - 2 \cdot R_3 \cdot \sin\left(\frac{\theta_1(t) - \theta_1(0)}{2}\right) \right]^2 \quad (26)$$

$$U_5 = F_x \cdot R_4 \cdot \theta_2(t) \quad (27)$$

Portanto, a energia potencial do sistema será:

$$\begin{aligned}
 U = & m_1 \cdot g \cdot R_1 \cdot \sin \theta_1(t) + m_2 \cdot g \cdot R_2 \cdot \sin \theta_1(t) + \\
 & + m_3 \cdot g \cdot R_2 \cdot \sin \theta_1(t) + \\
 & + \frac{1}{2} \cdot k \cdot \left[di - 2 \cdot R_3 \cdot \sin \left(\frac{\theta_1(t) - \theta_1(0)}{2} \right) \right]^2 + F_X \cdot R_4 \cdot \theta_2(t)
 \end{aligned} \quad (28)$$

Substituindo-se as equações (21) e (28) na equação (2), tem-se a expressão do Lagrangeano:

$$\begin{aligned}
 L = & \frac{1}{2} \cdot m_1 \cdot R_1^2 \cdot \dot{\theta}_1^2(t) \cdot (\sin^2 \theta_1(t) + \cos^2 \theta_1(t)) + \frac{I_{p_{CG1}} \cdot \dot{\theta}_1^2(t)}{2} + \\
 & + \frac{1}{2} \cdot m_2 \cdot R_2^2 \cdot \dot{\theta}_1^2(t) \cdot (\sin^2 \theta_1(t) + \cos^2 \theta_1(t)) + \frac{I_{p_{CG2}} \cdot \dot{\theta}_2^2(t)}{2} + \\
 & + \frac{1}{2} \cdot m_3 \cdot R_2^2 \cdot \dot{\theta}_1^2(t) \cdot (\sin^2 \theta_1(t) + \cos^2 \theta_1(t)) + \frac{I_{p_{CG3}} \cdot \dot{\theta}_1^2(t)}{2} + \\
 & - g \cdot \sin \theta_1(t) \cdot (m_1 \cdot R_1 + m_2 \cdot R_2 + m_3 \cdot R_2) + \\
 & - \frac{1}{2} \cdot k \cdot \left[di - 2 \cdot R_3 \cdot \sin \left(\frac{\theta_1(t) - \theta_1(0)}{2} \right) \right]^2 - F_X \cdot R_4 \cdot \theta_2(t)
 \end{aligned} \quad (29)$$

Tem-se, então:

$$\begin{aligned}
 \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_1} \right) = & m_1 \cdot R_1^2 \cdot \ddot{\theta}_1(t) \cdot (\cos^2 \theta_1(t) + \sin^2 \theta_1(t)) + I_{p_{CG1}} \cdot \ddot{\theta}_1(t) + \\
 & + m_2 \cdot R_2^2 \cdot \ddot{\theta}_1(t) \cdot (\cos^2 \theta_1(t) + \sin^2 \theta_1(t)) + \\
 & + m_3 \cdot R_2^2 \cdot \ddot{\theta}_1(t) \cdot (\cos^2 \theta_1(t) + \sin^2 \theta_1(t)) + I_{p_{CG3}} \cdot \ddot{\theta}_1(t)
 \end{aligned} \quad (30)$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial L}{\partial \theta_1} = & - g \cdot \cos \theta_1(t) \cdot (m_1 \cdot R_1 + m_2 \cdot R_2 + m_3 \cdot R_2) + \\
 & + k \cdot R_3 \cdot \cos \left(\frac{\theta_1(0) - \theta_1(t)}{2} \right) \cdot \left[di - 2 \cdot R_3 \cdot \sin \left(\frac{\theta_1(0) - \theta_1(t)}{2} \right) \right]
 \end{aligned} \quad (31)$$

$$F_{\theta_1} = F_X(t) \cdot \frac{\partial x_s}{\partial \theta_1} + F_Y(t) \cdot \frac{\partial y_s}{\partial \theta_1} + M_T(t) \cdot \frac{\partial \theta_2}{\partial \theta_1} \quad (32)$$

$$F_{\theta_1} = R_2 \cdot F_Y(t) \cdot \cos \theta_1(t) - R_2 \cdot F_X(t) \cdot \sin \theta_1(t) \quad (33)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_2} \right) = I_{p_{CG2}} \cdot \ddot{\theta}_2(t) \quad (34)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \theta_2} = - R_4 \cdot F_X(t) \quad (35)$$

$$F_{\theta_2} = F_X(t) \cdot \frac{\partial x_s}{\partial \theta_2} + F_Y(t) \cdot \frac{\partial y_s}{\partial \theta_2} + M_T(t) \cdot \frac{\partial \theta_2}{\partial \theta_2} \quad (36)$$

$$F_{\theta_2} = M_T(t) \quad (37)$$

Substituindo as equações (30), (31) e (33) na equação (3), e as equações (34), (35) e (37) na equação (4), tem-se:

$$\begin{aligned} & m_1 \cdot R_1^2 \cdot \ddot{\theta}_1(t) \cdot (\cos^2 \theta_1(t) + \sin^2 \theta_1(t)) + I_{p_{CG1}} \cdot \ddot{\theta}_1(t) + \\ & + m_2 \cdot R_2^2 \cdot \ddot{\theta}_1(t) \cdot (\cos^2 \theta_1(t) + \sin^2 \theta_1(t)) + \\ & + m_3 \cdot R_2^2 \cdot \ddot{\theta}_1(t) \cdot (\cos^2 \theta_1(t) + \sin^2 \theta_1(t)) + I_{p_{CG3}} \cdot \ddot{\theta}_1(t) + \\ & + g \cdot \cos \theta_1(t) \cdot (m_1 \cdot R_1 + m_2 \cdot R_2 + m_3 \cdot R_2) + \\ & - k \cdot R_3 \cdot \cos \left(\frac{\theta_1(0) - \theta_1(t)}{2} \right) \cdot \left[di - 2 \cdot R_3 \cdot \sin \left(\frac{\theta_1(0) - \theta_1(t)}{2} \right) \right] = \\ & = R_2 \cdot F_Y(t) \cdot \cos \theta_1(t) - R_2 \cdot F_X(t) \cdot \sin \theta_1(t) \end{aligned} \quad (38)$$

$$I_{p_{CG2}} \cdot \ddot{\theta}_2(t) + R_4 \cdot F_X(t) = M_T(t) \quad (39)$$

$$\text{onde: } F_X(t) = \mu_R \cdot F_Y(t)$$

μ_R = coeficiente de raspagem.

A solução da equação (38) - força vertical gerada pelo rolo oscilante - é dada por:

$$F_Y(t) = \frac{-1}{-R_2 \cdot \cos \theta_1(t) + R_2 \cdot \mu_R \cdot \sin \theta_1(t)} \cdot \left\{ -g \cdot \cos \theta_1(t) \cdot (m_1 \cdot R_1 + m_2 \cdot R_2 + m_3 \cdot R_2) + k \cdot R_3 \cdot \cos \left(\frac{\theta_1(t) - \theta_1(0)}{2} \right) \cdot \left[di - 2 \cdot R_3 \cdot \sin \left(\frac{\theta_1(t) - \theta_1(0)}{2} \right) \right] + \ddot{\theta}_1(t) \cdot (I_{p_{CG1}} + I_{p_{CG3}}) + \ddot{\theta}_1(t) \cdot \left[(\sin^2 \theta_1(t) + \cos^2 \theta_1(t)) \cdot (m_1 \cdot R_1^2 + m_2 \cdot R_2^2 + m_3 \cdot R_2^2) \right] \right\}$$

A solução da equação (39) - momento tissor de entrada no dispositivo - é dada por:

$$M_T(t) = I_{p_{CG2}} \cdot \ddot{\theta}_2(t) - R_4 \cdot \mu_R \cdot F_Y(t)$$

4.2.- Valores Numéricos para as Equações de Lagrange

As determinações dos valores numéricos do dispositivo para limpeza de cana-de-açúcar crua e inteira utilizados durante os ensaios experimentais são dadas no Anexo A.1, e sintetizados abaixo:

- massa do braço oscilante $\Rightarrow m_1 = 16,8532 \text{ kg}$
- massa do rolo superior $\Rightarrow m_2 = 27,5395 \text{ kg}$
- massa do mancal de rolamento $\Rightarrow m_3 = 1,6524 \text{ kg}$
- momento polar de inércia do elemento 1 $\Rightarrow I_{p_{CG1}} = 0,5420 \text{ kg} \times \text{m}^2$
- momento polar de inércia do elemento 2 $\Rightarrow I_{p_{CG2}} = 0,2823 \text{ kg} \times \text{m}^2$
- momento polar de inércia do elemento 3 $\Rightarrow I_{p_{CG3}} = 0,0019 \text{ kg} \times \text{m}^2$
- aceleração da gravidade $\Rightarrow g = 9,81 \text{ m/s}^2$

- distância do CG1 ao seu centro de rotação $\Rightarrow R_1 = 0,275 \text{ m}$
- distância do CG2 ao seu centro de rotação $\Rightarrow R_2 = 0,550 \text{ m}$
- distância da mola à origem do sistema inercial $\Rightarrow R_3 = 0,390 \text{ m}$
- raio do rolo superior oscilante $\Rightarrow R_4 = 0,150 \text{ m}$
- constante da mola helicoidal $\Rightarrow k = 10.300 \text{ N/m}$
- ângulo de inclinação da mola helicoidal $\Rightarrow \alpha = 3,4^\circ = 0,0593 \text{ rad.}$
- posição inicial do rolo superior oscilante $\Rightarrow \theta_1(0) = 0$
- deformação inicial da mola helicoidal $\Rightarrow d_i = 0,040 / 0,035 \text{ m}$

Como a entrada do colmo de cana-de-açúcar no dispositivo forma um degrau na movimentação do rolo superior oscilante, o modelo matemático foi alimentado com uma função “step” para o ângulo $\theta_1(t)$, representativo do perfil do colmo na entrada do dispositivo, dada pela seguinte equação:

$$\theta_1(t) = 4 \cdot \frac{a}{\pi} \cdot \sum_{n=1}^{10} \frac{1}{2 \cdot n - 1} \cdot \text{sen}[(2 \cdot n - 1) \cdot \omega \cdot t] \quad (\text{Beckwith et al, 1982})$$

onde:

a = amplitude da função;

ω = frequência.

5.- ANÁLISE DO ENSAIO PARA AVALIAÇÃO DO DISPOSITIVO LIMPADOR

Com os resultados obtidos nos ensaios, procedeu-se a análise estatística de cada efeito estudado, analisando-se os diferentes tratamentos, as diferentes configurações do limpador e as diferentes pré-cargas aplicadas pelas molas helicoidais, independentemente.

As tabelas de análise de variância (ANOVA) e os testes de Tukey com as respectivas conclusões são apresentados a seguir.

5.1.- Entre Tratamentos

As características dos colmos de cana-de-açúcar em cada um dos nove tratamentos, que são resultados das diferentes combinações entre configurações do dispositivo e pré-cargas aplicadas nas molas, são apresentadas nas Figuras 20 e 21.

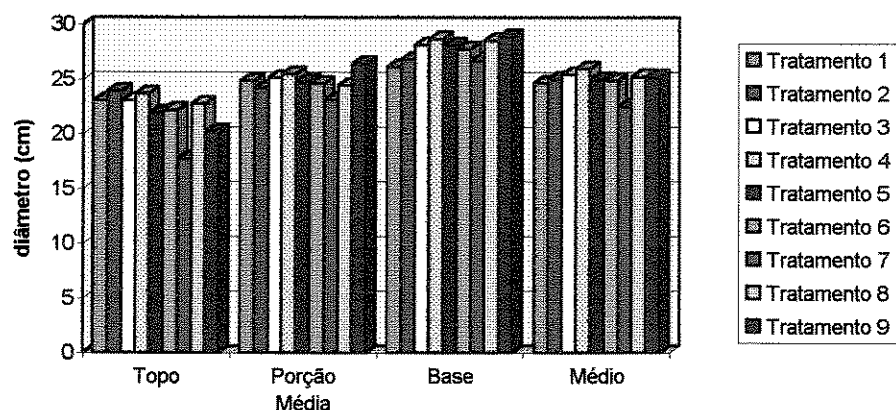


Figura 20 - Diâmetros dos topos, das porções médias, das bases e diâmetros médios dos colmos de cana-de-açúcar em cada tratamento.

Quando analisados os diâmetros dos topos dos colmos, observou-se que não existiram diferenças, ao nível de 5%, entre os tratamentos 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 8, com um diâmetro médio de 22,9 mm, embora os tratamentos 5, 6 e 9 tenham sido estatisticamente iguais, com um diâmetro médio de 21,4 mm. O diâmetro dos topos dos colmos no tratamento 7 foi estatisticamente diferente dos demais, ao nível de 5% (diâmetro médio de 17,8 mm).

Na análise dos diâmetros das porções médias e das bases dos colmos nos tratamentos, notou-se que, dentre os mesmos, os tratamentos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8 e 9 foram estatisticamente iguais, ao nível de 5%, com valores médios de 25,0 e 28,0 mm, respectivamente, embora os tratamentos 1, 2, 3, 5, 6 e 8 tenham sido estatisticamente iguais ao tratamento 7, com diâmetro médio das porções médias de 24,5 mm, e diâmetro médio das bases de 27,5 mm.

O diâmetro médio dos colmos nos tratamentos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8 e 9 foram estatisticamente iguais, ao nível de 5% de significância, e diferentes do tratamento 7 (25,2 e 22,5 mm, respectivamente).

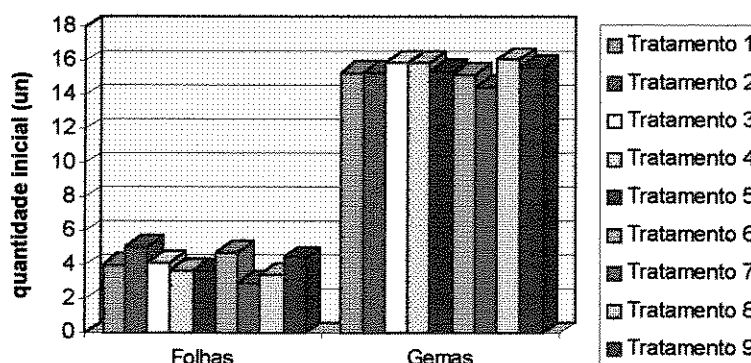


Figura 21 - Quantidade inicial de folhas e gemas nos colmos de cana-de-açúcar em cada tratamento. (un = unidades)

As quantidades iniciais de folhas nos colmos de cana-de-açúcar dos tratamentos 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 9 foram estatisticamente iguais ao nível de 5% (média de 4,3 folhas por colmo), embora essas quantidades iniciais dos tratamentos 1, 3, 4, 5, 7, 8 e 9 também tenham sido estatisticamente iguais, no mesmo nível de significância (média de 3,8 folhas por colmo).

As quantidades iniciais de gemas nos colmos em todos os tratamentos foram estatisticamente iguais, ao nível de 5% de significância, com uma média de 15,5 gemas por colmo.

As Tabelas 10 e 11 apresentam os resultados obtidos nos ensaios de laboratório, de uma forma sintética, para melhor visualização e compreensão das discussões que serão apresentadas a seguir. O Anexo A.2 apresenta os valores obtidos que originaram as referidas tabelas.

Tabela 10 - Quadro sintético dos resultados da análise estatística entre os 9 tratamentos, através do teste ANOVA, apresentados no Anexo A.2.

	Teste	F	F _{crítico}
a.)	Porcentagem de remoção de folhas com 1 passagem	4,7811	1,9740
b.)	Porcentagem de remoção de folhas com 2 passagens	4,8921	1,9740
c.)	Porcentagem de gemas danificadas com 1 passagem	8,1438	1,9740
d.)	Porcentagem de gemas danificadas com 2 passagens	12,2080	1,9740
e.)	Danos mecânicos visíveis nos topos dos colmos após 1 passagem	0,9755	1,9740
f.)	Danos mecânicos visíveis nos topos dos colmos após 2 passagens	0,6772	1,9740
g.)	Danos mecânicos visíveis nas porções médias dos colmos após 1 passagem	3,7999	1,9740
h.)	Danos mecânicos visíveis nas porções médias dos colmos após 2 passagens	8,5732	1,9740
i.)	Danos mecânicos visíveis nas bases dos colmos após 1 passagem	9,7030	1,9740
j.)	Danos mecânicos visíveis nas bases dos colmos após 2 passagens	19,1195	1,9740

Tabela 11 - Quadro sintético dos Testes de Tukey com $\alpha=0,05$, para os 9 tratamentos, apresentados no Anexo A.2.

		Tratamento								
	Teste	1	2	3	4	5	6	7	8	9
a.)	Porcentagem de remoção de folhas com 1 passagem (%)	AB 40,5	B 63,2	B 59,9	B 57,2	B 62,2	B 53,8	A 25,9	AB 50,3	AB 40,6
b.)	Porcentagem de remoção de folhas com 2 passagens (%)	AB 57,7	C 82,5	BC 72,6	BC 77,3	BC 73,8	BC 70,1	A 45,6	ABC 63,5	ABC 60,8
c.)	Porcentagem de gemas danificadas com 1 passagem (%)	ABC 8,4	BCD 13,1	D 15,7	CD 13,9	BCD 11,2	CD1 3,8	A 2,4	ABC 8,2	AB 6,8
d.)	Porcentagem de gemas danificadas com 2 passagens (%)	B 16,7	CDE 26,5	E 29,6	BCD E 22,7	BCD 20,6	DE 27,0	A 6,6	BC 17,6	B 16,1
e.)	Danos mecânicos visíveis nos topos dos colmos após 1 passagem	A 0,0	A 0,0	A 0,0	A 0,0	A 0,2	A 0,1	A 0,0	A 0,0	A 0,0
f.)	Danos mecânicos visíveis nos topos dos colmos após 2 passagens	A 0,2	A 0,0	A 0,2	A 0,0	A 0,4	A 0,2	A 0,0	A 0,2	A 0,3
g.)	Danos mecânicos visíveis nas porções médias dos colmos após 1 passagem	A 0,0	AB 0,5	AB 0,4	A 0,0	A 0,1	AB 0,3	A 0,0	AB 0,5	B 0,9
h.)	Danos mecânicos visíveis nas porções médias dos colmos após 2 passagens	A 0,0	BC 1,2	C 1,6	A 0,0	AB 0,1	ABC 0,9	A 0,0	ABC 1,0	C 2,0
i.)	Danos mecânicos visíveis nas bases dos colmos após 1 passagem	AB 0,2	AB 0,2	ABC 0,4	AB 0,1	D 1,8	BCD 1,0	A 0,0	CD 1,2	BCD 0,9
j.)	Danos mecânicos visíveis nas bases dos colmos após 2 passagens	AB 0,2	ABC 0,9	BCD 1,1	AB 0,2	E 2,5	DE 2,0	A 0,0	E 2,5	CDE 1,7

Observação: os resultados devem ser interpretados apenas nas linhas horizontais, onde tratamentos com a mesma letra significam que não houveram diferenças estatisticamente significativas, ao nível de 5%.

5.1.1.- Porcentagem de remoção de folhas

Para uma passada, apenas, da cana-de-açúcar pelo dispositivo, observou-se que não existiram diferenças significativas, ao nível de 5%, entre os tratamentos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8 e 9, mas o tratamento 7 foi o que apresentou o pior desempenho (25,9%) na remoção de folhas com 1 passagem dos colmos de cana-de-açúcar pelo dispositivo, sendo este estatisticamente diferente dos tratamentos 2, 3, 4, 5 e 6, ao nível de 5% de significância, que apresentaram os melhores percentuais de remoção de folhas na 1ª passagem dos colmos pelo limpador (59,3%).

Com duas passadas dos colmos pelo dispositivo, pode-se confirmar que o tratamento 2 permaneceu com o melhor desempenho na remoção das folhas dos colmos da cana-de-açúcar (82,5%), embora tenha-se apresentado estatisticamente igual aos tratamentos 3, 4, 5, 6, 8 e 9, ao nível de 5%. O tratamento 7 foi o que apresentou o pior desempenho na remoção das folhas (45,6%), embora tenha sido estatisticamente igual aos tratamentos 1, 8 e 9, ao nível de 5%. A Figura 22 ilustra esses resultados.

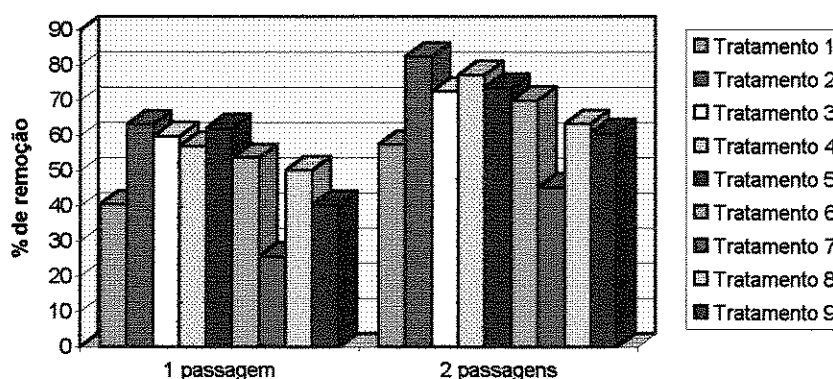


Figura 22 - Porcentagem de remoção das folhas da cana-de-açúcar com 1 e com 2 passagens dos colmos pelo dispositivo.

5.1.2.- Porcentagem de gemas danificadas

Embora tenha sido estatisticamente igual aos tratamentos 2, 4, 5 e 6, ao nível de 5%, o tratamento 3 apresentou a maior porcentagem de gemas visivelmente danificadas (15,7%), com 1 passagem dos colmos pelo dispositivo. O tratamento 7 apresentou o menor índice de danos visíveis nas gemas (2,4%), embora tenha sido estatisticamente igual, ao nível de 5%, aos tratamentos 1, 8 e 9.

Após duas passagens dos colmos pelo dispositivo, observou-se que o tratamento 7 apresentou a menor porcentagem de gemas visivelmente danificadas (6,6%), ao nível de 5%. Embora tenha sido estatisticamente igual aos tratamentos 2, 4 e 6, ao nível de 5% de significância, o tratamento 3 foi o que apresentou a maior porcentagem de gemas visivelmente danificadas (29,6%), após 2 passagens da cana pelo dispositivo. A Figura 23 ilustra esses resultados.

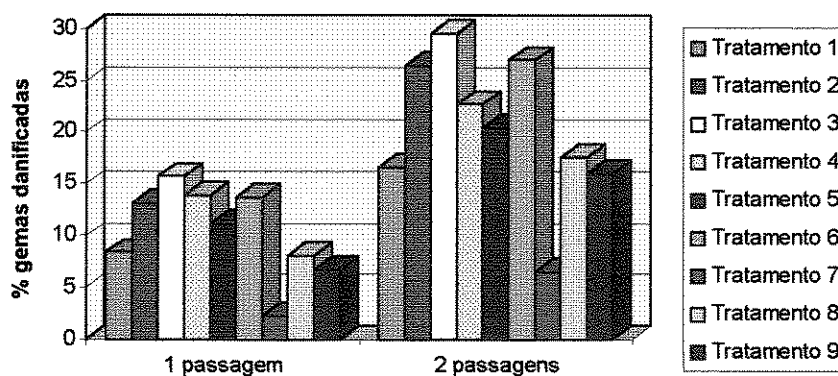


Figura 23 - Porcentagem de gemas visivelmente danificadas com 1 e com 2 passagens dos colmos pelo dispositivo.

5.1.3.- Danos mecânicos visíveis nos colmos

5.1.3.1.- Nos topos

Todos os tratamentos foram estatisticamente iguais, ao nível de 5% de significância, ou seja, não houveram danos mecânicos visíveis nos topos dos colmos de cana após 1 ou 2 passagens dos mesmos pelo dispositivo. A Figura 24 a seguir ilustra esses resultados.

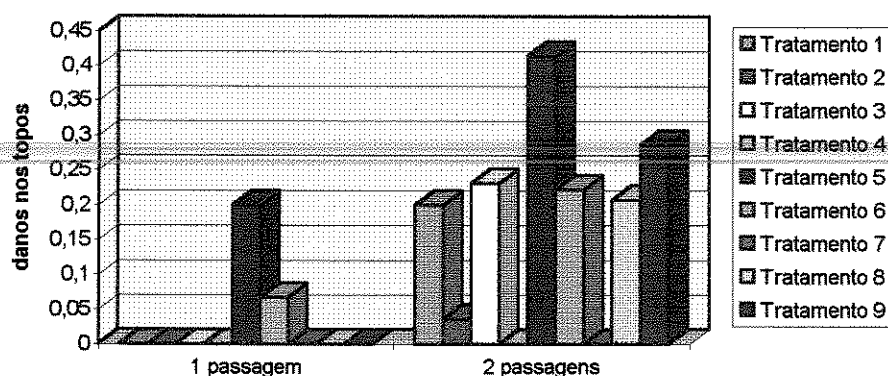


Figura 24 - Danos mecânicos visíveis nos topos dos colmos de cana-de-açúcar com 1 e com 2 passagens pelo dispositivo.

5.1.3.2.- Nas porções médias

Os tratamentos de 1 a 8 não apresentaram diferenças estatísticas ao nível de 5%, e, embora os tratamentos 2, 3, 6, 8 e 9 tenham sido estatisticamente iguais, o tratamento 9 apresentou maiores danos mecânicos visíveis nas porções médias dos colmos, do tipo 1, fissuras com comprimento de 0 a 0,05 m, após 1 passagem dos mesmos pelo dispositivo limpador. Observou-se ainda que, os tratamentos 1, 4 e 7 não apresentaram nenhum tipo de danos mecânicos nas porções médias dos colmos de cana-de-açúcar.

Após 2 passagens dos colmos pelo dispositivo, observou-se que os tratamentos 2, 3, 6, 8, e 9 foram estatisticamente iguais, ao nível de 5%, embora os tratamentos 3 e 9 tenham apresentado danos do tipo 2, fissuras e rupturas com comprimento de 0,05 a 0,10 m nas porções médias dos colmos da cana-de-açúcar. Os tratamentos 1, 4 e 7 não apresentaram nenhum tipo de danos mecânicos visíveis nas porções médias dos colmos após 2 passagens pelo dispositivo limpador, embora não tenham apresentado diferenças estatísticas dos tratamentos 5, 6 e 8. A Figura 25 ilustra esses resultados obtidos.

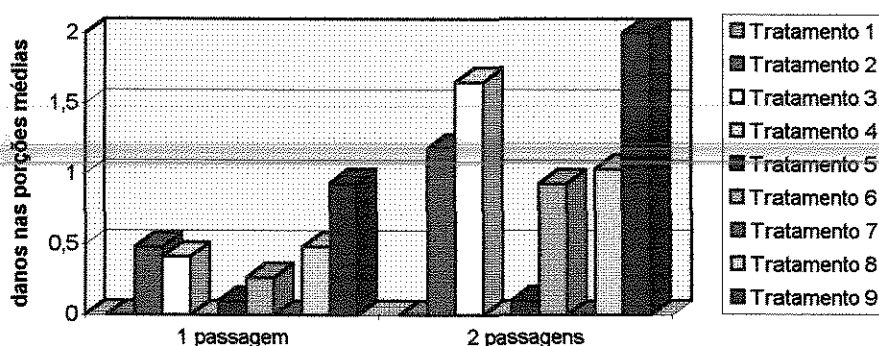


Figura 25 - Danos mecânicos visíveis nas porções médias dos colmos de cana-de-açúcar com 1 e com 2 passagens pelo dispositivo.

5.1.3.3.- Nas bases

Após uma passagem dos colmos pelo dispositivo, o tratamento 5 foi o que apresentou os maiores danos mecânicos nas bases dos colmos de cana-de-açúcar, do tipo esmagamentos com extensão de 0,05 a 0,10 m, embora tenha sido estatisticamente igual aos tratamentos 6, 8 e 9, ao nível de 5% de significância. Os tratamentos 1, 2, 3, 4, e 7 foram estatisticamente iguais, ao nível de 5%. O tratamento 7 não apresentou danos mecânicos

visíveis nas bases dos colmos, após 1 passagem pelo dispositivo. Os tratamentos 1, 2, 3, 4, 6 e 9 também não apresentaram diferenças significativas.

Embora os tratamentos 5, 6, 8 e 9 tenham sido estatisticamente iguais, ao nível de 5%, os tratamentos 5 e 8 apresentaram danos mecânicos nas bases dos colmos após duas passagens dos mesmos pelo limpador, do tipo esmagamentos em trechos de, aproximadamente, 0,10 m de comprimento. O tratamento 7 foi o que menos danificou as bases dos colmos, mesmo sendo estatisticamente igual aos tratamentos 1, 2 e 4, ao nível de 5%. A Figura 26 ilustra esses resultados obtidos durante os ensaios.

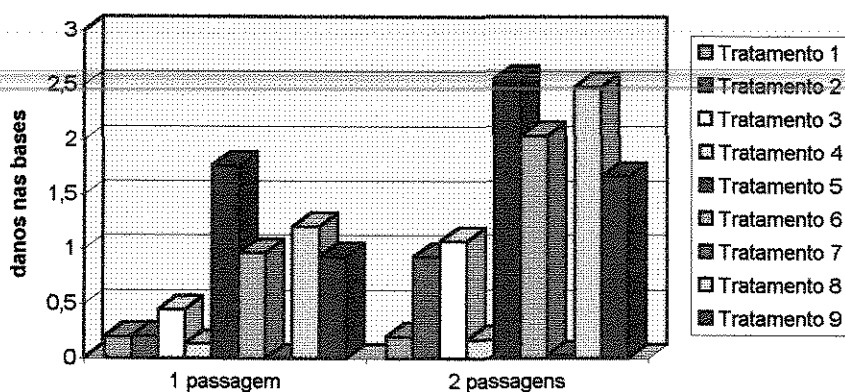


Figura 26 - Danos mecânicos visíveis nas bases dos colmos de cana-de-açúcar com 1 e com 2 passagens pelo dispositivo.

5.2.- Entre Configurações

Na realização dos ensaios, foram testadas três configurações diferentes do dispositivo limpador, cada uma delas com um determinado DVTR, conforme mostrado na Tabela 3 do item 3.2.2, denominadas Configuração I (DVTR=43%, DVTPRS=29%),

Configuração II (DVTR=29%, DVTPRS=19%) e Configuração III (DVTR=0,0%, DVTPRS=19%).

As características iniciais dos colmos de cana-de-açúcar são apresentadas nas Figuras 27 e 28, a seguir.

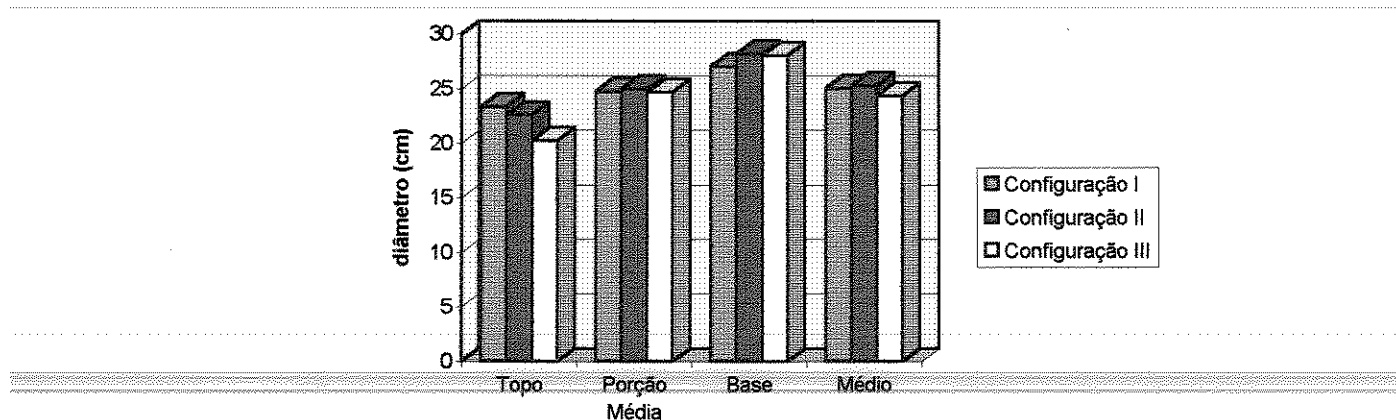


Figura 27 - Diâmetros dos topos, das porções médias, das bases e diâmetros médios dos colmos de cana-de-açúcar em cada configuração do dispositivo.

Os diâmetros dos topos dos colmos nas configurações I e II (23,0 mm) são estatisticamente iguais, ao nível de 5%, enquanto que na configuração III, esse diâmetro apresentou-se menor que os demais (20,2 mm).

Analisando-se os diâmetros das porções médias dos colmos nas três configurações, observou-se que os mesmos são estatisticamente iguais, ao nível de 5%, com um valor médio de 24,8 mm.

Embora tenham sido estatisticamente iguais aos diâmetros das bases dos colmos na configuração III, esses diâmetros na configuração I foram menores (27,0 mm), ao nível de 5%. Nas configurações II e III, observou-se que os diâmetros das bases dos colmos foram estatisticamente iguais (27,0 mm).

Os diâmetros médios dos colmos de cana-de-açúcar nas configurações I e II foram estatisticamente iguais, ao nível de 5%, com um valor médio de 25,1 mm, embora nas configurações I e III esses diâmetros também tenham sido iguais, ao nível de 5% de significância (25,7 mm).

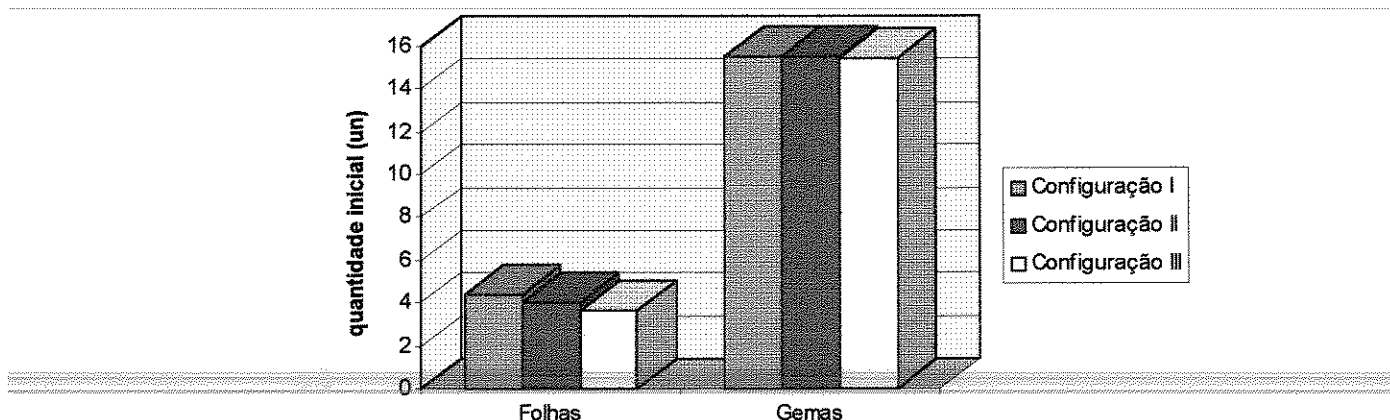


Figura 28 - Quantidade inicial de folhas e gemas nos colmos de cana-de-açúcar em cada configuração do dispositivo.

Embora tenha sido estatisticamente igual à configuração II, a quantidade de folhas inicial na configuração III foi a menor (3,6 folhas por colmo). Na configuração I, a quantidade inicial de folhas nos colmos da cana-de-açúcar foi de 4,4 folhas, sendo estatisticamente igual à configuração II (4,0 folhas por colmo), ao nível de 5%.

As Tabelas 12 e 13 apresentam os resultados obtidos nos ensaios, de uma forma sintética, para melhor visualização e compreensão das discussões que serão apresentadas a seguir. O Anexo A.3 apresenta os valores obtidos que deram origem às referidas tabelas.

Tabela 12 - Quadro sintético dos resultados da análise estatística entre as 3 configurações, através do teste ANOVA, apresentados no Anexo A.3.

	Teste	F	F _{crítico}
a.)	Porcentagem de remoção de folhas com 1 passagem	8,8808	3,0296
b.)	Porcentagem de remoção de folhas com 2 passagens	9,1125	3,0296
c.)	Porcentagem de gemas danificadas com 1 passagem	20,0905	3,0296
d.)	Porcentagem de gemas danificadas com 2 passagens	23,1439	3,0296
e.)	Danos mecânicos visíveis nos topos dos colmos após 1 passagem	1,6973	3,0296
f.)	Danos mecânicos visíveis nos topos dos colmos após 2 passagens	0,0955	3,0296
g.)	Danos mecânicos visíveis nas porções médias dos colmos após 1 passagem	3,3079	3,0296
h.)	Danos mecânicos visíveis nas porções médias dos colmos após 2 passagens	4,8818	3,0296
i.)	Danos mecânicos visíveis nas bases dos colmos após 1 passagem	7,8153	3,0296
j.)	Danos mecânicos visíveis nas bases dos colmos após 2 passagens	7,9745	3,0296

Tabela 13 - Quadro sintético dos Testes de Tukey com $\alpha=0,05$, para as 3 configurações, apresentados no Anexo A.3.

	Teste	Conf. I	Conf. II	Conf. III
a.)	Porcentagem de remoção de folhas com 1 passagem (%)	B 54,5	B 57,7	A 38,9
b.)	Porcentagem de remoção de folhas com 2 passagens (%)	B 70,9	B 73,7	A 56,6
c.)	Porcentagem de gemas danificadas com 1 passagem (%)	B 12,4	B 13,0	A 5,8
d.)	Porcentagem de gemas danificadas com 2 passagens (%)	B 24,3	B 23,4	A 13,4
e.)	Danos mecânicos visíveis nos topos dos colmos após 1 passagem	A 0,0	A 0,1	A 0,0
f.)	Danos mecânicos visíveis nos topos dos colmos após 2 passagens	A 0,1	A 0,2	A 0,2
g.)	Danos mecânicos visíveis nas porções médias dos colmos após 1 passagem	AB 0,3	A 0,1	B 0,5
h.)	Danos mecânicos visíveis nas porções médias dos colmos após 2 passagens	B 0,9	A 0,3	B 1,0
i.)	Danos mecânicos visíveis nas bases dos colmos após 1 passagem	A 0,3	B 0,9	B 0,7
j.)	Danos mecânicos visíveis nas bases dos colmos após 2 passagens	A 0,7	B 1,6	B 1,4

Observação: os resultados devem ser interpretados apenas nas linhas horizontais, onde configurações com a mesma letra significam que não houveram diferenças estatisticamente significativas, ao nível de 5%.

5.2.1.- Porcentagem de remoção de folhas

Após 1 passagem dos colmos de cana-de-açúcar pelo dispositivo limpador, as configurações I e II apresentaram os maiores índices de remoção de folhas (56,1% de eficiência), e não diferem entre si ao nível de significância de 5%. A configuração III, com 38,9% de eficiência de remoção das folhas, foi a que apresentou o pior resultado.

A configuração III mostrou-se como a configuração menos eficiente, com 56,6% de remoção de folhas dos colmos, após 2 passagens dos mesmos pelo dispositivo. As configurações I e II foram estatisticamente iguais ao nível de 5%, e apresentaram os melhores resultados de remoção de folhas durante os ensaios, com uma eficiência média de 72,3%. A Figura 29 ilustra esses resultados.

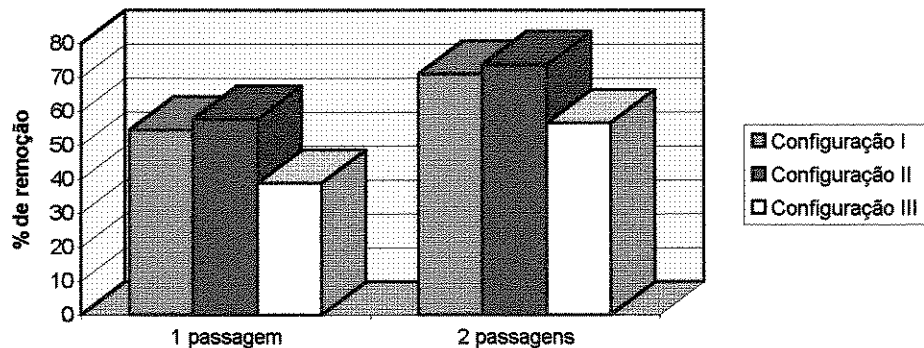


Figura 29 - Porcentagem de remoção das folhas da cana-de-açúcar com 1 e com 2 passagens dos colmos pelo dispositivo.

5.2.2.- Porcentagem de gemas danificadas

As configurações I e II foram estatisticamente iguais, ao nível de 5%, e apresentaram a maior porcentagem de gemas visivelmente danificadas após 1 passagem dos

colmos de cana-de-açúcar pelo limpador (12,7%). A configuração III foi a que menos danificou as gemas (5,8%).

Após 2 passagens dos colmos pelo dispositivo limpador, confirmou-se que as configurações I e II apresentaram a maior quantidade de gemas visivelmente danificadas e foram estatisticamente iguais, ao nível de 5%, com 23,8% de gemas danificadas. A configuração III apresentou a menor quantidade de gemas visivelmente danificadas (13,4%) após as 2 passagens dos colmos pelo dispositivo. A Figura 30 ilustra esses resultados experimentais.

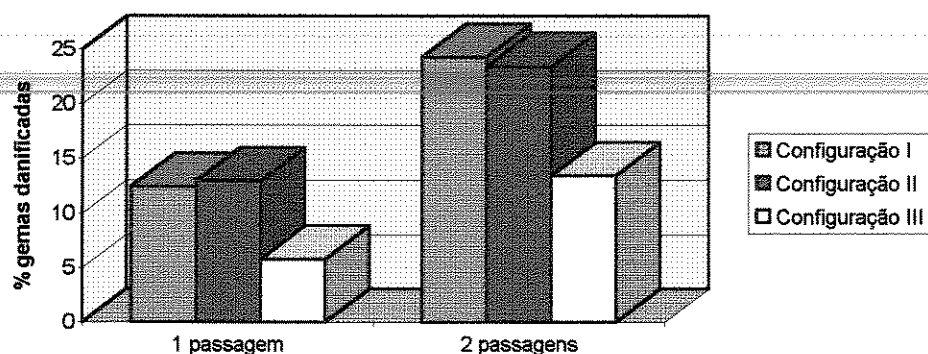


Figura 30 - Porcentagem de gemas visivelmente danificadas com 1 e com 2 passagens dos colmos pelo dispositivo.

5.2.3.- Danos mecânicos visíveis nos colmos

5.2.3.1.- Nos topos

Após 1 e 2 passagens dos colmos de cana-de-açúcar pelo dispositivo, observou-se que as três configurações ensaiadas foram estatisticamente iguais, ao nível de

5%, no que se refere aos danos mecânicos visíveis observados nos topos dos colmos, ou seja, não apresentaram danos mecânicos visíveis. A Figura 31 ilustra os resultados obtidos.

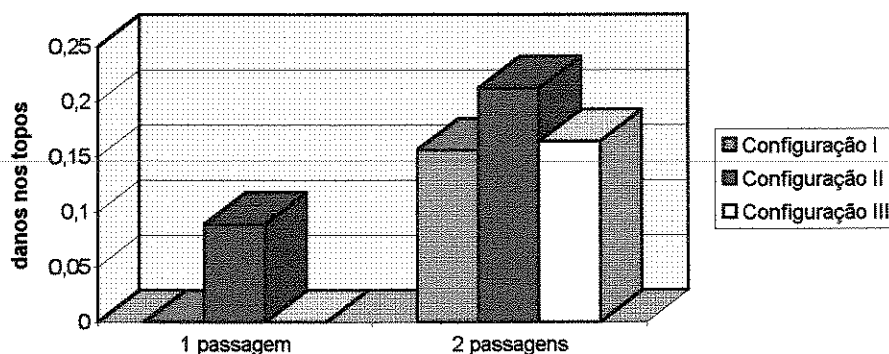


Figura 31 - Danos mecânicos visíveis nos topos dos colmos de cana-de-açúcar com 1 e com 2 passagens pelo dispositivo.

5.2.3.2.- Nas porções médias

Ao nível de 5%, pode-se afirmar que a configuração III apresentou mais danos mecânicos nas porções médias dos colmos, do tipo esmagamentos com extensão de 0 a 0,05 m, após 1 passagem dos mesmos pelo limpador. A configuração II foi a que menos danificou a região mediana dos colmos de cana-de-açúcar.

Após 2 passagens dos colmos pelo limpador, observou-se que as configurações I e III foram estatisticamente iguais, ao nível de 5%, e apresentaram danos mecânicos visíveis nas porções médias dos colmos, do tipo esmagamentos e fissuras com extensão de 0,05 a 0,10 m. A configuração II foi a que menos danificou essa região dos colmos, após a 2ª passagem dos mesmos pelo limpador. A Figura 32 ilustra esses resultados.

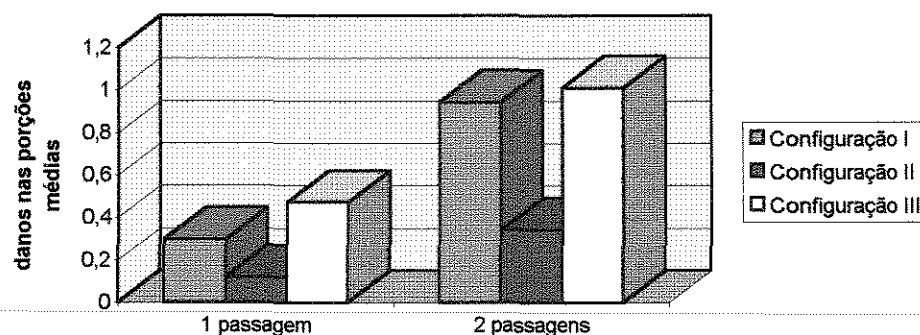


Figura 32 - Danos mecânico visíveis nas porções médias dos colmos de cana-de-açúcar com 1 e com 2 passagens pelo dispositivo.

5.2.3.3.- Nas bases

Os danos mecânicos nas bases dos colmos apresentados pelas configurações

II e III foram estatisticamente iguais, ao nível de 5%, e do tipo fissuras ou esmagamentos com extensão de 0 a 0,05 m, após 1 passagem dos mesmos pelo limpador. A configuração I danificou menos a base dos colmos durante os ensaios realizados.

Pode-se afirmar, ao nível de 5%, que as configurações II e III foram estatisticamente iguais, e produziram os maiores danos mecânicos visíveis nas bases dos colmos após 2 passagens dos mesmos pelo limpador; esses danos observados foram do tipo esmagamento ou fissura com comprimento da ordem de 0,05 m. A configuração I foi a que menos danificou a base dos colmos. A Figura 33 ilustra esses resultados experimentais obtidos.

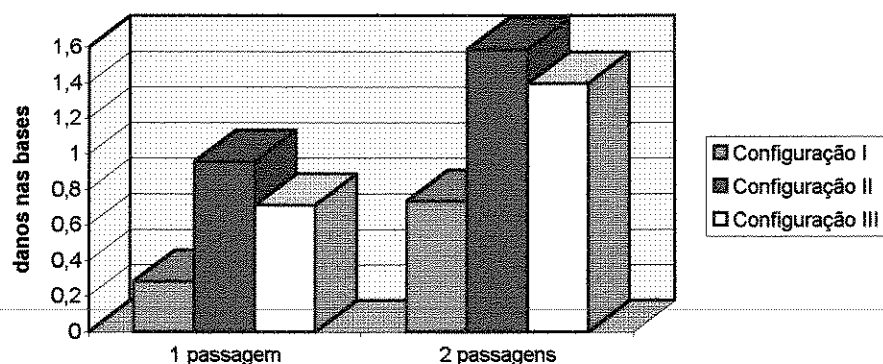


Figura 33 - Danos mecânicos visíveis nas bases dos colmos de cana-de-açúcar com 1 e com 2 passagens pelo dispositivo.

5.3. - Entre Cargas

Durante os ensaios, foram ensaiadas três condições de pré-cargas nas molas helicoidais, conforme mostrado na Tabela 4 do item 3.2.2, denominadas Carga 1 (PCMS=0, PCMI=412,0 N), Carga 2 (PCMS=0, PCMI=360,5 N) e Carga 3 (PCMS=103,0 N, PCMI=412,0 N).

As características iniciais da cana-de-açúcar em cada condição de pré-carga são apresentadas nos gráficos das Figuras 34 e 35, a seguir.

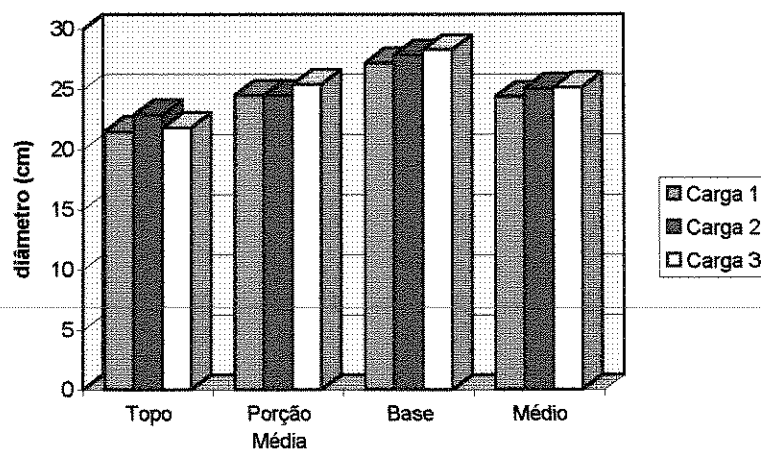


Figura 34 - Diâmetros dos topos, das porções médias, das bases e diâmetros médios dos colmos de cana-de-açúcar em cada condição de carga.

Estatisticamente, os diâmetros dos topos dos colmos nas cargas 1 e 3 foram iguais, ao nível de 5% (21,7 mm), enquanto que na carga 2, a média desses diâmetros foi maior (22,9 mm), embora tenha sido estatisticamente igual à carga 3.

A análise estatística dos diâmetros das porções médias, das bases e diâmetro médio dos colmos de cana-de-açúcar mostra que não existiram diferenças significativas, ao nível de 5%, entre as três pré-cargas aplicadas nas molas helicoidais, com valores médios de 24,8 mm, 27,8 mm e 24,9 mm, respectivamente.

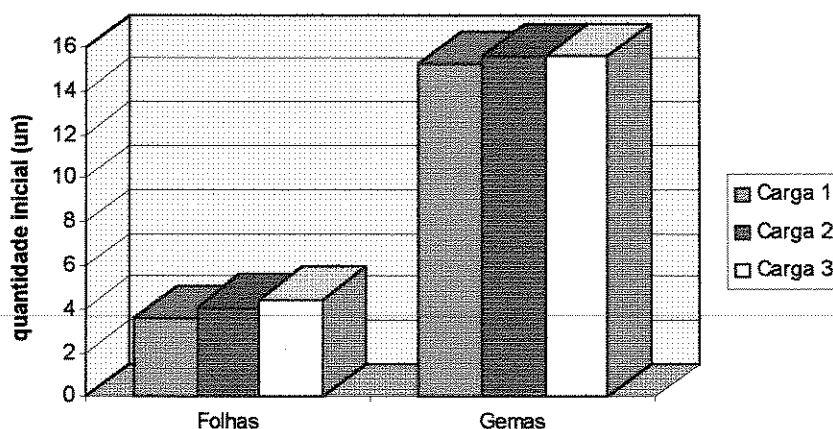


Figura 35 - Quantidade inicial de folhas e gemas nos colmos de cana-de-açúcar em cada condição de carga.

A quantidade de folhas inicial para as cargas 2 e 3 foram estatisticamente iguais, ao nível de 5%, embora não tenha ocorrido diferença significativa entre as quantidades para as cargas 1 e 2 (3,6 e 4,1 folhas/colmo, respectivamente).

Não ocorreram diferenças significativas, ao nível de 5%, entre as quantidades de gemas iniciais para cada um das pré-cargas aplicadas nas molas helicoidais (15,5 gemas por colmo).

As Tabelas 14 e 15 apresentam os resultados obtidos, de uma forma sintética, para melhor compreensão e visualização das discussões a seguir apresentadas. O Anexo A.4 apresenta os valores que deram origem às referidas tabelas.

Tabela 14 - Quadro sintético dos resultados da análise estatística entre as 3 cargas, através do teste ANOVA, apresentados no Anexo A.4.

	Teste	F	F _{crítico}
a.)	Porcentagem de remoção de folhas com 1 passagem	6,5833	3,0296
b.)	Porcentagem de remoção de folhas com 2 passagens	4,5143	3,0296
c.)	Porcentagem de gemas danificadas com 1 passagem	4,4180	3,0296
d.)	Porcentagem de gemas danificadas com 2 passagens	12,3696	3,0296
e.)	Danos mecânicos visíveis nos topos dos colmos após 1 passagem	0,7373	3,0296
f.)	Danos mecânicos visíveis nos topos dos colmos após 2 passagens	0,9797	3,0296
g.)	Danos mecânicos visíveis nas porções médias dos colmos após 1 passagem	8,3905	3,0296
h.)	Danos mecânicos visíveis nas porções médias dos colmos após 2 passagens	24,0027	3,0296
i.)	Danos mecânicos visíveis nas bases dos colmos após 1 passagem	17,2226	3,0296
j.)	Danos mecânicos visíveis nas bases dos colmos após 2 passagens	48,7662	3,0296

Tabela 15 - Quadro sintético dos Testes de Tukey com $\alpha=0,05$, para as 3 cargas, apresentados no Anexo A.4.

	Teste	Carga 1	Carga 2	Carga 3
a.)	Porcentagem de remoção de folhas com 1 passagem	A 41,2%	B 58,6%	AB 51,4%
b.)	Porcentagem de remoção de folhas com 2 passagens	A 60,2%	B 73,2%	AB 67,8%
c.)	Porcentagem de gemas danificadas com 1 passagem	A 8,2%	AB 10,8%	B 12,1%
d.)	Porcentagem de gemas danificadas com 2 passagens	A 15,3%	B 21,6%	B 24,2%
e.)	Danos mecânicos visíveis no topo do colmo após 1 passagem	A 0,0	A 0,1	A 0,0
f.)	Danos mecânicos visíveis no topo do colmo após 2 passagens	A 0,1	A 0,2	A 0,2
g.)	Danos mecânicos visíveis na porção média do colmo após 1 passagem	A 0,0	B 0,3	B 0,5
h.)	Danos mecânicos visíveis na porção média do colmo após 2 passagens	A 0,0	B 0,8	C 1,5
i.)	Danos mecânicos visíveis na base do colmo após 1 passagem	A 0,1	B 1,1	B 0,8
j.)	Danos mecânicos visíveis na base do colmo após 2 passagens	A 0,1	B 2,0	B 1,6

Observação: os resultados devem ser interpretados apenas nas linhas horizontais, onde cargas com a mesma letra significam que não houveram diferenças estatisticamente significativas, ao nível de 5%.

5.3.1.- Porcentagem de remoção de folhas

A condição de carga 2 foi a mais eficiente em termos de remoção de folhas dos colmos após 1 passagem dos mesmos pelo limpador (58,6%), ao nível de 5%, e foi estatisticamente igual à condição de carga 3. A condição de carga 1 foi a que apresentou o menor índice de remoção de folhas (41,2%).

Embora as condições de carga 2 e 3 tenham sido estatisticamente iguais, ao nível de 5%, a condição de carga 2 apresentou o melhor resultado de remoção de folhas dos colmos de cana (73,2%), após 2 passagens pelo limpador. A condição de carga 1 foi a que apresentou o menor índice de remoção de folhas (60,2%), após 2 passagens dos colmos. A

Figura 36 ilustra esses resultados.

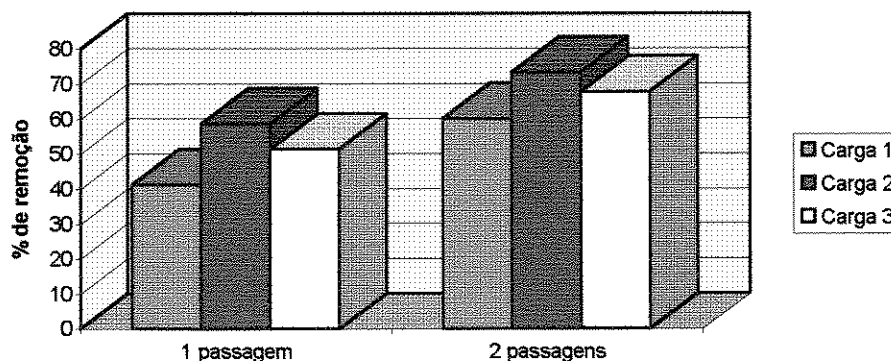


Figura 36 - Porcentagem de remoção das folhas da cana-de-açúcar com 1 e com 2 passagens dos colmos pelo dispositivo.

5.3.2.- Porcentagem de gemas danificadas

Embora as condições de carga 2 e 3 tenham sido estatisticamente iguais, ao nível de 5%, a condição de carga 3 apresentou o maior índice de danos visíveis nas gemas da cana-de-açúcar (12,1%), após 1 passagem pelo dispositivo limpador. A condição de carga 1 foi a que menos danificou as gemas (8,2%).

Após 2 passagens dos colmos pelo limpador, as condições de carga 2 e 3 apresentaram a maior quantidade de gemas danificadas, e foram estatisticamente iguais, ao nível de 5% de significância, com 22,9% de gemas danificadas. A condição de carga 1 foi a que apresentou o menor índice de gemas danificadas (15,3%), ao final dos ensaios realizados. A Figura 37 ilustra esses resultados.

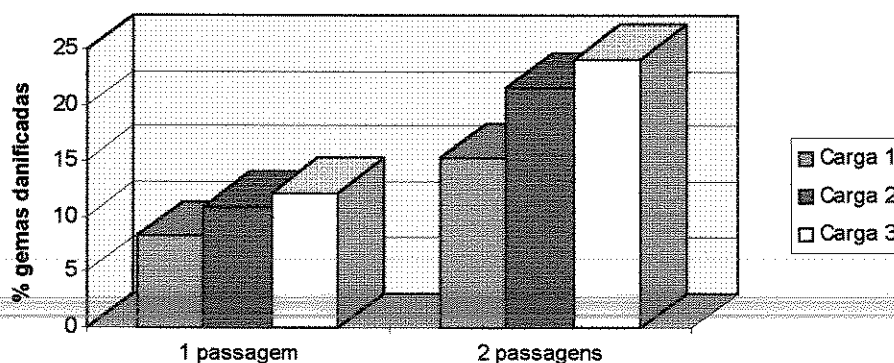


Figura 37 - Porcentagem de gemas visivelmente danificadas com 1 e com 2 passagens dos colmos pelo dispositivo.

5.3.3.- Danos mecânicos visíveis nos colmos

5.3.3.1.- Nos topos

Após 1 passagem e após 2 passagens dos colmos pelo limpador, observou-se que as condições de carga 1, 2 e 3 foram estatisticamente iguais, ao nível de 5%, ou seja, não apresentaram danos mecânicos visíveis nos topos dos mesmos, conforme mostrado na Figura 38.

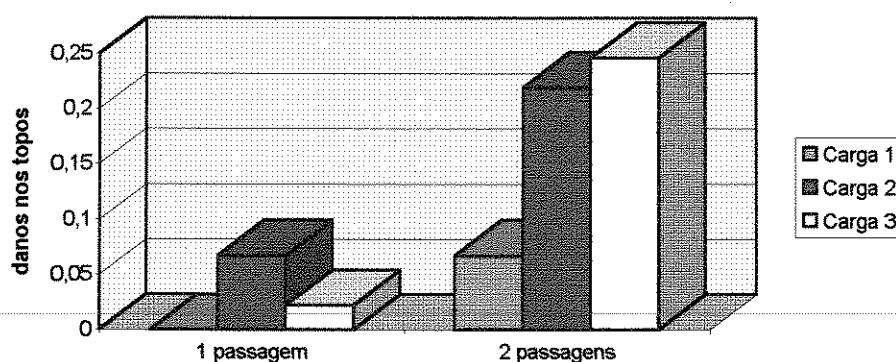


Figura 38 - Danos mecânicos visíveis nos topos dos colmos de cana-de-açúcar com 1 e com 2 passagens pelo dispositivo.

5.3.3.2.- Nas porções médias

Os danos mecânicos visíveis causados na porção média dos colmos pelas condições de carga 2 e 3 foram estatisticamente iguais, ao nível de 5% de significância, do tipo fissuras com extensão até 0,05 m, após 1 passagem pelo dispositivo limpador, enquanto que a condição de carga 1 não apresentou nenhum tipo de dano mecânico nessa região dos colmos.

Após 2 passagens pelo dispositivo limpador, a condição de carga 1 não apresentou danos mecânicos visíveis nas porções médias dos colmos. A condição de carga 2 apresentou danos do tipo fissuras ou esmagamentos com comprimento de 0 a 0,05 m, e a condição de carga 3 apresentou danos mecânicos visíveis nas porções médias dos colmos com extensão de 0,05 a 0,10 m. As três condições de carga foram estatisticamente diferentes, ao nível de 5% de significância, conforme mostrado na Figura 39.

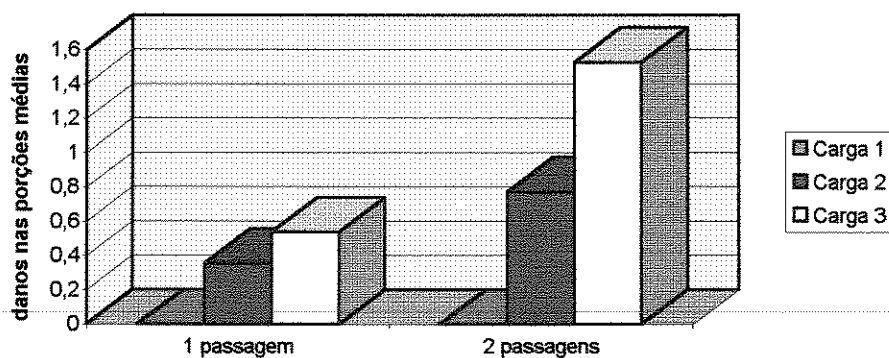


Figura 39 - Danos mecânicos visíveis nas porções médias dos colmos de cana-de-açúcar com 1 e com 2 passagens pelo dispositivo.

5.3.3.3.- Nas bases

As condições de carga 2 e 3 foram estatisticamente iguais, ao nível de 5%, e causaram danos mecânicos nas bases dos colmos do tipo fissuras ou esmagamentos de comprimento de 0 a 0,05 m, após 1 passagem dos mesmos pelo limpador. A condição de carga 1 foi a que menos danificou as bases dos colmos após essa 1ª passagem.

Após 2 passagens dos colmos pelo dispositivo, confirmou-se que as condições de carga 2 e 3 foram estatisticamente iguais, ao nível de 5% de significância, e causaram os maiores danos mecânicos visíveis nas bases. Esses danos foram do tipo fissuras ou esmagamentos com extensão de 0,05 a 0,10 m. A condição de carga 1 permaneceu como a condição que menos danificou a base dos colmos, conforme mostrado na Figura 40.

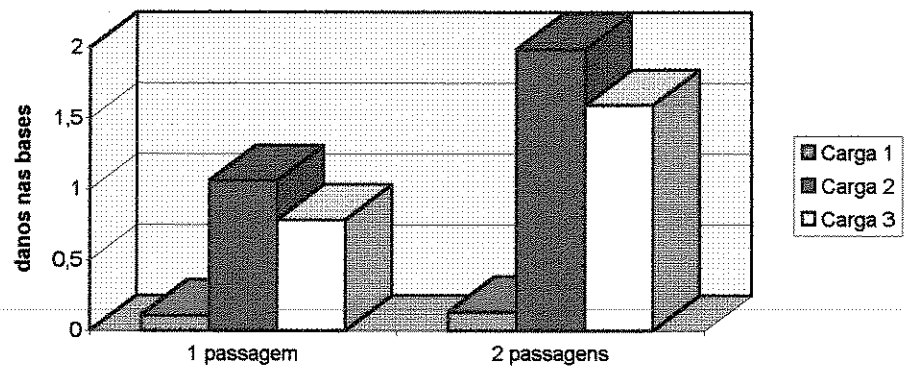


Figura 40 - Danos mecânicos visíveis nas bases dos colmos de cana-de-açúcar com 1 e com 2 passagens pelo dispositivo.

6.- RESULTADOS E DISCUSSÕES DA ANÁLISE ESTATÍSTICA

A porcentagem de remoção de folhas entre os vários tratamentos variou de 45,6 % a 82,5 %, enquanto que a porcentagem de gemas visivelmente danificadas variou de 6,6 % a 29,6%.

Pelos resultados apresentados, observou-se que o tratamento 2, com a configuração I e condição de carga 2 na mola, foi o que apresentou os melhores resultados em termos de porcentagem de remoção de folhas (82,5% de eficiência), mas apresentou um alto índice de danos mecânicos nas gemas (26,5%), o que inviabiliza este tratamento na colheita de cana semente. Os danos mecânicos observados nesse tratamento não foram os mais elevados, com danos leves, do tipo fissuras de 0,05 a 0,10 m de comprimento, nas porções médias e nas bases dos colmos.

A justificativa física desses melhores resultados de remoção de folhas no tratamento 2, deve-se ao fato de que, com a configuração I do dispositivo, ou seja, com maiores diferenciais de velocidades tangenciais tanto entre rolos superiores e inferiores quanto entre pares de rolos adjacentes, permite-se um maior contato superficial entre as taliscas e os colmos, com maiores forças de atrito entre essas superfícies, promovendo-se uma melhor eficiência de remoção de folhas. Aliado a esse fator, a menor pré-carga aplicada na mola helicoidal também permitiu um maior contato entre essas superfícies, melhorando a eficiência de remoção de folhas nesse tratamento. O alto índice de danos mecânicos nas gemas é consequência dessas maiores forças de atrito nas superfícies dos colmos, que promovem tanto a remoção de folhas quanto a remoção/danificação de gemas.

O tratamento 7, com a configuração III e condição de carga 1 na mola, foi o que apresentou os piores resultados na eficiência de remoção de folhas dos colmos (45,6%), embora seja o tratamento em que observou-se a menor quantidade de gemas visivelmente danificadas (6,6%) e, praticamente, não apresentou danos mecânicos ao longo dos colmos, embora tenha apresentado um diâmetro médio inferior aos demais tratamentos (22,5 mm).

Esses piores resultados de remoção de folhas do tratamento 7 deveu-se ao fato de que, a configuração III do dispositivo não permitiu cargas axiais entre rolos superiores e inferiores (diferencial de velocidades tangenciais nulo), diminuindo-se dessa forma, o atrito entre as superfícies das taliscas e dos colmos. Nessa configuração, o único fator que promoveu a presença de forças axiais foi o diferencial de velocidades entre pares de rolos adjacentes, que observou-se não ser muito eficiente como efeito isolado no processo de remoção de folhas dos colmos. A condição de carga 1 na mola helicoidal, ou seja, maior pré-carga aplicada na mola, originando menor carga na superfície dos colmos, também contribuiu nessa menor eficiência de remoção de folhas. A menor quantidade de gemas visivelmente danificadas foi consequência dessas menores forças axiais nas superfícies dos colmos.

Os resultados mostraram que as configurações I e II, ou seja, a presença de diferenciais de velocidades tanto entre rolos superiores e inferiores quanto entre pares de rolos adjacentes, foram praticamente iguais e mais eficientes, em termos de remoção de folhas dos colmos (72,3% de eficiência), embora essas configurações tenham apresentado uma maior quantidade de gemas danificadas (23,8%), inviabilizando a sua utilização em sistemas de colheita de cana semente. Os danos mecânicos causados por essas configurações

não foram muito significativos, com fissuras e trincas com comprimento médio de 0,05 a 0,10 m, nas porções médias e nas bases dos colmos.

Na análise das cargas aplicadas nas molas helicoidais, observou-se que a condição de carga 2 foi a mais eficiente em termos de remoção de folhas dos colmos (73,2%), embora tenha apresentado uma quantidade de gemas danificadas significativa (21,6%). Essa maior eficiência de remoção deve-se ao fato de que a menor pré-carga aplicada nas molas permitiu um maior contato entre as superfícies das taliscas e dos colmos, com maiores forças axiais nessas superfícies. Os danos mecânicos observados nas porções médias dos colmos causados por essa condição de carga 2, foram menores que os ocorridos devido a condição de carga 3, ou seja, com a menor pré-carga aplicada nas molas inferiores e com a presença das molas superiores. Nas porções médias dos colmos, a condição de carga 2 apresentou fissuras ou trincas com 0,05 a 0,10 m de extensão, enquanto que a condição de carga 3, apresentou fissuras ou trincas com 0,10 a 0,20 m de extensão. Nas bases dos colmos, ambas condições de carga apresentaram fissuras ou trincas com comprimento de 0,10 a 0,20 m, sem apresentar perdas na qualidade da matéria-prima.

As Figuras 41, 42 e 43 mostram lotes de colmos de cana-de-açúcar, antes e após a passagem dos mesmos pelo dispositivo limpador. Note-se que, após a passagem pelo dispositivo, alguns colmos apresentaram rupturas nas porções médias, típicas de esforços de tração, devido ao diferencial de velocidades entre pares de rolos adjacentes, conforme pode-se observar na Figura 44, onde a ruptura do colmo não apresenta trincas longitudinais provenientes de esforços de flexão.

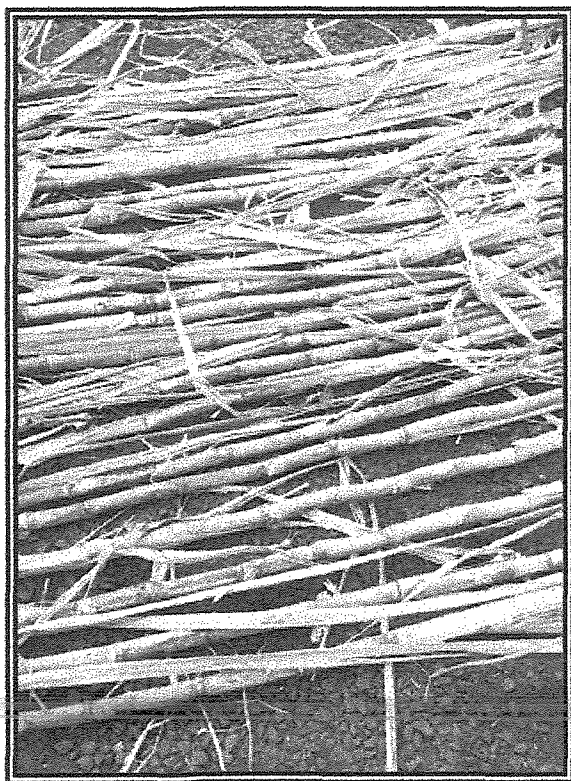
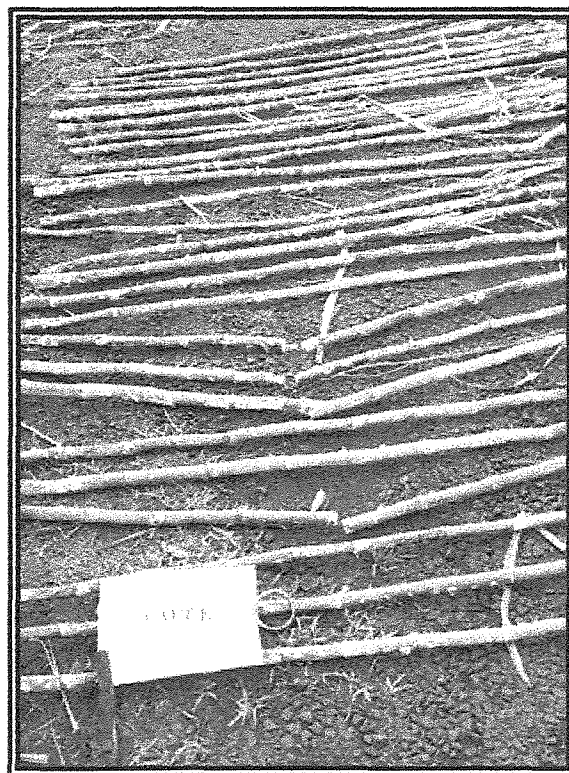


Figura 41 - Lote de cana-de-açúcar antes da passagem pelo dispositivo limpador.

Figura 42 - Lote de cana-de-açúcar após a passagem pelo dispositivo limpador.



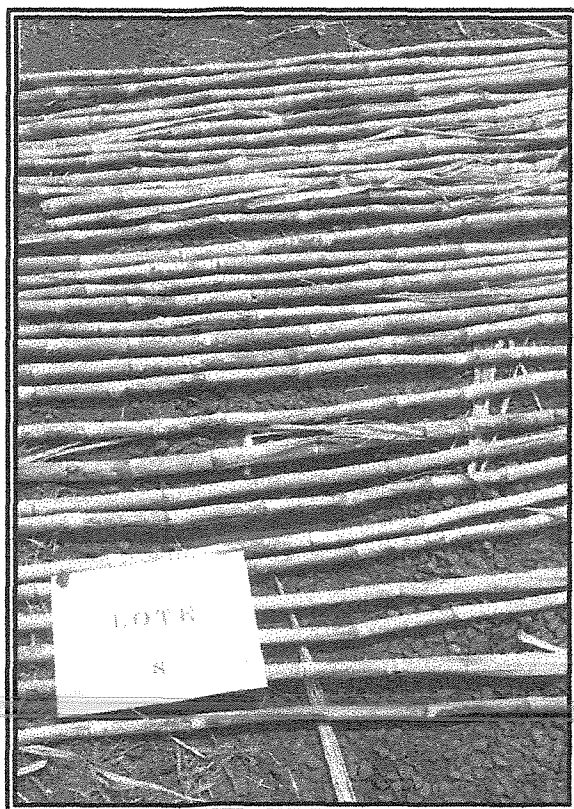


Figura 43 - Lote de cana-de-açúcar após a passagem pelo dispositivo limpador.

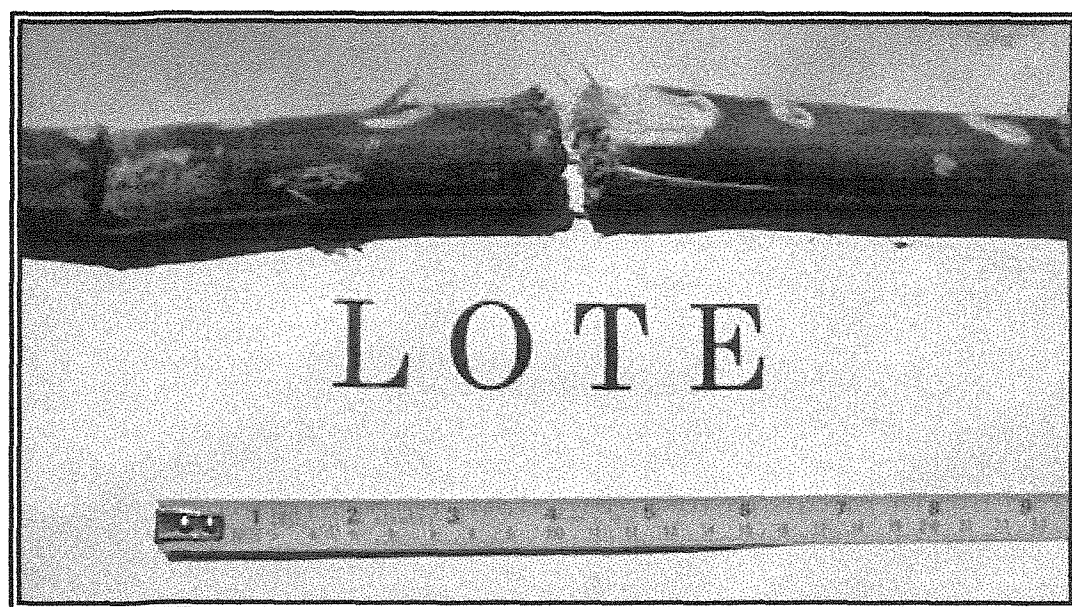


Figura 44 - Detalhe da ruptura do colmo da cana-de-açúcar causada por esforços de tração.

As Figuras 45, 46 e 47 mostram, respectivamente, um monte de colmos de após a passagem dos mesmos pelo dispositivo limpador, um detalhe do mesmo e uma visão do eito relativo aos 9 montes formados após a realização dos ensaios para avaliação do dispositivo limpador.



Figura 45 - Monte de colmos após a passagem dos mesmos pelo dispositivo limpador.



Figura 46 - Detalhe dos colmos após a passagem pelo dispositivo limpador.

Figura 47 - Vista do eito amontoadado formado dos 9 lotes de colmos após a passagem pelo dispositivo limpador.



As Figuras 48 a 51 mostram detalhes dos colmos onde ocorreram danos mecânicos visíveis; as marcas devido à ação das taliscas junto ao colmo e um trecho de colmo onde não houve raspagem das taliscas sobre o mesmo.

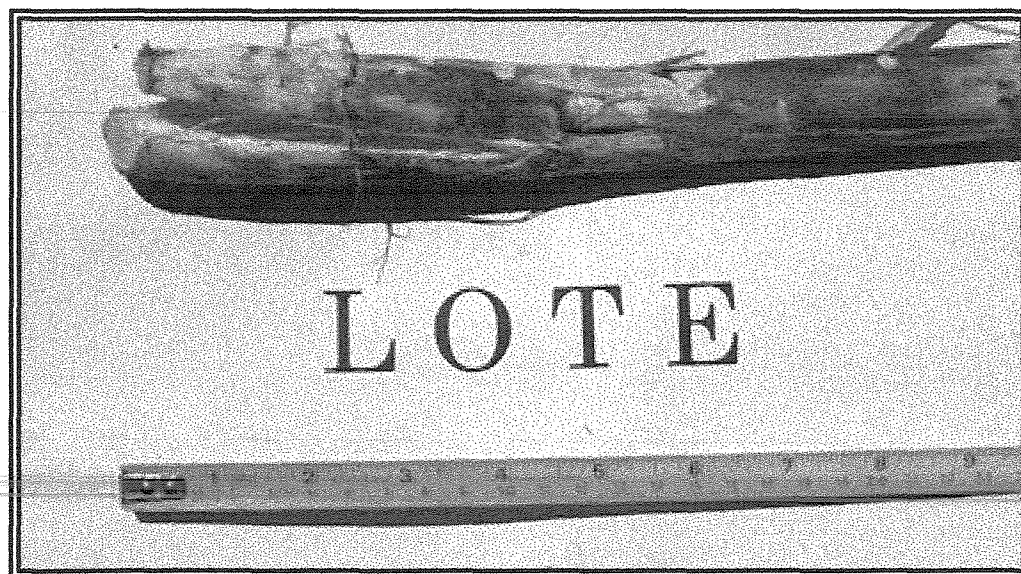


Figura 48 - Detalhe de fissura típica causada por esmagamento na base do colmo.

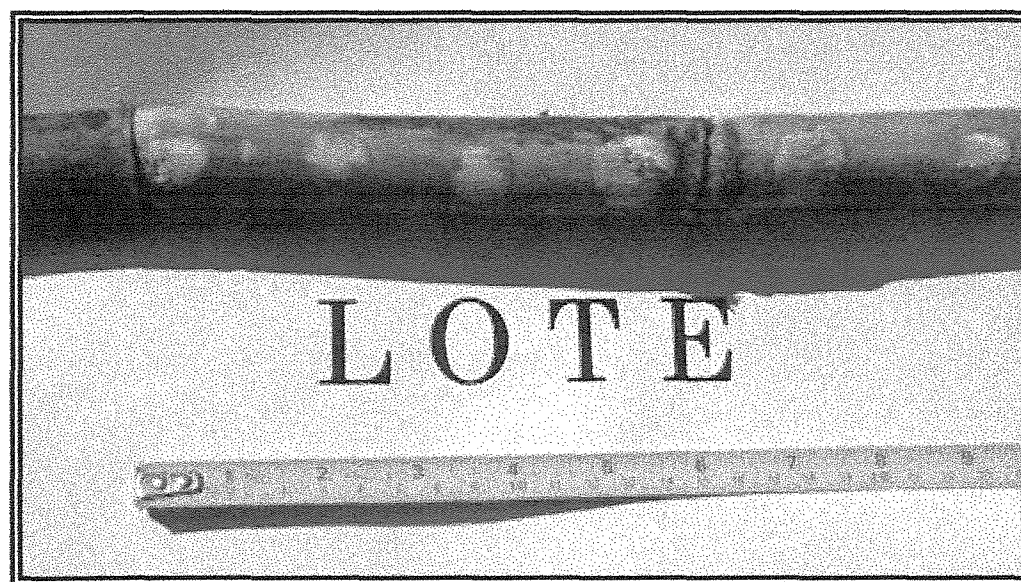


Figura 49 - Detalhe das marcas provenientes da raspagem das taliscas na porção média do colmo após a passagem pelo dispositivo limpador.

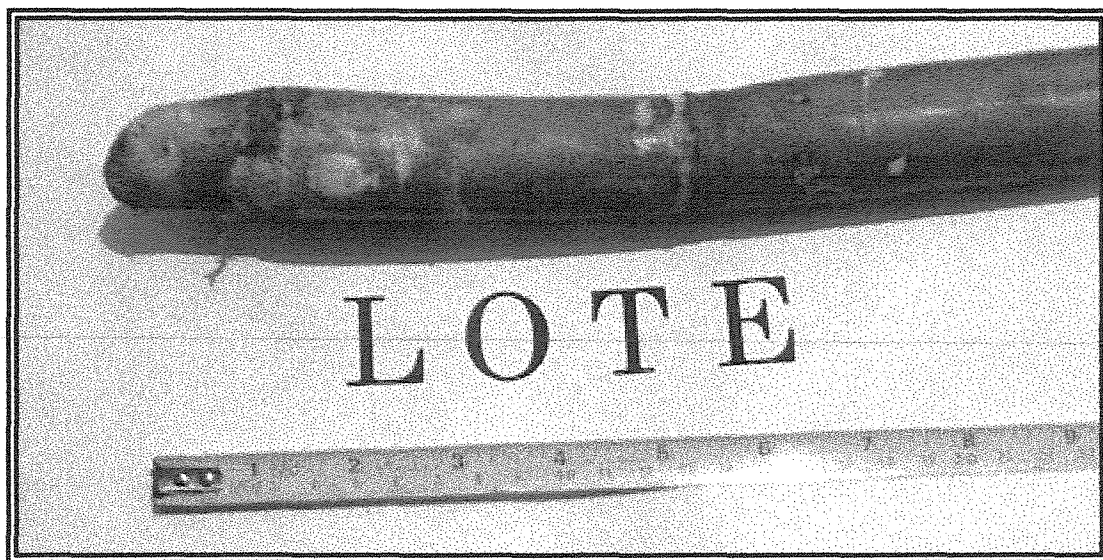


Figura 50 - Detalhe das marcas provenientes da raspagem das taliscas na base do colmo após a passagem pelo dispositivo.

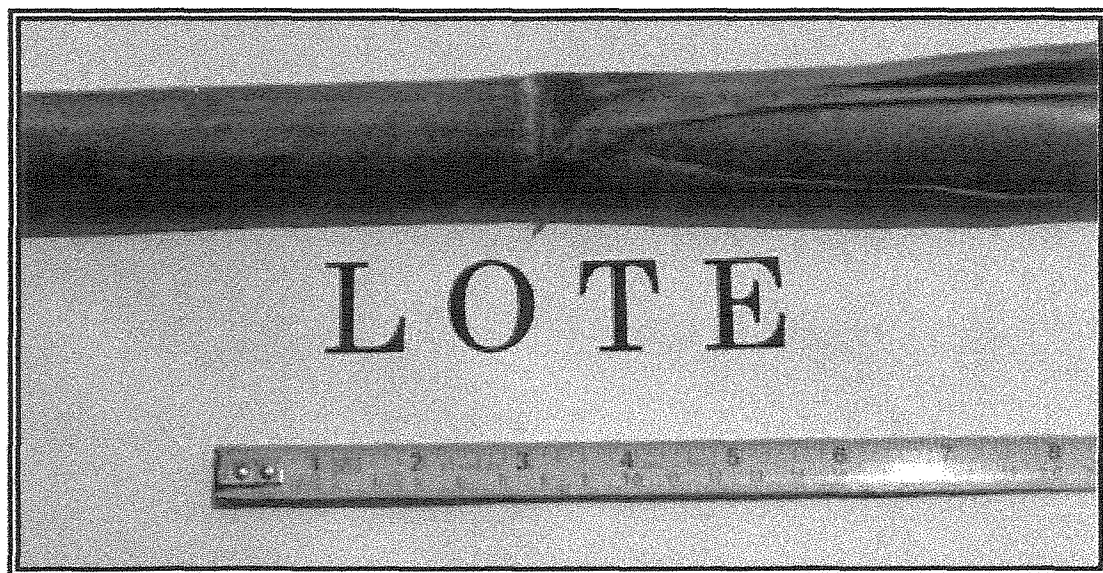


Figura 51 - Detalhe de um trecho de colmo onde não houve o efeito da raspagem das taliscas após a passagem pelo dispositivo.

7.- ANÁLISE DO ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DOS ESFORÇOS

Com os resultados dos ensaios para determinação dos esforços gerados pelo rolo superior oscilante, construiu-se gráficos de forças em função do tempo, como os mostrados nas Figuras 52 e 53. Como os ensaios não foram simultâneos por falta de equipamentos de medição, os eixos de tempo não são coincidentes.

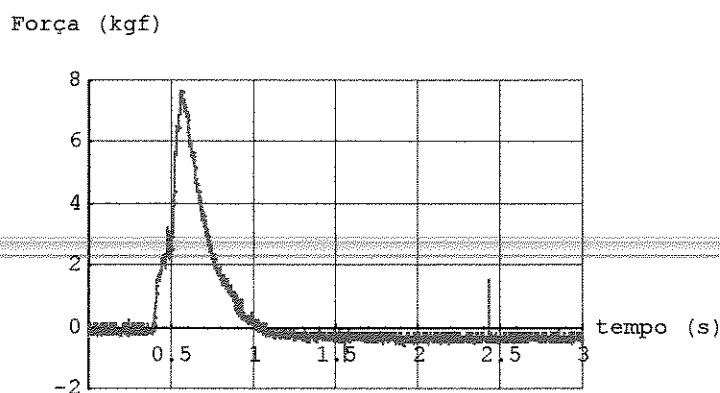


Figura 52 - Gráfico da força vertical em função do tempo, para o rolo superior oscilante.

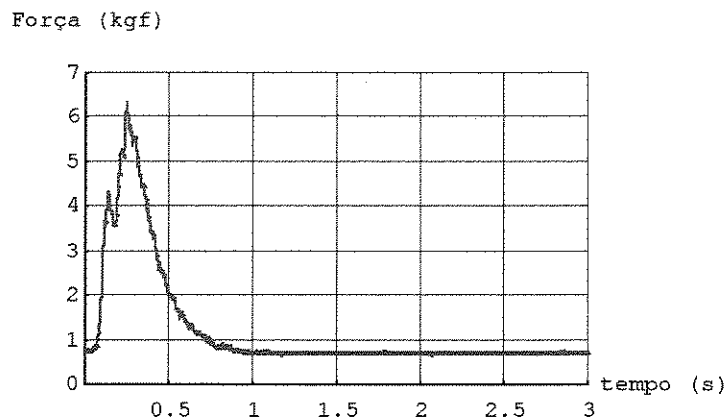


Figura 53 - Gráfico da força horizontal em função do tempo, para o rolo superior oscilante.

Foram ensaiadas 2 condições de cargas nas molas helicoidais - Carga 1 (PCMI=412,0 N) e Carga 2 (PCMI=360,5 N) - conforme descrito no item 3.2.3. do Capítulo 3. As Tabelas 16 e 17 a seguir, sintetizam os resultados obtidos nos ensaios para determinação dos esforços gerados pelo rolo superior oscilante.

Tabela 16 - Forças obtidas no ensaio com a condição de Carga 1 ($d_i = 0,040$ m).

Cana	Comprimento (m)	Diâmetro médio (mm)	Força vertical - F_y (N)	Diâmetro médio (mm)	Força horizontal - F_x (N)
1	0,605	25,9	74,9	27,3	62,0
2	0,610	24,7	71,1	27,9	52,0
3	0,615	26,6	73,7	25,4	39,7
4	0,610	28,0	90,3	22,9	32,4
5	0,620	28,7	74,9	22,7	48,8
	Valores médios	26,8	77,0	25,2	47,0

Tabela 17 - Forças obtidas no ensaio com a condição de Carga 2 ($d_i = 0,035$ m).

Cana	Comprimento (m)	Diâmetro médio (mm)	Força vertical - F_y (N)	Diâmetro médio (mm)	Força horizontal - F_x (N)
1	0,615	26,4	82,6	26,4	33,5
2	0,600	26,6	81,3	26,6	20,8
3	0,595	26,6	101,8	27,3	27,6
4	0,600	23,4	74,9	23,4	46,9
5	0,610	28,5	104,4	28,5	25,0
	Valores médios	26,3	89,0	26,4	30,8

Como a distância inicial entre o rolo superior e o suporte da célula de carga era de 0,020 m, a amplitude da função “step” era dada pela seguinte equação:

$$\alpha = - \frac{(D - 0,020)}{R_2} \cdot \frac{\pi}{180} \quad [\text{rad}]$$

onde: D = diâmetro médio do colmo;

$$R_2 = 0,550 \text{ m}$$

O coeficiente de raspagem foi calculado pela seguinte equação:

$$\mu_R = \frac{F_{XE}}{F_{YE}}$$

onde: F_{XE} = força horizontal obtida no ensaio para determinação dos esforços;

F_{YE} = força vertical obtida no ensaio para determinação dos esforços.

Os erros percentuais das forças determinadas pelo modelo matemático em relação às forças obtidas nos ensaios foram calculados pela seguinte expressão:

$$\text{erro \%} = \frac{F_{MM} - F_E}{F_E} \cdot 100$$

onde: F_{MM} = força determinada pelo modelo matemático;

F_E = força obtida no ensaio para determinação dos esforços.

As Tabelas 18 e 19 sintetizam as forças obtidas nos ensaios, as forças determinadas pelo modelo matemático, os coeficientes de raspagem, os erros percentuais da determinação das forças pelo modelo matemático e o momento torsor de entrada determinado pelo modelo, para as condições de Carga 1 e Carga 2, respectivamente.

Tabela 18 - Resultados com a condição de Carga 1 ($d_i=0,040$ m).

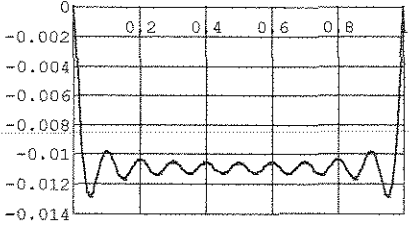
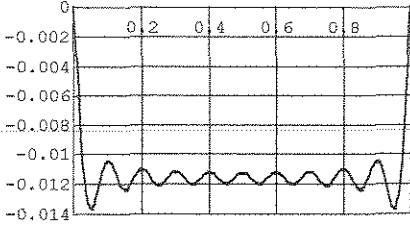
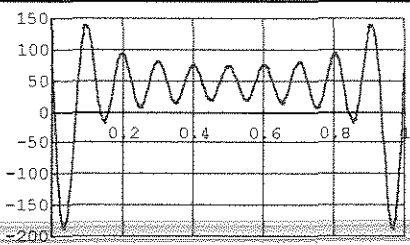
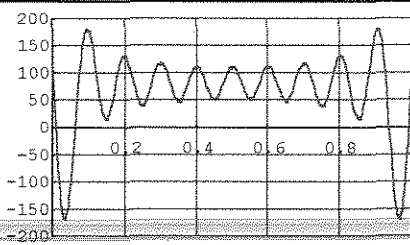
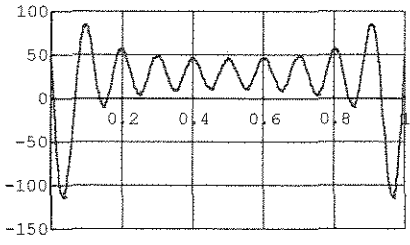
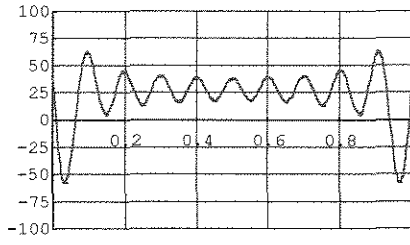
D (m)	a (rad.)	μ_R	F_{YMM} (N)	F_{YE} (N)	erro (%)	F_{XMM} (N)	F_{XE} (N)	erro (%)	M_T (N·m)
0,0266	-0,0120	0,8278	43,1	74,9	-42,46	35,7	62,0	-42,42	5,36
0,0263	-0,0115	0,7314	44,6	71,1	-37,27	32,6	52,0	-37,31	4,89
0,0260	-0,0109	0,5387	46,3	73,7	-37,18	25,0	39,7	-37,03	3,74
0,0255	-0,0100	0,3588	48,9	90,3	-45,85	17,6	32,4	-45,68	2,63
0,0257	-0,0104	0,6515	47,7	74,9	-36,32	31,1	48,8	-36,27	4,66
Valores médios com a condição de Carga 1									
0,02602	-0,0109	0,6104	46,3	77,0	-39,87	28,3	47,0	-39,79	4,24

Tabela 19 - Resultados com a condição de Carga 2 ($d_i=0,035$ m).

D (m)	a (rad.)	μ_R	F_{YMM} (N)	F_{YE} (N)	erro (%)	F_{XMM} (N)	F_{XE} (N)	erro (%)	M_T (N·m)
0,0264	-0,0116	0,4056	80,8	82,6	-2,18	32,8	33,5	-2,09	4,92
0,0266	-0,0120	0,2558	79,8	81,3	-1,85	20,4	20,8	-1,92	3,06
0,0270	-0,0127	0,2711	77,9	101,8	-23,48	21,1	27,6	-23,55	3,17
0,0234	-0,0062	0,6262	95,8	74,9	+27,90	60,0	46,9	+27,93	9,00
0,0285	-0,0155	0,2395	70,1	104,4	-32,85	16,8	25,0	-32,80	2,52
Valores médios com a condição de Carga 1									
0,02638	-0,0116	0,3461	80,9	89,0	-9,10	28,0	30,8	-9,09	4,20

A Tabela 20, a seguir, ilustra os resultados médios determinados pelo modelo matemático e os obtidos através dos ensaios, para as condições da Carga 1 e Carga 2.

Tabela 20 - Comparação entre os resultados determinados pelo modelo matemático e os obtidos através dos ensaios.

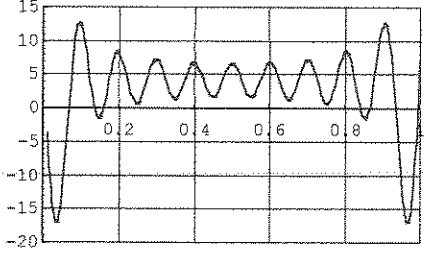
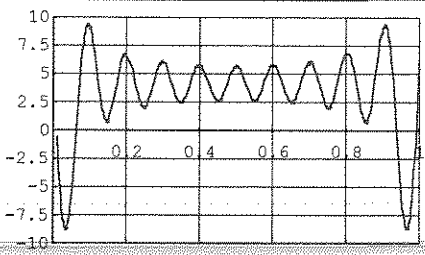
	Condição de Carga 1 ($d_i = 0,040$ m)	Condição de Carga 2 ($d_i = 0,035$ m)
$\theta_1(t)$ com o qual o modelo matemático foi simulado - $\theta_1(t)$ em radianos - t em segundos		
$F_Y(t)$ determinada pelo modelo matemático - $F_Y(t)$ em Newtons - t em segundos		
valor médio do modelo $F_Y(t)$ - (N)	46,3	80,9
Valor médio real obtido no ensaio experimental $F_Y(t)$ - (N)	77,0	89,0
Erro percentual de $F_Y(t)$	-39,87 %	-9,10 %
$F_X(t)$ determinada pelo modelo matemático - $F_X(t)$ em Newtons - t em segundos		
valor médio do modelo $F_X(t)$ - (N)	28,3	28,0
Valor médio real obtido no ensaio experimental $F_X(t)$ - (N)	47,0	30,8
Erro percentual de $F_X(t)$	-39,79 %	-9,09 %

Através dos resultados obtidos, observa-se que o erro na determinação das forças com a condição de Carga 2 não foi elevado (-9,10 % para $F_Y(t)$ e -9,09 % para $F_X(t)$), em comparação com o observado com a condição de Carga 1 (-39,87 % para $F_Y(t)$ e -39,79% para $F_X(t)$). Esses resultados devem-se ao fato de que, com a condição de Carga 1, ou seja, com maior pré-carga inicial aplicada na mola helicoidal, o rolo oscilante fica mais susceptível às variações das superfícies dos colmos (nós e internódios), com maiores oscilações verticais, ocasionando um maior coeficiente de raspagem (0,6104), enquanto que, com a condição de Carga 2, ou seja, com menor pré-carga inicial na mola helicoidal, o rolo oscilante possui um movimento mais uniforme ao longo da passagem dos colmos, com menores oscilações verticais, causando um menor coeficiente de raspagem (0,3461).

Embora existam diferenças entre as forças determinadas pela modelagem matemática e as obtidos pelos ensaios, pode-se utilizar essa modelagem para uma primeira aproximação dos resultados esperados por um dispositivo limpador com essa configuração, prevendo um erro de -9,1 % nas forças com menor pré-carga inicial nas molas helicoidais, ou seja, quando o movimento do rolo oscilante não for muito sensível às pequenas excitações causadas pelas superfícies dos colmos (nós e internódios), e um erro de -39,8 % nas forças com maior pré-carga inicial aplicada nas molas helicoidais, ou seja, quando o movimento do rolo oscilante for mais sensível às variações das superfícies dos colmos.

A Tabela 21 ilustra o momento torsor no eixo de entrada do dispositivo, determinado pela modelagem matemática, para cada uma das condições de carga.

Tabela 21 - Momento tursor determinado pelo modelo matemático.

Condição de Carga	Gráfico $M_T = f(t)$	M_T médio (N·m)
Carga 1		4,24
Carga 2		4,20

Através desses resultados, pode-se observar que o momento tursor no eixo de entrada do dispositivo varia pelas condições das forças verticais geradas pelo rolo oscilante, ou seja, quanto maiores as forças verticais, menor é o momento tursor, possibilitando o dimensionamento do motor de acionamento do dispositivo.

A Figura 54 ilustra o ângulo de rotação dos rolos limpadores $\theta_2(t) = f(t)$.

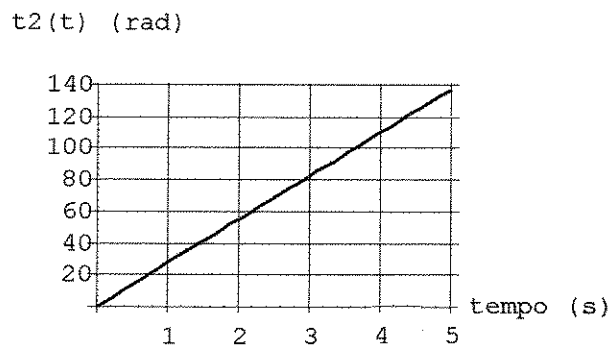


Figura 54 - Ângulo de rotação dos rolos limpadores $\theta_2(t) = f(t)$.

8.- CONCLUSÕES

A análise dos resultados deste estudo para avaliação do dispositivo proposto para despalhe de colmos de cana-de-açúcar através de rolos oscilantes com diferença de velocidades tangenciais permitiu concluir que:

O dispositivo apresentou uma eficiência de remoção de folhas de 82,5%, após 2 passagens dos colmos pelo dispositivo, quando utilizado com a Configuração I (diferencial de velocidades tangencial entre rolos superiores e inferiores de 43% e entre pares de rolos adjacentes de 29%), e com a condição de Carga 2 na mola helicoidal (360,5 N); essa eficiência é consideravelmente alta, em comparação com outros sistemas apresentados na bibliografia;

Embora a eficiência de remoção de folhas tenha-se apresentado elevada, essa condição do dispositivo apresentou uma grande quantidade de gemas visivelmente danificadas (26,5%), inviabilizando a sua utilização na colheita de cana-semente;

Nessa condição com alta eficiência de remoção de folhas, os danos mecânicos observados após os ensaios não foram elevados, com danos leves, do tipo fissuras de 0,05 a 0,10 m de comprimento, nas porções médias e nas bases dos colmos, sem apresentar perdas na qualidade da matéria-prima;

Com a Configuração III (sem diferencial de velocidades entre rolos superiores e inferiores e com 19% de diferencial entre pares de rolos adjacentes), e com a condição de Carga 1 na mola helicoidal (412,0 N), o dispositivo apresentou a menor

eficiência de remoção de folhas (45,6%), após 2 passagens dos colmos pelo dispositivo, embora tenha se apresentado como a condição que menos danificou as gemas (6,6%);

Essa condição com menor eficiência de remoção de folhas não apresentou qualquer tipo de dano mecânico aos colmos, embora esse tratamento tenha apresentado um diâmetro médio dos colmos inferiores aos demais (22,5 mm);

Analisando-se como efeito independente, ou seja, sem levar em consideração as condições de cargas nas molas helicoidais, as configurações I e II do sistema, com diferencial de velocidades tangenciais entre rolos superiores e inferiores de 43 e 29%, e entre pares de rolos adjacentes de 29 e 19%, respectivamente, são praticamente iguais em termos de remoção de folhas, embora tenham apresentado uma grande quantidade de gemas visivelmente danificadas (23,8%), inviabilizando sua utilização em sistemas de colheita de cana-semente;

Essas duas configurações com diferenciais de velocidades não apresentaram danos mecânicos significativos aos colmos, com fissuras e trincas de comprimento médio de 0,05 a 0,10 m, nas porções médias e nas bases dos mesmos, sem comprometer a qualidade da matéria-prima;

Com o modelo matemático desenvolvido, consegue-se determinar os esforços gerados pelo dispositivo com braços oscilantes, observando-se que o mesmo subestima as forças geradas pelo mesmo: -9,1 % nas forças com pré-carga inicial nas molas helicoidais de 360,5 N, e -39,8 % nas forças com pré-carga inicial nas molas helicoidais de 412,0 N, em relação aos valores obtidos nos ensaios;

Essas variações nas determinações das forças geradas pela modelagem matemática, devem-se ao fato da existência dos nós e internódios irregulares existentes ao longo dos colmos da cana-de-açúcar, que causam pequenas, mas significantes oscilações no movimento dos rolos;

Com a condição de Carga 1 na mola helicoidal (412,0 N), o rolo superior ficou mais susceptível às oscilações causadas pelas superfícies dos colmos, ou seja, mais sensível ao movimento vertical, fazendo com que o contato entre as superfícies dos colmos e das taliscas não fosse muito uniforme, conduzindo a maiores diferenças entre as forças obtidas nos ensaios e as determinadas pelo modelo;

Com essa condição de Carga 1, as forças horizontais resultantes nos ensaios apresentaram-se maiores, também devido às maiores oscilações do rolo superior, fazendo com que o coeficiente de raspagem fosse mais elevado (0,6104);

Com a condição de Carga 2 na mola helicoidal (360,5 N), o rolo superior não ficou tão sensível quanto na condição com maior pré-carga inicial aplicada na mola, fazendo com que o contato entre as superfícies dos colmos e das taliscas ficasse mais uniforme, conduzindo a menores diferenças entre as forças obtidas nos ensaios e as determinadas pelo modelo;

Nessa condição de Carga 2 na mola, as forças horizontais apresentaram-se de menor magnitude, devido à maior uniformidade no movimento oscilatório do rolo superior, conduzindo a um menor coeficiente de raspagem entre as superfícies das taliscas e dos colmos (0,3461);

As diferenças entre as forças obtidas nos ensaios e as determinadas pela modelagem matemática também podem ser devido à capacidade das células de carga utilizadas na aquisição de dados (1.000 N na aquisição das forças verticais e 500 N na aquisição das forças horizontais); a utilização de células de carga de menor capacidade (em torno de 100 N) podem conduzir a leituras mais precisas das forças geradas pelo dispositivo, devido à faixa de variação das mesmas (77,0~89,0 N nas forças verticais e 47,0~30,8 N nas forças horizontais).

O sistema para remoção de folhas de colmos por diferencial de velocidades tangenciais estudado pode ser utilizado em cortadoras de cana-de-açúcar crua e inteira, com uma eficiência de remoção de folhas relativamente alta, sem apresentar danos mecânicos capazes de comprometer a qualidade da matéria-prima, mas a sua utilização na colheita de cana-semente não é aconselhada, devido à grande quantidade de gemas visivelmente danificadas observadas após os ensaios.

Posterioros trabalhos neste ramo de desenvolvimento da Engenharia Agrícola podem ser realizados no sentido de otimizar o funcionamento deste dispositivo, simulando-se, através de programas de computadores, essas oscilações causadas pelos diferentes nós e internódios dos colmos de cana-de-açúcar, visando uma melhor adequação das equações ao real funcionamento desse sistema de limpeza por diferencial de velocidades.

Também pode-se proceder à instalação desse dispositivo nas atuais cortadoras, pois trata-se de um sistema extremamente simples, de fácil manutenção e fabricação que, além de limpar os colmos de cana-de-açúcar, pode ter a função de transporte

e separação de terra dos mesmos, no interior das cortadoras, bem com ter a função de lançador de colmos após a passagem pela máquina.

9.- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABE, M., KOJIMA, S. e MIYABE, Y. 1979. Studies on the development of a leaf stripping system for sugar cane. Bulletin of the Faculty of Agriculture. Kagoshima University, Japan. Nº 29: p.217-224.

_____; _____; _____ e KASHIWAGI, S. 1984. Fundamental studies on the tether typed leaf-stripping-machine for sugar cane. Bulletin of the Faculty of Agriculture. Kagoshima University, Japan. Nº 34: p.165-171.

BECKWITH, T. G., BUCK, N. L. e MARANGONI, R. D. 1982. Mechanical measurements. third edition. University of Pittsburgh, USA. Addison-Wesley Publishing Company. p.23-49.

BERTO, P. N. A., MIALHE, L. G. 1981. Danificação mecânica de gema de colmos de cana-semente. Brasil Açucareiro, Rio de Janeiro. Nº 6: p.353-358.

BLANCHMAN, N. 1992. Mathematica: a practical approach. Stanford University. Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.

de BEER, A. G. e BOEVEY, T. C. 1979. Field performance of chopper harvesters. South African Sugar Association Experiment Station, South Africa. Proceedings of the South African Sugar Technologists' Association. June. p.158-162.

FUELLING T. G., HENKEL, C. R., LEVERINGTON, K. C. and WEGENER, M. K. 1978. Sugarcane harvester performance. Bureau of Sugar Experiment Stations, Tully, Brisbane. p.209-216.

FURLANI NETO, V. L. 1994. Colheita mecanizada da cana-de-açúcar. STAB, Piracicaba, SP. Vol. 12 Nº3: p.8-9.

GOMES, F. P. 1987. A estatística moderna na pesquisa agropecuária. 3ª edição. Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato (POTAFOS). Piracicaba, SP.

HUDSON, J. C., BOYCOTT, C. A. e SCOTT, D. A. 1975. Sugarcane harvesting - a new method. Edgehill, Barbados. Ludlow, England. The South African Sugar Journal, September. p.457-465.

KOJIMA, S., ABE, M. e MIYABE, Y. 1979. Fundamental studies on the roll type leaf-stripping-machine for sugar cane. Bulletin of the Faculty of Agriculture. Kagoshima University, Japan. Nº 29: p.225-230.

MAGALHÃES, P. S. G. 1994. Colheita de Cana-de-Açúcar - Atualidade e Perspectiva. Notas Internas da Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas (FEAGRI / UNICAMP), Campinas, São Paulo. não publicado, 10 páginas.

MIYABE, Y. e ABE, M. 1976. On the pulling-force of a leaf-detachment. Bulletin of the Faculty of Agriculture. Kagoshima University, Japan. Nº 26: p.271-276.

_____; _____ e KOJIMA, S. 1979 (a). On the penetrating, bending, cutting and crushing resistance of a sugar cane stalk. Bulletin of the Faculty of Agriculture. Kagoshima University, Japan. Nº 29: p.231-243.

_____; _____; _____. 1979 (b). On the impacting resistance of a sugar cane stalk. Bulletin of the Faculty of Agriculture. Kagoshima University, Japan. Nº 29: p.245-248.

_____; _____; _____ e KASHIWAGI, S. 1984. Winnowing the trash from sugar cane stalks. Bulletin of the Faculty of Agriculture. Kagoshima University, Japan. Nº 34: p.173-178.

PAGNANO, N. B. 1994. Estudo das propriedades mecânicas da cana-de-açúcar relativas à remoção de folhas e resistência do colmo à compressão - Relatório de estágio supervisionado, realizado na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas (FEAGRI / UNICAMP). Campinas, São Paulo.

PASSOS, S. M. G., CANECHIO FILHO, V. e JOSÉ, A. 1973. Principais culturas v.1. Instituto Campineiro de Ensino Agrícola. Campinas, São Paulo. P.305-351.

RIDGE, D. R. and DICK, R. G. 1987. A new method for testing cane harvester performance. Bureau of Sugar Experiment Stations, Bundaberg. Proceedings of Australian Society of Sugarcane Technologists. p.87-92.

RÍPOLI, T. C. e BERTO, P. N. A. 1981. Avaliação de desempenho de colhedoras de cana-de-açúcar na região de Campos, RJ. Brasil Açucareiro, Rio de Janeiro. Vol. XCVII Nº 2: p.20-31.

_____; _____ e MIALHE, L. G. 1980. Evaluation of some performance parameters of three combine harvesters of sugarcane (Saccharum Officinarum). International Society of Sugarcane Technologists, Manila. Proceedings. Philippines. p.1036-1056.

_____; _____ e SEGALLA, A. L. 1981. O "push-rake" chega ao Brasil. Brasil Açucareiro, Rio de Janeiro. Vol. XCVII Nº 1: p.34-40.

SHUKLA, L. N., SANDHAR, N. S. e SINGH, I. 1991. Design, development and testing of a sugarcane cleaner. Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America. Tokyo. vol. 22, Nº 3: p.55-58.

SRIVASTAVA, L. N. and SINGH, K. 1990. Development of a power driven sugarcane detrapper. Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America. Tokyo. vol. 21, Nº 2: p.49-52.

TOKESHI, H. 1985. Rumos para o Proálcool - Energia na agricultura. Tecnologias poupadoras de insumos, integração de sistemas energéticos, produção de alimentos. Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - UNESP - Fundação de Estudos e Pesquisas (FUNEP). Jaboticabal, SP. p.365-401.

VEIGA FILHO, A. A., RODRIGUES, A. P., ZIMBACK, L., LANDELL, M., ROSSETO, R., YOSHII, R. J. 1996. Cadeia agroindustrial do açúcar, álcool e sub-produtos. Repensando a Agricultura Paulista. Secretaria de Agricultura e Abastecimento do Estado de São Paulo (SAA-SP). São Paulo, SP.

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

WHALEN, S. A. 1989. Cane burning: environmental and health impacts. Proceedings of the Hawaiian Sugarcane Technologists Annual Conference, Honolulu. A1-A5.

WOLFRAM, S. 1993. Mathematica: a system for doing mathematics by computer. second edition. Illinois, USA. Addison-Wesley Publishing Company.

10.- ANEXOS

ANEXO A.1 - Determinação dos Momentos Polares

Legenda:

J_O = momento polar de inércia;

e = espessura;

I_{pCG} = momento polar de inércia em relação ao centro de massa;

m = massa;

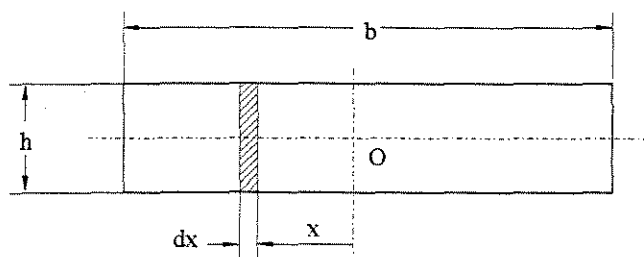
dS = diferencial de área.

Valores utilizados:

- densidade do aço: $\rho_{aço} = 7.800 \text{ kg/m}^3$

A.1.1.- Elemento 1 - Braco oscilante

1.- Chapa de aço (2x)



$$\begin{aligned} b &= 0,55 \text{ m} \\ h &= 0,121 \text{ m} \\ e &= 1,25 \times 10^{-2} \text{ m} \end{aligned}$$

$$J_O = \int x^2 \cdot dS$$

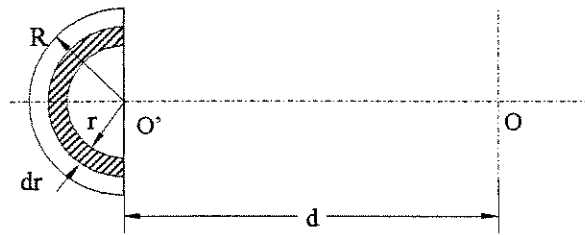
$$dS = h \cdot dx$$

$$J_O = h \cdot \int_{-b/2}^{b/2} x^2 \cdot dx = 0,121 \cdot \left[\frac{x^3}{3} \right]_{-0,275}^{0,275} = 1,68 \cdot 10^{-3} \text{ m}^4$$

$$I_{pCG11} = \rho \cdot e \cdot J_O = 7800 \cdot 1,25 \cdot 10^{-2} \cdot 1,68 \cdot 10^{-3} = 0,1636 \text{ kg} \times \text{m}^2$$

$$m_{11} = \rho \cdot e \cdot \int dS = \rho \cdot e \cdot h \cdot b = 7800 \cdot 1,25 \cdot 10^{-2} \cdot 0,121 \cdot 0,55 = 6,4886 \text{ kg}$$

2.- Chapa de aço (4x)



$$\begin{aligned}d &= 0,275 \text{ m} \\ R &= 6,05 \times 10^{-2} \text{ m} \\ e &= 1,25 \times 10^{-2} \text{ m}\end{aligned}$$

$$J_O = \int r^2 \cdot dS$$

$$dS = \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr = \pi \cdot r \cdot dr$$

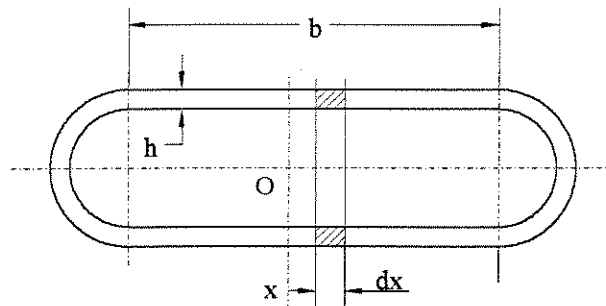
$$J_{O'} = \pi \cdot \int_0^R r^3 \cdot dr = \pi \cdot \left[\frac{r^4}{4} \right]_0^{6,05 \times 10^{-2}} = 1,05 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4$$

$$J_O = J_{O'} + S \times d^2 = 1,05 \cdot 10^{-5} + \frac{\pi \cdot (6,05 \cdot 10^{-2})^2}{2} \cdot 0,275^2 = 4,45 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4$$

$$I_{p_{CG12}} = \rho \cdot e \cdot J_O = 7800 \cdot 1,25 \cdot 10^{-2} \cdot 4,45 \cdot 10^{-4} = 0,0434 \text{ kg} \times \text{m}^2$$

$$m_{12} = \rho \cdot e \cdot \pi \cdot \int_0^R r \cdot dr = 7800 \cdot 1,25 \cdot 10^{-2} \cdot \pi \cdot \left[\frac{r^2}{2} \right]_0^{6,05 \times 10^{-2}} = 0,5606 \text{ kg}$$

3.- Corrente de elos ASA 40 - passo 1/2" (1x)



$$\begin{aligned}b &= 0,55 \text{ m} \\ e &= 1,60 \times 10^{-2} \text{ m} \\ h &= 1,19 \times 10^{-2} \text{ m}\end{aligned}$$

$$J_O = \int x^2 \cdot dS$$

$$dS = 2 \cdot h \cdot dx$$

$$J_o = 2 \cdot h \cdot \int_0^b x^2 \cdot dx = 2 \cdot 1,19 \cdot 10^{-2} \cdot \left[\frac{x^3}{3} \right]_{-0,275}^{0,275} = 3,30 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4$$

$$I_{p_{CG13}} = \rho \cdot e \cdot J_o = 7800 \cdot 1,60 \cdot 10^{-2} \cdot 3,30 \cdot 10^{-4} = 0,0412 \text{ kg} \times \text{m}^2$$

$$m_{13} = \rho \cdot e \cdot \int dS = \rho \cdot e \cdot 2 \cdot h \cdot b = 7800 \cdot 1,60 \cdot 10^{-2} \cdot 2 \cdot 1,19 \cdot 10^{-2} \cdot 0,55 = 1,6336 \text{ kg}$$

Portanto, temos:

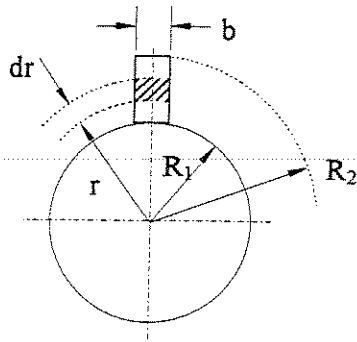
$$I_{p_{CG1}} = 2 \cdot I_{p_{CG11}} + 4 \cdot I_{p_{CG12}} + I_{p_{CG13}}$$

$$I_{p_{CG1}} = 0,5420 \text{ kg} \times \text{m}^2$$

$$m_1 = 16,8532 \text{ kg}$$

A.1.2.- Elemento 2 - Rolo Superior

1.- Taliscas (16x)



$$b = 0,95 \times 10^{-2} \text{ m}$$

$$e = 0,181 \text{ m}$$

$$R_1 = 0,125 \text{ m}$$

$$R_2 = 0,150 \text{ m}$$

$$J_O = \int r^2 \cdot dS$$

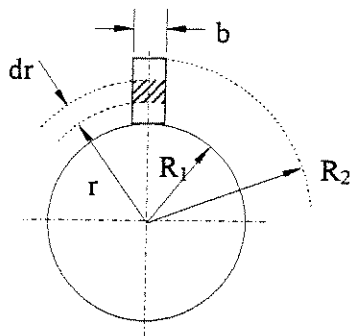
$$dS = b \cdot dr$$

$$J_O = b \cdot \int_{R_1}^{R_2} r^2 \cdot dr = 0,95 \cdot 10^{-2} \cdot \left[\frac{r^3}{3} \right]_{0,125}^{0,150} = 4,50 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$$

$$I_{p_{CG21}} = \rho \cdot e \cdot J_O = 7800 \cdot 0,181 \cdot 4,50 \cdot 10^{-6} = 0,0064 \text{ kg} \times \text{m}^2$$

$$m_{21} = \rho \cdot e \cdot b \cdot \int_{R_1}^{R_2} dr = 7800 \cdot 0,181 \cdot 0,95 \cdot 10^{-2} \cdot [r]_{0,125}^{0,150} = 0,3353 \text{ kg}$$

2.- Suporte taliscas (16x)



$$b = 0,04 \text{ m}$$

$$e = 0,181 \text{ m}$$

$$R_1 = 0,121 \text{ m}$$

$$R_2 = 0,125 \text{ m}$$

$$J_O = \int r^2 \cdot dS$$

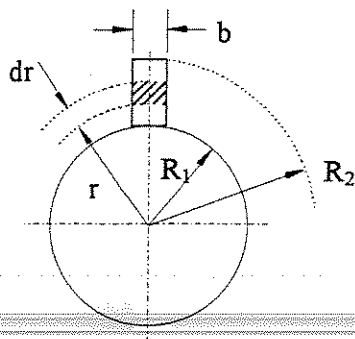
$$dS = b \cdot dr$$

$$J_o = b \cdot \int_{R_1}^{R_2} r^2 \cdot dr = 0,04 \cdot \left[\frac{r^3}{3} \right]_{0,121}^{0,125} = 2,42 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$$

$$I_{p_{CG22}} = \rho \cdot e \cdot J_o = 7800 \cdot 0,181 \cdot 2,42 \cdot 10^{-6} = 0,0034 \text{ kg} \times \text{m}^2$$

$$m_{22} = \rho \cdot e \cdot b \cdot \int_{R_1}^{R_2} dr = 7800 \cdot 0,181 \cdot 0,04 \cdot [r]_{0,121}^{0,125} = 0,2259 \text{ kg}$$

3.- Chapa de fixação (16x)



$$\begin{aligned} b &= 0,0635 \text{ m} \\ e &= 0,95 \times 10^{-2} \text{ m} \\ R_1 &= 0,071 \text{ m} \\ R_2 &= 0,121 \text{ m} \end{aligned}$$

$$J_o = \int r^2 \cdot dS$$

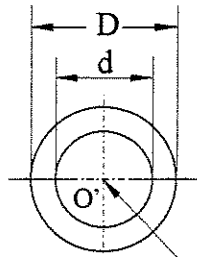
$$dS = b \cdot dr$$

$$J_o = b \cdot \int_{R_1}^{R_2} r^2 \cdot dr = 0,0635 \cdot \left[\frac{r^3}{3} \right]_{0,071}^{0,121} = 2,99 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4$$

$$I_{p_{CG23}} = \rho \cdot e \cdot J_o = 7800 \cdot 0,95 \cdot 10^{-2} \cdot 2,99 \cdot 10^{-5} = 0,0022 \text{ kg} \times \text{m}^2$$

$$m_{23} = \rho \cdot e \cdot b \cdot \int_{R_1}^{R_2} dr = 7800 \cdot 0,95 \cdot 10^{-2} \cdot 0,0635 \cdot [r]_{0,071}^{0,121} = 0,2353 \text{ kg}$$

4.- Porca M12×1,25 (64x)



$$\begin{aligned} r &= 0,0945 \text{ m} \\ D &= 0,021 \text{ m} \\ d &= 0,012 \text{ m} \\ e &= 0,010 \text{ m} \end{aligned}$$

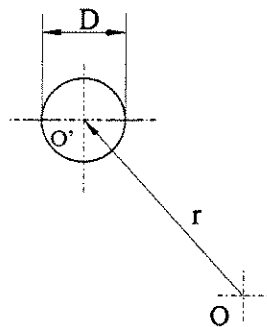
$$J_{O'} = \frac{\pi}{32} \cdot (D^4 - d^4) = \frac{\pi}{32} \cdot (0,021^4 - 0,012^4) = 1,71 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4$$

$$\begin{aligned} J_O &= J_{O'} + S \times r^2 = J_{O'} + \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2) \cdot r^2 = \\ &= 1,71 \cdot 10^{-8} + \frac{\pi}{4} \cdot (0,021^2 - 0,012^2) \cdot 0,0945^2 = 2,10 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4 \end{aligned}$$

$$I_{p_{CG24}} = \rho \cdot e \cdot J_O = 7800 \cdot 0,010 \cdot 2,10 \cdot 10^{-6} = 0,0002 \text{ kg} \times \text{m}^2$$

$$m_{24} = \rho \cdot e \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2) = 7800 \cdot 0,010 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (0,021^2 - 0,012^2) = 0,0182 \text{ kg}$$

5.- Parafuso M12×1,25 (32x)



$$\begin{aligned} r &= 0,0945 \text{ m} \\ D &= 0,012 \text{ m} \\ e &= 0,045 \text{ m} \end{aligned}$$

$$J_{O'} = \frac{\pi \cdot D^4}{32} = \frac{\pi \cdot 0,012^4}{32} = 2,04 \cdot 10^{-9} \text{ m}^4$$

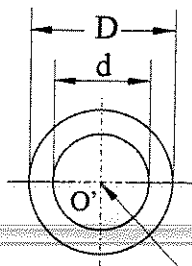
$$J_O = J_{O'} + S \times r^2 = J_{O'} + \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot r^2 =$$

$$= 2,04 \cdot 10^{-9} + \frac{\pi \cdot 0,012^2}{4} \cdot 0,0945^2 = 1,01 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$$

$$I_{p_{CG25}} = \rho \cdot e \cdot J_O = 7800 \cdot 0,045 \cdot 1,01 \cdot 10^{-6} = 0,0004 \text{ kg} \times \text{m}^2$$

$$m_{25} = \rho \cdot e \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} = 7800 \cdot 0,045 \cdot \frac{\pi \cdot 0,012^2}{4} = 0,0397 \text{ kg}$$

6.- Arruela lisa M12 (32x)



$$r = 0,0945 \text{ m}$$

$$D = 0,037 \text{ m}$$

$$d = 0,014 \text{ m}$$

$$e = 0,3 \times 10^{-2} \text{ m}$$

$$J_{O'} = \frac{\pi}{32} \cdot (D^4 - d^4) = \frac{\pi}{32} \cdot (0,037^4 - 0,014^4) = 1,80 \cdot 10^{-7} \text{ m}^4$$

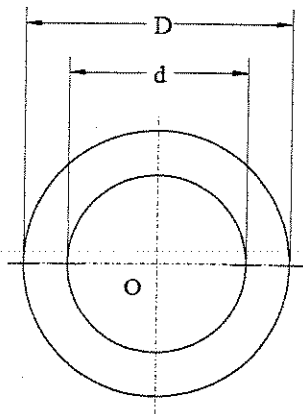
$$J_O = J_{O'} + S \times r^2 = J_{O'} + \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2) \cdot r^2 =$$

$$= 1,80 \cdot 10^{-7} + \frac{\pi}{4} \cdot (0,037^2 - 0,014^2) \cdot 0,0945^2 = 8,41 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$$

$$I_{p_{CG26}} = \rho \cdot e \cdot J_O = 7800 \cdot 0,3 \cdot 10^{-2} \cdot 8,41 \cdot 10^{-6} = 0,0002 \text{ kg} \times \text{m}^2$$

$$m_{26} = \rho \cdot e \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2) = 7800 \cdot 0,3 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (0,037^2 - 0,014^2) = 0,0216 \text{ kg}$$

7.- Flange (2x)



$$e = 0,95 \times 10^{-2} \text{ m}$$

$$D = 0,250 \text{ m}$$

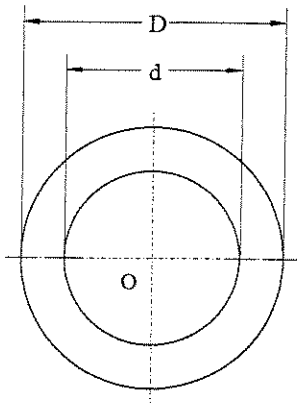
$$d = 0,0518 \text{ m}$$

$$J_o = \frac{\pi}{32} \cdot (D^4 - d^4) = \frac{\pi}{32} \cdot (0,250^4 - 0,0518^4) = 0,0004 \text{ m}^4$$

$$I_{p_{CG27}} = \rho \cdot e \cdot J_o = 7800 \cdot 0,95 \cdot 10^{-2} \cdot 0,0004 = 0,0284 \text{ kg} \times \text{m}^2$$

$$m_{27} = \rho \cdot e \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2) = 7800 \cdot 0,95 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (0,250^2 - 0,0518^2) = 3,4812 \text{ kg}$$

8.- Tubo L = 0,042 m (2x)



$$e = 0,042 \text{ m}$$

$$D = 0,0518 \text{ m}$$

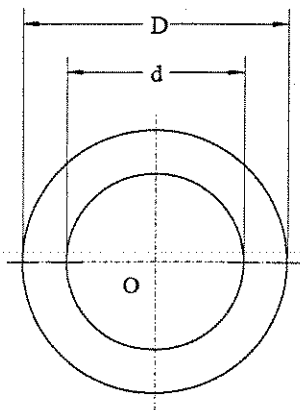
$$d = 0,036 \text{ m}$$

$$J_o = \frac{\pi}{32} \cdot (D^4 - d^4) = \frac{\pi}{32} \cdot (0,0518^4 - 0,036^4) = 5,42 \cdot 10^{-7} \text{ m}^4$$

$$I_{p_{CG28}} = \rho \cdot e \cdot J_o = 7800 \cdot 0,042 \cdot 5,42 \cdot 10^{-7} = 0,0002 \text{ kg} \times \text{m}^2$$

$$m_{28} = \rho \cdot e \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2) = 7800 \cdot 0,042 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (0,0518^2 - 0,036^2) = 0,3569 \text{ kg}$$

9.- Tubo L = 0,116 m (1x)



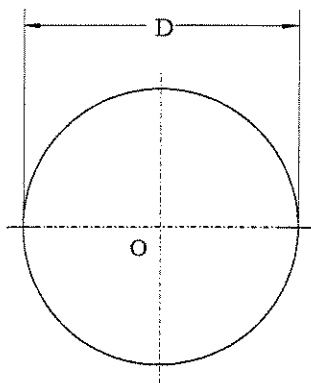
$$\begin{aligned} e &= 0,116 \text{ m} \\ D &= 0,0483 \text{ m} \\ d &= 0,0409 \text{ m} \end{aligned}$$

$$J_o = \frac{\pi}{32} \cdot (D^4 - d^4) = \frac{\pi}{32} \cdot (0,0483^4 - 0,0409^4) = 2,596 \cdot 10^{-7} \text{ m}^4$$

$$I_{p_{CG29}} = \rho \cdot e \cdot J_o = 7800 \cdot 0,116 \cdot 2,596 \cdot 10^{-7} = 0,0002 \text{ kg} \times \text{m}^2$$

$$m_{29} = \rho \cdot e \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2) = 7800 \cdot 0,116 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (0,0483^2 - 0,0409^2) = 0,4691 \text{ kg}$$

10.- Eixo (1x)



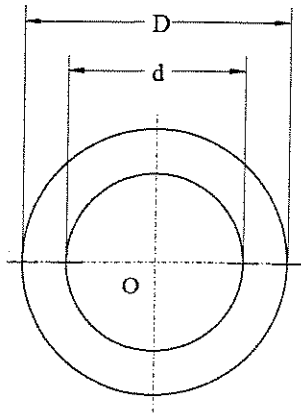
$$\begin{aligned} D &= 0,036 \text{ m} \\ e &= 0,373 \text{ m} \end{aligned}$$

$$J_o = \frac{\pi \cdot D^4}{32} = \frac{\pi \cdot 0,036^4}{32} = 1,65 \cdot 10^{-7} \text{ m}^4$$

$$I_{p_{CG210}} = \rho \cdot e \cdot J_o = 7800 \cdot 0,373 \cdot 1,65 \cdot 10^{-7} = 0,0005 \text{ kg} \times \text{m}^2$$

$$m_{210} = \rho \cdot e \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} = 7800 \cdot 0,373 \cdot \frac{\pi \cdot 0,036^2}{4} = 2,9614 \text{ kg}$$

11.- Engrenagem (1x)



$$\begin{aligned}e &= 0,025 \text{ m} \\D &= 0,069 \text{ m} \\d &= 0,033 \text{ m}\end{aligned}$$

$$J_o = \frac{\pi}{32} \cdot (D^4 - d^4) = \frac{\pi}{32} \cdot (0,069^4 - 0,033^4) = 2,11 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$$

$$I_{p_{CG211}} = \rho \cdot e \cdot J_o = 7800 \cdot 0,025 \cdot 2,11 \cdot 10^{-6} = 0,0004 \text{ kg} \times \text{m}^2$$

$$m_{211} = \rho \cdot e \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2) = 7800 \cdot 0,025 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (0,069^2 - 0,033^2) = 0,5624 \text{ kg}$$

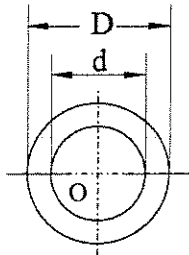
Portanto, temos:

$$I_{p_{CG2}} = 0,2823 \text{ kg} \times \text{m}^2$$

$$m_2 = 27,5395 \text{ kg}$$

A.1.3.- Elemento 3 - Mancais de rolamento

1.- Mancal (1x)



$$D = 0,087 \text{ m}$$

$$d = 0,068 \text{ m}$$

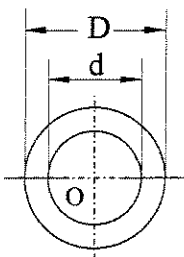
$$e = 0,030 \text{ m}$$

$$J_o = \frac{\pi}{32} \cdot (D^4 - d^4) = \frac{\pi}{32} \cdot (0,087^4 - 0,068^4) = 3,525 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$$

$$I_{p_{CG31}} = \rho \cdot e \cdot J_o = 7800 \cdot 0,030 \cdot 3,525 \cdot 10^{-6} = 8,25 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \times \text{m}^2$$

$$m_{31} = \rho \cdot e \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2) = 7800 \cdot 0,030 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (0,087^2 - 0,068^2) = 0,5412 \text{ kg}$$

2.- Mancal (1x)



$$D = 0,081 \text{ m}$$

$$d = 0,057 \text{ m}$$

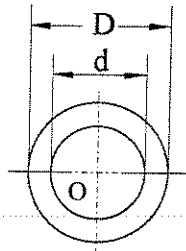
$$e = 0,030 \text{ m}$$

$$J_o = \frac{\pi}{32} \cdot (D^4 - d^4) = \frac{\pi}{32} \cdot (0,081^4 - 0,057^4) = 3,19 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$$

$$I_{p_{CG32}} = \rho \cdot e \cdot J_o = 7800 \cdot 0,030 \cdot 3,19 \cdot 10^{-6} = 7,46 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \times \text{m}^2$$

$$m_{32} = \rho \cdot e \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2) = 7800 \cdot 0,030 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (0,081^2 - 0,057^2) = 0,6087 \text{ kg}$$

3.- Rolamento SKF 6007-2Z (1x)



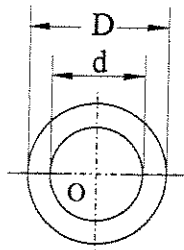
$$\begin{aligned} D &= 0,062 \text{ m} \\ d &= 0,035 \text{ m} \\ e &= 0,014 \text{ m} \end{aligned}$$

$$J_o = \frac{\pi}{32} \cdot (D^4 - d^4) = \frac{\pi}{32} \cdot (0,062^4 - 0,035^4) = 1,30 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$$

$$I_{p_{CG33}} = \rho \cdot e \cdot J_o = 7800 \cdot 0,014 \cdot 1,30 \cdot 10^{-6} = 1,42 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \times \text{m}^2$$

$$m_{33} = \rho \cdot e \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2) = 7800 \cdot 0,014 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (0,062^2 - 0,035^2) = 0,2246 \text{ kg}$$

4.- Rolamento SKF 6008-2Z (1x)



$$\begin{aligned} D &= 0,068 \text{ m} \\ d &= 0,040 \text{ m} \\ e &= 0,015 \text{ m} \end{aligned}$$

$$J_o = \frac{\pi}{32} \cdot (D^4 - d^4) = \frac{\pi}{32} \cdot (0,068^4 - 0,040^4) = 1,85 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$$

$$I_{p_{CG34}} = \rho \cdot e \cdot J_o = 7800 \cdot 0,015 \cdot 1,85 \cdot 10^{-6} = 2,16 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \times \text{m}^2$$

$$m_{34} = \rho \cdot e \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2) = 7800 \cdot 0,015 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (0,068^2 - 0,040^2) = 0,2779 \text{ kg}$$

Portanto, temos:

$$I_{p_{CG3}} = 0,019 \text{ kg} \times \text{m}^2$$

$$m_3 = 1,6524 \text{ kg}$$

ANEXO A.2 - Análise Estatística entre Tratamentos

A.2.1.) Diâmetros dos topos dos colmos de cana-de-açúcar

Quadro ANOVA

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variação	CV
Tratamento 1	30	691	23,033	13,757	16,103
Tratamento 2	30	718	23,933	18,064	17,759
Tratamento 3	30	691	23,033	6,999	11,486
Tratamento 4	30	711	23,700	6,424	10,694
Tratamento 5	30	658	21,933	6,547	11,666
Tratamento 6	30	666	22,200	9,752	14,067
Tratamento 7	30	533	17,767	6,599	14,459
Tratamento 8	30	683	22,767	6,806	11,459
Tratamento 9	30	607	20,233	5,564	11,658

ANOVA

Fonte da variação	SQ	GL	QM	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	911,9333	8	113,9917	12,7424	1,8743E-15	1,9740
Resíduo	2334,8667	261	8,9458			
Total	3246,8000	269				

Teste de Tukey com $\alpha = 0,05$:

$$\begin{array}{l}
 9 \text{ tratamentos} \\
 GL_{\text{RES}} = 261
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{l} 9 \text{ tratamentos} \\ GL_{\text{RES}} = 261 \end{array}} \right\} q_{5\%} = 4,39 \quad \Rightarrow \quad \Delta = 4,39 \times \sqrt{\frac{8,9458}{30}} = 2,397$$

A.2.2.) Diâmetros das porções médias dos colmos de cana-de-açúcar

Quadro ANOVA

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variação	CV
Tratamento 1	30	746	24,867	7,913	11,312
Tratamento 2	30	727	24,233	9,151	12,483
Tratamento 3	30	755	25,167	8,144	11,339
Tratamento 4	30	765	25,500	4,259	8,093
Tratamento 5	30	745	24,833	7,040	10,685
Tratamento 6	30	739	24,633	11,068	13,505
Tratamento 7	30	695	23,167	8,833	12,829
Tratamento 8	30	733	24,433	7,013	10,838
Tratamento 9	30	793	26,433	9,978	11,950

ANOVA

Fonte da variação	SQ	GL	QM	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	193,4519	8	24,1815	2,9651	0,0034	1,9740
Resíduo	2128,5333	261	8,1553			
Total	2321,9852	269				

Teste de Tukey com $\alpha = 0,05$:

$$\left. \begin{array}{l} 9 \text{ tratamentos} \\ GL_{\text{RES}} = 261 \end{array} \right\} q_{5\%} = 4,39 \quad \Rightarrow \quad \Delta = 4,39 \times \sqrt{\frac{8,1553}{30}} = 2,289$$

A.2.3.) Diâmetros das bases dos colmos de cana-de-açúcar

Quadro ANOVA

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variação	CV
Tratamento 1	30	785	26,167	10,420	12,336
Tratamento 2	30	806	26,867	8,051	10,561
Tratamento 3	30	844	28,133	11,706	12,161
Tratamento 4	30	861	28,700	4,631	7,498
Tratamento 5	30	844	28,133	10,878	11,723
Tratamento 6	30	834	27,800	10,579	11,700
Tratamento 7	30	801	26,700	10,010	11,850
Tratamento 8	30	856	28,533	10,326	11,262
Tratamento 9	30	867	28,900	10,714	11,326

ANOVA

Fonte da variação	SQ	GL	QM	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	225,6296	8	28,2037	2,9071	0,0040	1,9740
Resíduo	2532,1333	261	9,7017			
Total	2757,7630	269				

Teste de Tukey com $\alpha = 0,05$:

$$\left. \begin{array}{l} 9 \text{ tratamentos} \\ GL_{\text{RES}} = 261 \end{array} \right\} q_{5\%} = 4,39 \quad \Rightarrow \quad \Delta = 4,39 \times \sqrt{\frac{9,7017}{30}} = 2,496$$

A.2.4.) Diâmetros médios dos colmos de cana-de-açúcar

Quadro ANOVA

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variação	CV
Tratamento 1	30	740,667	24,689	7,302	10,945
Tratamento 2	30	750,333	25,011	9,184	12,117
Tratamento 3	30	763,333	25,444	6,853	10,288
Tratamento 4	30	779,000	25,967	3,259	6,953
Tratamento 5	30	749,000	24,967	5,803	9,649
Tratamento 6	30	746,333	24,878	8,617	11,799
Tratamento 7	30	676,333	22,544	6,134	10,986
Tratamento 8	30	757,333	25,244	6,582	10,163
Tratamento 9	30	755,667	25,189	5,515	9,323

ANOVA

Fonte da variação	SQ	GL	QM	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	217,3111	8	27,1639	4,1262	0,0001	1,9740
Resíduo	1718,2296	261	6,5833			
Total	1935,5407	269				

Teste de Tukey com $\alpha = 0,05$:

$$\left. \begin{array}{l} 9 \text{ tratamentos} \\ GL_{RES} = 261 \end{array} \right\} q_{5\%} = 4,39 \Rightarrow \Delta = 4,39 \times \sqrt{\frac{6,5833}{30}} = 2,056$$

A.2.5.) Quantidade inicial de folhas nos colmos de cana-de-açúcar

Quadro ANOVA

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variação	CV
Tratamento 1	30	123	4,100	3,886	48,082
Tratamento 2	30	154	5,133	4,878	43,026
Tratamento 3	30	124,14	4,138	1,774	32,188
Tratamento 4	30	110	3,667	3,195	48,752
Tratamento 5	30	111	3,700	3,528	50,762
Tratamento 6	30	144	4,800	5,131	47,191
Tratamento 7	30	88,97	2,966	2,516	53,486
Tratamento 8	30	103,45	3,448	2,316	44,135
Tratamento 9	30	134	4,467	4,671	48,388

ANOVA

Fonte da variação	SQ	GL	QM	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	111,8125	8	13,9766	3,9437	0,0002	1,9740
Resíduo	924,9862	261	3,5440			
Total	1036,7987	269				

Teste de Tukey com $\alpha = 0,05$:

$$\left. \begin{array}{l} 9 \text{ tratamentos} \\ GL_{RES} = 261 \end{array} \right\} q_{5\%} = 4,39 \Rightarrow \Delta = 4,39 \times \sqrt{\frac{3,5440}{30}} = 1,509$$

A.2.6.) Quantidade inicial de gemas nos colmos de cana-de-açúcar

Quadro ANOVA

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variação	CV
Tratamento 1	30	459	15,300	5,528	15,367
Tratamento 2	30	461	15,367	4,102	13,181
Tratamento 3	30	477	15,900	3,886	12,398
Tratamento 4	30	479	15,967	3,344	11,452
Tratamento 5	30	463	15,433	3,909	12,811

Tratamento 6	30	456	15,200	4,786	14,393
Tratamento 7	30	435	14,500	6,534	17,629
Tratamento 8	30	483	16,100	1,955	8,685
Tratamento 9	30	470	15,667	5,609	15,117

ANOVA

Fonte da variação	SQ	GL	QM	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	57,5185	8	7,1898	1,6318	0,1159	1,9740
Resíduo	1149,9667	261	4,4060			
Total	1207,4852	269				

Teste de Tukey com $\alpha = 0,05$:

$$\left. \begin{array}{l} 9 \text{ tratamentos} \\ GL_{RES} = 261 \end{array} \right\} q_{5\%} = 4,39 \Rightarrow \Delta = 4,39 \times \sqrt{\frac{4,4060}{30}} = 1,682$$

A.2.7.) Porcentagem de remoção de folhas com 1 passagem

Quadro ANOVA

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variação	CV
Tratamento 1	30	1215,556	40,519	1010,556	78,456
Tratamento 2	30	1897,024	63,234	589,663	38,402
Tratamento 3	30	1797,284	59,909	1201,241	57,852
Tratamento 4	30	1715,238	57,175	982,124	54,813
Tratamento 5	30	1867,338	62,245	1136,738	54,166
Tratamento 6	30	1614,841	53,828	878,472	55,062
Tratamento 7	30	778,571	25,952	978,525	120,534
Tratamento 8	30	1508,833	50,294	1109,919	66,241
Tratamento 9	30	1217,738	40,591	898,632	73,851

ANOVA

Fonte da variação	SQ	GL	QM	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	37339,0697	8	4667,3837	4,7811	1,6852E-05	1,9740
Resíduo	254790,2256	261	976,2078			
Total	292129,2952	269				

Teste de Tukey com $\alpha = 0,05$:

$$\left. \begin{array}{l} 9 \text{ tratamentos} \\ GL_{RES} = 261 \end{array} \right\} q_{5\%} = 4,424 \Rightarrow \Delta = 4,424 \times \sqrt{\frac{976,2078}{30}} = 25,236$$

A.2.8.) Porcentagem de remoção com 2 passagens

Quadro ANOVA

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variação	CV
Tratamento 1	30	1729,722	57,657	877,020	51,363
Tratamento 2	30	2475,729	82,524	310,103	21,339
Tratamento 3	30	2177,069	72,569	1008,706	43,765
Tratamento 4	30	2319,643	77,321	648,548	32,936
Tratamento 5	30	2213,171	73,772	843,552	39,370
Tratamento 6	30	2102,346	70,078	646,465	36,282
Tratamento 7	30	1367,143	45,571	1078,980	72,080
Tratamento 8	30	1904,000	63,467	887,995	46,953
Tratamento 9	30	1823,937	60,798	813,086	46,901

ANOVA

Fonte da variação	SQ	GL	QM	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	30937,3074	8	3867,1634	4,8921	1,2113E-05	1,9740
Resíduo	206319,2168	261	790,4951			
Total	237256,5242	269				

Teste de Tukey com $\alpha = 0,05$:

$$\left. \begin{array}{l} 9 \text{ tratamentos} \\ GL_{RES} = 261 \end{array} \right\} q_{5\%} = 4,424 \quad \Rightarrow \quad \Delta = 4,424 \times \sqrt{\frac{790,4951}{30}} = 22,709$$

A.2.9.) Porcentagem de gemas danificadas com 1 passagem

Quadro ANOVA

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variação	CV
Tratamento 1	30	252,446	8,415	64,041	95,100
Tratamento 2	30	394,327	13,144	60,539	59,194
Tratamento 3	30	472,706	15,757	151,410	78,092
Tratamento 4	30	417,997	13,933	73,377	61,479
Tratamento 5	30	337,127	11,238	86,576	82,799
Tratamento 6	30	413,988	13,800	78,227	64,093
Tratamento 7	30	71,291	2,376	14,955	162,735
Tratamento 8	30	245,141	8,171	30,567	67,660
Tratamento 9	30	205,029	6,834	49,386	102,827

ANOVA

Fonte da variação	SQ	GL	QM	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	4409,0755	8	551,1344	8,1438	7,957E-10	1,9740
Resíduo	17663,2522	261	67,6753			
Total	22072,3277	269				

Teste de Tukey com $\alpha = 0,05$:

$$\left. \begin{array}{l} 9 \text{ tratamentos} \\ GL_{\text{RES}} = 261 \end{array} \right\} q_{5\%} = 4,424 \quad \Rightarrow \quad \Delta = 4,424 \times \sqrt{\frac{67,6753}{30}} = 6,645$$

A.2.10.) Porcentagem de gemas danificadas com 2 passagens

Quadro ANOVA

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância	CV
Tratamento 1	30	500,421	16,681	172,103	78,647
Tratamento 2	30	796,474	26,549	176,931	50,102
Tratamento 3	30	886,826	29,561	193,928	47,109
Tratamento 4	30	681,775	22,726	125,612	49,317
Tratamento 5	30	617,090	20,570	91,566	46,520
Tratamento 6	30	809,693	26,990	108,048	38,513
Tratamento 7	30	198,956	6,632	60,245	117,037
Tratamento 8	30	528,212	17,607	95,133	55,396
Tratamento 9	30	483,533	16,118	82,615	56,393

ANOVA

Fonte da variação	SQ	GL	QM	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	12003,7709	8	1500,4714	12,2080	8,0388E-15	1,9740
Resíduo	32079,2545	261	122,9090			
Total	44083,0254	269				

Teste de Tukey com $\alpha = 0,05$:

$$\left. \begin{array}{l} 9 \text{ tratamentos} \\ GL_{\text{RES}} = 261 \end{array} \right\} q_{5\%} = 4,424 \quad \Rightarrow \quad \Delta = 4,424 \times \sqrt{\frac{122,9090}{30}} = 8,955$$

A.2.11.) Danos mecânicos visíveis nos topos dos colmos após 1 passagem

Quadro ANOVA

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Tratamento 1	30	0,000	0,000	0,000
Tratamento 2	30	0,000	0,000	0,000
Tratamento 3	30	0,000	0,000	0,000
Tratamento 4	30	0,000	0,000	0,000
Tratamento 5	30	6,000	0,200	1,200
Tratamento 6	30	2,000	0,067	0,064
Tratamento 7	30	0,000	0,000	0,000
Tratamento 8	30	0,000	0,000	0,000
Tratamento 9	30	0,000	0,000	0,000

ANOVA

Fonte da variação	SQ	GL	QM	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	1,0963	8	0,1370	0,9755	0,4555	1,9740
Resíduo	36,6667	261	0,1405			
Total	37,7630	269				

Teste de Tukey com $\alpha = 0,05$:

$$\left. \begin{array}{l} 9 \text{ tratamentos} \\ GL_{\text{RES}} = 261 \end{array} \right\} q_{5\%} = 4,424 \quad \Rightarrow \quad \Delta = 4,424 \times \sqrt{\frac{0,1405}{30}} = 0,303$$

A.2.12.) Danos mecânicos visíveis nos topos dos colmos após 2 passagens

Quadro ANOVA

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variação	CV
Tratamento 1	30	6,000	0,200	1,200	547,723
Tratamento 2	30	1,080	0,036	0,033	506,535
Tratamento 3	30	6,920	0,231	1,194	473,643
Tratamento 4	30	0,000	0,000	0,000	
Tratamento 5	30	12,410	0,414	2,312	367,536
Tratamento 6	30	6,660	0,222	0,575	341,486
Tratamento 7	30	0,000	0,000	0,000	
Tratamento 8	30	6,210	0,207	1,199	528,886
Tratamento 9	30	8,580	0,286	1,300	398,738

ANOVA

Fonte da variação	SQ	GL	QM	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	4,7029	8	0,5879	0,6772	0,7115	1,9740
Resíduo	226,5538	261	0,8680			
Total	231,2568	269				

Teste de Tukey com $\alpha = 0,05$:

$$\left. \begin{array}{l} 9 \text{ tratamentos} \\ GL_{\text{RES}} = 261 \end{array} \right\} q_{5\%} = 4,424 \quad \Rightarrow \quad \Delta = 4,424 \times \sqrt{\frac{0,8680}{30}} = 0,753$$

A.2.13.) Danos mecânicos visíveis nas porções médias dos colmos após 1 passagem

Quadro ANOVA

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variação	CV
Tratamento 1	30	0,000	0,000	0,000	
Tratamento 2	30	14,480	0,483	1,353	241,005
Tratamento 3	30	12,410	0,414	0,312	134,928
Tratamento 4	30	0,000	0,000	0,000	

Tratamento 5	30	3,000	0,100	0,300	547,723
Tratamento 6	30	8,000	0,267	1,306	428,510
Tratamento 7	30	0,000	0,000	0,000	
Tratamento 8	30	14,480	0,483	1,767	275,400
Tratamento 9	30	28,000	0,933	1,995	151,349

ANOVA

Fonte da variação	SQ	GL	QM	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	23,7548	8	2,9694	3,7999	0,00030675	1,9740
Resíduo	203,9506	261	0,7814			
Total	227,7054	269				

Teste de Tukey com $\alpha = 0,05$:

$$\left. \begin{array}{l} 9 \text{ tratamentos} \\ GL_{RES} = 261 \end{array} \right\} q_{5\%} = 4,424 \quad \Rightarrow \quad \Delta = 4,424 \times \sqrt{\frac{0,7814}{30}} = 0,714$$

A.2.14.) Danos mecânicos visíveis nas porções médias dos colmos após 2 passagens

Quadro ANOVA

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variação	CV
Tratamento 1	30	0,000	0,000	0,000	
Tratamento 2	30	35,360	1,179	4,349	176,921
Tratamento 3	30	49,600	1,653	4,617	129,959
Tratamento 4	30	0,000	0,000	0,000	
Tratamento 5	30	3,100	0,103	0,300	529,739
Tratamento 6	30	27,860	0,929	3,374	197,805
Tratamento 7	30	0,000	0,000	0,000	
Tratamento 8	30	31,030	1,034	3,826	189,119
Tratamento 9	30	60,000	2,000	2,345	76,564

ANOVA

Fonte da variação	SQ	GL	QM	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	143,3480	8	17,9185	8,5732	2,2812E-10	1,9740
Resíduo	545,5042	261	2,0901			
Total	688,8522	269				

Teste de Tukey com $\alpha = 0,05$:

$$\left. \begin{array}{l} 9 \text{ tratamentos} \\ GL_{RES} = 261 \end{array} \right\} q_{5\%} = 4,424 \quad \Rightarrow \quad \Delta = 4,424 \times \sqrt{\frac{2,0901}{30}} = 1,168$$

A.2.15.) Danos mecânicos visíveis nas bases dos colmos após 1 passagem

Quadro ANOVA

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variação	CV
Tratamento 1	30	6,000	0,200	0,372	305,129
Tratamento 2	30	6,210	0,207	0,440	320,430
Tratamento 3	30	13,450	0,448	0,730	190,583
Tratamento 4	30	4,000	0,133	0,189	325,629
Tratamento 5	30	53,000	1,767	3,151	100,471
Tratamento 6	30	29,000	0,967	2,033	147,512
Tratamento 7	30	0,000	0,000	0,000	
Tratamento 8	30	36,210	1,207	1,543	102,928
Tratamento 9	30	28,000	0,933	1,513	131,775

ANOVA

Fonte da variação	SQ	GL	QM	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	85,9978	8	10,7497	9,7030	8,84E-12	1,9740
Resíduo	289,1563	261	1,1079			
Total	375,1542	269				

Teste de Tukey com $\alpha = 0,05$:

$$\left. \begin{array}{l} 9 \text{ tratamentos} \\ GL_{\text{RES}} = 261 \end{array} \right\} q_{5\%} = 4,424 \quad \Rightarrow \quad \Delta = 4,424 \times \sqrt{\frac{1,1079}{30}} = 0,850$$

A.2.16.) Danos mecânicos visíveis nas bases dos colmos após 2 passagens

Quadro ANOVA

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variação	CV
Tratamento 1	30	6,000	0,200	0,372	305,129
Tratamento 2	30	27,860	0,929	1,788	143,994
Tratamento 3	30	32,140	1,071	1,512	114,788
Tratamento 4	30	5,170	0,172	0,212	266,958
Tratamento 5	30	76,550	2,552	3,075	68,721
Tratamento 6	30	61,120	2,037	2,861	83,020
Tratamento 7	30	1,000	0,033	0,033	547,723
Tratamento 8	30	74,480	2,483	2,181	59,482
Tratamento 9	30	50,000	1,667	1,885	82,378

ANOVA

Fonte da variação	SQ	GL	QM	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	236,5614	8	29,5702	19,1195	1,4703E-22	1,9740
Resíduo	403,6624	261	1,5466			
Total	640,2237	269				

Teste de Tukey com $\alpha = 0,05$:

$$\left. \begin{array}{l} 9 \text{ tratamentos} \\ GL_{\text{RES}} = 261 \end{array} \right\} q_{5\%} = 4,424 \quad \Rightarrow \quad \Delta = 4,424 \times \sqrt{\frac{1,5466}{30}} = 1,005$$

ANEXO A.3 - Análise Estatística entre Configurações

A.3.1.) Diâmetros dos topos dos colmos de cana-de-açúcar

Quadro ANOVA

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variação	CV
Configuração I	90	2100	23,333	12,831	15,352
Configuração II	90	2035	22,611	8,016	12,521
Configuração III	90	1823	20,256	10,395	15,917

ANOVA

Fonte da variação	SQ	GL	QM	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	466,2889	2	233,1444	22,3878	1,0264E-09	3,0296
Resíduo	2780,5111	267	10,4139			
Total	3246,8000	269				

Teste de Tukey com $\alpha = 0,05$:

$$\left. \begin{array}{l} 3 \text{ tratamentos} \\ GL_{\text{RES}} = 267 \end{array} \right\} q_{5\%} = 3,31 \quad \Rightarrow \quad \Delta = 3,31 \times \sqrt{\frac{10,4139}{90}} = 1,126$$

A.3.2.) Diâmetros das porções médias dos colmos de cana-de-açúcar

Quadro ANOVA

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variação	CV
Configuração I	90	2228	24,756	8,367	11,684
Configuração II	90	2249	24,989	7,427	10,906
Configuração III	90	2221	24,678	10,243	12,969

ANOVA

Fonte da variação	SQ	GL	QM	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	4,7185	2	2,3593	0,2718	0,7622	3,0296
Resíduo	2317,2667	267	8,6789			
Total	2321,9852	269				

Teste de Tukey com $\alpha = 0,05$:

$$\left. \begin{array}{l} 3 \text{ tratamentos} \\ GL_{\text{RES}} = 267 \end{array} \right\} q_{5\%} = 3,31 \quad \Rightarrow \quad \Delta = 3,31 \times \sqrt{\frac{8,6789}{90}} = 1,028$$

A.3.3.) Diâmetros das bases dos colmos de cana-de-açúcar

Quadro ANOVA

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância	CV
Configuração I	90	2435	27,056	10,502	11,978
Configuração II	90	2539	28,211	8,640	10,419
Configuração III	90	2524	28,044	11,054	11,855

ANOVA

Fonte da variação	SQ	GL	QM	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	70,2296	2	35,1148	3,4886	0,0319	3,0296
Resíduo	2687,5333	267	10,0657			
Total	2757,7630	269				

Teste de Tukey com $\alpha = 0,05$:

$$\left. \begin{array}{l} 3 \text{ tratamentos} \\ GL_{\text{RES}} = 267 \end{array} \right\} q_{5\%} = 3,31 \quad \Rightarrow \quad \Delta = 3,31 \times \sqrt{\frac{10,0657}{90}} = 1,107$$

A.3.4.) Diâmetros médios dos colmos de cana-de-açúcar

Quadro ANOVA

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância	CV
Configuração I	90	2254,333	25,048	7,702	11,079
Configuração II	90	2274,333	25,270	6,007	9,699
Configuração III	90	2189,333	24,326	7,546	11,292

ANOVA

Fonte da variação	SQ	GL	QM	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	43,8889	2	21,9444	3,0974	0,0468	3,0296
Resíduo	1891,6519	267	7,0848			
Total	1935,5407	269				

Teste de Tukey com $\alpha = 0,05$:

$$\left. \begin{array}{l} 3 \text{ tratamentos} \\ GL_{\text{RES}} = 267 \end{array} \right\} q_{5\%} = 3,31 \quad \Rightarrow \quad \Delta = 3,31 \times \sqrt{\frac{7,0848}{90}} = 0,929$$

A.3.5.) Quantidade inicial de folhas nos colmos de cana-de-açúcar

Quadro ANOVA

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variação	CV
Configuração I	90	401,14	4,457	3,665	42,954
Configuração II	90	365	4,056	4,143	50,189
Configuração III	90	326,42	3,627	3,493	51,527

ANOVA

Fonte da variação	SQ	GL	QM	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	31,0281	2	15,5141	4,1185	0,0173	3,0296
Resíduo	1005,7706	267	3,7669			
Total	1036,7987	269				

Teste de Tukey com $\alpha = 0,05$:

$$\left. \begin{array}{l} 3 \text{ tratamentos} \\ GL_{RES} = 267 \end{array} \right\} q_{5\%} = 3,31 \quad \Rightarrow \quad \Delta = 3,31 \times \sqrt{\frac{3,7669}{90}} = 0,677$$

A.3.6.) Quantidade inicial de gemas nos colmos de cana-de-açúcar

Quadro ANOVA

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variação	CV
Configuração I	90	1397	15,522	4,477	13,631
Configuração II	90	1398	15,533	4,027	12,919
Configuração III	90	1388	15,422	5,056	14,580

ANOVA

Fonte da variação	SQ	GL	QM	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,6741	2	0,3370	0,0746	0,9282	3,0296
Resíduo	1206,8111	267	4,5199			
Total	1207,4852	269				

Teste de Tukey com $\alpha = 0,05$:

$$\left. \begin{array}{l} 3 \text{ tratamentos} \\ GL_{RES} = 267 \end{array} \right\} q_{5\%} = 3,31 \quad \Rightarrow \quad \Delta = 3,31 \times \sqrt{\frac{4,5199}{90}} = 0,742$$

A.3.7.) Porcentagem de remoção de folhas com 1 passagem

Quadro ANOVA

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variação	CV
Configuração I	90	4909,864	54,554	1014,303	58,379

Configuração II	90	5197,417	57,749	988,765	54,450
Configuração III	90	3505,143	38,946	1074,551	84,169

ANOVA

Fonte da variação	SQ	GL	QM	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	18221,1831	2	9110,5915	8,8808	0,0002	3,0296
Resíduo	273908,1122	267	1025,8731			
Total	292129,2952	269				

Teste de Tukey com $\alpha = 0,05$:

$$\left. \begin{array}{l} 3 \text{ tratamentos} \\ GL_{RES} = 267 \end{array} \right\} q_{5\%} = 3,31 \quad \Rightarrow \quad \Delta = 3,31 \times \sqrt{\frac{1025,8731}{90}} = 11,175$$

A.3.8.) Porcentagem de remoção de folhas com 2 passagens

Quadro ANOVA

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variação	CV
Configuração I	90	6382,520	70,917	821,093	40,406
Configuração II	90	6635,160	73,724	705,679	36,033
Configuração III	90	5095,079	56,612	968,695	54,978

ANOVA

Fonte da variação	SQ	GL	QM	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	15159,9208	2	7579,9604	9,1125	0,0001	3,0296
Resíduo	222096,6034	267	831,8225			
Total	237256,5242	269				

Teste de Tukey com $\alpha = 0,05$:

$$\left. \begin{array}{l} 3 \text{ tratamentos} \\ GL_{RES} = 267 \end{array} \right\} q_{5\%} = 3,31 \quad \Rightarrow \quad \Delta = 3,31 \times \sqrt{\frac{831,8225}{90}} = 10,063$$

A.3.9.) Porcentagem de gemas danificadas com 1 passagem

Quadro ANOVA

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variação	CV
Configuração I	90	1119,479	12,439	99,266	80,099
Configuração II	90	1169,112	12,990	79,165	68,494
Configuração III	90	521,461	5,794	37,132	105,171

ANOVA

Fonte da variação	SQ	GL	QM	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	2887,1847	2	1443,5924	20,0905	7,4492E-09	3,0296

Resíduo	19185,1430	267	71,8545
Total	22072,3277	269	

Teste de Tukey com $\alpha = 0,05$:

$$\left. \begin{array}{l} 3 \text{ tratamentos} \\ GL_{\text{RES}} = 267 \end{array} \right\} q_{5\%} = 3,31 \quad \Rightarrow \quad \Delta = 3,31 \times \sqrt{\frac{71,8545}{90}} = 2,958$$

A.3.10.) Porcentagem de gemas danificadas com 2 passagens

Quadro ANOVA

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variação	CV
Configuração I	90	2183,720	24,264	207,522	59,371
Configuração II	90	2108,559	23,428	113,169	45,407
Configuração III	90	1210,701	13,452	101,442	74,871

ANOVA

Fonte da variação	SQ	GL	QM	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	6513,1921	2	3256,5960	23,1439	5,3804E-10	3,0296
Resíduo	37569,8334	267	140,7110			
Total	44083,0254	269				

Teste de Tukey com $\alpha = 0,05$:

$$\left. \begin{array}{l} 3 \text{ tratamentos} \\ GL_{\text{RES}} = 267 \end{array} \right\} q_{5\%} = 3,31 \quad \Rightarrow \quad \Delta = 3,31 \times \sqrt{\frac{140,7110}{90}} = 4,139$$

A.3.11.) Danos mecânicos visíveis nos topos dos colmos após 1 passagem

Quadro ANOVA

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variação
Configuração I	90	0,000	0,000	0,000
Configuração II	90	8,000	0,089	0,419
Configuração III	90	0,000	0,000	0,000

ANOVA

Fonte da variação	SQ	GL	QM	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,4741	2	0,2370	1,6973	0,1852	3,0296
Resíduo	37,2889	267	0,1397			
Total	37,7630	269				

Teste de Tukey com $\alpha = 0,05$:

$$\left. \begin{array}{l} 3 \text{ tratamentos} \\ GL_{\text{RES}} = 267 \end{array} \right\} q_{5\%} = 3,31 \quad \Rightarrow \quad \Delta = 3,31 \times \sqrt{\frac{0,1397}{90}} = 0,130$$

A.3.12.) Danos mecânicos visíveis nos topos dos colmos após 2 passagens

Quadro ANOVA

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variação	CV
Configuração I	90	14,000	0,156	0,798	574,330
Configuração II	90	19,070	0,212	0,969	464,658
Configuração III	90	14,790	0,164	0,829	554,056

ANOVA

Fonte da variação	SQ	GL	QM	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,1654	2	0,0827	0,0955	0,9089	3,0296
Resíduo	231,0914	267	0,8655			
Total	231,2568	269				

Teste de Tukey com $\alpha = 0,05$:

$$\left. \begin{array}{l} 3 \text{ tratamentos} \\ GL_{\text{RES}} = 267 \end{array} \right\} q_{5\%} = 3,31 \quad \Rightarrow \quad \Delta = 3,31 \times \sqrt{\frac{0,8655}{90}} = 0,325$$

A.3.13.) Danos mecânicos visíveis nas porções médias dos colmos após 1 passagem

Quadro ANOVA

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variação	CV
Configuração I	90	26,890	0,299	0,588	256,729
Configuração II	90	11,000	0,122	0,535	598,703
Configuração III	90	42,480	0,472	1,373	248,235

ANOVA

Fonte da variação	SQ	GL	QM	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	5,5057	2	2,7528	3,3079	0,0381	3,0296
Resíduo	222,1998	267	0,8322			
Total	227,7054	269				

Teste de Tukey com $\alpha = 0,05$:

$$\left. \begin{array}{l} 3 \text{ tratamentos} \\ GL_{\text{RES}} = 267 \end{array} \right\} q_{5\%} = 3,31 \quad \Rightarrow \quad \Delta = 3,31 \times \sqrt{\frac{0,8322}{90}} = 0,318$$

A.3.14.) Danos mecânicos visíveis nas porções médias dos colmos após 2 passagens

Quadro ANOVA

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variação	CV
Configuração I	90	84,960	0,944	3,410	195,611
Configuração II	90	30,960	0,344	1,372	340,475
Configuração III	90	91,030	1,011	2,685	162,014

ANOVA

Fonte da variação	SQ	GL	QM	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	24,3009	2	12,1505	4,8818	0,0083	3,0296
Resíduo	664,5512	267	2,4890			
Total	688,8522	269				

Teste de Tukey com $\alpha = 0,05$:

$$\left. \begin{array}{l} 3 \text{ tratamentos} \\ GL_{RES} = 267 \end{array} \right\} q_{5\%} = 3,31 \Rightarrow \Delta = 3,31 \times \sqrt{\frac{2,4890}{90}} = 0,551$$

A.3.15.) Danos mecânicos visíveis nas bases dos colmos após 1 passagem

Quadro ANOVA

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variação	CV
Configuração I	90	25,660	0,285	0,516	251,966
Configuração II	90	86,000	0,956	2,200	155,232
Configuração III	90	64,210	0,713	1,266	157,695

ANOVA

Fonte da variação	SQ	GL	QM	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	20,7475	2	10,3737	7,8153	0,0005	3,0296
Resíduo	354,4067	267	1,3274			
Total	375,1542	269				

Teste de Tukey com $\alpha = 0,05$:

$$\left. \begin{array}{l} 3 \text{ tratamentos} \\ GL_{RES} = 267 \end{array} \right\} q_{5\%} = 3,31 \Rightarrow \Delta = 3,31 \times \sqrt{\frac{1,3274}{90}} = 0,402$$

A.3.16.) Danos mecânicos visíveis nas bases dos colmos após 2 passagens

Quadro ANOVA

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variação	CV
Configuração I	90	66,000	0,733	1,344	158,090

Configuração II	90	142,840	1,587	3,060	110,213
Configuração III	90	125,480	1,394	2,384	110,751

ANOVA

Fonte da variação	SQ	GL	QM	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	36,0875	2	18,0438	7,9745	0,0004	3,0296
Resíduo	604,1362	267	2,2627			
Total	640,2237	269				

Teste de Tukey com $\alpha = 0,05$:

$$\left. \begin{array}{l} 3 \text{ tratamentos} \\ GL_{RES} = 267 \end{array} \right\} q_{5\%} = 3,31 \quad \Rightarrow \quad \Delta = 3,31 \times \sqrt{\frac{2,2627}{90}} = 0,525$$

ANEXO A.4 - Análise Estatística entre Cargas

A.4.1.) Diâmetros dos topos dos colmos de cana-de-açúcar

Quadro ANOVA

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variação	CV
Carga 1	90	1935	21,500	15,848	18,516
Carga 2	90	2059	22,878	10,917	14,443
Carga 3	90	1964	21,822	8,665	13,489

ANOVA

Fonte da variação	SQ	GL	QM	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	93,4889	2	46,7444	3,9580	0,0202	3,0296
Resíduo	3153,3111	267	11,8102			
Total	3246,8000	269				

Teste de Tukey com $\alpha = 0,05$:

$$\left. \begin{array}{l} 3 \text{ tratamentos} \\ GL_{RES} = 267 \end{array} \right\} q_{5\%} = 3,31 \quad \Rightarrow \quad \Delta = 3,31 \times \sqrt{\frac{11,8102}{90}} = 1,199$$

A.4.2.) Diâmetros das porções médias dos colmos de cana-de-açúcar

Quadro ANOVA

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variação	CV
Carga 1	90	2206	24,511	7,826	11,413
Carga 2	90	2205	24,500	7,624	11,270
Carga 3	90	2287	25,411	10,088	12,499

ANOVA

Fonte da variação	SQ	GL	QM	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	49,2074	2	24,6037	2,8904	0,0573	3,0296
Resíduo	2272,7778	267	8,5123			
Total	2321,9852	269				

Teste de Tukey com $\alpha = 0,05$:

$$\left. \begin{array}{l} 3 \text{ tratamentos} \\ GL_{\text{RES}} = 267 \end{array} \right\} q_{5\%} = 3,31 \Rightarrow \Delta = 3,31 \times \sqrt{\frac{8,5123}{90}} = 1,018$$

A.4.3.) Diâmetros das bases dos colmos de cana-de-açúcar

Quadro ANOVA

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variação	CV
Carga 1	90	2447	27,189	9,368	11,257
Carga 2	90	2506	27,844	10,043	11,381
Carga 3	90	2545	28,278	10,967	11,711

ANOVA

Fonte da variação	SQ	GL	QM	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	54,0963	2	27,0481	2,6711	0,0710	3,0296
Resíduo	2703,6667	267	10,1261			
Total	2757,7630	269				

Teste de Tukey com $\alpha = 0,05$:

$$\left. \begin{array}{l} 3 \text{ tratamentos} \\ GL_{\text{RES}} = 267 \end{array} \right\} q_{5\%} = 3,31 \Rightarrow \Delta = 3,31 \times \sqrt{\frac{10,1261}{90}} = 1,110$$

A.4.4.) Diâmetros médios dos colmos de cana-de-açúcar

Quadro ANOVA

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variação	CV
Carga 1	90	2196,000	24,400	7,456	11,191
Carga 2	90	2256,667	25,074	7,043	10,584
Carga 3	90	2265,333	25,170	6,892	10,430

ANOVA

Fonte da variação	SQ	GL	QM	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	31,7136	2	15,8568	2,2238	0,1102	3,0296
Resíduo	1903,8272	267	7,1304			
Total	1935,5407	269				

Teste de Tukey com $\alpha = 0,05$:

$$\left. \begin{array}{l} 3 \text{ tratamentos} \\ GL_{\text{RES}} = 267 \end{array} \right\} q_{5\%} = 3,31 \quad \Rightarrow \quad \Delta = 3,31 \times \sqrt{\frac{7,1304}{90}} = 0,932$$

A.4.5.) Quantidade inicial de folhas nos colmos de cana-de-açúcar

Quadro ANOVA

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variação	CV
Carga 1	90	321,97	3,577	3,348	51,149
Carga 2	90	368,45	4,094	4,051	49,162
Carga 3	90	402,14	4,468	3,846	43,890

ANOVA

Fonte da variação	SQ	GL	QM	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	36,0098	2	18,0049	4,8035	0,0069	3,0296
Resíduo	1000,7890	267	3,7483			
Total	1036,7987	269				

Teste de Tukey com $\alpha = 0,05$:

$$\left. \begin{array}{l} 3 \text{ tratamentos} \\ GL_{\text{RES}} = 267 \end{array} \right\} q_{5\%} = 3,31 \quad \Rightarrow \quad \Delta = 3,31 \times \sqrt{\frac{3,7483}{90}} = 0,675$$

A.4.6.) Quantidade inicial de gemas nos colmos de cana-de-açúcar

Quadro ANOVA

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variação	CV
Carga 1	90	1373	15,256	5,383	15,209
Carga 2	90	1407	15,633	3,358	11,722
Carga 3	90	1403	15,589	4,739	13,965

ANOVA

Fonte da variação	SQ	GL	QM	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	7,6741	2	3,8370	0,8539	0,4269	3,0296
Resíduo	1199,8111	267	4,4937			
Total	1207,4852	269				

Teste de Tukey com $\alpha = 0,05$:

$$\left. \begin{array}{l} 3 \text{ tratamentos} \\ GL_{\text{RES}} = 267 \end{array} \right\} q_{5\%} = 3,31 \quad \Rightarrow \quad \Delta = 3,31 \times \sqrt{\frac{4,4937}{90}} = 0,740$$

A.4.7.) Porcentagem de remoção de folhas com 1 passagem

Quadro ANOVA

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância	CV
Carga 1	90	3709,365	41,215	1132,688	81,658
Carga 2	90	5273,195	58,591	959,163	52,858
Carga 3	90	4629,864	51,443	1036,246	62,576

ANOVA

Fonte da variação	SQ	GL	QM	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	13728,7260	2	6864,3630	6,5833	0,0016	3,0296
Resíduo	278400,5692	267	1042,6988			
Total	292129,2952	269				

Teste de Tukey com $\alpha = 0,05$:

$$\left. \begin{array}{l} 3 \text{ tratamentos} \\ GL_{RES} = 267 \end{array} \right\} q_{5\%} = 3,31 \quad \Rightarrow \quad \Delta = 3,31 \times \sqrt{\frac{1042,6988}{90}} = 11,266$$

A.4.8.) Porcentagem de remoção de folhas com 2 passagens

Quadro ANOVA

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância	CV
Carga 1	90	5416,508	60,183	1021,798	53,114
Carga 2	90	6592,900	73,254	726,604	36,797
Carga 3	90	6103,352	67,815	830,206	42,488

ANOVA

Fonte da variação	SQ	GL	QM	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	7760,4030	2	3880,2015	4,5143	0,0118	3,0296
Resíduo	229496,1212	267	859,5360			
Total	237256,5242	269				

Teste de Tukey com $\alpha = 0,05$:

$$\left. \begin{array}{l} 3 \text{ tratamentos} \\ GL_{RES} = 267 \end{array} \right\} q_{5\%} = 3,31 \quad \Rightarrow \quad \Delta = 3,31 \times \sqrt{\frac{859,5360}{90}} = 10,229$$

A.4.9.) Porcentagem de gemas danificadas com 1 passagem

Quadro ANOVA

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância	CV
Carga 1	90	741,734	8,241	72,175	103,083

Carga 2	90	976,596	10,851	62,140	72,646
Carga 3	90	1091,722	12,130	105,745	84,773

ANOVA

Fonte da variação	SQ	GL	QM	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	707,0598	2	353,5299	4,4180	0,0130	3,0296
Resíduo	21365,2679	267	80,0197			
Total	22072,3277	269				

Teste de Tukey com $\alpha = 0,05$:

$$\left. \begin{array}{l} 3 \text{ tratamentos} \\ GL_{RES} = 267 \end{array} \right\} q_{5\%} = 3,31 \Rightarrow \Delta = 3,31 \times \sqrt{\frac{80,0197}{90}} = 3,121$$

A.4.10.) Porcentagem de gemas danificadas com 2 passagens

Quadro ANOVA

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variação	CV
Carga 1	90	1381,152	15,346	161,193	82,732
Carga 2	90	1941,776	21,575	132,474	53,347
Carga 3	90	2180,052	24,223	159,645	52,162

ANOVA

Fonte da variação	SQ	GL	QM	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	3738,2095	2	1869,1048	12,3696	7,285E-06	3,0296
Resíduo	40344,8159	267	151,1042			
Total	44083,0254	269				**

Teste de Tukey com $\alpha = 0,05$:

$$\left. \begin{array}{l} 3 \text{ tratamentos} \\ GL_{RES} = 267 \end{array} \right\} q_{5\%} = 3,31 \Rightarrow \Delta = 3,31 \times \sqrt{\frac{151,1042}{90}} = 4,289$$

A.4.11.) Danos mecânicos visíveis nos topos dos colmos após 1 passagem

Quadro ANOVA

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variação
Carga 1	90	0,000	0,000	0,000
Carga 2	90	6,000	0,067	0,400
Carga 3	90	2,000	0,022	0,022

ANOVA

Fonte da variação	SQ	GL	QM	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,2074	2	0,1037	0,7373	0,4794	3,0296

Resíduo	37,5556	267	0,1407
Total	37,7630	269	

Teste de Tukey com $\alpha = 0,05$:

$$\left. \begin{array}{l} 3 \text{ tratamentos} \\ GL_{\text{RES}} = 267 \end{array} \right\} q_{5\%} = 3,31 \quad \Rightarrow \quad \Delta = 3,31 \times \sqrt{\frac{0,1407}{90}} = 0,131$$

A.4.12.) Danos mecânicos visíveis nos topos dos colmos após 2 passagens

Quadro ANOVA

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variação	CV
Carga 1	90	6,000	0,067	0,400	948,683
Carga 2	90	19,700	0,219	1,179	495,993
Carga 3	90	22,160	0,246	1,001	406,294

ANOVA

Fonte da variação	SQ	GL	QM	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	1,6848	2	0,8424	0,9797	0,3768	3,0296
Resíduo	229,5720	267	0,8598			
Total	231,2568	269				

Teste de Tukey com $\alpha = 0,05$:

$$\left. \begin{array}{l} 3 \text{ tratamentos} \\ GL_{\text{RES}} = 267 \end{array} \right\} q_{5\%} = 3,31 \quad \Rightarrow \quad \Delta = 3,31 \times \sqrt{\frac{0,8598}{90}} = 0,324$$

A.4.13.) Danos mecânicos visíveis nas porções médias dos colmos após 1 passagem

Quadro ANOVA

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variação	CV
Carga 1	90	0,000	0,000	0,000	
Carga 2	90	31,960	0,355	1,147	301,632
Carga 3	90	48,410	0,538	1,260	208,675

ANOVA

Fonte da variação	SQ	GL	QM	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	13,4651	2	6,7325	8,3905	0,0003	3,0296
Resíduo	214,2403	267	0,8024			
Total	227,7054	269				

Teste de Tukey com $\alpha = 0,05$:

$$\left. \begin{array}{l} 3 \text{ tratamentos} \\ GL_{RES} = 267 \end{array} \right\} q_{5\%} = 3,31 \quad \Rightarrow \quad \Delta = 3,31 \times \sqrt{\frac{0,8024}{90}} = 0,313$$

A.4.14.) Danos mecânicos visíveis nas porções médias dos colmos após 2 passagens

Quadro ANOVA

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variação	CV
Carga 1	90	0,000	0,000	0,000	
Carga 2	90	69,490	0,772	2,991	223,991
Carga 3	90	137,460	1,527	3,569	123,698

ANOVA

Fonte da variação	SQ	GL	QM	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	104,9779	2	52,4889	24,0027	2,593E-10	3,0296
Resíduo	583,8743	267	2,1868			
Total	688,8522	269				

Teste de Tukey com $\alpha = 0,05$:

$$\left. \begin{array}{l} 3 \text{ tratamentos} \\ GL_{RES} = 267 \end{array} \right\} q_{5\%} = 3,31 \quad \Rightarrow \quad \Delta = 3,31 \times \sqrt{\frac{2,1868}{90}} = 0,516$$

A.4.15.) Danos mecânicos visíveis nas bases dos colmos após 1 passagem

Quadro ANOVA

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variação	CV
Carga 1	90	10,000	0,111	0,190	392,056
Carga 2	90	95,420	1,060	2,094	136,478
Carga 3	90	70,450	0,783	1,450	153,835

ANOVA

Fonte da variação	SQ	GL	QM	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	42,8677	2	21,4339	17,2226	9,2243E-08	3,0296
Resíduo	332,2865	267	1,2445			
Total	375,1542	269				

Teste de Tukey com $\alpha = 0,05$:

$$\left. \begin{array}{l} 3 \text{ tratamentos} \\ GL_{RES} = 267 \end{array} \right\} q_{5\%} = 3,31 \quad \Rightarrow \quad \Delta = 3,31 \times \sqrt{\frac{1,2445}{90}} = 0,389$$

A.4.16.) Danos mecânicos visíveis nas bases dos colmos após 2 passagens

Quadro ANOVA

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância	CV
Carga 1	90	12,170	0,135	0,207	336,100
Carga 2	90	178,890	1,988	2,863	85,127
Carga 3	90	143,260	1,592	2,199	93,166

ANOVA

Fonte da variação	SQ	GL	QM	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	171,2950	2	85,6475	48,7662	8,8609E-19	3,0296
Resíduo	468,9288	267	1,7563			
Total	640,2237	269				

Teste de Tukey com $\alpha = 0,05$:

$$\left. \begin{array}{l} 3 \text{ tratamentos} \\ GL_{RES} = 267 \end{array} \right\} q_{5\%} = 3,31 \quad \Rightarrow \quad \Delta = 3,31 \times \sqrt{\frac{1,7563}{90}} = 0,462$$

**ANEXO A.5 - Simulação do Modelo Matemático pelo software Mathematica for
Windows - v. 2.2.3.**

1.- Desenvolvimento das Equações de Lagrange

In[1]:=

```
t1[t];  
t2[t];  
t1'[t]=D[t1[t], t];  
t2'[t]=D[t2[t], t];  
t1''[t]=D[t1'[t], t];  
t2''[t]=D[t2'[t], t];
```

In[7]:=

```
x1=r1 Cos[t1[t]];  
y1=r1 Sin[t1[t]];  
x2=r2 Cos[t1[t]];  
y2=r2 Sin[t1[t]];  
x3=r2 Cos[t1[t]];  
y3=r2 Sin[t1[t]];  
x4=r3 Cos[t1[t]];  
y4=r3 Sin[t1[t]];  
x5=r2 Cos[t1[t]];  
y5=r2 Sin[t1[t]] + r4;
```

In[17]:=

```
SetAttributes[{r1,r2,r3,r4,ipcg1,ipcg2,ipcg3,mi,g,  
m1,m2,m3,k}, Constant]
```

In[18]:=

```

encinetica = m1/2 (D[x1,t]^2 + D[y1,t]^2) +
  (ipcg1 t1'[t]^2)/2 +
  m2/2 (D[x2,t]^2 + D[y2,t]^2) +
  (ipcg2 t2'[t]^2)/2 +
  m3/2 (D[x3,t]^2 + D[y3,t]^2) +
  (ipcg3 t1'[t]^2)/2

```

Out[18]=

$$\begin{aligned}
 & \frac{\text{ipcg1 } t_1'[t]^2}{2} + \frac{\text{ipcg3 } t_1'[t]^2}{2} + \\
 & \frac{(m_1 (r_1^2 \cos[t_1[t]] t_1'[t]^2 + r_1^2 \sin[t_1[t]] t_1'[t]^2))}{2} + \\
 & \frac{(m_2 (r_2^2 \cos[t_1[t]] t_1'[t]^2 + r_2^2 \sin[t_1[t]] t_1'[t]^2))}{2} + \\
 & \frac{(m_3 (r_2^2 \cos[t_1[t]] t_1'[t]^2 + r_2^2 \sin[t_1[t]] t_1'[t]^2))}{2} + \frac{\text{ipcg2 } t_2'[t]^2}{2}
 \end{aligned}$$

In[19]:=

```

enpotencial = m1 g r1 Sin[t1[t]] + m2 g r2 Sin[t1[t]] +
  m3 g r2 Sin[t1[t]] +
  k/2 (di - 2 r3 Sin[(t1[t] - t1[0])/2])^2 +
  fx[t] r4 t2[t]

```

Out[19]=

$$\begin{aligned}
 & g m_1 r_1 \sin[t_1[t]] + g m_2 r_2 \sin[t_1[t]] + \\
 & g m_3 r_2 \sin[t_1[t]] + \\
 & \frac{k (d_i - 2 r_3 \sin[\frac{-t_1[0] + t_1[t]}{2}])^2}{2} + r_4 f_x[t] t_2[t]
 \end{aligned}$$

In[20]:=

l=encinetica - enpotencial

Out[20]=

$$\begin{aligned}
 & -(g \, m1 \, r1 \, \text{Sin}[t1[t]]) - g \, m2 \, r2 \, \text{Sin}[t1[t]] - \\
 & \quad g \, m3 \, r2 \, \text{Sin}[t1[t]] - \\
 & \quad \frac{-t1[0] + t1[t] \quad 2}{2} \\
 & \quad k \, (d1 - 2 \, r3 \, \text{Sin}[\frac{-t1[0] + t1[t] \quad 2}{2}]) \\
 & \quad \frac{2}{2} \\
 & \quad r4 \, fx[t] \, t2[t] + \frac{ipcg1 \, t1'[t] \quad 2}{2} + \frac{ipcg3 \, t1'[t] \quad 2}{2} + \\
 & \quad (m1 \, (r1 \, \text{Cos}[t1[t]] \, t1'[t] \quad 2 + \\
 & \quad \quad r1 \, \text{Sin}[t1[t]] \, t1'[t] \quad 2)) / 2 + \\
 & \quad (m2 \, (r2 \, \text{Cos}[t1[t]] \, t1'[t] \quad 2 + \\
 & \quad \quad r2 \, \text{Sin}[t1[t]] \, t1'[t] \quad 2)) / 2 + \\
 & \quad (m3 \, (r2 \, \text{Cos}[t1[t]] \, t1'[t] \quad 2 + \\
 & \quad \quad r2 \, \text{Sin}[t1[t]] \, t1'[t] \quad 2)) / 2 + \frac{ipcg2 \, t2'[t] \quad 2}{2}
 \end{aligned}$$

In[21]:=

parcela11=D[D[l, t1'[t]], t]

Out[21]=

$$\begin{aligned}
 & ipcg1 \, t1''[t] + ipcg3 \, t1''[t] + \\
 & \quad (m1 \, (2 \, r1 \, \text{Cos}[t1[t]] \, t1''[t] + \\
 & \quad \quad 2 \, r1 \, \text{Sin}[t1[t]] \, t1''[t])) / 2 + \\
 & \quad (m2 \, (2 \, r2 \, \text{Cos}[t1[t]] \, t1''[t] + \\
 & \quad \quad 2 \, r2 \, \text{Sin}[t1[t]] \, t1''[t])) / 2 + \\
 & \quad (m3 \, (2 \, r2 \, \text{Cos}[t1[t]] \, t1''[t] + \\
 & \quad \quad 2 \, r2 \, \text{Sin}[t1[t]] \, t1''[t])) / 2
 \end{aligned}$$

In[22]:=

parcela12=D[1, t1[t]]

Out[22]=

$$-(g m1 r1 \cos[t1[t]]) - g m2 r2 \cos[t1[t]] - g m3 r2 \cos[t1[t]] + \frac{-t1[0] + t1[t]}{2} k r3 \cos\left[\frac{-t1[0] + t1[t]}{2}\right] \\ (d1 - 2 r3 \sin\left[\frac{-t1[0] + t1[t]}{2}\right])$$

In[23]:=

termo11=parcela11 + parcela12

Out[23]=

$$-(g m1 r1 \cos[t1[t]]) - g m2 r2 \cos[t1[t]] - g m3 r2 \cos[t1[t]] + \frac{-t1[0] + t1[t]}{2} k r3 \cos\left[\frac{-t1[0] + t1[t]}{2}\right] \\ (d1 - 2 r3 \sin\left[\frac{-t1[0] + t1[t]}{2}\right]) + ipcg1 t1''[t] + ipcg3 t1''[t] + (m1 \frac{2 r1 \cos[t1[t]] t1''[t] + 2 r1 \sin[t1[t]] t1''[t])}{2} / 2 + \\ (m2 \frac{2 r2 \cos[t1[t]] t1''[t] + 2 r2 \sin[t1[t]] t1''[t])}{2} / 2 + \\ (m3 \frac{2 r2 \cos[t1[t]] t1''[t] + 2 r2 \sin[t1[t]] t1''[t])}{2} / 2$$

In[24]:=

termo12=fx[t] D[x5, t1[t]] + fy[t] D[y5, t1[t]] + mt[t] D[t2[t], t1[t]]

Out[24]=

$$r2 \cos[t1[t]] fy[t] - r2 fx[t] \sin[t1[t]]$$

In[25]:=

parcela21=D[D[1, t2'[t]], t]

Out[25]=

$$ipcg2 t2''[t]$$

In[26]:=

parcela22=D[1, t2[t]]

Out[26]=

-(r4 fx[t])

In[27]:=

termo21=parcela21 + parcela22

Out[27]=

-(r4 fx[t]) + ipcg2 t2''[t]

In[28]:=

termo22=fx[t] D[x5, t2[t]] + fy[t] D[y5, t2[t]] +
mt[t] D[t2[t], t2[t]]

Out[28]=

mt[t]

In[29]:=

fx[t]=mi fy[t]

Out[29]=

mi fy[t]

In[30]:=

solução1=DSolve[termo11==termo12, fy[t], t]

Out[30]=

```
{fy[t] ->
  -((- (g m1 r1 Cos[t1[t]]) - g m2 r2 Cos[t1[t]] -
    g m3 r2 Cos[t1[t]] +
    -t1[0] + t1[t]
    di k r3 Cos[ $\frac{-t1[0] + t1[t]}{2}$ ]) -
    2 k r3 Cos[ $\frac{-t1[0] + t1[t]}{2}$ ]
    Sin[ $\frac{-t1[0] + t1[t]}{2}$ ] + ipcg1 t1''[t] +
    ipcg3 t1''[t] + m1 r1 Cos[t1[t]] t1''[t] +
    m2 r2 Cos[t1[t]] t1''[t] +
    m3 r2 Cos[t1[t]] t1''[t] +
    m1 r1 Sin[t1[t]] t1''[t] +
    m2 r2 Sin[t1[t]] t1''[t] +
    m3 r2 Sin[t1[t]] t1''[t]) /
  (- (r2 Cos[t1[t]]) + m1 r2 Sin[t1[t]]))}}
```

In[31]:=

solução2=DSolve[termo21==termo22, mt[t], t]

Out[31]=

```
{mt[t] -> - (m1 r4 fy[t]) + ipcg2 t2''[t]}
```

In[32]:=

fy[t]=Evaluate[fy[t] /. solução1];

In[33]:=

mt[t]=Evaluate[mt[t] /. solução2];

2.- Resultados numéricos das equações de Lagrange:

Os valores numéricos do dispositivo são dados abaixo:

In[34]:=

```
m1=16.8532;
m2=27.5395;
m3=1.6524;
ipcg1=.5420;
```

```

ipcg2=.2823;
ipcg3=.0019;
g=9.81;
r1=.275;
r4=.150;
r2=.550;
r3=.390;
mi=.6104;
k=10300;
di=.040;
t1[0]=0;

```

Adotando-se uma função para t1[t] (função "step", com amplitude "a" e frequência Pi rad/s)

In[49]:=

```

a=-.0109;
w=Pi;
t1[t]=4 a/Pi Sum[(1/(2 n-1)) Sin[(2 n-1) w t],
{n,1,10}]

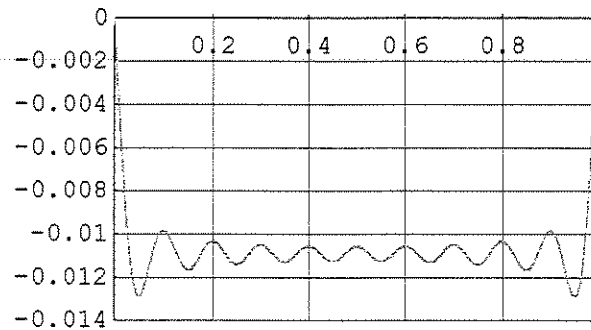
```

Out[51]=

$$\begin{aligned}
 & (-0.0436 \left(\sin[\pi t] + \frac{\sin[3 \pi t]}{3} + \frac{\sin[5 \pi t]}{5} + \right. \\
 & \quad \frac{\sin[7 \pi t]}{7} + \frac{\sin[9 \pi t]}{9} + \frac{\sin[11 \pi t]}{11} + \\
 & \quad \frac{\sin[13 \pi t]}{13} + \frac{\sin[15 \pi t]}{15} + \frac{\sin[17 \pi t]}{17} + \\
 & \quad \left. \frac{\sin[19 \pi t]}{19} \right) / \pi
 \end{aligned}$$

In[52]:=

```
Plot[Evaluate[t1[t]], {t, 0, 1},  
GridLines -> Automatic,  
Ticks -> Automatic,  
PlotStyle -> RGBColor[1, 0, 1],  
PlotRange -> {{0, 1}, {0, -0.014}}]
```



Out[52]=

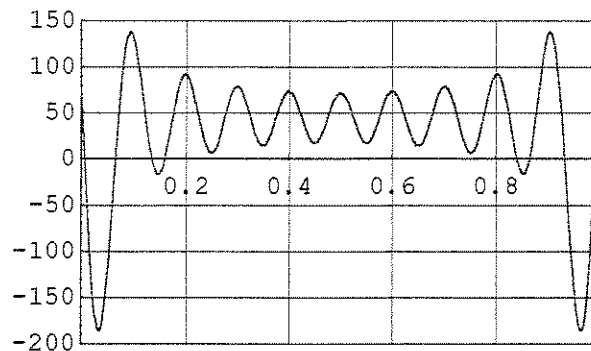
-Graphics-

In[53]:=

```
t1'[t]=D[t1[t], t];  
t1''[t]=D[t1'[t], t];
```

In[55]:=

```
Plot[Evaluate[fy[t]], {t, 0, 1},  
GridLines -> Automatic,  
Ticks -> Automatic,  
PlotStyle -> RGBColor[0, 0, 1],  
PlotRange -> {{0, 1}, {-200, 150}}]
```



Out[55]=

-Graphics-

In[56]:=

```
tabelafy1=Table[Evaluate[fy[t]], {t, 0.2, 0.8, .01}] // N;
```

In[57]:=

```
tabelaFlattenfy1=Flatten[tabelafy1];
```

In[58]:=

```
<<Statistics`DescriptiveStatistics`
```

In[59]:=

```
LocationReport[tabelaFlattenfy1]
```

Out[59]=

```
{Mean -> 46.3156, HarmonicMean -> 30.3938,  
Median -> 53.9293}
```

In[60]:=

```
t2'[t]=2 Pi n/60;  
t2''[t]=D[t2'[t], t];  
t2[t]=Integrate[t2'[t], t];
```

In[63]:=

```
mt[t]=-Evaluate[mt[t] /. solução2];
```

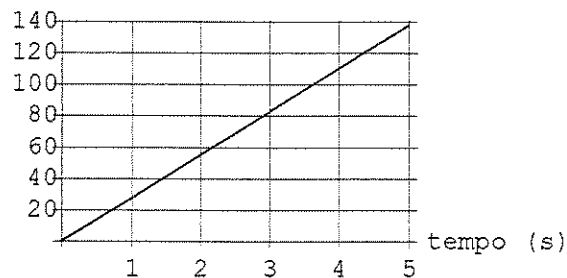
In[64]:=

```
n=263;
```

In[65]:=

```
Plot[Evaluate[t2[t]], {t, 0, 5},  
AxesLabel -> {"tempo (s)", "t2(t) (rad)"},  
GridLines -> Automatic,  
Ticks -> Automatic]
```

t2(t) (rad)

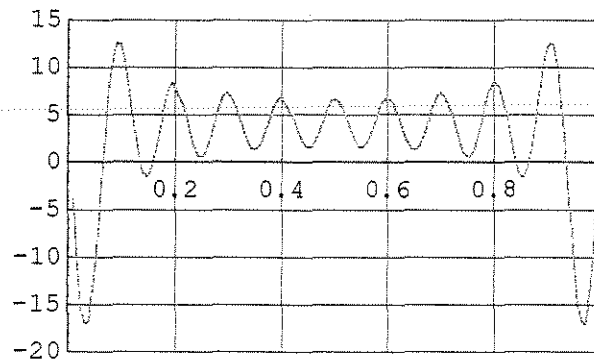


Out[65]=

-Graphics-

In[66]:=

```
Plot[Evaluate[mt[t]], {t, 0.01, 1},  
GridLines -> Automatic,  
PlotStyle -> RGBColor[1,0,1],  
PlotRange -> {{0,1}, {-20,15}}]
```



Out[66]=

-Graphics-

In[67]:=

```
tabelamt1=Table[Evaluate[mt[t]], {t, 0.2, 0.8, .01}] // N;
```

In[68]:=

```
tabelaFlattenmt1=Flatten[tabelamt1];
```

In[69]:=

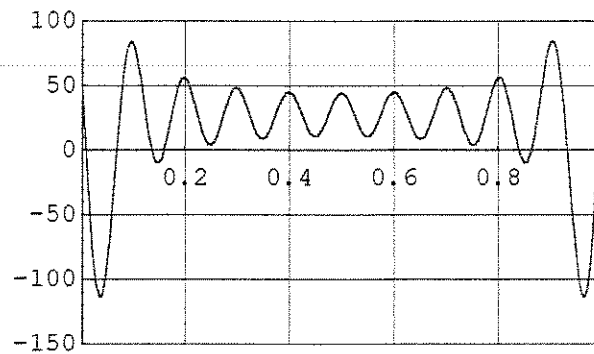
```
LocationReport[tabelaFlattenmt1]
```

Out[69]=

```
{Mean -> 4.24066, HarmonicMean -> 2.78285,  
Median -> 4.93776}
```

In[70]:=

```
Plot[Evaluate[fx[t]], {t, 0, 1},  
GridLines -> Automatic,  
Ticks -> Automatic,  
PlotStyle -> RGBColor[0, 0, 1],  
PlotRange -> {{0, 1}, {-150, 100}}]
```



Out[70]=

-Graphics-

In[71]:=

```
tabelafx1=Table[Evaluate[fx[t]], {t, 0.2, 0.8, .01}] // N;
```

In[72]:=

```
tabelaFlattenfx1=Flatten[tabelafx1];
```

In[73]:=

```
LocationReport[tabelaFlattenfx1]
```

Out[73]=

```
{Mean -> 28.271, HarmonicMean -> 18.5524,  
Median -> 32.9184}
```

In[74]:=

```
mi=.8278;
di=.040;
a=-.0120;
w=Pi;
t1[t]=4 a/Pi Sum[(1/(2 n-1)) Sin[(2 n-1) w t],
  {n,1,10}];
t1'[t]=D[t1[t], t];
t1''[t]=D[t1'[t], t];
tabelafy11=Table[Evaluate[fy[t]], {t, 0.2, 0.8, .01}]/N;
tabelaFlattenfy11=Flatten[tabelafy11];
LocationReport[tabelaFlattenfy11]
mt[t]=-Evaluate[mt[t] /. solução2];
tabelamt11=Table[Evaluate[mt[t]], {t, 0.2, 0.8, .01}] // N
tabelaFlattenmt11=Flatten[tabelamt11];
LocationReport[tabelaFlattenmt11]
tabelafx11=Table[Evaluate[fx[t]], {t, 0.2, 0.8, .01}]/N;
tabelaFlattenfx11=Flatten[tabelafx11];
LocationReport[tabelaFlattenfx11]
```

Out[83]=

```
{Mean -> 43.1413, HarmonicMean -> -4.59602,
  Median -> 51.4951}
```

Out[87]=

```
{Mean -> 5.35686, HarmonicMean -> -0.570688,
  Median -> 6.39414}
```

Out[90]=

```
{Mean -> 35.7124, HarmonicMean -> -3.80459,
  Median -> 42.6276}
```

In[91]:=

```
mi=.7314;  
di=.040;  
a=-.0115;  
w=Pi;  
t1[t]=4 a/Pi Sum[(1/(2 n-1)) Sin[(2 n-1) w t],  
  {n,1,10}];  
t1'[t]=D[t1[t], t];  
t1''[t]=D[t1'[t], t];  
tabelafy12=Table[Evaluate[fy[t]], {t, 0.2, 0.8, .01}]/N;  
tabelaFlattenfy12=Flatten[tabelafy12];  
LocationReport[tabelaFlattenfy12]  
mt[t]=-Evaluate[mt[t] /. solução2];  
tabelamt12=Table[Evaluate[mt[t]], {t, 0.2, 0.8, .01}]/N;  
tabelaFlattenmt12=Flatten[tabelamt12];  
LocationReport[tabelaFlattenmt12]  
tabelafx12=Table[Evaluate[fx[t]], {t, 0.2, 0.8, .01}]/N;  
tabelaFlattenfx12=Flatten[tabelafx12];  
LocationReport[tabelaFlattenfx12]
```

Out[100]=

```
{Mean -> 44.583, HarmonicMean -> 23.2103,  
  Median -> 52.6012}
```

Out[104]=

```
{Mean -> 4.8912, HarmonicMean -> 2.5464,  
  Median -> 5.77088}
```

Out[107]=

```
{Mean -> 32.608, HarmonicMean -> 16.976,  
  Median -> 38.4725}
```

In[108]:=

```
mi=.5387;  
di=.040;  
a=-.0109;  
w=Pi;  
t1[t]=4 a/Pi Sum[(1/(2 n-1)) Sin[(2 n-1) w t],  
  {n,1,10}];  
t1'[t]=D[t1[t], t];  
t1''[t]=D[t1'[t], t];  
tabela fy13=Table[Evaluate[fy[t]], {t, 0.2, 0.8, .01}]/N;  
tabelaFlattenfy13=Flatten[tabela fy13];  
LocationReport[tabelaFlattenfy13]  
mt[t]=-Evaluate[mt[t] /. solução2];  
tabela mt13=Table[Evaluate[mt[t]], {t, 0.2, 0.8, .01}]/N;  
tabelaFlattenmt13=Flatten[tabela mt13];  
LocationReport[tabelaFlattenmt13]  
tabela fx13=Table[Evaluate[fx[t]], {t, 0.2, 0.8, .01}]/N;  
tabelaFlattenfx13=Flatten[tabela fx13];  
LocationReport[tabelaFlattenfx13]
```

Out[117]=

```
{Mean -> 46.351, HarmonicMean -> 30.4178,  
Median -> 53.9707}
```

Out[121]=

```
{Mean -> 3.74539, HarmonicMean -> 2.45791,  
Median -> 4.36111}
```

Out[124]=

```
{Mean -> 24.9693, HarmonicMean -> 16.3861,  
Median -> 29.074}
```

In[125]:=

```
mi=.3588;
di=.040;
a=-.0100;
w=Pi;
t1[t]=4 a/Pi Sum[(1/(2 n-1)) Sin[(2 n-1) w t],
  {n,1,10}];
t1'[t]=D[t1[t], t];
t1''[t]=D[t1'[t], t];
tabelaFy14=Table[Evaluate[fy[t]], {t, 0.2, 0.8, .01}]/N;
tabelaFlattenfy14=Flatten[tabelaFy14];
LocationReport[tabelaFlattenfy14]
mt[t]=-Evaluate[mt[t] /. solução2];
tabelamt14=Table[Evaluate[mt[t]], {t, 0.2, 0.8, .01}]/N;
tabelaFlattenmt14=Flatten[tabelamt14];
LocationReport[tabelaFlattenmt14]
tabelafx14=Table[Evaluate[fx[t]], {t, 0.2, 0.8, .01}]/N;
tabelaFlattenfx14=Flatten[tabelafx14];
LocationReport[tabelaFlattenfx14]
```

Out[134]=

```
{Mean -> 48.9465, HarmonicMean -> 37.3957,
Median -> 55.9534}
```

Out[138]=

```
{Mean -> 2.6343, HarmonicMean -> 2.01264,
Median -> 3.01141}
```

Out[141]=

```
{Mean -> 17.562, HarmonicMean -> 13.4176,
Median -> 20.0761}
```

```

In[142]:=
mi=.6515;
di=.040;
a=-.0104;
w=Pi;
t1[t]=4 a/Pi Sum[(1/(2 n-1)) Sin[(2 n-1) w t],
  {n,1,10}];
t1'[t]=D[t1[t], t];
t1''[t]=D[t1'[t], t];
tabelafy15=Table[Evaluate[fy[t]], {t, 0.2, 0.8, .01}]/N;
tabelaFlattenfy15=Flatten[tabelafy15];
LocationReport[tabelaFlattenfy15]
mt[t]=-Evaluate[mt[t] /. solução2];
tabelamt15=Table[Evaluate[mt[t]], {t, 0.2, 0.8, .01}]/N;
tabelaFlattenmt15=Flatten[tabelamt15];
LocationReport[tabelaFlattenmt15]
tabelafx15=Table[Evaluate[fx[t]], {t, 0.2, 0.8, .01}]/N;
tabelaFlattenfx15=Flatten[tabelafx15];
LocationReport[tabelaFlattenfx15]

```

```

Out[151]=
{Mean -> 47.6899, HarmonicMean -> 34.4855,
  Median -> 54.9536}

```

```

Out[155]=
{Mean -> 4.66049, HarmonicMean -> 3.3701,
  Median -> 5.37034}

```

```

Out[158]=
{Mean -> 31.0699, HarmonicMean -> 22.4673,
  Median -> 35.8022}

```

```

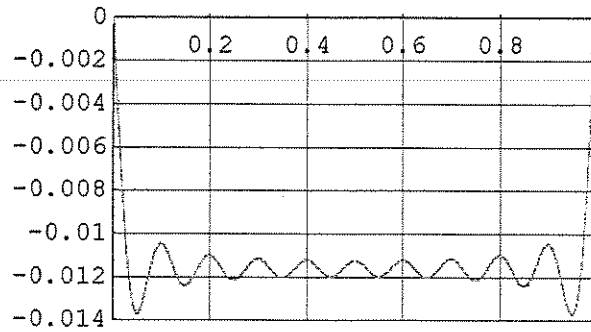
In[159]:=
mi=.3461;
k=10300;
di=.035;

In[162]:=
a=-.0116;
w=Pi;
t1[t]=4 a/Pi Sum[(1/(2 n-1)) Sin[(2 n-1) w t],
  {n,1,10}];

```

In[165]:=

```
Plot[Evaluate[t1[t]], {t, 0, 1},  
GridLines -> Automatic,  
Ticks -> Automatic,  
PlotStyle -> RGBColor[1, 0, 1],  
PlotRange -> {{0, 1}, {0, -0.014}}]
```



Out[165]=

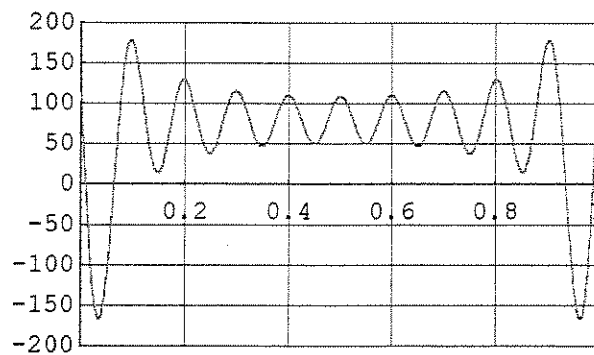
-Graphics-

In[166]:=

```
t1'[t]=D[t1[t], t];  
t1''[t]=D[t1'[t], t];
```

In[168]:=

```
Plot[Evaluate[fy[t]], {t, 0, 1},  
GridLines -> Automatic,  
Ticks -> Automatic,  
PlotStyle -> RGBColor[1, 0, 0],  
PlotRange -> {{0, 1}, {-200, 200}}]
```



Out[168]=

-Graphics-

In[169]:=

```
tabelafy2=Table[Evaluate[fy[t]], {t, 0.2, 0.8, .01}] // N;
```

In[170]:=

```
tabelaFlattenfy2=Flatten[tabelafy2];
```

In[171]:=

```
LocationReport[tabelaFlattenfy2]
```

Out[171]=

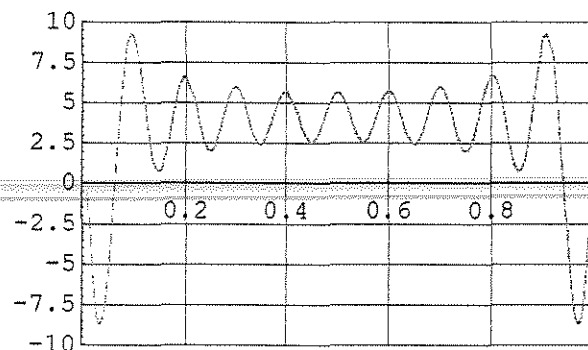
```
{Mean -> 80.8723, HarmonicMean -> 72.3481,  
Median -> 88.9979}
```

In[172]:=

```
mt[t]=Evaluate[mt[t] /. solucao2];
```

In[173]:=

```
Plot[Evaluate[mt[t]], {t, 0.01, 1},  
GridLines -> Automatic,  
PlotStyle -> RGBColor[1,0,1],  
PlotRange -> {{0,1}, {-10,10}}]
```



Out[173]=

```
-Graphics-
```

In[174]:=

```
tabelamt2=Table[Evaluate[mt[t]], {t, 0.2, 0.8, .01}] // N;
```

In[175]:=

```
tabelaFlattenmt2=Flatten[tabelamt2];
```

In[176]:=

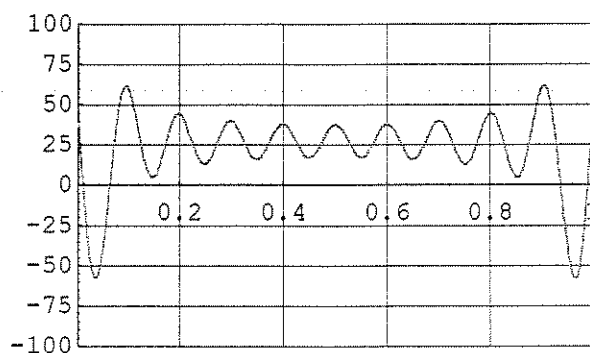
```
LocationReport[tabelaFlattenmt2]
```

Out[176]=

```
{Mean -> 4.19849, HarmonicMean -> 3.75595,  
Median -> 4.62033}
```

In[177]:=

```
Plot[Evaluate[fx[t]], {t, 0,1},  
GridLines -> Automatic,  
Ticks -> Automatic,  
PlotStyle -> RGBColor[1,0,0],  
PlotRange -> {{0,1}, {-100,100}}]
```



Out[177]=

-Graphics-

In[178]:=

```
tabelafx2=Table[Evaluate[fx[t]], {t, 0.2, 0.8, .01}] // N;
```

In[179]:=

```
tabelaFlattenfx2=Flatten[tabelafx2];
```

In[180]:=

```
LocationReport[tabelaFlattenfx2]
```

Out[180]=

```
{Mean -> 27.9899, HarmonicMean -> 25.0397,  
Median -> 30.8022}
```

In[181]:=

```
mi=.4056;  
di=.035;  
a=-.0116;  
w=Pi;  
t1[t]=4 a/Pi Sum[(1/(2 n-1)) Sin[(2 n-1) w t],  
  {n,1,10}];  
t1'[t]=D[t1[t], t];  
t1''[t]=D[t1'[t], t];  
tabelaFy21=Table[Evaluate[fy[t]], {t, 0.2, 0.8, .01}]/N;  
tabelaFlattenfy21=Flatten[tabelaFy21];  
LocationReport[tabelaFlattenfy21]  
mt[t]=-Evaluate[mt[t] /. solução2];  
tabelamt21=Table[Evaluate[mt[t]], {t, 0.2, 0.8, .01}]/N;  
tabelaFlattenmt21=Flatten[tabelamt21];  
LocationReport[tabelaFlattenmt21]  
tabelafx21=Table[Evaluate[fx[t]], {t, 0.2, 0.8, .01}]/N;  
tabelaFlattenfx21=Flatten[tabelafx21];  
LocationReport[tabelaFlattenfx21]
```

Out[190]=

```
{Mean -> 80.8173, HarmonicMean -> 72.298,  
  Median -> 88.9374}
```

Out[194]=

```
{Mean -> 4.91693, HarmonicMean -> 4.39861,  
  Median -> 5.41095}
```

Out[197]=

```
{Mean -> 32.7795, HarmonicMean -> 29.3241,  
  Median -> 36.073}
```

In[198]:=

```
mi=.2558;
di=.035;
a=-.0120;
w=Pi;
t1[t]=4 a/Pi Sum[(1/(2 n-1)) Sin[(2 n-1) w t],
  {n,1,10}];
t1'[t]=D[t1[t], t];
t1''[t]=D[t1'[t], t];
tabela fy22=Table[Evaluate[fy[t]], {t, 0.2, 0.8, .01}]/N;
tabelaFlattenfy22=Flatten[tabela fy22];
LocationReport[tabelaFlattenfy22]
mt[t]=-Evaluate[mt[t] /. solução2];
tabela mt22=Table[Evaluate[mt[t]], {t, 0.2, 0.8, .01}]/N;
tabelaFlattenmt22=Flatten[tabela mt22];
LocationReport[tabelaFlattenmt22]
tabela fx22=Table[Evaluate[fx[t]], {t, 0.2, 0.8, .01}]/N;
tabelaFlattenfx22=Flatten[tabela fx22];
LocationReport[tabelaFlattenfx22]
```

Out[207]=

```
{Mean -> 79.8398, HarmonicMean -> 70.5116,
  Median -> 88.2533}
```

Out[211]=

```
{Mean -> 3.06345, HarmonicMean -> 2.70553,
  Median -> 3.38628}
```

Out[214]=

```
{Mean -> 20.423, HarmonicMean -> 18.0369,
  Median -> 22.5752}
```

In[215]:=

```
mi=.2711;
di=.035;
a=-.0127;
w=Pi;
t1[t]=4 a/Pi Sum[(1/(2 n-1)) Sin[(2 n-1) w t],
  {n,1,10}];
t1'[t]=D[t1[t], t];
t1''[t]=D[t1'[t], t];
tabelafy23=Table[Evaluate[fy[t]], {t, 0.2, 0.8, .01}]/N;
tabelaFlattenfy23=Flatten[tabelafy23];
LocationReport[tabelaFlattenfy23]
mt[t]=-Evaluate[mt[t] /. solução2];
tabelamt23=Table[Evaluate[mt[t]], {t, 0.2, 0.8, .01}]/N;
tabelaFlattenmt23=Flatten[tabelamt23];
LocationReport[tabelaFlattenmt23]
tabelafx23=Table[Evaluate[fx[t]], {t, 0.2, 0.8, .01}]/N;
tabelaFlattenfx23=Flatten[tabelafx23];
LocationReport[tabelaFlattenfx23]
```

Out[224]=

```
{Mean -> 77.872, HarmonicMean -> 66.9954,
Median -> 86.7729}
```

Out[228]=

```
{Mean -> 3.16666, HarmonicMean -> 2.72437,
Median -> 3.52862}
```

Out[231]=

```
{Mean -> 21.1111, HarmonicMean -> 18.1625,
Median -> 23.5241}
```

In[232]:

```
mi=.6262;
di=.035;
a=-.0062;
w=Pi;
t1[t]=4 a/Pi Sum[(1/(2 n-1)) Sin[(2 n-1) w t],
  {n,1,10}];
t1'[t]=D[t1[t], t];
t1''[t]=D[t1'[t], t];
tabelaFy24=Table[Evaluate[fy[t]], {t, 0.2, 0.8, .01}]/N;
tabelaFlattenfy24=Flatten[tabelaFy24];
LocationReport[tabelaFlattenfy24]
mt[t]=-Evaluate[mt[t] /. solução2];
tabelamt24=Table[Evaluate[mt[t]], {t, 0.2, 0.8, .01}]/N;
tabelaFlattenmt24=Flatten[tabelamt24];
LocationReport[tabelaFlattenmt24]
tabelafx24=Table[Evaluate[fx[t]], {t, 0.2, 0.8, .01}]/N;
tabelaFlattenfx24=Flatten[tabelafx24];
LocationReport[tabelaFlattenfx24]
```

Out[241]:

```
{Mean -> 95.8248, HarmonicMean -> 93.8713,
Median -> 100.17}
```

Out[245]:

```
{Mean -> 9.00082, HarmonicMean -> 8.81734,
Median -> 9.40896}
```

Out[248]:

```
{Mean -> 60.0055, HarmonicMean -> 58.7822,
Median -> 62.7264}
```

In[249]:=

```
mi=.2395;
di=.035;
a=-.0155;
w=Pi;
t1[t]=4 a/Pi Sum[(1/(2 n-1)) Sin[(2 n-1) w t],
  {n,1,10}];
t1'[t]=D[t1[t], t];
t1''[t]=D[t1'[t], t];
tabelafy25=Table[Evaluate[fy[t]], {t, 0.2, 0.8, .01}]/N;
tabelaFlattenfy25=Flatten[tabelafy25];
LocationReport[tabelaFlattenfy25]
mt[t]=-Evaluate[mt[t] /. solucao2];
tabelamt25=Table[Evaluate[mt[t]], {t, 0.2, 0.8, .01}]/N;
tabelaFlattenmt25=Flatten[tabelamt25];
LocationReport[tabelaFlattenmt25]
tabelafx25=Table[Evaluate[fx[t]], {t, 0.2, 0.8, .01}]/N;
tabelaFlattenfx25=Flatten[tabelafx25];
LocationReport[tabelaFlattenfx25]
```

Out[258]=

```
{Mean -> 70.0986, HarmonicMean -> 49.7892,
Median -> 80.9588}
```

Out[262]=

```
{Mean -> 2.51829, HarmonicMean -> 1.78868,
Median -> 2.90844}
```

Out[265]=

```
{Mean -> 16.7886, HarmonicMean -> 11.9245,
Median -> 19.3896}
```