

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**PROJETO, CONSTRUÇÃO E AVALIAÇÃO DE UMA UNIDADE
DE DESPALHAMENTO PARA CANA-DE-AÇÚCAR.**

EFRAIM ALBRECHT NETO

CAMPINAS
JANEIRO DE 2006

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**PROJETO, CONSTRUÇÃO E AVALIAÇÃO DE UMA UNIDADE
DE DESPALHAMENTO PARA CANA-DE-AÇÚCAR.**

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

EFRAIM ALBRECHT NETO

Orientador: Prof. Dr. Oscar A. Braunbeck

CAMPINAS
JANEIRO DE 2006

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

Sa59L Albrecht Neto, Efraim
Projeto, construção e avaliação de uma unidade de
despalhamento para cana-de-açúcar / Efraim Albrecht
Neto. --Campinas, SP: [s.n.], 2006.

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

1. Cana-de-açúcar. 2. Cana-de-açúcar - Colheita. 3.
Máquinas agrícolas. 4. Colheita. I. Braunbeck, Oscar
Antonio. II. Universidade Estadual de Campinas.
Faculdade de Engenharia Agrícola. III. Título.

Título em Inglês: Design, construction and evaluation of a sugar cane detrasher

Palavras-chave em Inglês: Sugarcane, Mechanical harvester, Trash removal ,

Agriculture machine

Área de concentração: Máquinas Agrícolas

Titulação: Mestre em Engenharia Agrícola.

Banca examinadora: Paulo Sergio Graziano Magalhães, Jorge Luís Mangolini Neves

Data da defesa: 24/02/2006

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Oscar Braunbeck, pela dedicação e participação essencial para o desenvolvimento desse projeto, além de sua amizade, meu sincero agradecimento.

À CAPES e FAPESP, pelo apoio financeiro.

Sendo grande o número de pessoas que contribuíram para realização deste trabalho, gostaria que esse trecho fosse um especial agradecimento a todos, sem exceção.

SUMÁRIO

Lista de Tabelas	v
Lista de Figuras.....	vi
Resumo	viii
Abstract.....	ix
 1 Introdução	 1
 2 Revisão bibliográfica	 3
2.1 Importância sócio-econômica da cana-de-açúcar.....	3
2.2 A cultura da cana-de-açúcar	4
2.3 Sistemas de colheita da cana-de-açúcar	5
2.3.1 Sistema manual de colheita da cana-de-açúcar.....	6
2.3.2 Sistema semi-mecanizado de colheita da cana-de-açúcar.....	6
2.3.3 Sistema mecanizado de colheita da cana-de-açúcar	7
2.4 Qualidade da matéria-prima	9
2.5 Sistemas de limpeza da cana-de-açúcar	11
2.5.1 Sistema de limpeza para cana picada	11
2.5.2 Sistemas de limpeza para cana inteira.....	13
 3 Material e métodos	 18
3.1 Colmos de cana-de-açúcar.....	18
3.2 Sistema de acionamento da unidade de limpeza	18
3.3 Balança de precisão	19
3.4 Programas Computacionais	20
3.5 Unidade de despalhamento piloto	20

3.5.1 Modelagem cinemática da transmissão	22
3.5.2 Carga normal aplicada pela mola aos colmos	27
3.5.3 Projeto do mecanismo	29
3.5.4 Descrição dos fatores a serem avaliados.....	34
3.6 Avaliação do despalhador piloto	36
3.6.1 Análise estatística.....	39
4 Resultados e discussões	41
4.1 Características dimensionais dos colmos de cana-de-açúcar	41
4.2 Ensaios com a unidade de despalhamento piloto	42
4.3 Análise estatística dos resultados	43
4.3.1 Diagnóstico do Modelo	46
4.4 Análise dos fatores avaliados no ensaio	49
4.4.1 Determinação da velocidade de deslocamento dos colmos	50
4.4.2 Hipóteses consideradas no processo de despalhamento.....	53
5 Conclusões	59
6 Sugestões para futuras pesquisas	61
7 Referências Bibliográficas	62

Lista de Tabelas

TABELA 1 - Notas para avaliação dos danos mecânicos nos colmos.....	38
TABELA 2 - Valores adotados para cada fator na sequência de realização dos ensaios.....	39
TABELA 3 - Valores mínimo, máximo e médio do comprimento e diâmetro dos colmos.....	41
TABELA 4 - Massa de palhiço solto, aderido, total e eficiência de limpeza para cada ensaio.	42
TABELA 5 - Análise de variância (ANOVA) para a resposta eficiência de limpeza.....	44
TABELA 6 - Distância percorrida pelo colmo entre a saída do despalhador e o contato com o solo para as duas condições de velocidade.....	51
TABELA 7 - Valores dos trabalhos anteriores, observados e a diferença entre os dois para a velocidade de deslocamento do colmo em duas condições de velocidade.....	53

Lista de Figuras

FIGURA 1 - Visão esquemática das principais funções de uma colhedora de cana picada.	8
FIGURA 2 - Velocidade terminal obtida para diferentes partes dos colmos de cana-de-açúcar em função do seu diâmetro.....	12
FIGURA 3 - Seção transversal do modelo limpador por rolos puxadores.....	14
FIGURA 4 - Vista lateral do dispositivo de limpeza (TANAKA, 1996).....	15
FIGURA 5 - Despalhador inercial com facas oscilantes (PAGNANO, 1997).....	15
FIGURA 6 - Mecanismo de despalhe de cana-de-açúcar por rolos revestidos de borracha	16
FIGURA 7 - Modelo do rolo despalhador com taliscas retas (a) e do rolo despalhador com taliscas helicoidais (b) (SILVA, 2003).....	17
FIGURA 8 - Vista lateral do despalhador mostrando a disposição dos pares de rolos.....	20
FIGURA 9 - Princípio de limpeza empregado pelo despalhador.....	21
FIGURA 10 - Razões de velocidade entre rolos e pares de rolos.	22
FIGURA 11 - Desenho esquemático indicando as velocidades de rotação dos rolos.....	24
FIGURA 12 - Desenho esquemático do sistema de transmissão utilizado no despalhador.	26
FIGURA 13 - Vista do sistema de transmissão da unidade de despalhamento.....	27
FIGURA 14 - Ação da mola sobre o braço oscilante.	28
FIGURA 15 - Vista lateral direita da unidade de despalhamento.	29
FIGURA 16 - Vista lateral esquerda da unidade de despalhamento.	30
FIGURA 17 - Estrutura construída de perfis tubulares de parede fina.	31
FIGURA 18 - Vista de um dos braços oscilantes.....	32
FIGURA 19 - Vista das taliscas acopladas aos rolos despalhadores.....	34
FIGURA 20 - Velocidades de rotação dos rolos na configuração de velocidade I, onde a velocidade média de deslocamento dos colmos foi de 8 m.s^{-1}	35

FIGURA 21 - Velocidades de rotação dos rolos na configuração de velocidade II, onde a velocidade média de deslocamento dos colmos foi de 14 m.s^{-1} .	35
FIGURA 22 - Distância entre rolos.	36
FIGURA 23 - Amostra de cana-de-açúcar utilizada nos ensaios.	37
FIGURA 24 - Feixe de cana-de-açúcar após a limpeza manual da palha.	37
FIGURA 25 - Gráfico de Pareto para a resposta eficiência de limpeza.	45
FIGURA 26 - Gráfico de probabilidade normal para a resposta eficiência de limpeza.	47
FIGURA 27 - Gráfico dos resíduos na sequência de realização do ensaio	48
FIGURA 28 - Gráfico dos resíduos contra os valores estimados	49
FIGURA 29 - Distância, entre os pontos A e B, percorrida pelos colmos.	50
FIGURA 30 - Arco de contato entre talisca e colmo.	54
FIGURA 31 - Gráfico coeficiente de raspagem vs diferencial de velocidade DV	56
FIGURA 32 - Gráfico aceleração dos colmos vs velocidade tangencial dos rolos	57

Resumo

O sistema mecanizado de colheita da cana-de-açúcar utilizado atualmente no Brasil tem como característica a colheita de cana picada, necessita de altos investimentos para a sua implantação e gera perdas significativas de matéria-prima. Com o intuito de aproveitar a infraestrutura disponível nas usinas do país, bem como diminuir as perdas de matéria-prima na colheita, pesquisas têm sido realizadas para viabilizar a colheita mecanizada de cana inteira. Neste sistema, um dos principais obstáculos a ser superado é a remoção das folhas dos colmos de cana-de-açúcar. Este trabalho teve como objetivo projetar, construir e avaliar uma unidade de despalhamento piloto para cana-de-açúcar com rolos oscilantes montados em série, que será acoplada a uma colhedora de cana inteira. Para tanto foi avaliado a influência de três parâmetros operacionais na eficiência de limpeza do mecanismo. Dos três parâmetros analisados: distância entre rolos, carga aplicada pela mola aos colmos e velocidade tangencial dos rolos, o que apresentou maior influência sobre a eficiência de limpeza foi a velocidade tangencial dos rolos. A remoção do palhiço dos colmos de cana-de-açúcar ocorreu por intermédio da raspagem dos rolos e da força aplicada por estes aos colmos para provocar a aceleração observada nos mesmos.

Abstract

Mechanical harvesting of sugarcane in Brasil is done mainly through the chopped cane system which requires high capital investments and has high harvesting losses. A desirable harvesting system should take advantage of existing infra-structure, use harvesting principles associated with lower cane losses as well as utilize lower cost and simpler components. Under these conditions the whole stalk cane system has better characteristics to fulfill the above requirements. The objective of this work was to design, build and test a mechanical detrasher capable to be attached to a field whole stalk cane harvester. Three main factors related to detrashing efficiency were experimentally studied: clearance between upper and lower roller slats; level of spring load and tangential velocity of the rubbing slats. Roller speed was the main factor affecting detrashing performance. Direct rubbing action of slats on the cane stalks and inertial forces applied by the slats on the leaves were accounted for the main detrashing action.

1 Introdução

A cultura da cana-de-açúcar tem presença marcante na história do país, tendo contribuído de forma expressiva, durante séculos, para o seu desempenho econômico. O setor sucroalcooleiro constitui, nos tempos atuais, um segmento industrial importante, tanto pelo seu peso relativo no PIB - Produto Interno Bruto brasileiro, apenas o açúcar corresponde a 4% do total das exportações brasileiras, quanto pelo impacto social na criação de postos de trabalho (ULLER, 1999).

Neste contexto, o aproveitamento da planta da cana-de-açúcar evoluiu consideravelmente. No início era utilizado apenas o caldo, posteriormente surgiu a necessidade do bagaço e atualmente há uma tendência pelo aproveitamento do palhiço. Os princípios físicos envolvidos no processo de colheita devem acompanhar essas tendências fazendo com que os equipamentos de colheita sofram mudanças em todas as etapas do processo, desde o corte de base até o manuseio do produto colhido. O corte manual tem se mantido como a opção mais viável por mais de um século, entretanto, a evolução acima descrita coloca barreiras que obrigam a adoção de soluções mecanizadas para a colheita.

A evolução lenta da colheita mecânica no Estado e no País permite concluir que as soluções tecnológicas disponíveis não são suficientemente competitivas para atrair os usuários, pois existem limitadores que restringem sua implementação, como é o caso do sistema de limpeza, que não consegue uma alta eficiência e gera perdas consideráveis de matéria-prima.

Muitas pesquisas têm sido realizadas com o intuito de solucionar essa dificuldade, entretanto, o princípio operacional de limpeza pneumático, utilizado nas colhedoras de cana picada, encontra-se no seu limite de desempenho para o espaço físico máximo disponível nas colhedoras. Nessa condição extrema o sistema apresenta perdas de matéria-prima e não consegue retirar mais que 90% do palhiço contido nos colmos.

Com o intuito de melhorar os índices de colheita mecanizada da cultura da cana por meio do desenvolvimento de novos princípios de limpeza, a Faculdade de Engenharia Agrícola da Unicamp vem desenvolvendo vários trabalhos relacionados à limpeza de colmos

inteiros de cana-de-açúcar, como é o caso dos estudos de TANAKA (1996), OLIVEIRA (1998), PAGNANO (1997) e SILVA (2003).

De todos os sistemas propostos e avaliados para a limpeza da cana, o que se mostrou mais promissor foi o idealizado por TANAKA (1996) que, até então, operou processando um colmo de cana por vez, com apenas dois conjuntos de rolos em série. Aumentando o número de pares de rolos em série estima-se a melhora da eficiência de limpeza.

Para comprovar essa suposição, este trabalho terá como objetivos o projeto, construção e avaliação de uma unidade de limpeza piloto com quatro pares de rolos oscilantes, montados em séries, para ser acoplado a uma máquina de campo.

2 Revisão bibliográfica

2.1 Importância sócio-econômica da cana-de-açúcar

O agronegócio sucroalcooleiro movimenta cerca de R\$ 40 bilhões por ano, com faturamentos diretos e indiretos, o que corresponde a aproximadamente 2,35% do PIB nacional, além de ser um dos setores que mais emprega no país com a geração de 3,6 milhões de empregos diretos e indiretos e congregar mais de 72.000 agricultores (CANAWEB, 2005).

O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, seguido por Índia e Austrália. Na média, 55% da cana brasileira é utilizada para a fabricação do álcool e 45%, do açúcar. O processo de produção de cana, açúcar e álcool no Brasil tem diferença importante em relação ao de outros países: do plantio à comercialização do produto final tudo acontece sem intervenção ou subsídios do governo. Planta-se cana no Centro-Sul e no Norte-Nordeste, o que permite dois períodos de safra. Produz-se, portanto, o ano todo (ÚNICA, 2006).

Segundo MACEDO (2005) a competitividade econômica de uma atividade é fundamental para a sua sustentação; a indústria da cana-de-açúcar no Brasil tem avançado muito nesse sentido, com seus dois produtos principais. A competitividade do açúcar brasileiro é hoje indiscutível (é o de menor custo no mundo) e o Etanol consegue hoje ser competitivo com a gasolina (custos internacionais) sendo o primeiro combustível líquido renovável no mundo a atingir esta situação.

O Brasil detém atualmente uma tecnologia comprovada para produção de combustíveis renováveis em larga escala, e paralelamente reúne boas condições naturais (terras, clima e população) apropriados à expansão do cultivo de cana-de-açúcar para a produção em larga escala de etanol para combustível e como sucedâneo do petróleo no fornecimento de matéria-prima para a indústria química. Seja pelo baixo custo ou pelos bons indicadores de sustentabilidade energética, ambiental e social, o etanol brasileiro consolidou seu espaço no mercado interno e vem avançando no mercado internacional.

2.2 A cultura da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é cultivada em mais de cem países. Entre as culturas comerciais, é a que conseguiu desenvolver mais eficientemente o mecanismo da fotossíntese, o qual lhe permite fixar a energia solar e transformá-la em massa verde, composta fundamentalmente de açúcares, amidos, proteína e compostos lignocelulósicos, todos eles matérias primas para um amplo campo de produções de importância econômica. O seu fruto agrícola é o colmo, no qual se acumula sacarose durante o período de maturação (ULLER, 1999).

Segundo Wrigley (1982) citado por SHARPE (2003) a família da cana-de-açúcar é composta por seis espécies de gramíneas perenes do gênero *Saccharum L.*, da tribo *Andropogoneae*. Há duas espécies selvagens, *S. spontaneum* e *S. robustum* e 4 espécies cultivadas, *S. officinarum L.*, *S. Barberi*, *S. Sinense* e *S. Edule*. As quatro espécies cultivadas caracterizam-se como híbridos complexos e todas as canas comerciais cultivadas atualmente como híbridos inter-específicos. Entre os principais fatores considerados para a escolha das variedades comerciais estão o teor de sacarose, a resistência a doenças e pragas, a produtividade, a facilidade de brotação, a exigência do solo e o período útil de industrialização.

A planta se desenvolve formando touceiras, constituídas por partes aéreas (colmos e folhas) e partes subterrâneas (rizoma e raízes), sofrendo as influências das condições climáticas no curso do ano. Devido às necessidades de altas taxas de sacarose, ela precisa encontrar condições de temperatura e umidade adequadas que permitam um desenvolvimento suficiente durante a fase vegetativa, seguido de um período com restrição hídrica ou térmica para forçar o repouso vegetativo e o enriquecimento em sacarose na época do corte (ALFONSI et al. 1987).

A colheita da matéria-prima irá refletir todo o trabalho desenvolvido e implantado no campo, iniciado pela adequada seleção varietal em função de condições edafo-climáticas locais, passando por técnicas de preparo do solo, sulcação, plantio, adubação, tratos culturais e o próprio sistema de colheita adotado (RIPOLI e PARANHOS, 1987).

2.3 Sistemas de colheita da cana-de-açúcar

A colheita (corte e carregamento) e o transporte da matéria-prima do campo até a indústria representam ao redor de um terço do custo de produção da cana-de-açúcar. Nesta etapa crítica do processo produtivo ocorrem também as maiores perdas físicas de colmos, perdas de massa por evaporação, perdas de açúcares por deteriorações e inversões da sacarose e acréscimos de impureza.

Dentro de todo o processo produtivo da cana-de-açúcar a colheita é uma parte que ainda está em evolução, estando sujeita a mudanças freqüentes que envolvem alterações no espaçamento de plantio, variedades com características bastante diversificadas em termos de hábitos de crescimento, teor de folhas, facilidade para destacar as folhas dos colmos, teor de fibra e resistência ao tombamento. As exigências ambientais tem-se tornado mais severas demandando a colheita de colmos sem queima prévia e pode-se antecipar que os princípios da sustentabilidade conduzam a cultura da cana pelos caminhos do plantio direto e o controle de tráfego, visando reduzir os impactos da compactação provocada pelos atuais sistemas de colheita e transporte.

Segundo RIPOLI e PARANHOS (1987) os sistemas de colheita da cana-de-açúcar podem ser divididos, basicamente, em:

- 1) Sistema manual - onde o sub-sistema de corte e o sub-sistema de carregamento se processam manualmente, podendo haver um sub-sistema de transporte intermediário, por tração animal.
- 2) Sistema semi-mecanizado - envolve o sub-sistema de corte manual e o sub-sistema de carregamento por carregadoras mecânicas.
- 3) Sistema mecanizado - é aquele que se utiliza de um sub-sistema mecanizado com cortadoras mecânicas com sub-sistema de carregamento mecânico ou então, utiliza-se de sub-sistema por combinadas (colhedoras que cortam, picam, limpam parcialmente a matéria-prima e carregam na unidade de transporte).

2.3.1 Sistema manual de colheita da cana-de-açúcar

O corte manual caracteriza-se por uma série de eventos que o trabalhador braçal, de posse de uma ferramenta denominada de “folha”, “podão”, “facão”, etc., dependendo da região, utiliza para cortar e eliminar o material vegetal sem interesse para produção de álcool e açúcar (RIPOLI & RIPOLI, 2004).

De acordo com RIPOLI & MIALHE (1987) a colheita da cana-de-açúcar processou-se historicamente, sendo caracterizada pelas operações de corte dos colmos e seu carregamento nos veículos de transporte realizados manualmente em sua totalidade.

O carregamento manual existente até a década de 60 foi substituído pelo carregamento mecânico por meio de garra hidráulica, opção mais conhecida mundialmente e que, por sua simplicidade e baixo investimento, não foi ainda substituída por outros tipos de carregamento (BRAUNBECK e BANCHI, 1988). Deste modo, na maioria das propriedades agrícolas, o sistema manual de colheita de cana-de-açúcar não é mais empregado, sendo substituído pelo sistema semi-mecanizado que utiliza um sub-sistema de carregamento por carregadoras mecânicas.

2.3.2 Sistema semi-mecanizado de colheita da cana-de-açúcar

O sistema semi-mecanizado de colheita da cana-de-açúcar empregado atualmente, caracteriza-se por um sub-sistema de corte manual e um sub-sistema de carregamento por carregadoras mecânicas (RIPOLI e PARANHOS 1987).

Apesar de PEIXOTO e DELGADO (1988) enfatizarem que as operações de manejo da colheita da cana-de-açúcar, além de serem mais onerosas do seu processo produtivo, são as mais penosas para a execução manual, no Brasil a maior parte da colheita da cana-de-açúcar é realizada por meio do corte manual e carregamento mecânico.

A colheita manual de cana-de-açúcar pode se tornar menos atrativa para os trabalhadores por várias razões. Entretanto, alternativas mecânicas podem ser usadas quando o trabalho torna-se árduo. Países em desenvolvimento não devem, todavia apoiar sistemas

altamente mecanizados, mas devem buscar uma ótima combinação de trabalho e equipamentos para satisfazer suas características particulares (BEER 1980).

Segundo BEER et al. (1995) os seguintes fatores podem influenciar na produtividade do corte manual: variedades, projeto do facão, treinamento, alimentação, incentivos financeiros, estudos do trabalho, carregadoras mecânicas e auxílios mecânicos. Quanto aos auxílios mecânicos, os autores destacam que mecanismos relativamente simples, geralmente montados em tratores, têm sido desenvolvidos na Argentina, Barbados, Brasil, Costa Rica, Índia, Jamaica, Japão, África do Sul e Tailândia, sendo que atualmente existe ainda um alcance considerável para os mesmos, incluindo a necessidade de desenvolvimento de um auxílio para o despalhamento de cana crua.

Para BEER (1980), na situação da África do Sul com os auxílios mecânicos, a produtividade do trabalho pode ser aumentada de uma média de 4,5 para 15 toneladas por homem dia. Os custos de colheita podem ser mantidos razoavelmente baixos e podem ser bem menores do que aqueles de sistemas completamente mecanizados de cana-de-açúcar picada. Como as condições de colheita do Brasil são parecidas com as da África do Sul, acredita-se que conseguiremos os mesmos benefícios.

2.3.3 Sistema mecanizado de colheita da cana-de-açúcar

Segundo RIPOLI e MIALHE (1987) corte mecanizado é a designação que tem sido usada genericamente para nomear as diferentes formas de corte da cana-de-açúcar através da aplicação de energia mecânica fornecida por uma máquina motora (motor de combustão interna).

A tecnologia de colheita de cana picada que o país importou nos últimos anos vem se adaptando às condições de campo nacionais. Entretanto, isso é totalmente contrário ao método tradicional até então empregado no Brasil, a colheita da cana inteira; o que obrigou a indústria a investir uma elevada soma de recursos na substituição do sistema, tanto a nível de recepção como a nível de transporte (RIPOLI e PARANHOS, 1990).

O princípio de colheita mecânico de cana picada empregado atualmente no Brasil que combina a operação de colheita com a de carregamento surgiu na década de 50 na Austrália

(NEVES, 2003). De acordo com MAGALHÃES & BRAUNBECK (1998) trata-se de um equipamento (FIGURA 1) que corta uma fileira de cana por vez, utiliza um veículo que trafega paralelamente à colhedora para receber a matéria-prima e separa boa parte das folhas e ponteiros lançando-os ao solo da área colhida.

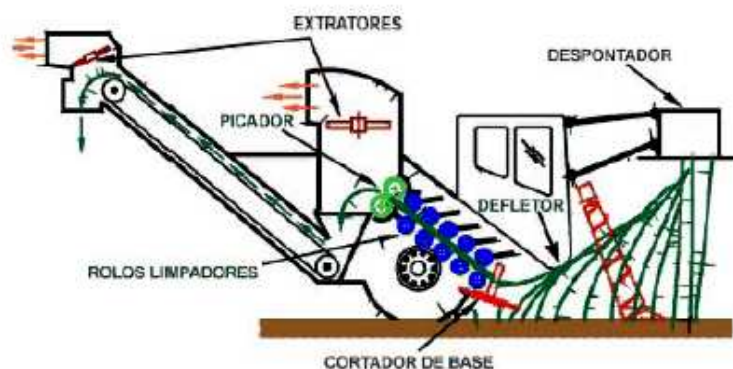


FIGURA 1 - Visão esquemática das principais funções de uma colhedora de cana picada.

A utilização dessas colhedoras vem crescendo nos últimos anos, já que se trata da única opção técnica e econômica para a realização da colheita da cana-de-açúcar crua. Na medida em que se aperfeiçoa o sistema, exige-se mais do ponto de vista operacional ou gerencial, além da qualidade da matéria-prima colhida (NEVES, 2003).

Uma das principais limitações das colhedoras de cana picada está relacionada aos mecanismos de corte de base e de limpeza. O mecanismo cortador é composto por dois discos que apresentam em suas extremidades facas fixas. Os discos posicionam-se na entrelinha da cultura durante a operação de corte, não se adaptando ao sistema de plantio em sulcos utilizados no Brasil e, como não apresentam recursos de flutuação ao realizar um corte rente a superfície, alimentam para o interior da colhedora uma elevada quantidade de terra (MAGALHÃES & BRAUNBECK, 1998).

Segundo KROES & HARRIS (1994) a colheita de cana picada provoca perdas consideráveis de matéria-prima, além disso, DE BEER et al. (1995) afirmam que, infelizmente, muitas usinas não podem utilizar todo o potencial dessas colhedoras. Fatores como tamanho da fazenda, layout do talhão, espaçamento das fileiras no plantio, pedras, falhas no gerenciamento e manutenção, problemas de logística, treinamento de operadores, recepção

da matéria-prima na indústria, alto custo de aquisição e principalmente áreas com topografia inclinada atuam contra um desempenho econômico aceitável das colhedoras de cana picada.

A declividade do terreno é um dos fatores limitantes para o uso de colhedoras de cana-de-açúcar, pois, na verdade, elas foram construídas basicamente para operar em terrenos planos como os encontrados em regiões canavieiras da Austrália e Flórida. Possuindo centro de gravidade elevado, essas máquinas podem operar até 12 % de declividade, além do qual corre-se o risco de acidentes por tombamento (RIPOLI & PARANHOS, 1987). Esse fator pode inviabilizar a produção de cana-de-açúcar em certas regiões do Estado de São Paulo, como a de Piracicaba, onde apenas 30% da área plantada pode ter colheita mecanizada devido a esta limitação.

Para MAGALHÃES & BRAUNBECK (1998) e NEVES (2003) a evolução tecnológica das colhedoras de cana-de-açúcar picada não foi significativa nos últimos anos, mantendo desde sua implementação nos canaviais, os mesmos conceitos nos vários sistemas de processamento e principalmente os mesmos componentes mecânicos, eletrônicos e hidráulicos, diferentemente do que ocorreu com as colhedoras de cereais.

2.4 Qualidade da matéria-prima

A cana-de-açúcar como matéria-prima pode ser definida como colmos em estágio adiantado de maturação, sadios, recém-cortados, normalmente despontados e livres de matéria estranha (STUPIELLO, 1987).

O conceito matéria estranha refere-se a tudo o que não for colmos ou rebolos de colmos maduros que acompanham a matéria prima, podendo ser dividido, em função de sua natureza, em matéria estranha vegetal (palmito, palha, folha, colmos secos) e matéria estranha mineral (pedra, terra). O teor de matéria estranha depende de vários fatores, onde se destacam as condições de cultivo, as características da variedade de cana-de-açúcar e do solo, a qualidade da queima e o tipo de máquina empregada na colheita (sistemas de corte de base e de despalhamento) (STUPIELLO & FERNANDES, 1984).

MORAES (1992) considera impureza toda a matéria estranha ao processamento industrial da cana-de-açúcar. O autor ainda relata que as impurezas vegetais como folhas,

ponteiros e raízes, compreendem a maior porcentagem de matéria estranha nas cargas transportadas à usina, seguida pelas impurezas minerais, como terra, pedras e possíveis pedaços de metal.

BURLEIGH (1988) discute os problemas que as impurezas causam tais como: aumento do custo de transporte; aumento da manutenção de equipamentos industriais e redução da eficiência de moagem e extração de sacarose. De acordo com LEGENDRE (1991) citado por RICHARD et al. (2001) em variedades de cana com baixo teor de açúcar, para cada 1% de impureza que vai junto com a cana a relação açúcar por tonelada de cana pode ser reduzida de 2,56 a 1,36 kg.

A colheita de cana picada provoca perdas consideráveis de matéria-prima, além disso propicia um aumento da exposição do colmo, por estar picado, ao ataque de microorganismos, como os fungos, que aceleram o seu processo de deterioração (KROES & HARRIS, 1994). Estes agentes transformam o açúcar em ácidos (lático e acético) e em gomas (dextrana); os quais interferem no processo industrial. Os ácidos são inibidores do processo de fermentação na matéria-prima e as gomas acarretam problemas nas operações de clarificação, cristalização e centrifugação, comprometendo a qualidade e a estocagem do açúcar.

Várias pesquisas comprovam esse problema. IVIN (1972) determinou a perda de açúcar e a formação de dextrana na matéria-prima para fabricação do açúcar, em função do tempo de armazenagem, tamanho e lesões existentes nos rebolos. Os resultados evidenciaram a deterioração da cana somente após 24 h, e o aumento de sua taxa com a diminuição do tamanho dos rebolos e acréscimo do grau de lesões. Quanto à concentração de dextrana, os níveis avaliados a 18 h nos rebolos com lesões, e a 36 h em rebolos pequenos podem causar dificuldades nos procedimentos industriais.

Sucessivamente, IVIN & BEVAN (1973) ainda com ênfase no tamanho e lesões existentes nos rebolos, após analisarem a concentração de dextrana, a perda de massa, os microorganismos viáveis e a variação da POL, CCS, e pureza, concluíram que até em condições favoráveis de colheita e armazenagem, acontecem deteriorações significativas a pequenos períodos após o corte, sendo que a taxa de deterioração para rebolos pequenos com lesões é aproximadamente o dobro da taxa dos rebolos maiores, num período de 12 a 24 h. valores semelhantes aos encontrados por STUPIELLO & FERNANDES (1984) em pesquisa realizada no Brasil.

2.5 Sistemas de limpeza da cana-de-açúcar

O conceito de colheita de cana-de-açúcar está sofrendo modificações em função de restrições legais e ambientais ao processo de queima, juntamente com a entrada em foco do aproveitamento do palhiço para aplicações, não consolidadas ainda comercialmente, tais como a geração de energia e a cobertura vegetal para a agricultura convencional ou orgânica. Perfila-se dessa forma um novo conceito de colheita, sem queima prévia, que visa o aproveitamento integral da cana (MAGALHÃES & BRAUNBECK, 1998).

Segundo ALBRECHT NETO & BRAUNBECK (2004) o processo tradicional de limpeza dos colmos pela gaseificação das folhas através da queima deixa de ser um processo de limpeza viável e ganham destaque os sistemas de limpeza mecânicos.

2.5.1 Sistema de limpeza para cana picada

Para a separação de folhas e colmos por meios mecânicos pode ser utilizado o processo de picagem e ventilação, onde a planta é cortada a intervalos de 200 a 250 mm e submetida posteriormente a uma corrente de ar para separar os rebolos dos fragmentos de palhiço cortados pelo picador. A eficiência desse processo, largamente aplicado em colhedoras de cana picada, mostra um comportamento antagônico entre a porcentagem de palhiço removido e as perdas de rebolos já que ambas aumentam com a velocidade da corrente de ar (ALBRECHT NETO e BRAUNBECK, 2004).

LEON (1974) utilizando um sistema pneumático de limpeza e transporte de cana, estudou o comportamento de diferentes partes da planta de cana-de-açúcar em fluxo de ar, bem como, a velocidade terminal e o coeficiente de arrasto para rebolos, topos e folhas, em função de vários parâmetros tecnológicos e biométricos. O autor conclui o trabalho afirmando que a separação pneumática de impurezas a partir da massa de cana tornar-se-á efetiva somente dentro de uma certa faixa de velocidade do ar, que será alta suficiente para as impurezas serem separadas e baixa o suficiente para evitar as perdas de cana no processo de limpeza.

MORAES (1992) em seu experimento evidenciou que os projetos existentes de colhedoras utilizam velocidades de ar ($20 - 22 \text{ m.s}^{-1}$) muito próximas da velocidade terminal dos rebolos (aproximadamente 25 m.s^{-1}), o que coloca uma porcentagem alta de rebolos em trajetória ascendente. Ao comparar a pesquisa de MORAES (1992), com os parâmetros levantados por LEON (1974) (FIGURA 2), é possível entender porque os sistemas de limpeza pneumática, utilizados pelas colhedoras de cana picada, não conseguem uma limpeza eficiente sem ter uma perda elevada de matéria-prima.

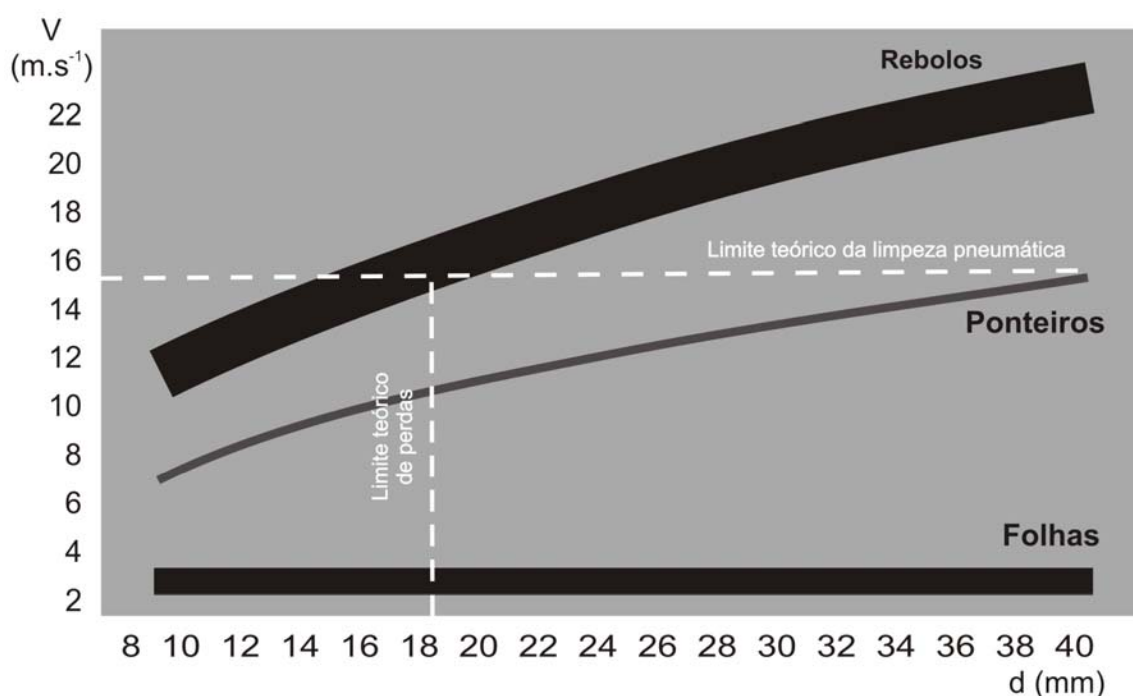


FIGURA 2 - Velocidade terminal obtida para diferentes partes dos colmos de cana-de-açúcar em função do seu diâmetro.

Fonte: Leon (1974)

Para YONGER (1980) os extratores são acionados hidráulicamente e consomem cerca de 52 hp da potência do motor. Em termos de consumo de combustível isto significa $11,3 \text{ L.h}^{-1}$. O sistema de extratores utiliza 25% da potência de saída do motor (20% da potência nominal) e representa 25% do custo total de uma colhedora padrão.

O decréscimo da qualidade tecnológica da matéria-prima e o aumento das perdas podem exceder qualquer redução de custos obtida pela mecanização (BURLEIGH, 1988) e a menor eficiência do sistema de colheita por colhedoras de cana picada, 83 a 91%, é devida às perdas invisíveis que podem variar de 5 a 10 %, durante a picagem e a limpeza.

SHAW e BROTHERTON (1992) avaliaram a colhedora da marca AUSTOFT modelo 7000, operando em cana crua, com o objetivo de quantificar as perdas de matéria-prima no extrator de acordo com o nível de limpeza pretendido. Os resultados dos testes apontaram perdas da ordem de 8,2 t.ha⁻¹ com 12 % de matéria estranha em cana ereta.

Por meio dos levantamentos de dados de perdas visíveis e invisíveis no processamento da matéria-prima pelas colhedoras comerciais de cana picada, MORAES (1992) obteve a média de perdas totais de 10%. Somente no extrator primário da colhedora, responsável pela limpeza, as perdas invisíveis foram da ordem de 2%. Em estudo similar, NEVES (2003) concluiu que as perdas de matéria-prima nos diferentes sistemas mecânicos das colhedoras de cana picada variam de 2 a 11%, sendo que a eficiência de limpeza ficou entre 74%, para a velocidade angular de rotação das pás do extrator primário de 1000 rpm e 89% para a velocidade de 1200 rpm.

2.5.2 Sistemas de limpeza para cana inteira

Buscando a diminuição das perdas ocorridas no campo, bem como o fornecimento de uma matéria-prima de alta qualidade para a indústria, novas soluções para a limpeza da cana-de-açúcar vêm sendo desenvolvidas.

Em 1983, SRIVASTAVA (1987) desenvolveu um equipamento operado manualmente para limpeza de cana inteira. Mesmo sendo um equipamento simples, muitos problemas foram observados. Após testarem vários modelos de dispositivos, SRIVASTAVA e SINGH (1990) chegaram a um modelo composto de dois cilindros (revestidos por lona) que giram em sentidos opostos, com lâminas giratórias que realizam a alimentação e retirada do colmo do mecanismo e um ventilador (FIGURA 3). Esta unidade é acionada pelo próprio trator.

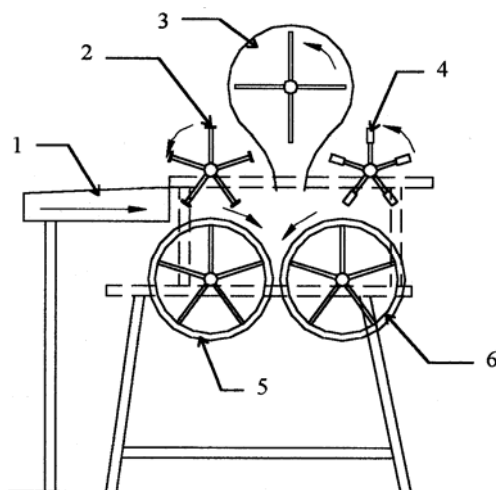


FIGURA 3 - Seção transversal do modelo limpador por rolos puxadores (SRIVASTAVA e SINGH, 1990).

SHUKLA et al. (1991) desenvolveram e testaram um protótipo que remove os topos e as folhas, semelhante ao desenvolvido por SRISVASTAVA e SINGH (1990). A diferença principal entre os modelos, é que neste a lâmina giratória foi substituída por um cilindro giratório que tem como função quebrar o topo do colmo em seu ponto fraco natural.

TANAKA (1996) estudou a remoção de folhas de colmos inteiros de cana-de-açúcar, por meio de um dispositivo de limpeza, desenvolvido em sua tese de Mestrado (FIGURA 4). O dispositivo era composto por rolos oscilantes com diferencial de velocidades entre os rolos superiores e inferiores e entre os pares de rolos adjacentes, possuindo molas helicoidais às quais eram aplicadas pré-cargas iniciais. Este pesquisador observou que a porcentagem de remoção das folhas variou de 45,6% a 82,5%, o que foi considerado como uma eficiência de remoção relativamente alta.

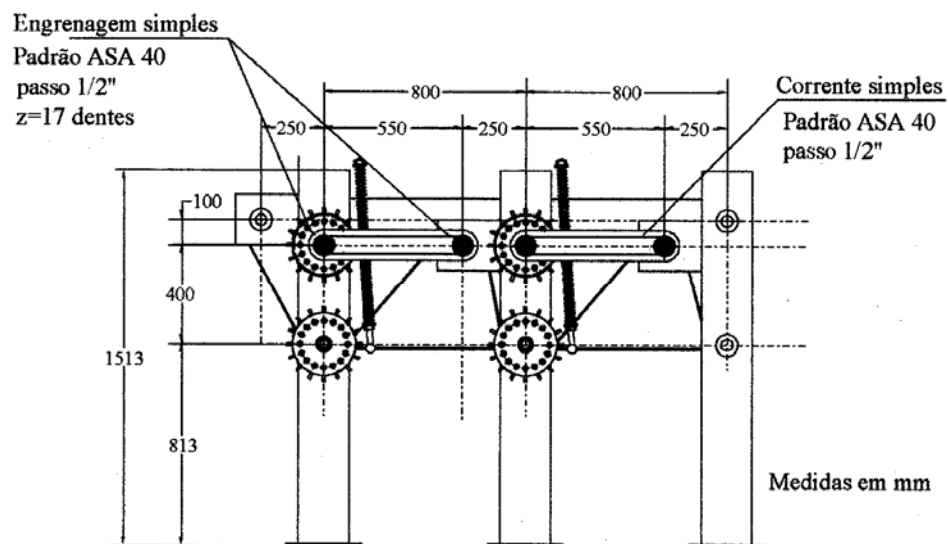


FIGURA 4 - Vista lateral do dispositivo de limpeza (TANAKA, 1996).

Com o objetivo de promover a remoção das folhas dos colmos de cana-de-açúcar inteiros, PAGNANO (1997) dimensionou, construiu e verificou o funcionamento de um despalhador inercial composto por facas oscilantes (FIGURA 5). O estudo concluiu que a utilização de facas com massa de 828g provoca uma pressão maior que a pressão suportada pelo colmo da cana (4,9 MPa). Desta maneira, devem ser utilizadas facas com menor massa no referido despalhador.

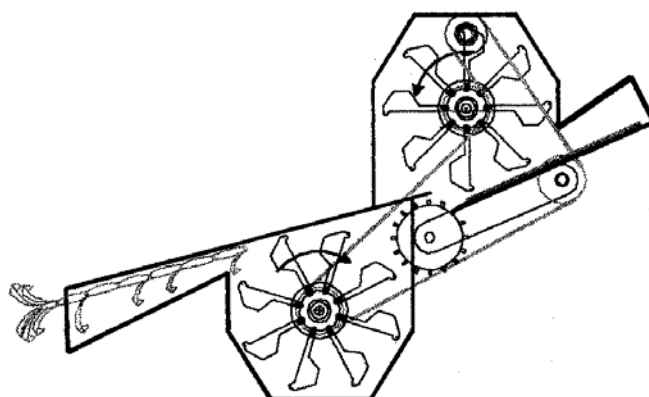


FIGURA 5 - Despalhador inercial com facas oscilantes (PAGNANO, 1997).

OLIVEIRA (1998) após discriminar mecanicamente a ruptura da folha da cana-de-açúcar a diferentes ângulos de tração e diferentes taxas de deformação, construiu um mecanismo de rolos justapostos (“snappers”) e, a três diferentes velocidades de rotação dos rolos, quantificou a sua eficiência de limpeza. O mecanismo (FIGURA 6), que tem como finalidade a remoção das folhas por tração, em condições reais de trabalho obteve sua maior eficiência (5,6 %) a uma velocidade tangencial dos rolos de 0,53 m/s. Esse resultando mostrou uma baixa eficiência, o que torna o mecanismo de limpeza inviável como dispositivo de remoção de folhas.

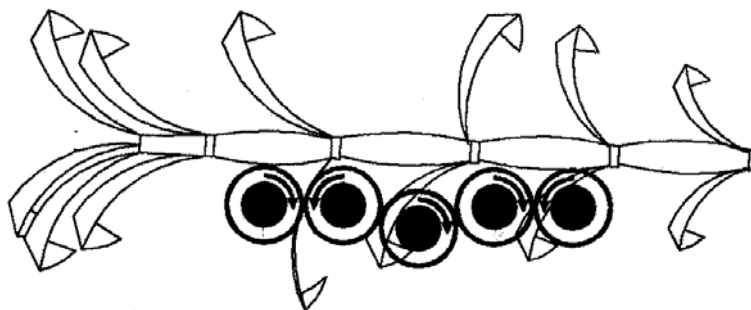


FIGURA 6 - Mecanismo de despálhe de cana-de-açúcar por rolos revestidos de borracha (OLIVEIRA, 1998).

SILVA (2003) realizou um processo de aprimoramento no despalhador construído por TANAKA (1996), promovendo uma alteração no diferencial de velocidade e substituição dos rolos despalhadores com taliscas dispostas axialmente, por rolos de taliscas dispostas helicoidalmente com ângulos de hélice de 45° (FIGURA 7). Estes rolos foram utilizados com o intuito de promover um maior contato perimetral entre o colmo e as taliscas provocando um maior atrito, aumentando, conseqüentemente a força de despalhamento.



FIGURA 7 - Modelo do rolo despalhador com taliscas retas (a) e do rolo despalhador com taliscas helicoidais (b) (SILVA, 2003).

Diante das informações apresentadas anteriormente neste capítulo é possível concluir que esforços estão sendo feitos para desenvolver um sistema que promova a separação entre o palhico e os colmos de cana-de-açúcar. Todavia, até o momento, nenhum trabalho realizado com este intuito conseguiu oferecer um equipamento viável quanto à sua eficiência de limpeza e possibilidade de vir a equipar uma colhedora comercial. Deste modo, o escopo deste trabalho consiste no projeto, construção e avaliação de uma unidade de limpeza piloto para ser acoplada a uma máquina de campo.

3 Material e métodos

A unidade de despalhamento piloto foi projetada, construída e submetida a ensaios que simularam a operação de colheita no campo. As influências de 03 fatores sobre o desempenho do mecanismo foram analisadas em função da massa de folhas retirada dos colmos de cana-de-açúcar nos diversos tratamentos.

3.1 Colmos de cana-de-açúcar

Para avaliar a influência dos fatores no desempenho da unidade, foram utilizados colmos de cana-de-açúcar pertencentes a um talhão que seria destinado a cana muda, no qual o canavial não havia atingido o ponto ideal de maturação. Esta característica diferencial foi o fator de sua escolha para a avaliação, por propiciar uma condição de limpeza adversa para o dispositivo.

A seguir são listadas suas características:

- Variedade comercial: SP 832847
- Número de cortes: primeiro corte
- Idade do canavial: 11 meses
- Disposição dos colmos: eretos
- Tipo de plantio: 1,40 m entre linhas
- Teor de fibra: 13,7 %

3.2 Sistema de acionamento da unidade de limpeza

O acionamento da unidade foi realizado por um motor elétrico ligado a um inversor de frequência, cujas especificações são relatadas a seguir.

a) Inversor de frequência:

- Marca: WEG
- Modelo: CFW09
- Tipo de alimentação: Fonte Chaveada
- Microcontrolador: Tipo RISC 32 bits
- Tipos de controle: Escalar e vetorial
- Frequência: 50 / 60 Hz +/- 2 Hz (48 a 62 Hz)
- Variação de frequência: 0 a 204 Hz
- Grau de proteção: NEMA 1 / IP 20

b) Motor elétrico:

- Marca: WEG
- Trifásico de indução, 4 pólos, 60Hz;
- Potência: 5 HP;
- Rotação nominal: 1715 RPM;
- Corrente nominal: 14 A;
- Corrente de partida: 106;
- Torque nominal: 20,6 Nm;
- Grau de Proteção: IP55.

3.3 Balança de precisão

Para quantificar a massa de folhas retirada dos colmos de cana-de-açúcar, foi utilizada uma balança de precisão marca URANO, modelo UDC 30000/10 com capacidade máxima de 33 kg e divisão de 0,01 kg.

3.4 Programas Computacionais

Durante o desenvolvimento e avaliação do dispositivo foram utilizados os softwares do pacote Microsoft® Office 2003. Além destes, utilizou-se o software Solid Edge® version 17 para elaboração dos desenhos do projeto mecânico, o software Matlab® version 6.5 para modelagens e simulações e o software STATGRAPHICS Plus 4.1 para o planejamento experimental e análise estatística dos dados.

3.5 Unidade de despalhamento piloto

Com base nos resultados dos trabalhos de TANAKA (1996) e SILVA (2003), foi projetado e construído um despalhador com rolos oscilantes montados em série. A unidade de limpeza é constituída de uma estrutura, onde estão montados 04 pares de rolos, sendo cada par de rolos constituído de um rolo superior oscilante e outro inferior fixo (FIGURA 8).

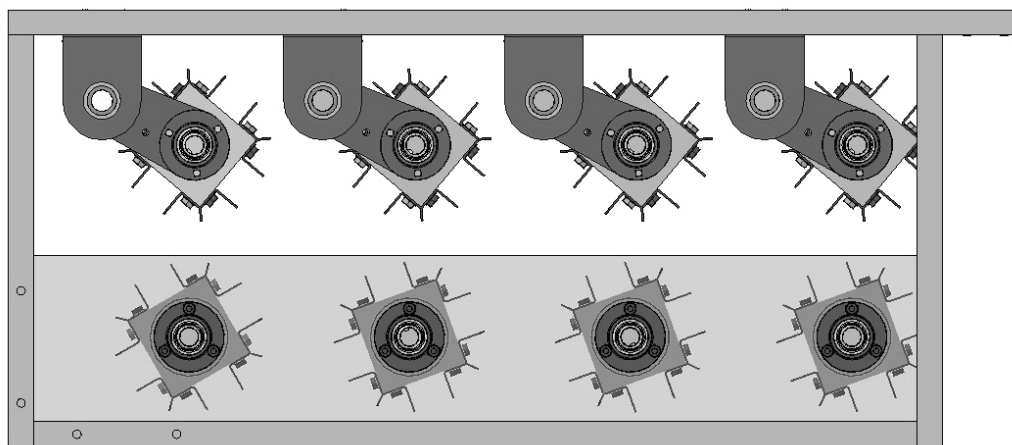


FIGURA 8 - Vista lateral do despalhador mostrando a disposição dos pares de rolos.

Os rolos superiores e inferiores giram em sentidos opostos e possuem uma razão de velocidades tangenciais entre eles (K_v), a qual promove o desenvolvimento de forças tangenciais de sentidos opostos (FIGURA 9). Essas forças surgem como consequência da

força normal aplicada ao colmo e o coeficiente de atrito correspondente, sendo que atuam simultaneamente e sofrem um deslizamento no sentido do eixo longitudinal do colmo.

O princípio de limpeza empregado pelo despalhador baseia-se no atrito entre taliscas (rolos) e colmos de cana-de-açúcar, onde a combinação das forças tangenciais de sentidos opostos com o deslocamento do colmo é responsável pelo destacamento das folhas.

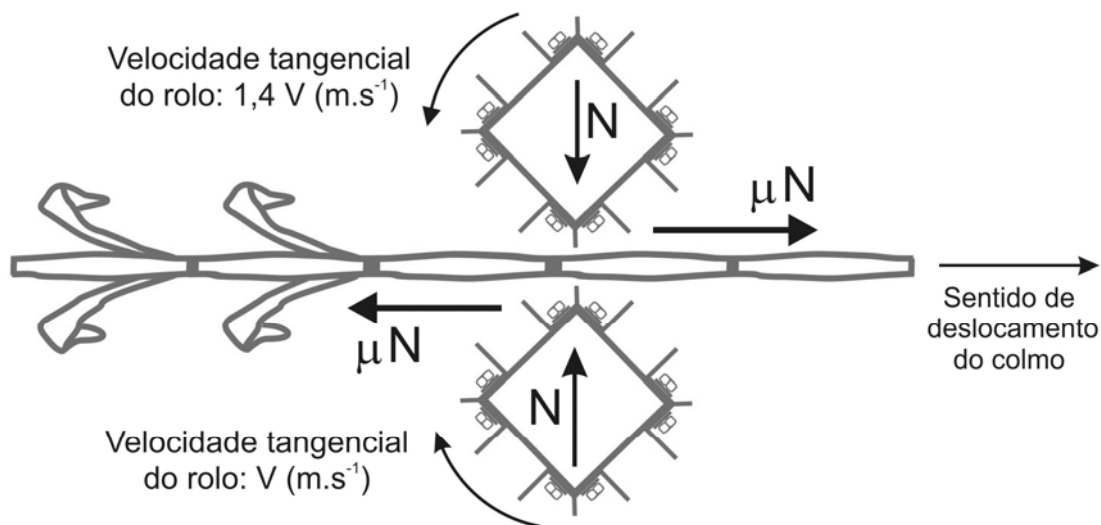


FIGURA 9 - Princípio de limpeza empregado pelo despalhador

Com o intuito de melhorar a eficiência de limpeza e promover a continuidade do fluxo de material entre os sucessivos pares de rolos foi estabelecida uma segunda razão de velocidades tangenciais (K_v), atuante entre os sucessivos pares de rolos. As razões de velocidade podem ser definidas como:

$$K_v = \frac{V_{ts}}{V_{ti}} \quad (1)$$

Sendo:

K_v : razão de velocidade tangencial entre rolos superiores e inferiores

V_{ts} : velocidade tangencial do rolo superior

V_{ti} : velocidade tangencial do rolo inferior

i : par de rolos

$$Kz = \frac{(V_{ts} + V_{ti})_{i+1}}{(V_{ts} + V_{ti})_i} \quad (2)$$

Sendo:

Kz: razão de velocidade entre pares de rolos subseqüentes

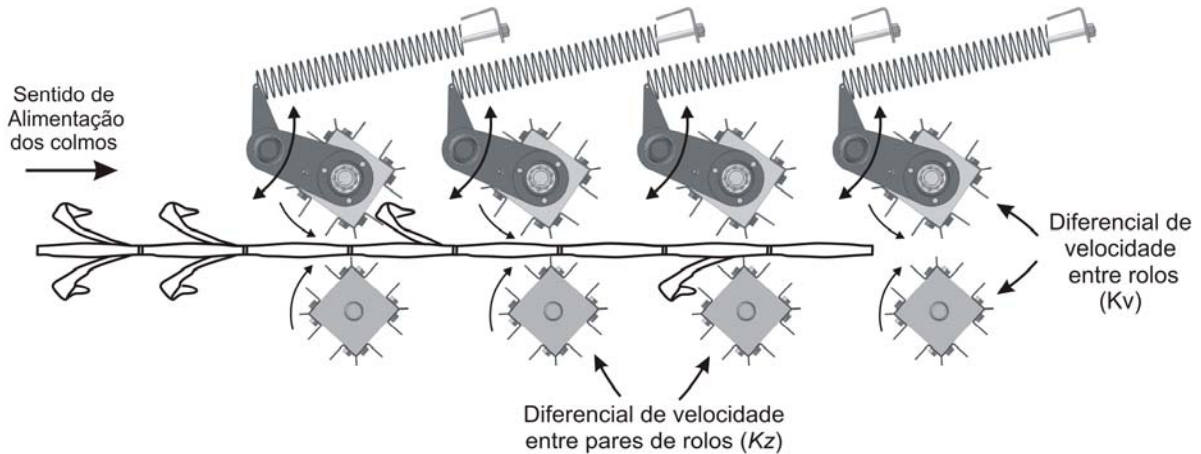


FIGURA 10 - Razões de velocidade entre rolos e pares de rolos.

3.5.1 Modelagem cinemática da transmissão

Em função de trabalhos anteriores (TANAKA, 1996 e SILVA, 2003), adotou-se uma diferença de velocidade de 40% entre os rolos superior e inferior, o que corresponde a um coeficiente Kv de 1,4 e uma diferença de velocidade de 20% entre pares de rolos subseqüentes, correspondendo a um coeficiente Kz de 1,2.

Para dimensionar a transmissão do despalhador, primeiramente foram calculadas as velocidades necessárias para gerar os diferenciais Kv e Kz adotados. Posteriormente foi calculado o número de dentes de cada engrenagem do sistema para atingir as velocidades pré-determinadas, tendo em vista que a sincronização e o acionamento dos rolos foram realizados por um conjunto de rodas dentadas e correntes de rolos.

3.5.1.1 Relações de velocidade

A razão de velocidades (K_v) é constante e inverte-se entre os sucessivos pares de rolos. Deste modo, os rolos inferiores do primeiro e terceiro par apresentam a maior velocidade de rotação, enquanto que no segundo e quarto par, a maior velocidade encontra-se nos rolos superiores.

Essa condição foi estabelecida por um conjunto de 4 equações, as quais relacionam a rotação de cada um dos respectivos rolos com o coeficiente K_v . Como todos os rolos apresentam um diâmetro de 250 mm, a razão entre velocidades tangenciais equivale à razão entre velocidades de rotação.

$$N9 = K_v \times N1 \quad (3)$$

$$N2 = K_v \times N10 \quad (4)$$

$$N11 = K_v \times N3 \quad (5)$$

$$N4 = K_v \times N12 \quad (6)$$

Sendo:

$N1=N5$: velocidade de rotação do primeiro rolo superior (RPM)

$N2=N6$: velocidade de rotação do segundo rolo superior

$N3=N7$: velocidade de rotação do terceiro rolo superior

$N4=N8$: velocidade de rotação do quarto rolo superior

$N9$: velocidade de rotação do primeiro rolo inferior

$N10$: velocidade de rotação do segundo rolo inferior

$N11$: velocidade de rotação do terceiro rolo inferior

$N12$: velocidade de rotação do quarto rolo inferior

Para a razão de velocidades entre os pares de rolos subseqüentes considerou-se a velocidade média de cada par de rolos (superior e inferior), a qual aumenta progressivamente

do primeiro ao último par, segundo o coeficiente K_z . Essa condição foi estabelecida por um conjunto de 3 equações, as quais relacionam as velocidades médias dos pares de rolos por meio do coeficiente K_z .

$$\frac{(N_{10}+N_2)}{2} = K_z \times \frac{(N_1+N_9)}{2} \quad (7)$$

$$\frac{(N_{11}+N_3)}{2} = K_z \times \frac{(N_{10}+N_2)}{2} \quad (8)$$

$$\frac{(N_4+N_{12})}{2} = K_z \times \frac{(N_{11}+N_3)}{2} \quad (9)$$

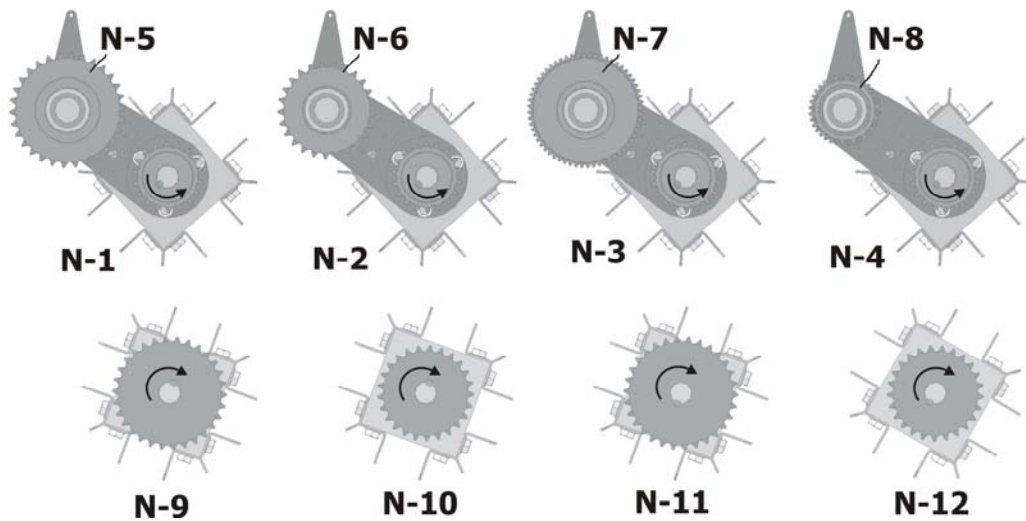


FIGURA 11 - Desenho esquemático indicando as velocidades de rotação dos rolos.

As equações de 3 a 9 constituem um sistema de 7 equações que permite calcular a velocidade de rotação de cada rolo satisfazendo as razões K_v e K_z . Para a solução do sistema adotou-se a velocidade de rotação do primeiro rolo superior, além dos coeficientes K_v e K_z , tendo como incógnitas as velocidades dos demais rolos do mecanismo (7 velocidades).

3.5.1.2 Dimensionamento da transmissão

O despalhador é acionado por apenas uma fonte de potência; assim foi necessário fixar a rotação dos eixos da transmissão por meio de rodas dentadas e correntes de rolos. Para o cálculo do número de dentes das rodas dentadas foram escritas as equações de 10 a 17, que estabelecem as relações cinemáticas necessárias para obtenção das velocidades de rotação descritas anteriormente. Os dois pares de rolos centrais são acionados por um motor elétrico com velocidade de rotação N_m que transmite o movimento para os rolos por meio de uma única corrente, gerando as velocidades de rotação N_6 , N_7 , N_{10} e N_{11} que satisfazem as equações de 10 a 13.

$$Z_{m1} \times N_6 - Z_{m2} \times N_7 = 0 \quad (10)$$

$$Z_{m3} \times N_{10} - Z_{m2} \times N_7 = 0 \quad (11)$$

$$Z_{m4} \times N_{11} - Z_{m2} \times N_7 = 0 \quad (12)$$

$$Z_{m2} \times N_7 - Z_A \times N_m = 0 \quad (13)$$

Sendo:

$Z_{\text{índice}}$: número de dentes; índice segundo FIGURA 12.

N_m : velocidade de rotação do motor (RPM)

Do mesmo modo, as velocidades de rotação do primeiro e do último par de rolos, foram vinculadas às velocidades dos rolos centrais pelas equações 14, 15, 16 e 17, as quais relacionam a velocidade de rotação do primeiro par de rolos com o segundo par e a velocidade de rotação do quarto par com o terceiro par de rolos.

$$Z_{b1} \times N_5 - Z_{b2} \times N_6 = 0 \quad (14)$$

$$Zb1 \times N7 - Zb3 \times N8 = 0 \quad (15)$$

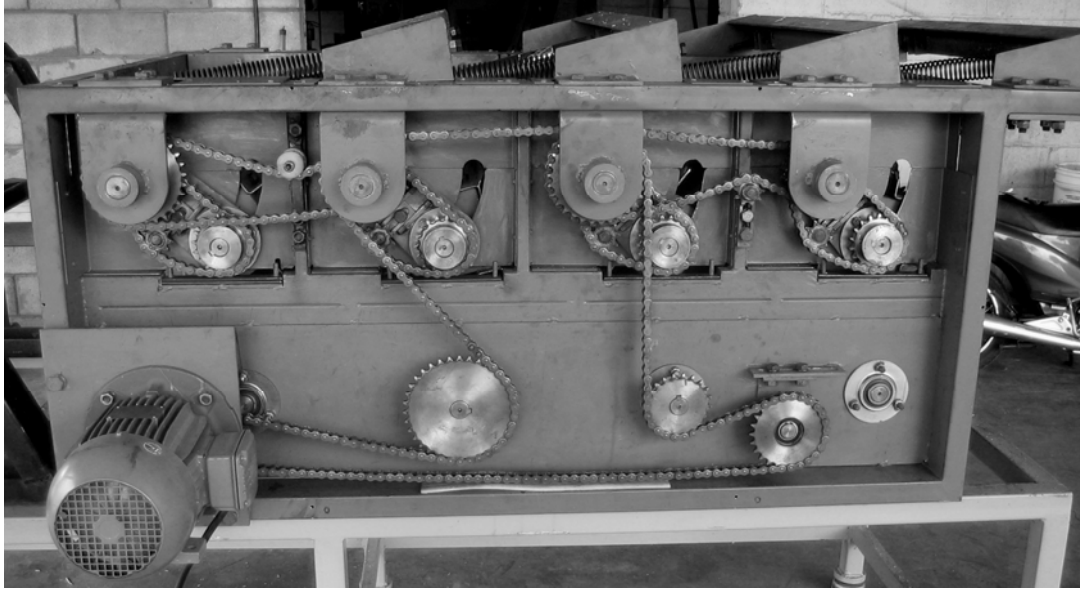


FIGURA 13 - Vista do sistema de transmissão da unidade de despalhamento.

3.5.2 Carga normal aplicada pela mola aos colmos

Em função do seu ajuste, a mola atuante sobre o braço oscilante do despalhador, aplica uma força normal F_N sobre os colmos cujo valor deve ser conhecido. A força F_N pode ser obtida do equilíbrio de momentos gerados pelas Forças F_M e F_N e atuantes sobre o braço oscilante, de acordo com a equação vetorial (18) e a FIGURA 14. A força normal F_N surge da solução dessa equação em função das dimensões do mecanismo, do ângulo de giro θ_2 do braço e das propriedades mecânicas da mola segundo a equação (19).

$${}_i R_2 \wedge {}_i F_M = {}_i R \wedge {}_i F_N \quad (18)$$

$${}_i F_N = \begin{Bmatrix} 0 \\ F_N \end{Bmatrix} \quad T_\theta = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 0 \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}_1R = \begin{Bmatrix} R \\ 0 \end{Bmatrix}$$

$${}_iR = T'_{\theta_1} {}_1R$$

$${}_2R_2 = \begin{Bmatrix} R_2 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

$${}_iR_2 = T'_{\theta_2} {}_2R_2$$

$${}_3F_M = \begin{Bmatrix} C \Delta X_3 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

$${}_iF_M = T'_{\theta_3} {}_3F_M$$

$$FN = -K \times Dx_3 \times R_2 \frac{[\sin(\theta_2 - \theta_3)]}{(R \cos \theta_1)} \quad (19)$$

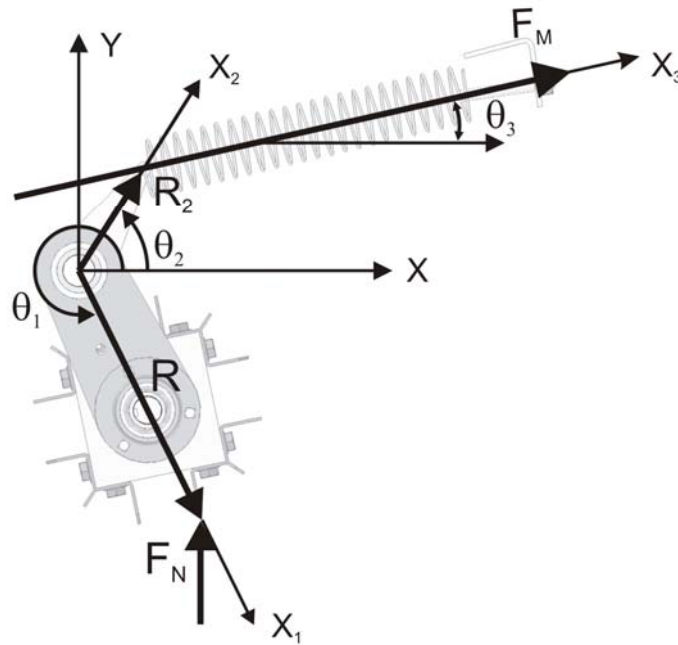


FIGURA 14 - Ação da mola sobre o braço oscilante.

$$R_2 = 130 \text{ mm}$$

$$R = 280 \text{ mm}$$

Especificações da mola de tração :

d (diâmetro do arame) = 3,60 mm

D_m (diâmetro médio da mola) = 36,4 mm

L_0 (comprimento livre - internamente aos olhais) = 206,6 mm

L_1 (máximo comprimento extensível) = 498,5 mm

P_1 (força em L_1) = 28,80 kgf

K (constante da mola) = 0,82 N / mm

3.5.3 Projeto do mecanismo

O despachador piloto é composto basicamente por uma estrutura, 04 pares de rolos, 04 braços oscilantes, 08 molas helicoidais, 01 motor elétrico de acionamento, 01 sistema de transmissão de rodas dentadas e correntes de rolos, parafusos, chapas de proteção, rolamentos e mancais.

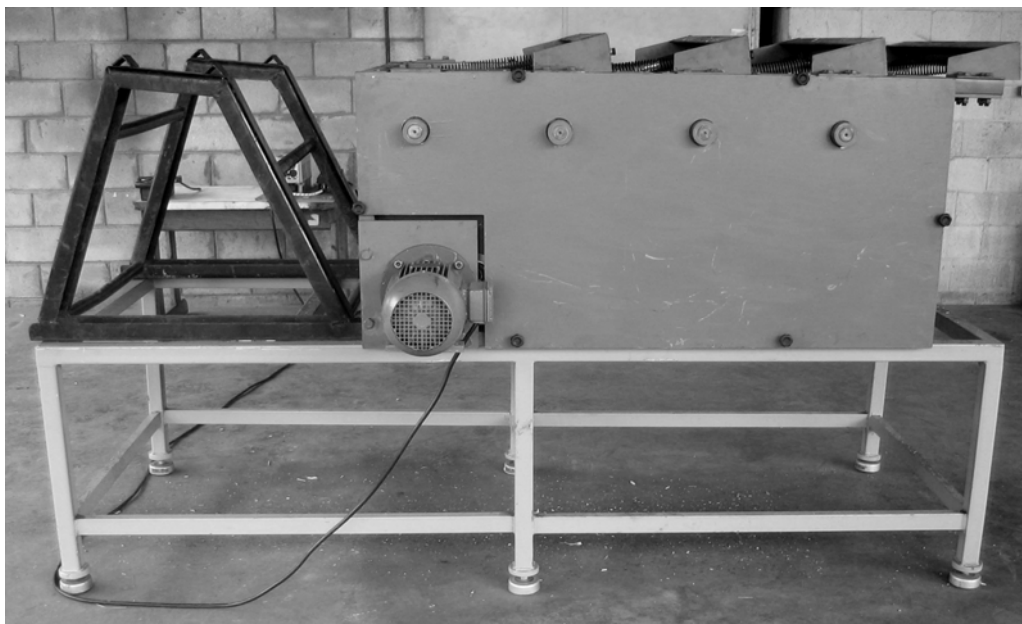


FIGURA 15 - Vista lateral direita da unidade de despachamento.



FIGURA 16 - Vista lateral esquerda da unidade de despalhamento.

3.5.3.1 Projeto estrutural

Para o projeto da estrutura da unidade de limpeza foram utilizados perfis tubulares de parede fina, com o intuito de atingir a resistência e rigidez necessárias, reduzindo a massa do conjunto. Esta escolha atende ao conceito geral do auxílio mecânico, que visa um equipamento de baixo custo resultante do peso reduzido, da baixa demanda de potência e da simplicidade dos componentes utilizados.

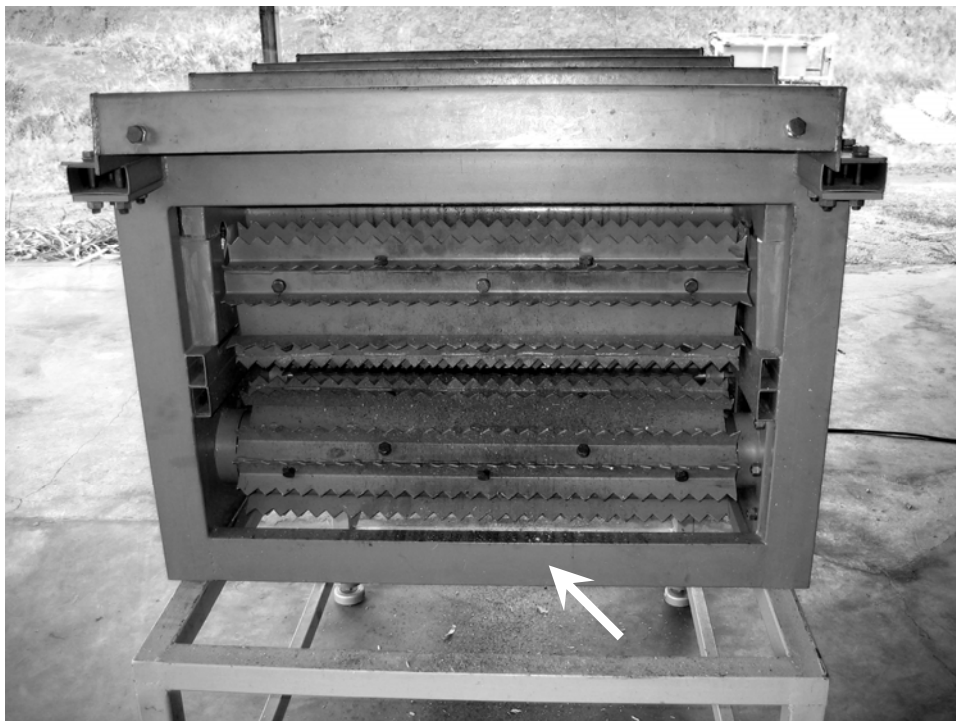


FIGURA 17 - Estrutura construída de perfis tubulares de parede fina.

3.5.3.2 Oscilação dos braços

Cada rolo superior é acoplado a um braço móvel independente, que assume movimentos oscilatórios durante o funcionamento do dispositivo. Essa oscilação tem por objetivo fazer com que os rolos superiores exerçam uma força capaz de promover o atrito necessário à remoção das folhas sem causar danos aos colmos e variam em função da carga aplicada aos braços oscilantes por molas helicoidais e das propriedades inerciais dos mesmos.

O comportamento oscilante dos rolos superiores também viabiliza a entrada de quantidades variáveis de colmos, tanto em número quanto em diâmetro, segundo a densidade dos mesmos nas linhas de plantio.

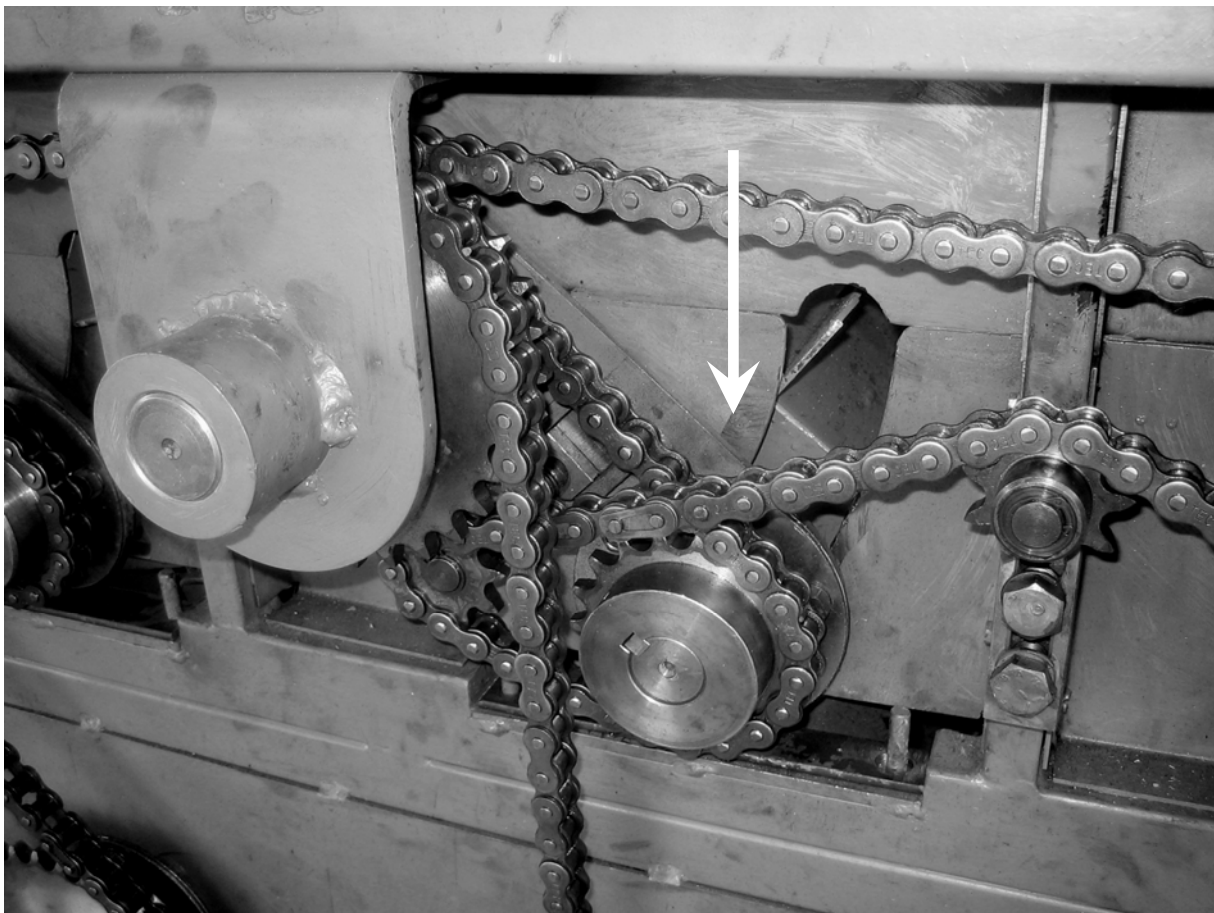


FIGURA 18 - Vista de um dos braços oscilantes.

3.5.3.3 Inércia dos braços

Uma das dificuldades encontradas nos trabalhos de TANAKA (1996) e SILVA (2003) foi a ocorrência de danos mecânicos nos colmos provocados pelas cargas dinâmicas resultantes da massa e do momento de inércia dos braços oscilantes superiores.

Segundo SILVA (2003) a natureza oscilante da carga aplicada pelos rolos aos colmos é uma propriedade física do mecanismo que não pode ser eliminada, mas pode ser reduzida visando melhorar o desempenho do despalhador. Com este objetivo, os braços e rolos foram projetados com a menor massa admissível, bem como foram utilizados mancais autocompensadores mais leves feitos de chapa estampada.

3.5.3.4 Prototipagem virtual

O despalhador de rolos foi desenhado com recursos 3D do pacote de projetos mecânicos Solid Edge® version 17 e após diversas versões foi simplificado expressivamente até atingir a configuração atual.

Para reduzir o custo do projeto, foram utilizados elementos de máquinas e materiais comerciais facilmente disponíveis no mercado, tais como mancais autocompensadores de chapa estampada, chapa estrutural A-36 cortada e soldada, rodas dentadas e correntes de rolos padronizadas pela norma ASA, motor elétrico trifásico de indução com quatro pólos e elementos de fixação convencionais, como parafusos sextavados UNC, classe 8.8.

3.5.3.5 Condições adversas de operação

Finalizada a avaliação da unidade de despalhamento em condições laboratoriais, a mesma será acoplada a uma máquina de campo e trabalhará em condições de colheita. Como estas condições são altamente abrasivas, o projeto prevê a fácil substituição das taliscas raspadoras dos rolos despalhadores.

Também foram utilizados para o projeto rolos despalhadores com perímetro maior que o comprimento das folhas, já que as folhas de cana possuem fibras longas, as quais facilmente podem enrolar em peças rotativas com perímetro inferior ao seu comprimento. Além disso, foram colocadas chapas de blindagem para evitar o contato das folhas com eixos e engrenagens.

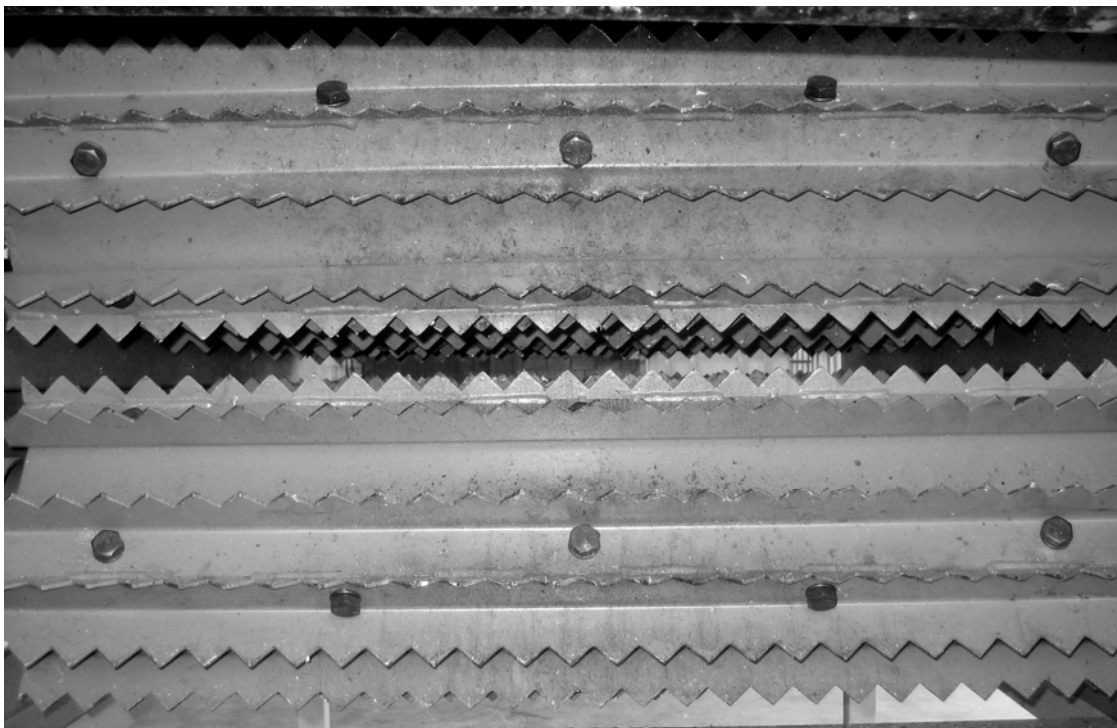


FIGURA 19 - Vista das taliscas acopladas aos rolos despalhadores.

3.5.4 Descrição dos fatores a serem avaliados

O desempenho do despalhador, descrito pela sua eficiência de limpeza e o nível de danos impetrados aos colmos, foi avaliado em função de três variáveis:

Velocidade tangencial dos rolos: afeta a eficiência de despalhamento e define a trajetória de lançamento dos colmos na descarga do despalhador, consequentemente determina a configuração de empilhamento dos mesmos na caçamba de armazenamento. No ensaio foram avaliadas duas configurações de velocidades dos rolos, apresentadas na FIGURA 20 e na FIGURA 21. Estas velocidades resultaram uma velocidade média de deslocamento dos colmos de 8 e 14 m.s^{-1} respectivamente e foram obtidas por diferentes regulagens no inversor de frequência.

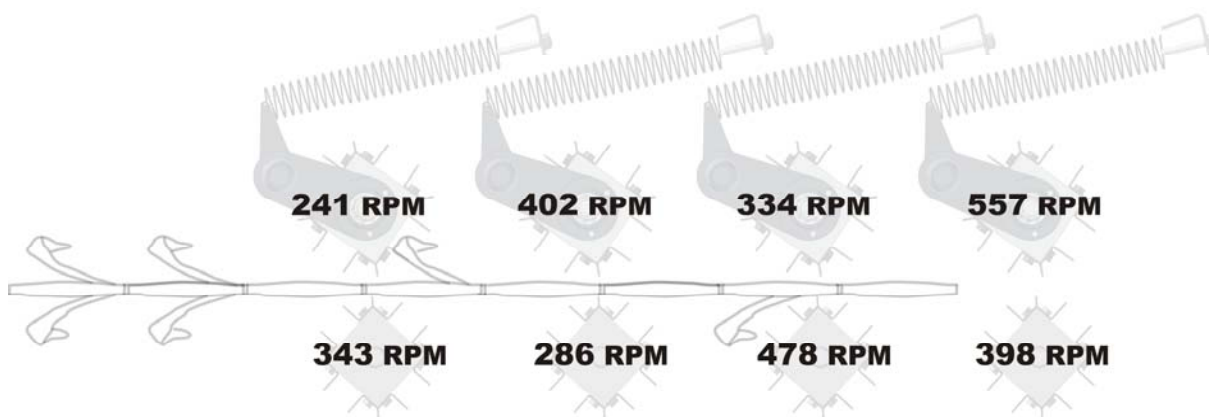


FIGURA 20 - Velocidades de rotação dos rolos na configuração de velocidade I, onde a velocidade média de deslocamento dos colmos foi de 8 m.s^{-1}

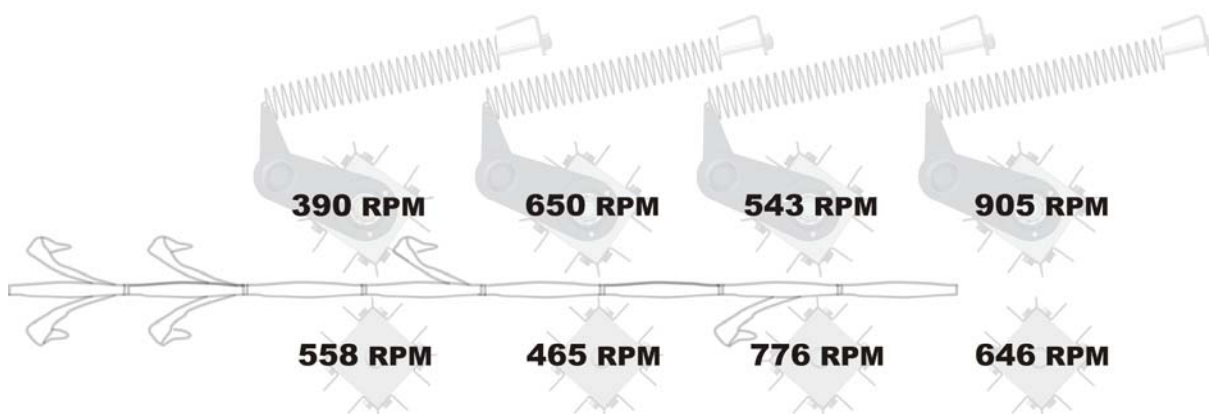


FIGURA 21 - Velocidades de rotação dos rolos na configuração de velocidade II, onde a velocidade média de deslocamento dos colmos foi de 14 m.s^{-1} .

Carga normal aplicada pela mola aos colmos: no ensaio foram avaliados dois níveis de carga normal, os quais foram proporcionados por uma mola helicoidal montada em uma haste com rosca, a qual permite ajustar a sua deformação.

Carga 1 = 0 (sem mola)

Carga 2 = 35 N

Distância entre rolos: duas distâncias “d” entre os rolos superiores e inferiores foram avaliadas no ensaio (FIGURA 22), as quais foram proporcionadas pela adição de chapas metálicas no batente dos braços oscilantes.

Distância 1: $d = 18 \text{ mm}$

Distância 2: $d = 28 \text{ mm}$

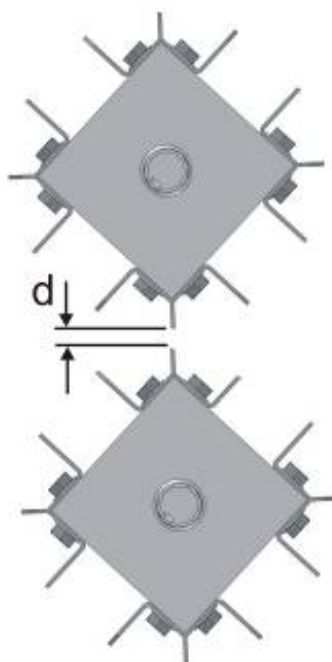


FIGURA 22 - Distância entre rolos.

3.6 Avaliação do despalhador piloto

Visando simular as condições de alimentação da unidade de despalhamento no campo, foram utilizados colmos de cana-de-açúcar colhidos manualmente, inteiros, com palha e sem os ponteiros (FIGURA 23), os quais foram separados em feixes de 10 unidades. Ao todo foram realizados 24 ensaios e em cada ensaio foi utilizado um feixe de cana.



FIGURA 23 - Amostra de cana-de-açúcar utilizada nos ensaios.

A alimentação da unidade de despalhamento foi realizada manualmente, inserindo os colmos pela base, um após o outro. Em seguida todo o palhiço removido pelo dispositivo era recolhido e pesado. Os colmos também eram recolhidos e submetidos a uma limpeza manual para remover possíveis impurezas não retiradas pelo despalhador (FIGURA 24), as quais sucessivamente eram pesadas.



FIGURA 24 - Feixe de cana-de-açúcar após a limpeza manual da palha.

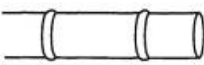
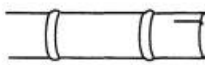
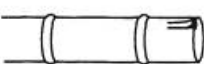
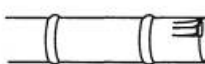
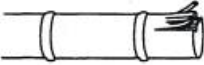
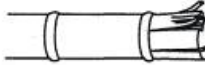
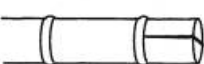
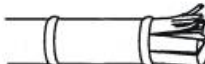
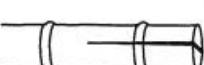
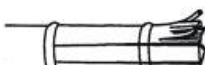
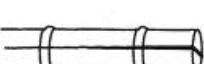

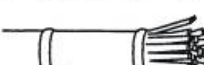



Em função das massas obtidas, e utilizando as equações 20 e 21, foi possível determinar a eficiência de limpeza da unidade de despalhamento piloto.

$$Palhiço\ total = palhiço\ removido\ (g) + palhiço\ aderido\ (g) \quad (20)$$

$$Eficiência\ de\ limpeza\ (\%) = \frac{palhiço\ removido\ (g)}{palhiço\ total\ (g)} \times 100 \quad (21)$$

Para a completa avaliação da unidade de limpeza, foram verificados também a ocorrência de danos mecânicos nos colmos de cana-de-açúcar, os quais foram mensurados segundo metodologia proposta por KROES (1997) que atribui classificações aos colmos em função de padrões pré-definidos apresentados na TABELA 1

TABELA 1 - Notas para avaliação dos danos mecânicos nos colmos.

Classificação Danos	Limite Inferior do colmo	Limite Superior do colmo
(1) sem avaria		
(2) avaria mínima		
(3) avaria		
(4) trinca mínima		
(5) trinca		
(6) trinca máxima		
(7) estilhaço mínimo		
(8) estilhaço		

3.6.1 Análise estatística

Segundo BARROS NETO et al. (2002) os planejamentos fatoriais de dois níveis 2^k são muito úteis em investigações preliminares ao questionar se determinados fatores têm ou não influência sobre a resposta. Neste tipo de planejamento cada fator (variável controlável) trabalha unicamente a dois níveis, chamados de “altos ou + 1” e “baixos ou – 1”

Como o principal objetivo do experimento foi determinar a influência de três fatores sobre a eficiência de limpeza da unidade de despalhamento piloto, a análise estatística dos dados foi fundamentada neste tipo de planejamento, mais especificamente em um planejamento fatorial com 03 fatores a dois níveis (2^3).

Para estimar o erro experimental foram realizadas três repetições de cada ensaio, totalizando 24 ensaios. O planejamento experimental e os cálculos estatísticos foram realizados com o auxílio do software STATGRAPHICS Plus 4.1.

A seguir é apresentado na TABELA 2 o planejamento experimental da avaliação realizada, com os valores adotados para cada fator nos respectivos ensaios. Para que nenhum fator fosse continuamente favorecido ou desfavorecido nas sucessivas repetições por alguma fonte estranha de variação, foi realizado um sorteio para determinar a ordem dos experimentos.

TABELA 2 - Valores adotados para cada fator na sequência de realização dos ensaios

Ensaio	Velocidade dos rolos	Carga normal aplicada pela mola aos colmos	Distância entre rolos
1	Configuração velocidade I	35N	28 mm
2	Configuração velocidade II	35N	18 mm
3	Configuração velocidade II	0	28 mm
4	Configuração velocidade I	0	28 mm
5	Configuração velocidade I	0	18 mm
6	Configuração velocidade II	35N	28 mm
7	Configuração velocidade II	0	18 mm

8	Configuração velocidade I	35N	18 mm
9	Configuração velocidade I	35N	28 mm
10	Configuração velocidade II	35N	18 mm
11	Configuração velocidade II	0	28 mm
12	Configuração velocidade I	0	28 mm
13	Configuração velocidade I	0	18 mm
14	Configuração velocidade II	35N	28 mm
15	Configuração velocidade II	0	18 mm
16	Configuração velocidade I	35N	18 mm
17	Configuração velocidade I	35N	28 mm
18	Configuração velocidade II	35N	18 mm
19	Configuração velocidade II	0	28 mm
20	Configuração velocidade I	0	28 mm
21	Configuração velocidade I	0	18 mm
22	Configuração velocidade II	35N	28 mm
23	Configuração velocidade II	0	18 mm
24	Configuração velocidade I	35N	18 mm

4 Resultados e discussões

Finalizada a parte experimental, foi realizada uma análise estatística das respostas obtidas para determinar quais fatores (distância entre rolos, carga normal aplicada pela mola aos colmos e velocidade tangencial dos rolos) influenciaram a eficiência de limpeza da unidade de despalhamento piloto. Posteriormente foram feitas argumentações explicando os resultados encontrados.

Em relação à verificação da ocorrência de danos mecânicos nos colmos, a mesma foi realizada, mas 95% dos colmos apresentaram avarias simples, opção número 2 da tabela proposta por KROES (1997). Deste modo, esta resposta não foi analisada estatisticamente.

4.1 Características dimensionais dos colmos de cana-de-açúcar

Os colmos de cana-de-açúcar utilizados no experimento pertenciam a um mesmo lote, colhido um dia antes da avaliação. A caracterização do lote foi realizada por meio das medidas de comprimento e dos diâmetros da base, meio e topo de 30 colmos selecionados aleatoriamente. A seguir são apresentados na TABELA 3, os valores mínimo, máximo e médio de cada medida.

TABELA 3 - Valores mínimo, máximo e médio do comprimento e diâmetro dos colmos.

Valores	Comprimento (mm)	Diâmetro (mm)		
		base	meio	topo
Mínimo	800	23,20	23,50	22,20
Máximo	1550	34,70	33,30	30,70
Médio	1300	29,64	27,19	26,30

4.2 Ensaios com a unidade de despalhamento piloto

Após a passagem dos colmos pela unidade de despalhamento foram obtidas em cada ensaio a massa de palhiço destacada pelo dispositivo (palhiço solto) e a massa de palhiço aderida ao colmo (palhiço aderido), sendo esta última removida manualmente para a pesagem. A seguir as mesmas são apresentadas na TABELA 4, junto à massa do palhiço total do colmo e à eficiência de limpeza.

TABELA 4 - Massa de palhiço solto, aderido, total e eficiência de limpeza para cada ensaio.

Ensaio	Palhiço solto (g)	Palhiço aderido (g)	Palhiço total (g)	Eficiência de limpeza (%)
1	310	310	620	50
2	100	330	430	23
3	240	270	510	47
4	260	240	500	52
5	120	360	480	25
6	130	230	360	36
7	150	410	560	27
8	110	280	390	28
9	260	220	480	54
10	150	400	550	27
11	310	340	650	48
12	160	330	490	33
13	230	320	550	42
14	190	350	540	35

15	140	310	450	31
16	210	360	570	37
17	310	390	700	44
18	120	260	380	32
19	260	440	700	37
20	270	250	520	52
21	200	310	510	39
22	250	260	510	49
23	180	400	580	31
24	260	360	620	42

A amostra de cana-de-açúcar utilizada para cada ensaio era composta por um feixe de 10 colmos. A massa média dos feixes foi determinada pela pesagem de 06 feixes, escolhidos aleatoriamente entre os 24 empregados no experimento. O valor registrado para a massa média dos feixes foi de 9,91 kg.

4.3 Análise estatística dos resultados

Para analisar os resultados observados no experimento foi realizada uma análise de variância (ANOVA) de efeitos aleatórios. Esta análise é um teste estatístico amplamente difundido entre os analistas, e visa fundamentalmente verificar se existe efeito dos tratamentos sobre a variabilidade natural da população estudada.

O planejamento fatorial designado para a avaliação estudou os efeitos de 3 fatores em 8 ensaios com 3 repetições, totalizando 24 ensaios. A ordem dos ensaios foi completamente aleatória, protegendo o experimento contra efeitos de variáveis desconhecidas. A seguir é apresentada a tabela de ANOVA.

TABELA 5 - Análise de variância (ANOVA) para a resposta eficiência de limpeza

Fonte de variação	Soma de quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F ₀	valor-P
(1) Distância entre rolos	234,37	1	234,37	4,66	0,0463
(2) Carga normal aplicada pela mola aos colmos	2,04	1	2,0416	0,04	0,8428
(3) Velocidade tangencial dos rolos	975,37	1	975,37	19,41	0,0004
(1) e (2)	40,04	1	40,04	0,80	0,3853
(1) e (3)	3,37	1	3,37	0,07	0,7988
(2) e (3)	1,04	1	1,04	0,02	0,8873
Falta de ajuste	9,37	1	9,37	0,19	0,6716
Erro experimental	804,0	16	50,25		
Total	2069,63	23			

A ANOVA divide a variabilidade existente na resposta eficiência de limpeza em partes separadas para cada um dos fatores analisados. Em seguida, a influência estatística de cada fator sobre a resposta é verificada pela comparação do seu quadrado médio com uma estimativa do erro experimental. Para a eficiência de limpeza, apenas o fator velocidade tangencial dos rolos apresentou um valor-P menor que 0,01, indicando que existe apenas 1 % de probabilidade de que a variabilidade observada seja apenas uma coincidência, um "acaso feliz" e não provocada pelo fator em questão, ou seja, pode-se afirmar com uma confiança de 99% que existe efeito do fator velocidade tangencial dos rolos sobre a eficiência de limpeza da unidade de despalhamento.

As conclusões do experimento podem ser visualizadas no gráfico de Pareto (FIGURA 25), no qual a linha vertical (para $p = 0,01$) indica a mínima magnitude dos efeitos estatisticamente significativos para a análise em questão. Por meio do gráfico observa-se que o fator principal para a eficiência de limpeza foi a velocidade tangencial dos rolos. Os demais fatores distância entre rolos e carga normal aplicada pela mola aos colmos, bem como todas as interações não foram estatisticamente significativos para um nível de confiança de 99%.

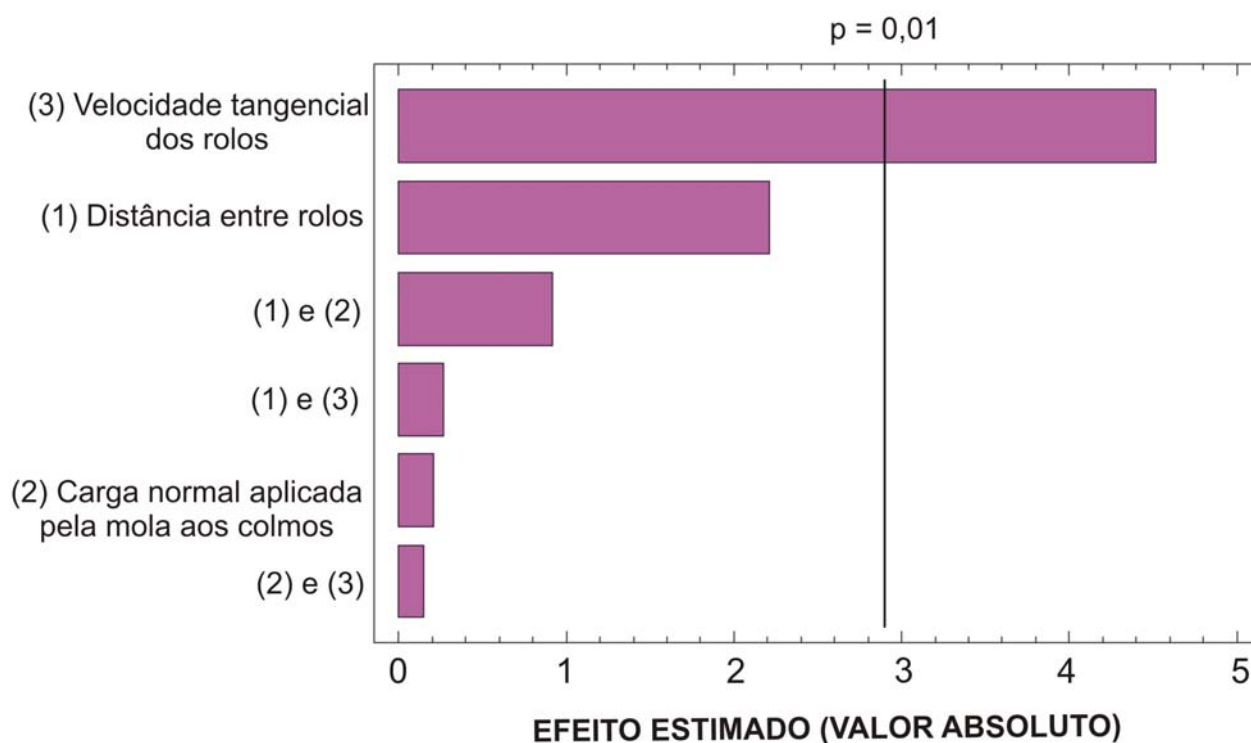


FIGURA 25 - Gráfico de Pareto para a resposta eficiência de limpeza.

A fim de esclarecer quais, dentre as velocidades tangenciais dos rolos envolvidas na análise de variância, seriam significativamente diferentes entre si, efetuou-se um teste de Tukey para as velocidades estudadas. Pelo teste, ao nível de confiança de 99%, as médias das configurações I e II do fator velocidade tangencial dos rolos apresentaram diferença significativa. Com o nível de confiança adotado, existe 1 % de chance de classificar um par de médias diferente significativamente, quando na realidade ele não apresenta diferença.

Ainda, para determinar se o modelo selecionado foi adequado para descrever os dados observados, ou se seria necessário utilizar um modelo mais complexo, foi realizado um Teste F para falta de ajuste do modelo (Lack of fit). O teste é promovido pela comparação da variabilidade dos resíduos no modelo atual com a variabilidade entre as repetições dos fatores ajustados. Como o valor-P para o teste da falta de ajuste na tabela de ANOVA é maior que 0,01, o modelo é considerado adequado para os dados observados a um nível de confiança de 99%.

4.3.1 Diagnóstico do Modelo

A seguir serão apresentadas as evidências que comprovam que os dados referentes a resposta eficiência de limpeza eram normais e as amostras homocedásticas, o que autoriza a aplicação do teste estatístico paramétrico.

4.3.1.1 A suposição de normalidade

O gráfico de probabilidade normal, onde uma das coordenadas (x) é apresentada com escala aritmética e, a outra (y), em porcentagem acumulada, constitui uma forma de visualização da aderência dos valores à distribuição normal. Nesse gráfico cada resíduo (erro experimental) foi comparado com seu valor esperado, caso a distribuição dos resíduos seja normal.

Para os valores da resposta eficiência de limpeza (FIGURA 26) os pontos caem próximos da reta, sugerindo que a amostra segue aproximadamente uma distribuição normal, assim a suposição de normalidade foi satisfeita.

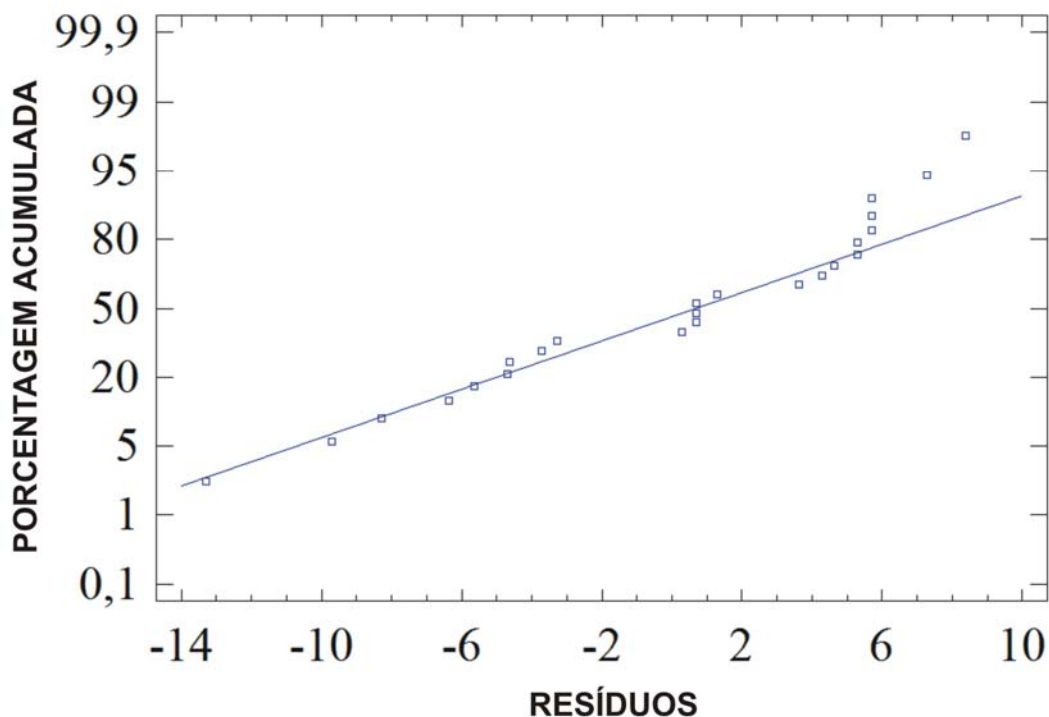


FIGURA 26 - Gráfico de probabilidade normal para a resposta eficiência de limpeza.

4.3.1.2 Independência dos erros experimentais

Como as respostas do ensaio foram obtidas numa ordem de execução, o gráfico dos resíduos contra a variável que representa a sequência é útil para testar a hipótese de independência dos erros, por meio do estudo da correlação entre os resíduos (erros experimentais) que estão próximos na ordenação.

Para os valores da resposta eficiência de limpeza (FIGURA 27) os resíduos se distribuíram aleatoriamente em torno de zero, o que os caracterizou como independentes.

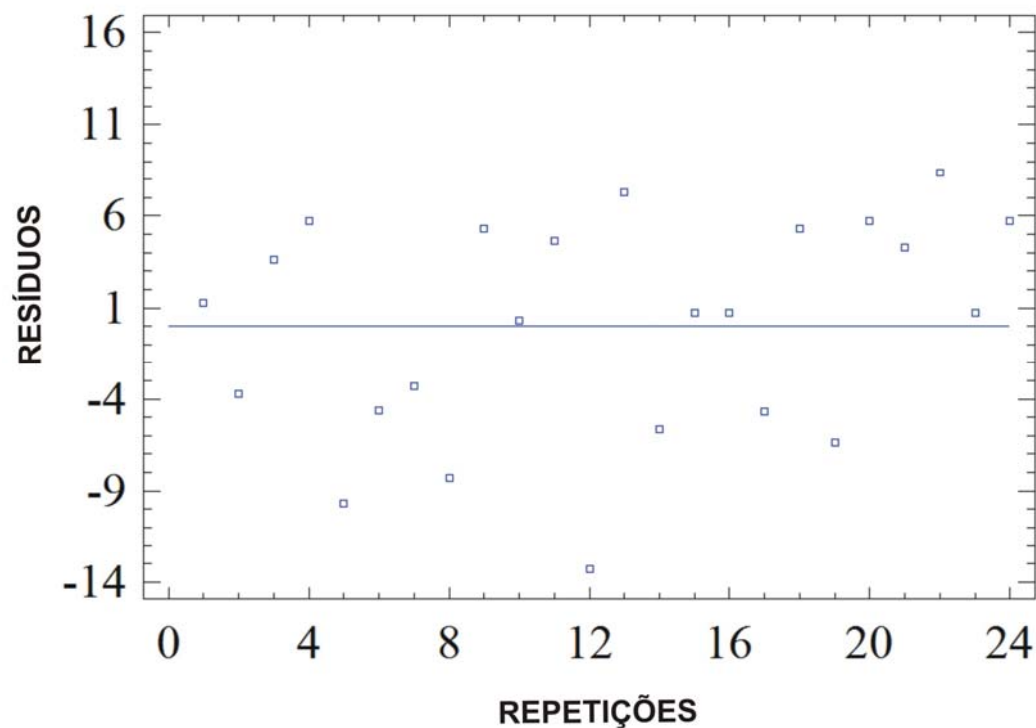


FIGURA 27 - Gráfico dos resíduos na sequência de realização do ensaio

4.3.1.3 Adequabilidade da equação linear

O gráfico dos resíduos (erros experimentais) contra os valores estimados é importantíssimo para identificar a adequabilidade da equação linear proposta para explicar os valores observados em função dos valores estimados.

Para os valores da resposta eficiência de limpeza (FIGURA 28) os resíduos se distribuíram aleatoriamente numa faixa horizontal em torno do eixo das abscissas, o que comprova um bom ajuste linear do modelo.

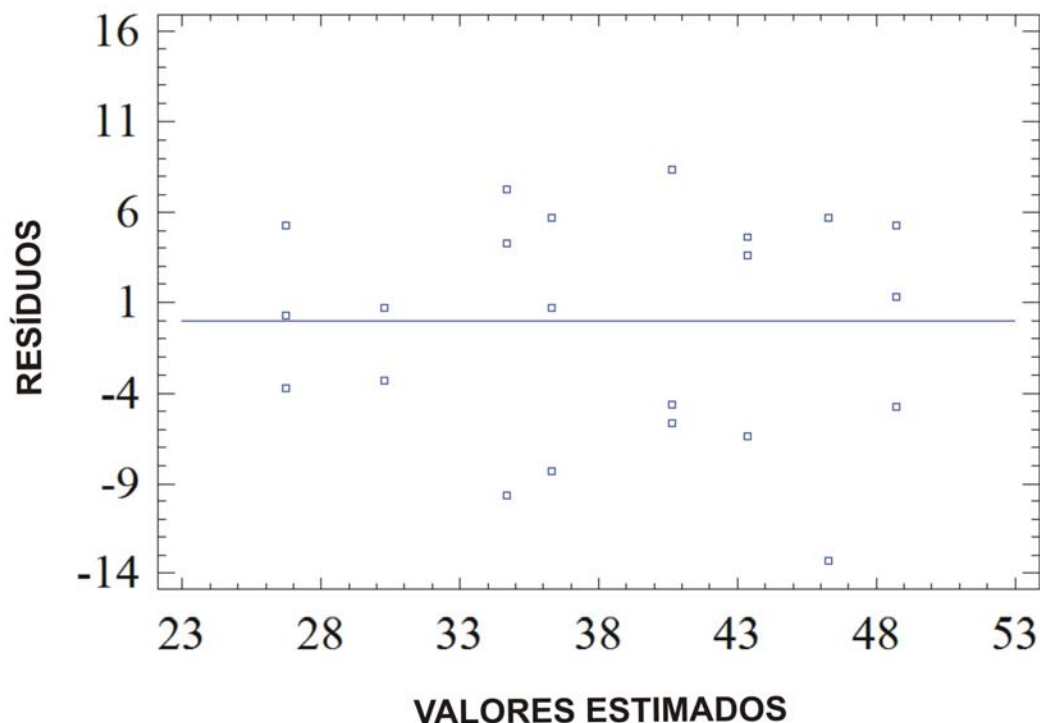


FIGURA 28 - Gráfico dos resíduos contra os valores estimados

4.4 Análise dos fatores avaliados no ensaio

Segundo a análise estatística das respostas observadas no ensaio, a velocidade tangencial dos rolos foi o único fator avaliado que influenciou a eficiência de limpeza da unidade de despalhamento piloto. O experimento apontou que ocorreu uma maior remoção do palhicho quando o dispositivo operou com velocidades tangenciais maiores (configuração de velocidade II).

Este resultado foi inesperado porque nos trabalhos realizados anteriormente (TANAKA (1996) e SILVA (2003)), inclusive no planejamento deste, a velocidade de deslocamento do colmo foi considerada como a média das velocidades tangenciais dos rolos superiores e inferiores. Partindo desta suposição, quando a velocidade tangencial dos rolos é aumentada, a velocidade de deslocamento do colmo também é, o que não traria diferenças para a remoção do palhicho.

Para comprovar esta suposição, a velocidade de deslocamento do colmo na unidade de despalhamento foi determinada. Para tanto foram consideradas as duas configurações de velocidades tangencias dos rolos (FIGURAS 20 e 21), as quais serão designadas a partir de agora como configuração de velocidade I (menor) e configuração de velocidade II (maior).

4.4.1 Determinação da velocidade de deslocamento dos colmos

A velocidade de deslocamento dos colmos na unidade de despalhamento foi determinada por meio da equação da balística. Para tanto foram medidas as distâncias percorridas pelo colmo entre a saída do último par de rolos (ponto A) e o contato com solo (ponto B), após o seu lançamento pelo despachador (FIGURA 29). Foram utilizados 15 colmos para a configuração de velocidade I e 15 colmos para a configuração de velocidade II, os quais foram escolhidos aleatoriamente.

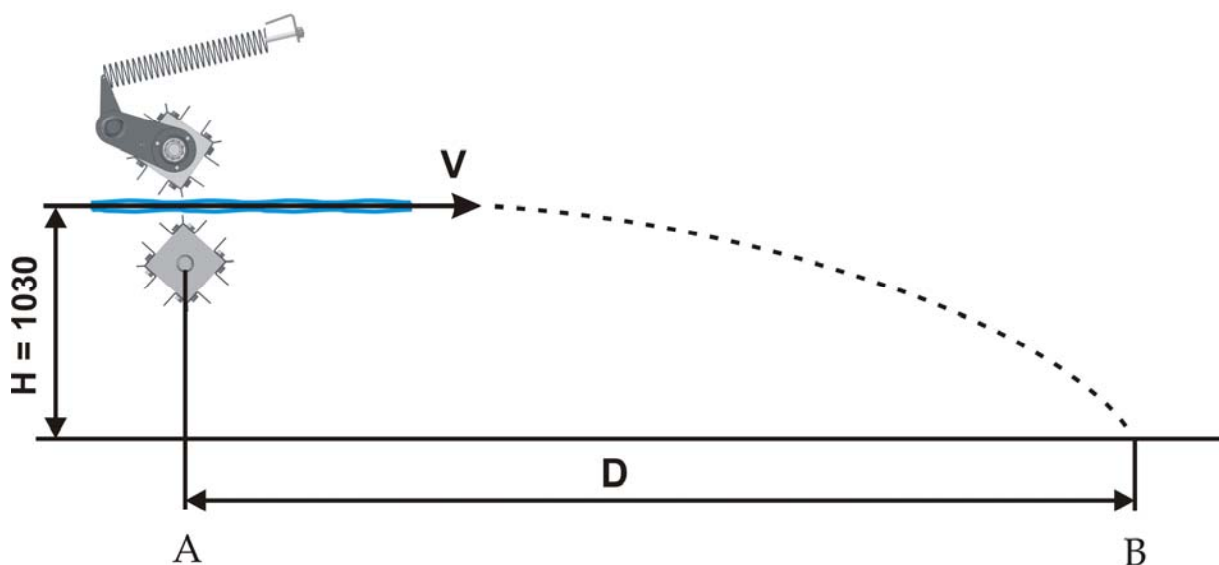


FIGURA 29 - Distância, entre os pontos A e B, percorrida pelos colmos.

TABELA 6 - Distância percorrida pelo colmo entre a saída do despalhador e o contato com o solo para as duas condições de velocidade.

Repetições	Distâncias (m)	
	Configuração de velocidade I	Configuração de velocidade II
1	2,4	3,6
2	2,6	3,72
3	2,62	3,71
4	2,65	3,72
5	2,72	3,87
6	2,72	3,9
7	2,78	4,01
8	2,95	4,01
9	3,06	4,18
10	3,08	4,25
11	3,15	4,28
12	3,16	4,4
13	3,32	4,63
14	3,35	4,89
15	3,49	5,38
Média	2,93	4,17

Tendo em vista que os colmos utilizados na avaliação possuem um comprimento médio de 1,3 metros (TABELA 3) e o movimento da balística ocorre apenas quando o colmo não está mais em contato com o despalhador, foi subtraído das distâncias médias empregadas no cálculo o valor correspondente a 1,00 metro. Deste modo, foi utilizada para a configuração de velocidade I a distância percorrida de 1,93 metros e para a configuração de velocidade II a distância percorrida de 3,17 metros.

A Equação da balística pode ser definida como:

$$D = V \times t \Rightarrow t = \frac{D}{V} \quad (22)$$

$$H = \frac{1}{2} g t^2 = \frac{1}{2} g \left(\frac{D}{V} \right)^2 \quad (23)$$

$$V = D \sqrt{\frac{g}{2H}} \quad (24)$$

Onde:

D: distância entre os pontos A e B percorrida pelos colmos (m)

V: componente horizontal da velocidade de deslocamento do colmo (m.s^{-1})

t: tempo (s)

H: altura entre o solo e o ponto onde o colmo é lançado (1,30 m)

g: aceleração da gravidade ($9,82 \text{ m.s}^{-2}$)

A TABELA 7 apresenta o resultado da velocidade de deslocamento dos colmos, obtido por meio da equação da balística, para as duas configurações de velocidade. Além disso, são apresentados os valores que estavam sendo adotados para a mesma velocidade antes da realização dos testes e as diferenças entre os mesmos.

TABELA 7 - Valores dos trabalhos anteriores, observados e a diferença entre os dois para a velocidade de deslocamento do colmo em duas condições de velocidade.

Fonte	Velocidade de deslocamento do colmo (m.s^{-1})	
	Configuração de velocidade I	Configuração de velocidade II
Média do último par de rolos (trabalhos anteriores)	6,25	10,14
Observado (balística)	4,43	7,13
Diferença	1,82	3,01

4.4.2 Hipóteses consideradas no processo de despalhamento

Em função das observações experimentais e da análise dos dados foram elaboradas duas hipóteses para explicar o processo de despalhamento considerando as variáveis físicas envolvidas. A primeira hipótese já foi apresentada em trabalhos anteriores e considera que os colmos avançam com velocidade igual à velocidade média dos rolos e que a raspagem acontece apenas como consequência do diferencial de velocidades Dv entre rolos superiores e inferiores, que aplicam forças de raspagem iguais e opostas sobre a superfície do colmo. A segunda hipótese foi formulada após a constatação de que a velocidade dos colmos não corresponde à velocidade média dos rolos e considera que existe um deslizamento maior entre a talisca e o colmo do que corresponderia puramente ao diferencial de velocidades Dv .

4.4.2.1 Raspagem dos colmos pelas taliscas

O princípio de limpeza empregado pela unidade de despalhamento baseia-se no atrito entre as taliscas e os colmos. O sucesso operacional deste princípio de limpeza está relacionado com a intensidade da interação entre colmo e talisca. Na primeira hipótese supõe-

se que o diferencial de velocidades Dv gera forças tangenciais iguais e de sentidos opostos, nas faces superior e inferior do colmo, as quais são responsáveis pelo destacamento das folhas.

Para uma análise mais detalhada do fenômeno de despalhamento foi definido o comprimento da raspagem como $Rp = (D_T - D_C)$, sendo D_C o deslocamento do colmo e D_T o deslocamento da talisca durante um intervalo de tempo “ t ” em que ambos estão em contato, como ilustra a FIGURA 30.

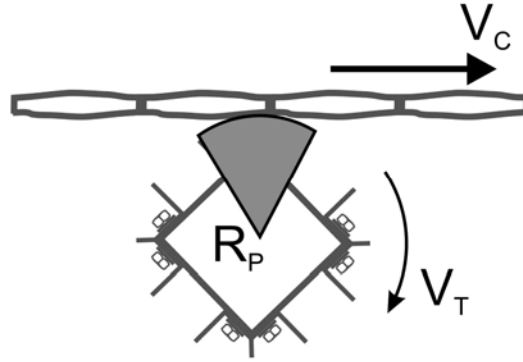


FIGURA 30 - Arco de contato entre talisca e colmo.

$$D_T = V_T \times t \quad (25)$$

$$D_C = V_C \times t \quad (26)$$

$$D_C = V_C \times \frac{D_T}{V_T} \quad (27)$$

$$t = \frac{D_T}{V_T} \quad (28)$$

$$Rp = (D_T - D_C) \quad (29)$$

$$Rp = D_C \left(\frac{V_T}{V_C} - 1 \right) \quad (30)$$

Onde:

D_T : deslocamento da talisca (mm)

V_T : velocidade tangencial da talisca (m.s^{-1})

t: tempo (s)

D_C : deslocamento do colmo (mm)

V_C : velocidade de deslocamento do colmo (m.s^{-1})

R_p : coeficiente de raspagem (mm)

Os referidos deslocamentos acontecem com velocidades diferentes, V_c para o colmo e V_t para a talisca, e foram substituídos nas equações de (25) a (28) resultando a equação (30) que fornece a raspagem em função da razão de velocidades V_t/V_c . Essa relação no caso da hipótese 1, pode ser colocada em função do diferencial de velocidades D_v , tal como indicado na equação (31).

$$R_p = D_c \left(\frac{D_v - 1}{D_v + 1} \right) \quad (31)$$

Se for considerado um diferencial de velocidades entre rolos superiores e inferiores de 40%, ou seja, $D_v = 1,4$ e um comprimento de interação D_c de 20 mm, a raspagem resultante será de apenas 3,3 mm, considerada extremamente ineficiente. Mesmo que este diferencial de velocidades seja elevado para 100% ($D_v = 2$) a raspagem obtida será de 6,6 mm, ainda assim considerada como ineficiente.

Por meio da FIGURA 31 obtida a partir da equação 31, conclui-se que para a obtenção de uma raspagem mais agressiva a razão de velocidades V_t/V_c deve ser aumentada acima dos níveis propostos na hipótese 1.

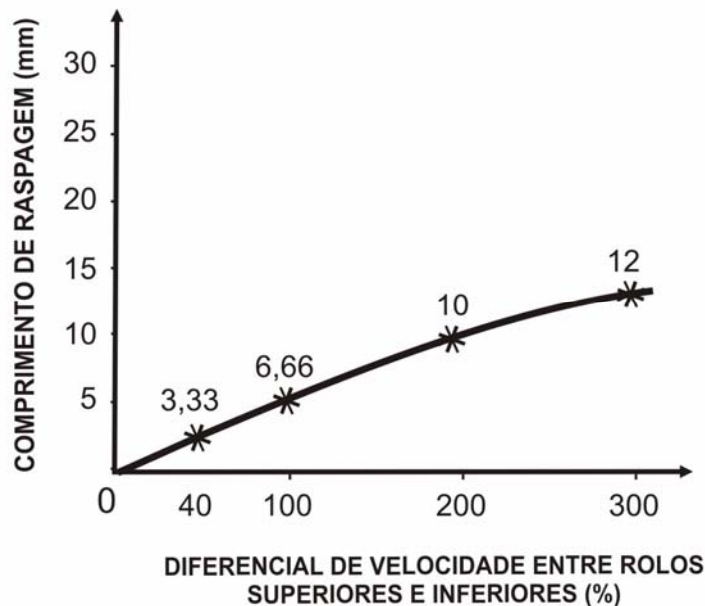


FIGURA 31 - Gráfico coeficiente de raspagem vs diferencial de velocidade DV

Com base nas observações experimentais foi proposta uma segunda hipótese que consiste em afastar os rolos para viabilizar o aumento da velocidade relativa entre as taliscas e os colmos. Neste caso ambos os rolos, superiores e inferiores, aplicam forças de raspagem no sentido de avanço do colmo, sendo que as forças de reação a essas forças de raspagem surgem da reação inercial do colmo. Nas duas velocidades de rotação ensaiadas, o tempo de permanência do colmo na unidade de despalhamento é diferente para percorrer as mesmas distâncias. Na configuração de velocidade II (maior) o colmo atinge uma velocidade final maior, ou seja está submetido a uma maior aceleração.

4.4.2.2 Diferença da força necessária para promover a aceleração do colmo

Assim que o colmo é inserido na unidade de despalhamento ocorre uma aceleração, fazendo com que o mesmo parta do repouso até a sua velocidade final de deslocamento quando é lançado pelo dispositivo.

Considerando que o despalhador tem um comprimento de 1,5 metros, na configuração de velocidade I o colmo demora 0,33 segundos para atingir a velocidade de 4,43 m.s⁻¹, enquanto que na configuração II, demora 0,2 segundos para atingir a velocidade de 7,13 m.s⁻¹, ou seja, na condição de velocidade II o colmo chega a uma velocidade mais alta com menos tempo. Isso pode ser melhor visualizado na FIGURA 32.

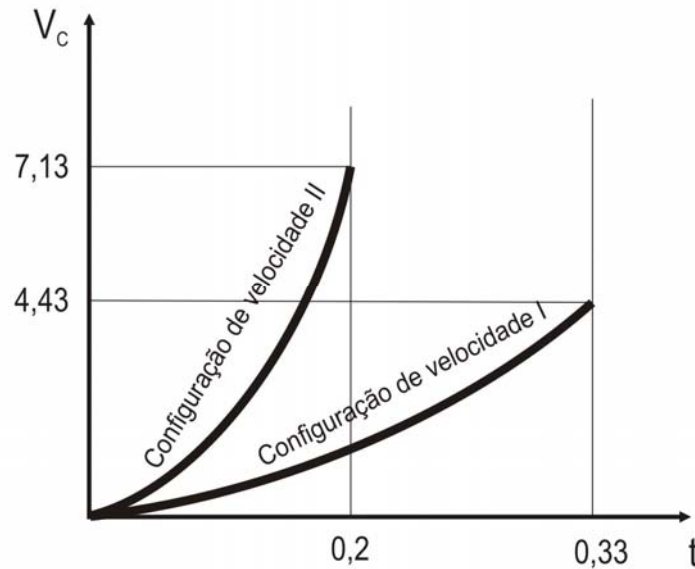


FIGURA 32 - Gráfico aceleração dos colmos vs velocidade tangencial dos rolos

Pela análise do gráfico, é possível perceber que existiu uma aceleração maior do colmo na condição de velocidade II. Consequentemente, para propiciar este aumento na aceleração do colmo, foi necessário um aumento da força aplicada pelas taliscas sobre o mesmo. Esta força em grande parte foi aplicada aos colmos por meio das folhas, na forma de uma força de tração. A magnitude dessa força pode ser obtida por meio da massa do colmo, apresentada no item 4.2, e sua aceleração (Equações 32 a 35).

Condição de velocidade II

$$\frac{Dv}{Dt} = \frac{7,13}{0,2} = a \Rightarrow 35,65 \text{ m.s}^{-2} \quad (32)$$

$$F = m \times a \Rightarrow 1 \text{ kg} \times 35,65 \text{ m.s}^{-2} \Rightarrow 35,65 \text{ N} \quad (33)$$

Condição de velocidade I

$$\frac{Dv}{Dt} = \frac{4,43}{0,33} = a \Rightarrow 13,42 m.s^{-2} \quad (34)$$

$$F = m \times a \Rightarrow 1 kg \times 13,42 m.s^{-2} \Rightarrow 13,42 N \quad (35)$$

Onde:

Dv : diferencial de velocidade

Vt : diferencial de tempo

F: Força aplicada pela talisca para acelerar o colmo (N)

m : massa do colmo (kg)

a : aceleração do colmo ($m.s^{-2}$)

Por meio das equações (33) e (35) é possível concluir que a força aplicada pelas taliscas para a aceleração dos colmos na configuração de velocidade II é superior à força aplicada na configuração I. Sendo assim, é comprovada a existência dos dois fenômenos que influenciam a eficiência de limpeza através das diferentes velocidades tangenciais dos rolos.

O primeiro é caracterizado pela raspagem das folhas por meio de um diferencial de velocidades e o segundo por meio de uma força de tração aplicada nas folhas para a aceleração do colmo. Um fenômeno depende das forças de ação e reação dos rolos superiores e inferiores e o outro depende da reação inercial dos colmos, segundo a segunda lei de Newton.

No ensaio realizado o comprimento de raspagem (FIGURA 30) foi o mesmo em termos de diferença de deslocamento para as duas condições de velocidade. No entanto, com o aumento da velocidade tangencial dos rolos a aceleração dos colmos demandou mais força, a qual aumentou a eficiência de limpeza da unidade de despalhamento.

5 Conclusões

A unidade de despalhamento piloto apresentou uma operacionalidade satisfatória, restando avaliar a sua confiabilidade em operação. Seu projeto contemplou os requisitos para um dispositivo de baixo custo, destacando o peso reduzido, a baixa demanda de potência e a simplicidade dos componentes utilizados.

A concepção cinemática de transmissão por corrente de rolos mostrou-se adequada para gerar as razões de velocidade, entre rolos superiores e inferiores assim como entre sucessivos pares de rolos, propostas por TANAKA (1996) e SILVA (2003).

Dois modelos físicos interagem na remoção das folhas dos colmos de cana-de-açúcar. O primeiro baseia-se na raspagem das folhas pelo diferencial de velocidades, que depende das forças de ação e reação dos rolos superiores e inferiores, e o segundo baseia-se na força aplicada ao colmo por meio das folhas, que depende da reação inercial dos colmos.

Existe um efeito significativo da velocidade tangencial dos rolos na eficiência de limpeza da unidade de despalhamento piloto. Se a velocidade é aumentada melhora o despalhamento, contudo existe uma restrição para este aumento em decorrência do lançamento dos colmos na caçamba armazenadora. Um valor ótimo, que atenda tanto ao despalhamento quanto ao lançamento, poderá ser obtido por meio de uma otimização.

Embora o fator distância entre rolos não tenha apresentado um efeito significativo ao nível de 1% de probabilidade na eficiência de limpeza da unidade de despalhamento piloto, o

mesmo apresentou um efeito significativo ao nível de 5%. Deste modo, a distância entre rolos deve ser considerada em um processo futuro de otimização da unidade de limpeza.

O fator carga aplicada pela mola ao colmo não influenciou a eficiência de limpeza da unidade de despalhamento piloto, todavia, como está relacionado com a oscilação do conjunto braço oscilante, deve ser otimizado para diminuir a amplitude de deslocamento do braço com o aumento da sua frequência de oscilação, visando reduzir os danos mecânicos nos colmos de cana-de-açúcar processados pelo dispositivo.

Após a passagem dos colmos pela unidade de limpeza foi apurada a ocorrência de danos mecânicos nos colmos, mas, praticamente todos os colmos apresentaram avarias simples, opção número 2 da tabela classificatória proposta por KROES (1997).

6 Sugestões para futuras pesquisas

Dois modelos físicos interagem na remoção do palhiço dos colmos de cana-de-açúcar. O primeiro modelo atua segundo um diferencial de velocidades entre os rolos e o segundo modelo em função de uma força de tração aplicada nas folhas para a aceleração do colmo.

A partir das respostas obtidas neste trabalho foi possível definir que o segundo modelo físico predomina na remoção do palhiço dos colmos de cana-de-açúcar. Sendo assim, futuras pesquisas devem se apoiar neste modelo, buscando otimizar as velocidades tangenciais de cada rolo e a distância entre os rolos superiores e inferiores, de modo a aumentar a eficiência de limpeza da unidade de despalhamento piloto.

7 Referências Bibliográficas

ALBRECHT NETO, E.; BRAUNBECK, O. A. Modelagem cinemática do acionamento de um despalhador de rolos oscilantes em série CONGRESSO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 33, 2004, São Pedro, **Resumos...** São Paulo: CONBEA, 2004. 1 CD ROM.

ALFONSI, R.R. et al. Condições climáticas para a cana-de-açúcar. In: PARANHOS, S.B. (coord.). **Cana-de-açúcar – cultivo e utilização**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. v.1, p.42-54.

BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I. E.; BRUNS R.E. **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. 2. ed. Campinas: Editora Unicamp, 2002. 401p.

BRAUNBECK, O. A.; BANCHI, A. D. Carregamento contínuo: redução de impurezas minerais. **Boletim Técnico Copersucar**. São Paulo, n.43, p.35-42, julho 1988.

BRAUNBECK, O. A.; OLIVEIRA, J. T. A. Colheita de cana-de-açúcar com auxílio mecânico CONGRESSO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 33, 2004, São Pedro, **Resumos...** São Paulo: CONBEA, 2004. 1 CD ROM.

BURLEIGH & ASSOCIATE. **A comparative evaluation of sugar cane harvesting and transport systems for use in the Brazilian sugar industry**. São Paulo: Coopersucar, 1988.

CANAWEB. **Um mercado de 40 bilhões**. URL: <http://www.canaweb.com.br/Conteudo.asp> , 29/01/2006.

DE BEER, A. G. Semi-mechanized sugar harvesting systems for a developing country. In: INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGARCANE TECHNOLOGISTS, 17., 1980, Manila. **Proceedings...** Philipppinies; 1980. v.1, p.992-1001.

DE BEER, A. G.; HUDSON, C.; MEYER, B.; SEIGMUND, B. Green cane harvesting and trash management. In: INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGARCANE TECHNOLOGISTS, 22., 1995, Cartagena. **Proceeding...** Colombia, 1995. v.1, p.133-149.

FERNANDES, A.C.; OLIVEIRA, E.R.; QUEIROZ, L. Sugarcane trash measurements in Brazil. In: INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGARCANE TECHNOLOGISTS, 16., 1977, São Paulo. **Proceeding...** São Paulo, 1978. v.2, p.1963-1977.

IVIN, P.C. The effect of billet size on the rate of cane deterioration. In: QUEENSLAND SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS, 39., 1972, Bundaberg. **Proceedings...** Bundaberg, 1972. v.1, p.279-280.

IVIN, P.C.; BEVAND, D. Further measurements of chopped cane deterioration. In: QUEENSLAND SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS, 40. Innisfail, 1973. **Proceedings...** Innisfail, 1973. v.1, p.31-38.

KROES, S.; HARRIS, H.D. Effects of cane harvester basecutter parameters on quality of cut. In: AUSTRALIAN SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS, 16, 1994, Townsville. **Proceedings....** Townsville ,1994. p.169-177.

LEON, N. Aerodynamic properties of sugarcane. In: International Society of Sugar Cane Technologists, 15. Durban,1974. **Proceedings...** Durban,1974. v.1, p.1136-1154.

MACEDO, I. C.. **A energia da cana-de-açúcar - Doze estudos sobre a agroindústria da cana-de açúcar no Brasil e a sua sustentabilidade.** São Paulo: Berlendis & Vertecchia: ÚNICA – União da Agroindústria Canavieira do Estado de São Paulo.

MAGALHÃES, P.S.G.; BRAUNBECK, O. A colheita de cana-de-açúcar: atualidades e perspectiva. In: INGENIERIA RURAL Y MECANIZACIÓN AGRÁRIA EM EL ÂMBITO LATINOAMERICANO, 1998, La Plata. **Anais...** La Plata, 1998. v.1, p.262-271.

MORAES, E.E. **Avaliação das perdas invisíveis de cana-de-açúcar (*Saccharum ssp*) e impurezas vegetais na colheita mecanizada.** 1992. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola – Máquinas Agrícolas) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1992.

NEVES, J. L. M. **Avaliação de perdas invisíveis em colhedoras de cana-de-açúcar picada e alternativas para sua redução.** 2003. 223 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola - Máquinas Agrícolas) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

OLIVEIRA, C.A.A. de. **Estudo das características da folha da cana-de-açúcar (*Saccharum ssp*) para desenvolvimento de despalhadores de rolos.** 1998. 57 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola - Máquinas Agrícolas) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1998.

PAGNANO, N. B. **Despalhador inercial de facas oscilantes para cana-de-açúcar (*Saccharum ssp*).** 1997. 78 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola - Máquinas Agrícolas) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1997.

RICHARD, C.; JACKSON, W.; WAGUESPACK JR, H. Harvester trails and extraneous matter in the Louisiana sugar industry. In: INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGARCANE TECHNOLOGISTS, 24., 2001, Brisbane. **Proceedings...** Mackay; 2001. p.263-268.

RIPOLI, T. C.; MIALHE, L. G. Colheita manual vs. colheita mecanizada da cana-de-açúcar **STAB açúcar, álcool e subprodutos.** Piracicaba, v.5, n.3, p.27-37, jan/fev. 1987.

RIPOLI, T.C.; PARANHOS, S.B. Sistemas de colheita. In: PARANHOS, S.B. (coord.). **Cana-de-açúcar - cultivo e utilização.** Campinas: Fundação Cargill, 1987. v.2, p.519-593.

RIPOLI & RIPOLI, 2004

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

SHARPE, P. **Ethnobotanical Leaflets.** Southern Illinois University Carbondale <http://www.siu.edu/~ebl/leaflets/sugar.htm>, 28/07/2003.

SHAW, G. R.; BROTHERTON, G. A. Green cane harvesting - a dilemma. In: AUSTRALIAN SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS, 14., 1992, Mackay. **Proceedings...** Brisbane; 1992. v.1, p.1-7.

SHUKLA, L.N.; SINGH, I.; SANDHAR; N.S. Design development and testing of sugarcane cleaner. **Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America**, Tóquio, v.22, n.3, p.55-8, 1991.

SILVA, R.A. **Aprimoramento de um despalhador de colmos inteiros de cana-de-açúcar por rolos oscilantes com diferencial de velocidades.** 2003. 79 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola - Máquinas Agrícolas) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

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

SRIVASTAVA, A.C.; SINGH, S.K. Development of a power-driven sugarcane detrasher. **Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America**, Tokyo, v. 21, n. 2, p.49-52, 1990.

STUPIELLO, J.P. A cana-de-açúcar como matéria-prima. In: PARANHOS, S.B. (coord.). **Cana-de-açúcar – cultivo e utilização.** Campinas: Fundação Cargill, 1987. v.2, p.761-791.

TANAKA, F.O. **Despalhe de colmos de cana-de-açúcar** (*Saccharum spp*) **inteira por rolos oscilantes com diferencial de velocidades**. 1996. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola - Máquinas Agrícolas) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1996.

ULLER, A. Introdução. In:_____ **Manual dos derivados da cana-de-açúcar**: diversificação, matérias-primas, derivados do bagaço, derivados do melaço, outros derivados, resíduos, energia. Brasília: ABIPT, 1999, 474p.

ÚNICA. **Produção da cana-de-açúcar**. <http://www.portalunica.com.br/acao/cana.jsp>. 29/01/2006.

YOUNGER, J.A. Quality cane and extraneous matter. In: INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGARCANE TECHNOLOGISTS, 17., 1980, Manila. **Proceedings...** Philipppinies; 1980. v.1, p.885-890.