

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

Sarecer

Este exemplar corresponde a redação final da Dissertação de Mestrado defendida por Carlos Alberto Alves de Oliveira e aprovada pela Comissão Julgadora em 20 de março de 1998. Campinas, 15 de julho de 1998.

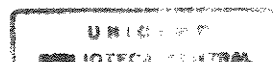
Presidente da Banca

Estudo das Características de Ruptura da Folha
da Cana-de-Açúcar (*Saccharum ssp*) para
Desenvolvimento de Despalhadores de Rolos

Autor: Carlos Alberto Alves de Oliveira
Orientador: Inácio Maria Dal Fabbro

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas, como requisito exigido para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Agrícola, área de Concentração de Máquinas Agrícolas

Campinas, SP
Março / 1998



1148106

UNIDADE	8C
N.º CHAMADA:	OL4e
V	Ex
TOMBO BC/	35085
PROC.	395/98
C	☐
D	☒
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	16/09/98
N.º CPO	

CM-00115891-9

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

OL4e

Oliveira, Carlos Alberto Alves de

Estudo das características de ruptura da folha da cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) para desenvolvimento de despalhadores de rolos. / Carlos Alberto Alves de Oliveira.--Campinas, SP: [s.n.], 1998.

Orientador: Inácio Maria Dal Fabbro
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Cana-de-açúcar - Limpeza. 2. Colheita.
3. Folhas - Propriedades mecânicas. 4. Máquinas agrícolas. I. Dal Fabbro, Inácio Maria. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. III. Título.

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

**Título: Estudo das Características de Ruptura da Folha
da Cana-de-Açúcar (*Saccharum spp*) para
Desenvolvimento de Despalhadores de Rolos**

Autor: Carlos Alberto Alves de Oliveira
Orientador: **Prof. Dr. Inácio Maria Dal Fabbro**

Aprovado em 20 de março de 1998

Prof. Dr. Inácio Maria Dal Fabbro

- FEAGRI / UNICAMP

Prof. Dr. Antonio Carlos de Oliveira Ferraz

- FEAGRI / UNICAMP

Prof. Dr. Tomaz Caetano C. Rípoli

- ESALQ / USP

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus pelo dom da vida.

À minha esposa Denise G. Santana pelo estímulo, compreensão e amor dado a todo momento e ao meu filho Pedro Santana de Oliveira, o qual chegou para alegrar nossas vidas.

Aos meus pais, Sebastião e Tereza, e meus irmãos Cleber e Cristiano pelo carinho e apoio humano sempre desmonstrados.

Ao Prof. Dr. Inácio Maria Dal Fabbro, pela orientação, ensinamentos e pela amizade.

Ao Prof. Dr. Oscar A. Braunbeck, pelas sugestões e colaborações prestadas ao longo do trabalho.

Aos membros do comitê de orientação, Prof. Antonio Carlos de Oliveira Ferraz e Dr. Roberto Funes Abraão, pelas sugestões dadas.

Ao membro da banca examinadora, Prof. Dr. Tomas Caetano Ripoli, pelos elogios e sugestões dadas a esse trabalho.

Ao CNPq pela bolsa de estudos que possibilitou à realização do curso de pós-graduação.

À Faculdade de Engenharia Agrícola, especialmente ao Departamento de Máquinas Agrícolas pela oportunidade de realização do curso.

À Faculdade de Engenharia de Alimentos por ter cedido suas instalações e equipamentos para realização parcial dos ensaios.

À Coordenadoria de Pós-Graduação pelo apoio e colaboração financeira no desenvolvimento do protótipo mecânico utilizado nesta pesquisa.

À Companhia Agrícola Ometto por ter cedido matéria-prima para a execução do trabalho.

Aos funcionários e amigos Edgar, Silvia, Alfredo, Dennis, Claudio, José Maria, Luís Carlos, Francisco, Roberto Carlos, Laura, pela constante colaboração.

Aos companheiros de todos as horas, Volpato, Admilson, Regina, Néri, Giovanni, Sebastião, e demais colegas da Pós-Graduação, a todos meu sincero carinho e constante amizade.

À todos que de alguma forma, direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

O presente estudo enfoca os aspectos mecânicos remoção da folha de cana-de-açúcar, considerada como fator importante no processo de colheita. O Brasil produz, aproximadamente 13,5 milhões de toneladas de açúcar, 13,7 milhões de metros cúbicos de álcool e, atualmente, tem usado o bagaço como fonte para geração de energia elétrica. Desde muitas décadas as folhas tem sido queimadas para otimizar a colheita, o que tem causado vários danos ao meio ambiente e freqüentes acidentes ocupacionais e rodoviários. Assim o estudo da remoção mecânica da folha torna-se um fator importante tanto no desenvolvimento de equipamentos despalhadores bem como no uso desta como combustível. A primeira fase experimental incluiu o despalhamento da folha por tração, sendo realizada no laboratório com auxílio de uma garra fixada à máquina universal de ensaios ligada ao sistema aquisição de dados. A variação da taxa de deformação foi considerada uma variável de estudo. Os ângulos de despalhamento foram, 45°, 90° e 135°. Através do ensaio de tração foi possível obter valores de força de ruptura versus deformação, bem como a influência das taxas de deformações. Os parâmetros utilizados no projeto do mecanismo de rolos revestidos de borracha foram: a força de ruptura da folha e o coeficiente de atrito da folha com a borracha. Para isso, os rolos foram fixados por um braço articulado para promover a força normal entre os contatos dos rolos para promover a remoção das folhas. Os resultados permitiram concluir que o ângulo de 45° apresentou maior valor de resistência a ruptura da folha, com um valor de força de 118 N. Verificou-se que as taxas de deformações não diferiram entre si, dessa forma a folha não caracterizou-se como material viscoelástico dentro do intervalo de taxas de deformação estabelecidas

neste estudo. Altos valores de desvios padrões e coeficientes de variação devem ser o motivo por este comportamento não ter sido evidenciado, as mesmas considerações são feitas para os ângulos de tração. Os parâmetros mecânicos força de ruptura e coeficiente de atrito utilizados para a confecção do mecanismo mostraram-se satisfatórios, pois as folhas que tiveram contato com os rolos foram removidas. A maior eficiência para uma condição real de trabalho do mecanismo de limpeza foi de 5,6% a uma velocidade tangencial dos rolos de 0,53 m/s. Esta baixa eficiência indica que o mecanismo de limpeza proposto é inviável como dispositivo de remoção de folhas. Após a fase experimental do mecanismo de limpeza, não foi notado danos mecânicos nos colmos e gemas, indicando, dessa maneira, a viabilidade da utilização de dispositivos de limpeza construídos ou revestidos de borracha.

ABSTRACT

This research work reports a study on the mechanical behavior of sugar cane leaves, considered important to the harvesting process. The Brazilian production is about 13,5 millions of metric tons of sugar, 13.7 billion liters of alcohol and a small but increasing amount of electricity through the use of bagasse as fuel. Since many decades leaves have been burned prior to harvesting causing environmental disasters and frequent accidents. It should be emphasized that the mechanical removal of leaves would also allow the employment of the trash as fuel. The experimental procedure includes the detachment of leaves by traction by means of specially designed clamps adapted to load cells in a press. Due to the viscoelastic properties of leaves, strain rate was considered as a controlled variable. Angles of the detachment were selected as 45° , 90° and 135° . From the surveyed data it was possible to obtain force and deformation values at failure as well as the influence of strain rate on the failure process. These parameters were also used to design a set of five rubber rollers disposed as snappers to remove the leaves. Friction coefficient between rubber and leaves were also determined. The rollers were fixed by articulated arms permitting the generation of a normal force between them, aiming to remove the leaves. The results allow to conclude that for 45 degree angle, the leaves presented greater failure resistance equal to 118 N force. It was observed that the strain rates were not different from each other, in other words, the leaves did not present a viscoelastic behavior in the interval of the strain rates established for this study. The high values of standard deviation and the

variation coefficient indicates that there is no difference between traction angle as well as the viscoelastic behavior of the leaves. The mechanical parameter values of the failure force and friction coefficient applied on the design of the apparatus, were satisfactory, because the leaves that were in contact to the rollers were removed. The great efficiency value reached for a real work condition was 6% with a tangential speed of 0,53 m/s. This low value indicates that the proposed apparatus design is not viable in what concerns the leaves removing. After the experimental tasks it was observed that the stalk and gem of the sugar cane were not injured, proving that it is viable to design mechanisms of leaves removing with a rubber covered

SUMÁRIO

Página

LISTA DE SÍMBOLOS	i
-------------------------	---

LISTA DE FIGURAS	ii
------------------------	----

LISTA DE TABELAS	iv
------------------------	----

<i>I. INTRODUÇÃO</i>	1
-----------------------------------	---

<i>II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</i>	5
---	---

2.1 Aspectos relevantes sobre a colheita da cana crua	5
---	---

2.1.1 Perdas de matéria prima decorrente da queimada	5
--	---

2.1.2 Resíduos do processo de colheita da cana crua no solo	6
---	---

2.1.3 Colheita mecânica da cana crua	6
--	---

2.1.4 Palhiço no processo de industrialização	7
---	---

2.2 Ensaio mecânico com tecido vegetal	7
--	---

2.3 Ensaio mecânico com folhas	9
--------------------------------------	---

2.4 Ensaio mecânico com folhas de cana-de-açúcar	11
--	----

2.5 Sistemas mecânicos de limpeza da cana crua	12
--	----

<i>III. TEORIA BÁSICA</i>	18
--	----

<i>IV. MATERIAL E MÉTODOS</i>	20
--	----

4.1 Material	20
--------------------	----

4.2 Método	23
------------------	----

4.2.1 Ensaio uniaxial de tração até a ruptura da folha	23
--	----

4.2.2 Caracterização do material experimental	25
4.2.3 Coeficiente de atrito folha e colmo com a superfície de borracha dos rolos.....	26
4.2.4 Considerações iniciais básicas para a elaboração do mecanismo	26
4.2.5 Uso dos parâmetros mecânicos da folha na confecção	
do mecanismo de limpeza.....	28
4.2.6 Danos mecânicos nas gemas e nos internódios após a operação de limpeza.....	28
4.2.7 Ensaio experimentais no mecanismo de limpeza	29
V. RESULTADOS E DISCUSSÕES	30
5.1 Ensaio uniaxial de tração em folha de cana-de-açúcar	30
5.2 Considerações básicas sobre o mecanismo de limpeza de folhas.....	44
5.3 Dimensionamento do mecanismo de limpeza pelos parâmetros da folha	46
5.4 Avaliação do mecanismo de limpeza	46
VI. CONCLUSÕES	52
VII. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	53
VIII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54
ANEXOS	

LISTA DE SÍMBOLOS

unidade

ν - coeficiente de Poisson	-
δ_{ij} - delta de Kronecker	-
ψ_s - função “creep” deviatórica	Pa
ψ_v - função “creep” volumétrica	Pa
ϕ_s - função “relaxation” deviatórica	Pa
ϕ_v - função “relaxation” volumétrica	Pa
E - módulo de elasticidade longitudinal	Pa
G - módulo de elasticidade transversal	Pa
ϵ_{kk} - tensor deformação específica hidrostática	Pa
$\epsilon_{ij}(t)$ - tensor deformação total em função do tempo	mm/mm
σ_{kk} - tensor tensão hidrostática	Pa
S_{ij} - tensor deformação específica deviatórica em função do tempo	mm/mm
$\sigma_{ij}(t)$ - tensor tensão total em função do tempo	Pa
D_c - diâmetro da cana	mm
D_r - diâmetro do rolo	mm
F_{at} - força de atrito da folha com a borracha dos rolos	N
K - módulo volumétrico	Pa
F_{eq} - força de equilíbrio do colmo com os rolos ($= N$)	N
w_c - peso da cana	N
μ_{cb} - coeficiente de atrito da cana com a borracha dos rolos	-
μ_{fb} - coeficiente de atrito da folha com a borracha dos rolos	-

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Ventiladores (extratores) de uma colhedora cana picada, (BRAUNBECK & MAGALHÃES, 1997).....	12
Figura 2.2 - Despalhador de rolos com taliscas. (TANAKA, 1996).....	13
Figura 2.3 - Despalhador inercial com facas oscilantes para cana inteira (PAGNANO, 1997).....	13
Figura 2.4 - Bancada de rolos limpadores para cana picada, detalhe de um para de rolos (CLAYTON & WITTEMORE, 1971)	14
Figura 4.1 - Representação esquemática do mecanismo de limpeza de folhas	22
Figura 4.2 - Representação esquemática em vista frontal do dispositivo utilizado no ensaio uniaxial de tração.....	24
Figura 4.3 - Representação esquemática em vista lateral do elemento móvel fixador da cana durante o ensaio uniaxial.....	25
Figura 4.4 - Esquema do equacionamento estático para determinação dos diâmetros dos rolos	27
Figura 5.1 - Valores de forças médias de ruptura para os ensaios de tração nos ângulos de 45°, 90° e 135° nas tres taxas de deformação	30
Figura 5.2 - Valores de forças médias de ruptura para os ensaios nas taxas de deformação de 0,8, 3,3 e 13,3 nos diferentes ângulos de tração.	33
Figura 5.3 - Energia média de ruptura para os ângulos 45°, 90° e 135° nas tres taxas deformação.....	36
Figura 5.4 - Força de tração em folha da cana-de-açúcar em função da deformação a uma taxa de 0,8 mm/s e ângulo de 90°	37
Figura 5.5 - Força de tração em folha da cana-de-açúcar em função da deformação a uma taxa de 3,3 mm/s e ângulo de 90°	37
Figura 5.6 - Força de tração em folha da cana-de-açúcar em função da deformação a uma taxa de 13,3 mm/s e ângulo de 90°	37
Figura 5.7 - Força de tração em folha da cana-de-açúcar em função da deformação a uma taxa de 0,8 mm/s e ângulo de 45°	38
Figura 5.8 - Força de tração em folha da cana-de-açúcar em função da deformação a uma de 3,3 mm/s e ângulo de 90°	38
Figura 5.9 - Força de tração em folha da cana-de-açúcar em função da deformação a uma de 13,3 mm/s e ângulo de 135°.....	39

Figura 5.10 - Força de tração em folha da cana-de-açúcar em função da deformação a uma de 0,8 mm/s e ângulo de 135°	39
Figura 5.11 - Força de tração em folha da cana-de-açúcar em função da deformação a uma de 3,3 mm/s e ângulo de 135°	40
Figura 5.12 - Força de tração em folha da cana-de-açúcar em função da deformação a uma de 13,3 mm/s e ângulo de 135°	40
Figura 5.13 - Ensaio uniaxial de tração da folha no ângulo de 45°	41
Figura 5.14 - Ensaio uniaxial de tração da folha no ângulo de 90°	41
Figura 5.15 - Ensaio uniaxial de tração da folha no ângulo de 135°	42
Figura 5.16 - Garra fixadora da folha da cana-de-açúcar	42
Figura 5.17 - Ruptura da folha da cana-de-açúcar	43
Figura 5.18 - Eficiência de limpeza do mecanismo quando a alimentação do colmo foi realizada pelas pontas	48
Figura 5.19 - Eficiência de limpeza do mecanismo quando a alimentação do colmo foi realizada pela base	48
Figura 5.20 - Vista superior da bancada de rolos justapostos (snappers) do mecanismo de limpeza	50
Figura 5.21 - Vista lateral do mecanismo de limpeza	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 - Força de ruptura da folha da cana-de-açúcar para o ângulo de tração de 90°	31
Tabela 5.2 - Força de ruptura da folha da cana-de-açúcar para o ângulo de tração de 45°	32
Tabela 5.3 - Força de ruptura da folha da cana-de-açúcar para o ângulo de tração de 135°	32
Tabela 5.4 - Força de ruptura da folha da cana-de-açúcar para a taxas de deformação de 0,8 mm/s	34
Tabela 5.5 - Força de ruptura da folha da cana-de-açúcar para a taxas de deformação de 3,3 mm/s	34
Tabela 5.6 - Força de ruptura da folha da cana-de-açúcar para a taxas de deformação de 13,3 mm/s	35
Tabela 5.7 - Quadro da força de equilíbrio entre a cana e diferentes diâmetros dos rolos.....	44
Tabela 5.8 - Quadro do diâmetro crítico da cana em relação ao arraste no mecanismo de limpeza	45

I. INTRODUÇÃO

Atualmente o Brasil é o maior produtor mundial de açúcar, sendo que a agroindústria sucroalcooleira representa um índice de 3% do PIB nacional, gerando diretamente mais de 1 milhão de empregos e, indiretamente mais de 300 mil, além de dar suporte a mais de 500 empresas de insumos. Embora esses números sejam expressivos, a colheita mecanizada ainda é incipiente e a prática da queima na pré-colheita é, ainda, bastante difundida, embora as perdas de sacarose causadas pela exsudação dos colmos ser significativa (FURLANI NETO et al., 1996, b).

Em relação aos impactos ambientais provocados pela queima da cana-de-açúcar, surgem tentativas de definir parâmetros para uma política no setor, requerendo esforços que viabilizem a colheita da cana crua. Entretanto, um dos sérios problemas na colheita mecânica da cana crua é a remoção do palhiço, o qual promove aumentos nos gastos de transporte da cana do campo até a usina, por causar redução na densidade de carga transportada. Além das implicações negativas que acarreta no processo industrial devido a diminuição do grau de pureza para a obtenção do açúcar (MAGALHÃES 1993).

Recentemente, a colheita da cana crua tem sido viabilizada, por que o setor canavieiro passou a valorizar as vantagens econômicas e ecológicas desta exploração, segundo PAGNANO (1997) citando Cortez 1992. Além da valorização atual do bagaço da cana, através da política de compra do excedente de energia elétrica produzida pelas usinas de açúcar e destilarias de álcool, e sua valorização para outros fins mais nobres, as usinas

estão atentas para a possibilidade de se utilizar o palhiço da cana-de-açúcar juntamente com o bagaço geração de vapor nas caldeiras.

Para o desenvolvimento de máquinas que permitam a remoção das folhas e facilitem a colheita da cana crua, é importante o conhecimento teórico do comportamento mecânico das folhas visando, sobretudo, o equacionamento desta quando submetida a operação de limpeza no mecanismo despalhador.

A ruptura do tecido vegetal pode ser considerada uma injúria mecânica ou um objetivo a ser atingido, dependendo do tipo de material que está sendo manuseado e a aplicabilidade final. Esse ponto de falha ou ruptura é atingido quando uma solicitação qualquer ultrapassa o limite elástico do material, acima do qual a deformação produzida não pode ser recuperada. A ruptura é uma característica mecânica do material, havendo várias teorias propostas para esse fenômeno. Através do conhecimento dessa característica mecânica, operações como destacamento de frutos do pedúnculo, remoção de folhas e tubérculos, limites mecânicos em grãos e colmos durante a colheita e processamento, são de grande interesse para projetistas de máquinas agrícolas.

O desenvolvimento teórico do comportamento mecânico do material vegetal se baseia na mecânica dos meios contínuos que, como o próprio nome sugere, considera o material ideal, isotrópico e homogêneo. Tal teoria serve de base para o estudo do relacionamento entre a tensões-deformações e tempo, as quais, relacionadas com funções e constantes mecânicas expressam leis comportamentais do material em estudo, resumindo as leis básicas da elasticidade e da viscoelasticidade, gerando as equações constitutivas do material. No entanto, o tecido vegetal é descontínuo, anisotrópico e heterogêneo. Considerá-lo como um meio contínuo, é a forma mais usual de se caracterizar este tipo de material e a forma de se aplicar as teorias existentes.

O material biológico quando submetido a tensões exibe um comportamento elástico que é combinado com um comportamento viscoso. Para o primeiro, a resposta da

tensão não depende do tempo já, para o segundo, a resposta é significativamente dependente do tempo. Durante ensaios de aplicação de carga em frutas e vegetais, com diferentes taxas de deformações específicas, MOHSENIN (1963) verificou diferenças nos valores de forças de até 33% para uma mesma deformação específica. As variações dessas taxas revelam características mecânicas próprias ao material, e devem ser consideradas na tomada de decisões no desenvolvimento de equipamentos destinados ao seu manuseio.

Dessa maneira, a determinação das propriedades mecânicas do material biológico é um elemento fundamental quando se pretende projetar equipamentos agrícolas funcionais e energeticamente eficientes.

Um estudo do comportamento mecânico da remoção da folha da cana-de-açúcar foi realizado MIABE & ABE (1976). Os autores utilizaram uma única taxa de deformação, assumindo assim um comportamento elástico desse material. No entanto, vários autores são citados por MOHSENIN (1986) interpretam os produtos agrícolas como viscoelástico, isto é, o parâmetro tempo esta presente nos modelos analíticos ou analógicos que descrevem o comportamento do material quando este está submetido a carregamentos.

O presente trabalho teve por objetivo caracterizar mecanicamente a ruptura da folha da cana-de-açúcar a diferentes ângulos de tração e diferentes taxas de deformação. Os parâmetros determinados foram: força normal máxima, deformação normal máxima e energia máxima de ruptura. De posse dessas informações, foi construído um mecanismo de rolos justapostos (“snappers”) que promoveu a remoção das folhas por tração. Ainda nessa etapa, foi quantificada a eficiência de limpeza a três diferentes velocidades de rotação dos rolos do mecanismo.

II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Aspectos relevantes sobre a colheita da cana-crua

2.1.1 Perdas de matéria-prima decorrentes da queimada

Uma das preocupações existentes no meio técnico-científico diz respeito às queimadas de pré-colheita que, a despeito de alguns benefícios que trazem para a otimização da colheita, representam problemas de ordem ambiental, em função direta da queima, e de ordem econômica, indiretamente, por causarem a exsudação nos colmos em períodos de pós queima. Durante ensaios preliminares realizados para determinar as perdas de ART decorrente da exsudação dos colmos foram encontrados valores variando de 55,82 a 279,13 litros de álcool por hectare. Essas variações encontradas foram funções das condições climáticas no momento da queima e de outras características correlacionadas com as condições de campo. Segundo RIPOLI et al. (1996) essas perdas de equivalente em álcool equivalente devido a exsudação dos colmos decorrente da queima, devem ser consideradas significativas.

2.1.2 Resíduos do processo de colheita da cana crua no solo

A prática de manejo mais generalizada na cultura da cana-de-açúcar no Brasil é a operação de queimada para facilitar a colheita. A manutenção do palhço em canaviais varia em quantidade de 5 a 17 t/ha de matéria seca (URQUIAGA, et al., 1989). A presença do palhço no solo contribui para o aumento da matéria orgânica, promove o cobrimento do solo com controle eficiente das ervas daninhas, aumenta a infiltração da água no solo, diminui a evaporação e a excessiva radiação solar, diminui o escoamento superficial, além de reduzir significativamente o uso de herbicidas, (URQUIAGA et al., 1991).

2.1.3 Colheita mecânica da cana crua

No sistema de colheita mecânica da cana-de-açúcar, uma das variáveis significativas é a quantidade de matéria-prima não colhida na operação, o que refletirá em perdas econômicas que podem chegar a inviabilizar a utilização de colhedoras, como agente de otimização do sistema de colheita (FURLANI NETO et al., 1996, a). Analisando o desempenho de uma colhedora comercial, em canavial de quarto corte, onde os tratamentos foram duas variedades de cana, colhidas com queima prévia e crua, os autores chegaram nos seguintes resultados: houve diferenças significativas ($\alpha = 0,05$) do efeito varietal com a condição de ausência de queima do canavial em relação a perdas totais de matéria-prima durante a operação de colheita. Esses autores, citam o estudo realizado por Lima (1994) sobre perdas totais na colheita mecânica em condição de cana queimada e cana crua, no qual encontrou resultados de perdas da ordem de 3,54 e 3,86 t/ha, respectivamente.

2.1.4. Palhiço no processo de industrialização

A matéria estranha em colheita mecânica da cana-de-açúcar refere-se a tudo o ~~que não for colmos industrializáveis e frações secas que acompanham a matéria-prima~~ podendo ser classificada de origem mineral ou vegetal, (STUPIELLO & FERNANDES, 1984).

Analisando sob o prisma do processamento vários autores tais como, Humbert & Payne (1960), Mayoral & Vargas (1966) e Cochran & Clayton (1968) citados por MUTTON et al. (1996) definiram as impurezas segundo seu efeito na industrialização da cana, como sendo qualquer material que contribui para a redução da produção, afetando a performance da indústria, causando desgaste de equipamentos tais como: facas, moendas, esteiras condutoras, bombas de caldo, entre outras, além de aumentar o consumo de energia e diminuir a pureza do caldo misto, reduzindo os coeficientes de extração e aumentando os custos de produção.

2.2 Ensaio mecânico com tecido vegetal

Através de estudos sobre “firmness” de frutas frescas submetidas a ensaios de compressão, MOHSENIN (1986) relata que esse ensaio é afetado pelas diferentes taxas de deformações. Analisando as curvas de tensão-deformação obtidas, foi verificado que inicialmente há uma relação linear entre tensão e deformação, não existindo influência das diferentes taxas aplicadas. A partir de um determinado ponto da curva, as taxas de deformação começam a influenciar os valores da tensão e da deformação, não havendo mais correspondência linear entre essas. A maior taxa de deformação específica nos ensaios, apresentou maior limite de tensão de ruptura. Esse fenômeno, que combina comportamento

elástico e viscoso para as curvas de tensão-deformação pode ser explicado pelo Modelo de Maxwell.

O conhecimento das propriedades mecânicas do material biológico sob carregamento estático ou dinâmico é o passo inicial no processamento de produtos agrícolas, redução de danos mecânicos durante o manuseio e armazenamento, e projetos de sistemas de colheita e pós colheita de produtos agrícolas. Máquinas agrícolas nacionais bem como as importadas, não seriam adequadamente projetadas e eficientes se não fossem consideradas as condições locais e as propriedades mecânicas do material. O estudo dessas propriedades não são enfatizados com muita frequência, exceto em países desenvolvidos, onde se tem preocupação com a auto-suficiência na produção agrícola e é dada atenção à utilização de inovações agro-tecnológicas, (ANAZODO, 1982).

Em estudos com o colmo da cana-de-açúcar, com intuito de determinar algumas propriedades mecânicas deste, MIABE et al. (1979 a) chegaram a conclusão de que a resistência à penetração varia do longo do colmo, tendendo a ser mais resistente nos internódios basais. A medida que aumenta a idade da cana, a resistência à flexão aumenta e a deflexão diminui do topo para a raiz, a resistência ao esmagamento seguiu a mesma tendência. Numa fase posterior de estudos, MIABE et al. (1979 b) determinaram a energia de impacto para cortar o colmo, sendo verificado que o tecido interno do colmo é mais elástico na parte superior do colmo em relação a base.

Algumas propriedades mecânicas foram determinadas por FERRAZ (1987), nesse estudo foi considerado apenas o comportamento elástico do internódio da cana-de-açúcar. Dentre os vários resultados encontrados pela análise das curvas tensão-deformação nos ensaios uniaxial e diametral, para os diferentes corpos de prova em estudos, o autor verificou que a casca contribui grandemente na resistência do colmo. As curvas tensão-deformação apresentaram um trecho linear, sendo assim possível expressar o módulo elástico aparente do material. O autor salienta a necessidade de trabalhos futuros com o

colmo da cana-de-açúcar, os quais são de suma importância na tomada de decisões durante os vários processos em que passa a cana, desde a colheita até o processamento na usina.

2.3 Ensaio mecânico com folhas

Um estudo do comportamento mecânico da folha do canteio através das curvas tensão-deformação, foi feito por GREENBERG et al. (1989). A folha foi ensaiada em duas seções, a basal e a apical, denominadas de grupo I e II, a duas taxas de deformação específica. Os parâmetros levantados e estudados das curvas foram: módulo de elasticidade, limite da tensão e deformação específica de proporcionalidade, limite da tensão e deformação específica de ruptura e energia de deformação no ponto da ruptura. Através dos resultados obtidos os autores verificaram que os grupos apresentaram diferenças significativas ($\alpha = 0,05$) em relação ao módulo de elasticidade, a tensão e a deformação no limite de proporcionalidade. As taxas de deformação também apresentaram diferenças significativas ($\alpha = 0,05$) para o módulo de elasticidade e energia de deformação no ponto de ruptura, os quais aumentaram diretamente com o acréscimo da taxa de deformação. Isso mostra o comportamento viscoelástico do canteio, o qual pode ser representado, qualitativamente, como tensão de resposta do elemento de Maxwell em função da taxa de deformação.

Segundo GREENBERG et al. (1989), o ensaio de resistência à ruptura de um material é geralmente complexo, dessa maneira, vários estudos tem sido realizados para determinar o parâmetro de resistência crítica, a qual é mais facilmente obtido pela medida de tensão. Através do estudo com ligas de titânio Hanhn & Rosenfield (1968) citado por GREENBERG et al. (1989) relataram que a deformação específica crítica para iniciar a ruptura é dado como o valor crítico da tensão; ou seja, a resistência a fratura (Kc), (equação 2.1), pode ser estimada através do ensaio de tração. Essa equação é apresentada em função

das seguintes variáveis: ponto de última resistência (S_y), largura da zona plástica no início da ruptura (l) e a deformação verdadeira de fratura no teste de tração uniaxial (ef). Os autores demonstraram que a largura da zona plástica pode ser aproximada pelo quadrado do expoente de rigidez do material.

$$K_{Ic} \sim (0.25 E S_y l ef)^{0.5} \text{ [MPa]} \quad 2.1$$

Utilizando a equação 2.1, GREENBERG et al. (1989) assumindo valores de rigidez do material variando de 0,1 a 0,5 encontraram valores de resistência à fratura para a folha do centeio entre 0,31 a $1,57 \times 10^5$ MPa. Os autores citam que estes valores apresentaram mesma ordem de grandeza dos encontrados anteriormente por Vicent (1982), confirmando os valores de K_{Ic} e energia específica de fratura para a cultura do centeio.

Na procura de otimizar processos industriais do processamento da folha do tabaco GANERIWALA (1990) estudou várias propriedades mecânicas desta cultura. O autor comenta que o conhecimento da folha ao nível de microestrutura, ajuda na generalização e interpretações de observações macroscópicas quando o material é submetido a ensaios de tensão-deformação. Pela análise das curvas tensão-deformação, o material não apresentou linearidade quando submetido as diferentes taxas de deformações específica e notou-se que o espécime da folha comportou-se como material ductil. Apesar de ter apresentado comportamento de material macio a folha mostrou-se resistente, característica mais evidente quando submetida ao cisalhamento que a tensão. O material comportou-se, sob carregamento, como viscoelástico, o qual tornou-se mais resistente a medida em que a taxa de deformação específica aumentava.

2.4 Ensaio mecânico com folhas de cana-de-açúcar

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

Em estudos envolvendo parâmetros quali-quantitativos da remoção da folha da cana foram analisados por SRIVASTAVA (1987). Através de análise dimensional, o autor chegou a uma equação na qual avalia a força requerida para remover a folha da cana. Os parâmetros abordados para a elaboração dessa equação, foram: maturidade do colmo, área de inserção da folha ao colmo, configuração do colmo, diâmetro nodal, entre outros. As folhas localizadas no topo do colmo apresentaram maior resistência ao despalhamento quando comparadas com as folhas da base; força requerida para a remoção das folhas verdes e secas ficaram entre 25,2 N e 0,098N. O coeficiente de correlação entre o valor observado da força requerida para o despalhamento e o valor estimado foi de 0,818, mostrando uma consistência entre os resultados calculados e os valores reais da força de despalhamento da cana-de-açúcar.

Estudos referentes a remoção da folha do colmo da cana-de-açúcar bem como sua resistência à compressão, foram realizados por PAGNANO et al. (1995). Os ensaios para avaliar as forças necessárias a remoção das folhas foram realizados com um dispositivo

de taliscas de 1/4", os quais geram uma força normal e uma força de tração no contato da talisca com a folha inserida no colmo. A força de fricção média para a remoção da folha ao longo do colmo foi de 308,9 N.

2.5 Sistemas mecânicos de limpeza da cana crua

Na tentativa da remoção de folhas durante a operação de colheita mecânica da cana-de-açúcar, vários mecanismos têm sido utilizados e pesquisados, tais como: extratores (ventiladores e exaustores), rolos com taliscas, facas oscilantes, bancada de rolos justapostos ("snappers"), dentre outros, conforme ilustram as Figuras 2.1, 2.2, 2.3, 2.4.

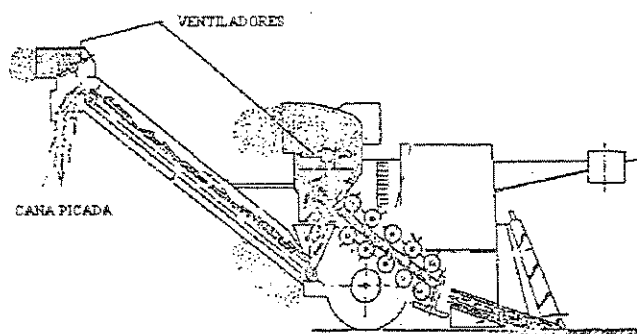


Figura 2.1 - Ventiladores (extratores) de uma colhedora de cana picada, (BRAUNBECK & MAGALHÃES, 1997).

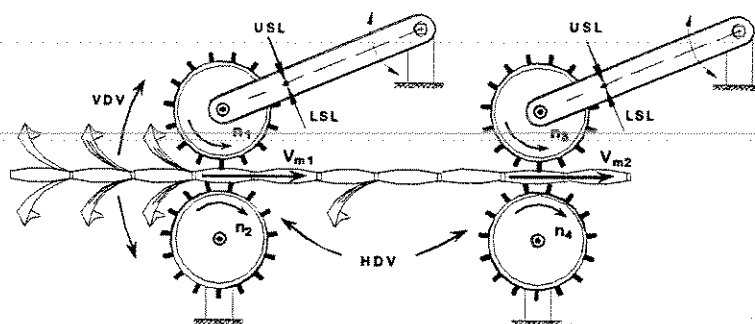


Figura 2.2 - Despalhador de rolos com taliscas (TANAKA, 1996)

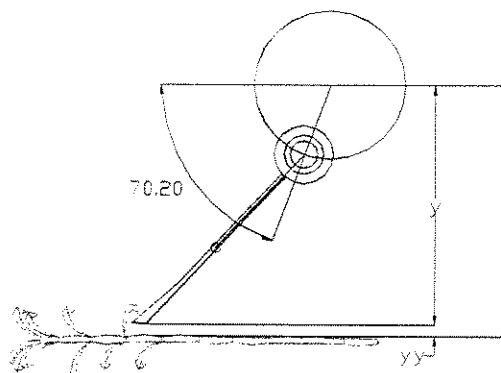


Figura 2.3 - Despalhador inercial com facas oscilantes para cana inteira (PAGNANO, 1997)

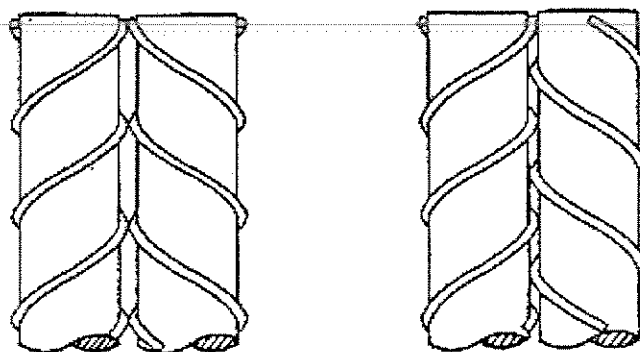


Figura 2.4 - Bancada de rolos limpadores para cana picada, detalhe para um de rolos (CLAYTON & WHITEMORE, 1971)

Desde 1968 o Brasil demonstra uma preocupação em colher cana-de-açúcar inteira crua. Para tal, foi proposto um mecanismo de limpeza que através do impacto de bastões ou chicotes flexíveis nas folhas ocasionava na remoção dessas, (Patente 203.875 de 1968). O dispositivo é constituído basicamente de uma estrutura fixa, motor hidráulico e rotores nos quais foram acoplados os bastões ou chicotes de material flexível.

Com o objetivo de desenvolver mecanismos de limpeza da cana crua (CLAYTON 1971), testou vários dispositivos mecânicos. As operações de colheita e de limpeza foram feitas separadamente, onde uma colhedora de cana picada alimentava uma unidade de limpeza. Os despalhadores que tiveram maior êxito foram os que utilizaram uma série de rolos, várias configurações e geometrias foram ensaiadas. O limpador de melhor eficiência na limpeza foi o construído com rolos degranadores de borracha, montado em um condutor de configuração em U. A cana era transportada por um parafuso sem fim de 36

polegadas no qual realizava a limpeza, este sistema diminuiu os resíduos de 20 para 5% e apresentou uma capacidade de desempenho médio de 15 t/h. O mecanismo de limpeza de melhor funcionamento foi o que estava equipado com uma bancada de rolos de aço com 5” de diâmetros, estes rolos eram recobertos externamente com uma espiral dupla de 0,5” de espessura e 1,5” de altura, com passo de 10”. Este mecanismo reduziu os resíduos de 20 para 8%, e apresentou uma capacidade de desempenho médio rendimento de 15 t/h.

Um sistema de limpeza para cana-de-açúcar picada e crua, formado por série de rolos combinados com barras de seções quadradas, de 2,5” de diâmetro e 3” quadradas respectivamente, foi proposto por CLAYTON & WHITEMORE (1971). Esse sistema foi instalado na base de um sistema transportador de cana, onde o movimento de avanço da cana sobre a base do mecanismo de limpeza era realizado por um sistema de barras. Os rolos e as barras apresentavam sentidos de rotações contrários, o que propiciava a remoção das folhas da cana por tração durante a operação do sistema de limpeza. Durante os ensaios foi verificado que houve uma certa dificuldade no movimento de avanço da cana sobre a base do limpador, quando esse estava totalmente equipado por rolos e barras de aço. Em função disso, foram instalados rolos de borracha na base do limpador, e foi verificado um aumento na agressividade e eficiência da limpeza, porém, os rolos de borracha expostos sem canas durante a operação desgastaram mais facilmente.

Com intuito de desenvolver mecanismos para colher cana inteira crua, SRISVASTAVA & SING (1990) desenvolveram um protótipo para remover as folhas secas e verdes da cana. Esse sistema era acionado pela TDP do trator constituído por uma unidade transportadora, rolos alimentadores e mecanismo de remoção de folhas. Nesse estudo, onze tipos de dispositivos de remoção foram testados, sendo o que apresentou melhores resultados foi um par de rolos com movimentos em posições opostas com escovas de aço na superfície externa. Os melhores resultados na limpeza foram conseguidos com velocidades

periféricas dos rolos acima 4 m/s. A unidade limpadora apresentou uma capacidade de desempenho médio de 1 t/h.

Na tentativa de viabilizar o processo da limpeza das folhas durante a colheita da cana inteira crua, TANAKA (1996) estudou e avaliou um mecanismo de rolos oscilantes através de um modelo matemático. Vários diferenciais de velocidades foram testadas, e a melhor eficiência de limpeza foi de 83% que aconteceu após duas passadas pelo mecanismo, nessa situação as velocidades entre os rolos superiores e inferiores apresentavam um diferencial de 43% e os rolos adjacentes de 29%. Embora nesta condição a eficiência de remoção de folhas tenha se apresentado elevada, essa condição do dispositivo esta disposição do mecanismo apresentou uma grande quantidade de gemas danificadas (26,5%) inviabilizando a sua utilização na colheita de cana-semente, já os danos mecânicos no colmo não foram significativos. O modelo matemático desenvolvido superestima as forças geradas nos braços oscilantes em -9,1% com pré-carga inicial nas molas helicoidais de 361 N, 40% nas forças com pré-carga inicial de 412 N, em relação aos valores obtidos nos ensaios; essas variações ocorreram em função das irregularidades existentes nos colmos, as quais provocam oscilações no movimento dos rolos.

PAGNANO (1997) estudou um mecanismo de limpeza de folhas para cana crua e inteira através de sistema de fricção por facas oscilantes, para o dimensionamento do sistema e validação dos esforços gerados na operação realizou-se um estudo analítico deste conjunto. Analisando os resultados foi verificado que a faca de 828 g provoca uma pressão sobre a cana superior ao seu limite de resistência (4,9 MPa) pela mesma, provocando danos a sua estrutura e as gemas. Com passagem da faca mais leve houve uma raspagem aparentemente adequada ao despalhe, sem que provocasse danos a cana. Nos valores de baixa rotação, 11 e 16 rad/s, as forças verticais e horizontais obtidos pelo método de Lagrange foram bastante representativos comparado aos dados da instrumentação, apresentando erro de +15% no primeiro caso e -6% no segundo caso. Já nos ensaios de alta

rotação, os valores provenientes do método de Lagrange superestimam as forças em 49 % em 22 rad/s e 109% em 25 rad/s em comparação aos dados da instrumentação. A autora salienta que mecanismo de limpeza como foi projetado e construído não se mostrou adequado a remoção de folhas da cana-de-açúcar; porém o princípio de facas oscilantes parece ser válido mas o mecanismo necessita de alterações.

III. TEORIA BÁSICA

Segundo MASE (1970) a mecânica dos meios contínuos preconiza dois comportamentos básicos para um material contínuo, isotrópico e homogêneo conhecidos como modelos elástico e viscoelástico. Para o comportamento elástico a Lei de Hooke em três dimensões pode ser expressa, como:

$$\sigma_{ij} = f[\epsilon_{ij}, E, \nu, G, K] \quad 3.1$$

Especificamente, pode-se dizer que:

$$\sigma_{ij} = \frac{E}{1+\nu} \left(\epsilon_{ij} + \frac{\nu}{1-2\nu} \delta_{ij} \epsilon_{kk} \right) \quad 3.2$$

ou

$$\epsilon_{ij} = \frac{1+\nu}{E} \sigma_{ij} - \frac{\nu}{E} \delta_{ij} \epsilon_{kk}$$

Onde E, ν , G e K são as conhecidas constantes elásticas.

Esta mesma equação transcrita em função do tempo toma a seguinte forma:

$$\sigma_{ij}(t) = f[\epsilon_{ij}(t), E(t), \nu(t), G(t), K(t)] \quad 3.3$$

Nas equação (3.3) as funções $E(t)$ $\nu(t)$, $G(t)$ e $K(t)$ são funções viscoelásticas, as quais caracterizam o material viscoelástico linear. Essas funções podem ser expressas em termo das funções “creep” e “relaxation”, denotados por $\psi(t)$ e $\phi(t)$. Nesse caso os tensores σ_{ij} e ϵ_{ij} se relacionam através das seguintes expressões:

$$\epsilon_{ij}(t) = \int_0^t \psi_s(t-t') \frac{\partial S_{ij}(t')}{\partial t'} dt' \quad 3.4$$

$$\epsilon_{ii}(t) = \int_0^t \psi_v(t-t') \frac{\partial \sigma_{ii}(t')}{\partial t'} dt' \quad 3.5$$

$$S_{ij}(t) = \int_0^t \phi_s(t-t') \frac{\partial \epsilon_{ij}(t')}{\partial t'} dt' \quad 3.6$$

$$\sigma_{ii}(t) = \int_0^t \phi_v(t-t') \frac{\partial \epsilon_{ii}(t')}{\partial t'} dt' \quad 3.7$$

IV. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Material

O material empregado neste trabalho inclui:

- Cana-de-açúcar variedade SP 792233

Essa variedade apresenta boa produtividade, características levemente decumbente, porém não acama, apresentando despalha média, perfilhamento alto, com crescimento regular e alta uniformidade dos colmos da touceira. A copa foliar apresenta folhas de largura média com pontas curvas, sendo o volume da copa denso. Possui, ainda, como características positivas o baixo nível de florescimento, sem chochamento, boa brotação da soqueira, pouca sensibilidade a herbicidas e apresenta resistência a broca (COPERSUCAR, 1993).

- Máquinas universal de ensaios

A máquina universal utilizada para realização dos ensaios foi o Instron Model 1130 Tester (Instron Corporation Canton, Massachusetts), pertencente ao Laboratório de Instrumentação da Faculdade de Engenharia de Alimentos - UNICAMP- local onde foi realizada a fase de ensaios de tração da folha.

- Instrumentos utilizados na aquisição dos dados

1. Microcomputador notebook 486 DX 4-100, marca Digmaç.
2. Célula de carga de capacidade de 200 N em formato “S”.
3. Condicionador de sinais marca HBM
4. Multímetro digital marca MIC 7000 Ft
5. Cartão de aquisição PCMCIA marca National Instruments DAQ CARD 7000 barramento PC CARD
6. Software NI DAWARE for Windows 4.8.5

Todos os equipamentos citados anteriormente pertencem ao Laboratório de Instrumentação Eletrônica da Faculdade de Engenharia Agrícola – UNICAMP- e foram cedidos para a execução do trabalho.

- Mecanismo de Limpeza

O mecanismo de limpeza é composto por uma bancada de cinco rolos justapostos – (“snappers”) com 50 mm de diâmetro, construído em barra de aço treilado de 38 mm de diâmetro e revestido por um tubo de borracha de 38 mm de diâmetro interno com espessura de parede de 6 mm. Os rolos sucessivos apresentavam sentido de rotação opostos de forma a propiciar a remoção das folhas por tração. Apenas 2 pares de rolos mantêm contato entre si, sendo estes os responsáveis pela limpeza, o último rolo tem finalidade apenas de realizar a alimentação da cana ao longo do mecanismo, conforme ilustra a Figura 4.1.

Para a determinação da energia de ruptura da folha da cana-de-açúcar foi utilizado o programa MATLAB for Windows versão 4.2.

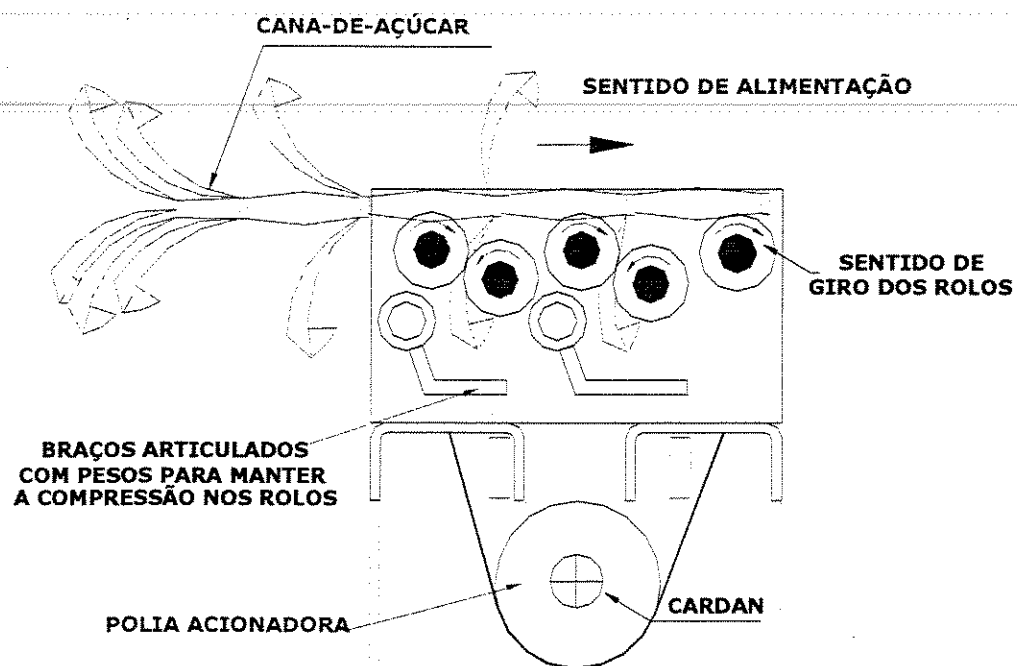


Figura 4.1 Representação esquemática do mecanismo de limpeza de folhas

4.2 Método

4.2.1 Ensaio uniaxial de tração até a ruptura da folha

Os ensaios de tração da folha da cana foram realizados em folhas secas localizadas no 12º internódio. Tal escolha é devido esta região ser a área do colmo onde acontece a transição de folhas secas e verdes, sendo assim a região de maior resistência a remoção das folhas secas, a qual aumenta a medida que se distância da base da cana.

Os ensaios foram realizados na máquina universal de ensaios a três diferentes taxas de deformação, sendo estas 0,83, 3,33 e 13,33 mm/s.

Os parâmetros medidos no ensaio foram: força normal de ruptura, e deformação normal de ruptura $\dot{\epsilon}(t)$. Todos esses parâmetros foram medidos a três diferentes ângulos da folha em relação ao colmo, sendo, 45°, 90° e 135°. Os valores desses ângulos foram baseados em estudos realizados por MIABE & ABE (1976), os quais mediram as forças de destacamento da folha do colmo a uma taxa de deformação constante.

O ensaio uniaxial de tração da folha é mostrado esquematicamente nas Figura 4.2 e 4.3.

Para a realização do ensaio, a folha juntamente com o colmo (A), ou seja, o corpo de prova de 300 mm, foram fixados num elemento móvel (B), montado num suporte e fixado na base da máquina universal (C), conforme ilustrado na Figura 4.2. O elemento móvel teve a finalidade de propiciar a liberdade de movimento da cana durante o ensaio, no intuito de minimizar as componentes das forças laterais, para se obter um valor de força

mais próximo do plano normal de tração. Já a variação dos ângulos ensaiados (45° , 90° e 135°) foi conseguida através de uma articulação móvel (D), localizada acima da base da máquina universal. Para prender a folha da cana para e dar início ao ensaio de tração, foi necessário prender a folha da numa garra (E) fixa a uma célula de carga, e esta, presa ao cabeçote da máquina universal de ensaios.

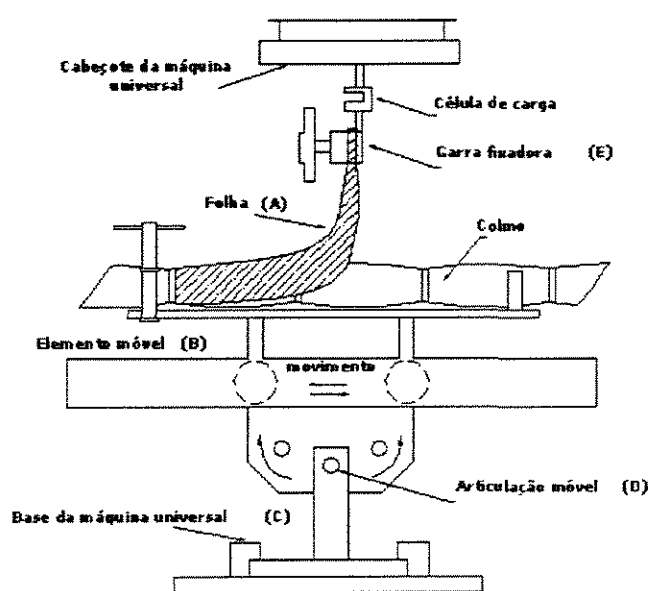


Figura 4.2 - Representação esquemática em vista frontal do dispositivo utilizado no ensaio uniaxial de tração

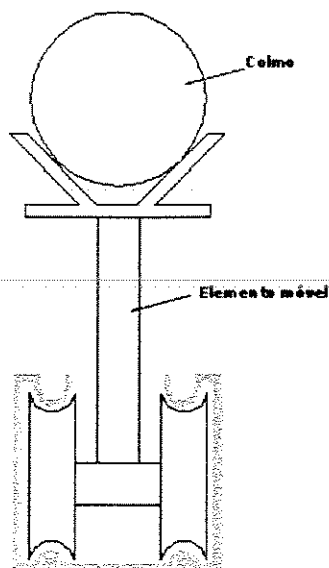


Figura 4.3 - Representação esquemática em vista lateral do elemento móvel fixador da cana durante o ensaio de tração

Durante o ensaio, uma célula de carga de 200 N fixada na garra transmitia os sinais analógicos, os quais foram convertidos em sinais digitais através de um conversor analógico-digital operando numa taxa de 25 Hz. Os dados foram armazenados no programa no microcomputador para posterior análise das curvas de força versus deformação.

A obtenção dos parâmetros força versus taxa de deformação, foram determinados a partir de 15 amostras.

4.2.2 Caracterização do material experimental

Como a caracterização do material é importante na interpretação, extrapolação e referência fundamental para trabalhos futuros, foram obtidos alguns dados de relevância da variedade de cana-de-açúcar e da borracha de revestimento dos rolos do mecanismo de

limpeza (Anexo 4.).

4.2.3 Coeficiente de atrito entre a folha e colmo com a superfície de borracha dos rolos

A determinação dos coeficientes de atrito estático da folha e do colmo com a superfície de borracha dos rolos, foi importante para se determinar a força normal (N) que deve ser aplicada entre os rolos para realizar na remoção da folha, conforme ilustra a equação (4.1). De posse do coeficiente de atrito do colmo com os rolos e através da equação estática que será apresentada no item 5.2. pode se escolher o diâmetro para construção dos “snappers” de forma a não provocar danos por esmagamento da cana.

$$F_{at} = N \cdot \mu \quad 4.1$$

4.2.4 Considerações iniciais básicas para o projeto do mecanismo.

O princípio operacional proposto para o despalhamento através de rolos, assume que as canas estão se movimentando sobre os rolos com seu eixo geométrico longitudinal orientado perpendicularmente ao eixo dos rolos. Com tudo, acidentalmente existirão canas ou fragmentos das mesmas com seu eixo disposto paralelamente ao eixo dos rolos, como ilustra a Figura 4.4, o que poderá provocar o esmagamento das mesmas no caso dos diâmetros dos rolos ser suficientemente grandes. O diâmetro dos rolos deve ser definido no projeto de forma a evitar que a soma do peso do colmo mais as componentes normais das forças de atrito (μN) não superem a soma das componentes verticais das

reações normais (N). Esta condição de projeto pode ser obtida do equilíbrio estático de um colmo de cana apoiado sobre dois rolos justapostos, conforme ilustrado na Figura 4.4.

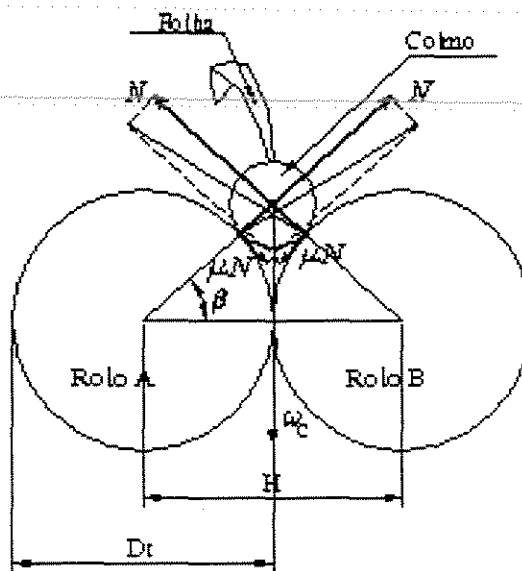


Figura 4.4 - Esquema do equacionamento estático para a determinação do diâmetro dos rolos.

O desenvolvimento da equação que relaciona a força normal, o diâmetro dos rolos, o coeficiente de atrito, assim como o peso e diâmetro da cana, é apresentado no item 5.2. Desta maneira, através da variação dos parâmetros considerados no equacionamento, obteve-se a força normal que mantém a condição de equilíbrio entre a cana e os rolos. Forças acima desse valor, representam a situação após a qual não há mais interesse no aumento dos diâmetro dos rolos, por haver arraste e esmagamento da cana pelos mesmos.

4.2.5 Uso dos parâmetros mecânicos da folha na confecção do mecanismo de limpeza

Para o dimensionamento do dispositivo de rolos foi utilizada a força máxima de ruptura da folha, obtida com os vários ângulos ensaiados nas diferentes taxas de deformações. Através da determinação dos diâmetros dos rolos e dos coeficientes de atrito estático da folha realizados sob as considerações feitas anteriormente, determinou-se a força de compressão entre os rolos para remover a folha da cana-de-açúcar. A força normal (N) de compressão ilustrada na equação (4.1) será mantida através de um sistema de braços articulados fixados nos rolos durante a operação do dispositivo, como ilustrado anteriormente na Figura 4.1.

4.2.6 Danos mecânicos nas gemas e nos internódios após a operação de limpeza

O método utilizado para verificar os danos nas gemas e nos colmos após a passagem destes pelo mecanismo de limpeza constou de, uma inspeção visual, e uma contagem dos danos mecânicos ocorridos depois da operação de remoção das folhas. Os danos no colmo e na gema foram classificados de três formas, sendo: ausência de danos, esmagamento e esmagamento com ruptura de material. A quantificação dos danos foi realizada em termos percentuais de gemas e internódios danificados.

4.2.7 Ensaios no mecanismo de limpeza

A avaliação do mecanismo de limpeza foi realizada com base na eficiência da remoção de folhas e em relação a danos no colmo e nas gemas, a três velocidades tangenciais dos rolos definidas através de ensaios preliminares para verificar a faixa na qual o mecanismo promovia a remoção das folhas. A alimentação da cana no mecanismo foi realizada de duas maneiras; a primeira, alimentando-se o mecanismo com a base do colmo, situação comum durante a colheita mecanizada; e a segunda alimentando-se o mecanismo com o topo do colmo. Esta segunda situação de alimentação só foi utilizada para efeito de comparação com a primeira situação. A variação das rotações foram conseguidas com auxílio de uma unidade hidrostática acoplada ao mecanismo de limpeza.

V. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Ensaio uniaxial de tração em folha de cana-de-açúcar

Os resultados mostram que há uma tendência das forças médias de ruptura no ângulo de 45° nas taxas de 0,8, 3,3 e 13,3 mm/s, serem maiores que os valores de forças de ruptura, que nos ângulos de 90° e 135°, com exceção do ângulo de 90° na taxa de 3,3 m/s, conforme ilustra a Figura 5.1. Esse fato pode ser explicado por ter sido o ângulo de tração de 45° aquele que ocasionou os menores danos na área de inserção da folha ao colmo, durante a conexão da folha na garra antes do início do ensaio. A tração com um ângulo de 135° apresentou menor resistência à ruptura, devido ao procedimento para prender a folha à garra fixadora. Isto provocou rachaduras da folha no sentido longitudinal das fibras, que na maioria dos casos, se propagaram até a área de inserção da folha, diminuindo a resistência na região. Essas rachaduras não ocorreram para os demais ângulos ensaiados. As ilustrações dos ensaios para os ângulos em questão são mostradas nas Figuras 5.13, 5.14 e 5.15.

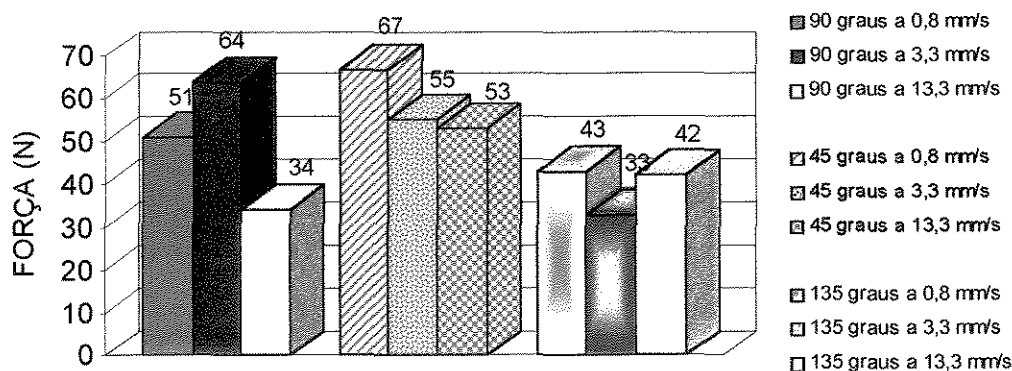


Figura 5.1 – Valores de forças médias de ruptura para os ensaios de tração nos ângulos de 90°, 45° e 135° nas três taxas de deformação.

Apesar das considerações feitas anteriormente sobre os ângulos de tração da folha, verificou-se que para os ângulos de 45, 90 e 135° nas diferentes taxas de deformação não apresentaram diferenças estatísticas entre as forças de ruptura. Os altos valores do desvio padrão e do coeficiente de variação podem ser o motivo por não ter havido diferenças entre essas três variáveis, como pode ser observado nas Tabelas 5.1 a 5.3. A alta variabilidade das medidas de posição e de dispersão é característica intrínseca das propriedades mecânicas da folha da cana-de-açúcar.

**Tabela 5.1 Forças de ruptura da folha da cana-de-açúcar para o ângulo de tração de 90°
n=45 amostras**

Forças de ruptura da folha (N)				
49	41	59	56	32
15	89	103	64	23
43	51	91	48	43
55	34	34	27	22
56	68	58	30	48
40	93	113	38	40
45	62	68	18	39
51	75	51	73	28
28	56	25	12	36
Força máxima = 113 N			Média = 50 N	
Coeficiente de variação = 46 %			Desvio padrão = 23 N	

Tabela 5.2 Forças de ruptura da folha da cana-de-açúcar para o ângulo de tração de 45°
n= 45 amostras

Forças de ruptura da folha (N)				
110	118	67	76	52
40	20	43	45	58
32	69	51	13	74
69	19	25	20	84
67	41	54	54	59
80	105	92	28	101
98	64	38	12	101
39	71	50	35	31
101	21	111	57	26
Força máxima = 118 N			Média = 58 N	
Coeficiente de variação = 52%			Desvio padrão = 30 N	

Tabela 5.3 Forças de ruptura da folha da cana-de-açúcar para o ângulos de tração de tração de 135°
n = 45 amostras

Forças de ruptura da folha (N)				
64	45	23	15	19
61	22	38	21	52
30	50	31	17	31
53	27	19	58	39
35	37	59	38	37
50	31	14	56	50
35	47	40	25	25
18	19	20	59	37
80	84	46	39	65
Força máxima = 84 N			Média = 39 N	
Coeficiente de variação = 44%			Desvio padrão = 17 N	

Através da Figura 5.2 verifica-se não haver aumento das forças de ruptura com o aumento das taxas de deformação, ou seja, o parâmetro tempo não influenciou as determinações para as baixas taxas de deformação aplicadas em função do equipamento disponível (máquina universal). Desta maneira, pode-se dizer que não se observou características viscoelásticas da folha da cana-de-açúcar para a amplitude de taxas de deformação considerada nos ensaios. As mesmas considerações feitas anteriormente para

força média de ruptura são mantidas para as diferentes taxas de deformação. A alta variabilidade do desvio padrão e do coeficiente de variação não permitiu que os efeitos viscoelásticos pudessem ser notados, segundo indicam as Tabelas 5.4 a 5.6. Apresenta-se no Anexo 1 os testes de médias de ângulos de tração e taxas de deformação.

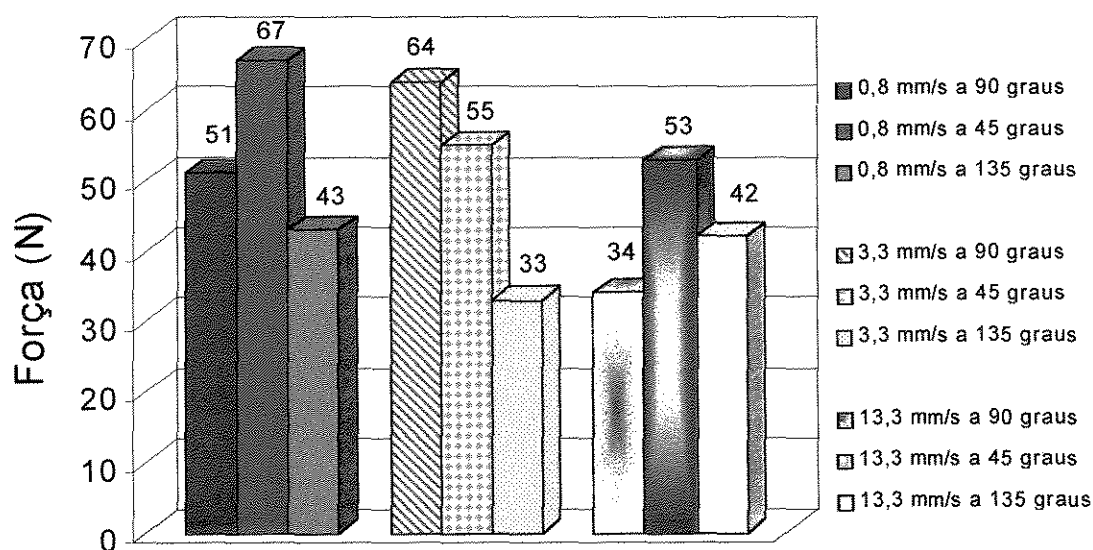


Figura 5.2 – Valores de forças médias de ruptura para as taxas de deformação de 0,8, 3,3 e 13,3 m/s nos três ângulos de tração.

**Tabela 5.4 - Forças de ruptura da folha da cana-de-açúcar para a taxa de deformação de 0,8 mm/s
n = 45 amostras**

<i>Forças de ruptura da folha (N)</i>				
49	41	69	19	35
16	89	67	41	18
43	51	79	105	81
55	34	98	64	45
56	68	39	61	22
40	93	101	30	50
45	110	118	53	27
52	32	20	35	37
28	40	69	50	31

Força máxima = 118 N

Média = 55 N

Coefficiente de variação = 53%

Desvio padrão = 29 N

**Tabela 5.5 Força de ruptura da folha da cana-de-açúcar para as taxas de deformação 3,3 mm/s
n= 45 repetições**

<i>Forças de ruptura da folha (N)</i>				
62	68	67	76	19
75	51	43	45	59
56	25	51	13	14
59	56	25	47	40
103	64	54	19	20
91	48	92	84	46
34	64	38	23	15
58	71	50	38	21
113	21	111	31	17

Força máxima = 113 N

Média = 51 N

Coefficiente de variação = 51%

Desvio padrão = 26 N

**Tabela 5.6 Forças de ruptura da folha da cana-de-açúcar para as taxas de deformação 13,3 mm/s
n= 45 repetições**

Forças de ruptura da folha (N)				
27	22	12	101	19
30	48	35	31	52
38	40	57	26	31
18	39	52	58	39
73	28	58	38	37
12	36	74	56	50
32	20	84	25	25
23	54	59	59	37
43	28	101	39	65
Força máxima=101 N			Média = 43 N	
Coeficiente de variação= 49%			Desvio padrão =21 N	

Analisando-se a Figura 5.3 nota-se que, para o ângulo de 135° nas três taxas de deformação a energia de ruptura foi em média cerca de duas vezes superior aos resultados correspondentes aos ângulos de 45 e 90°. Isso ocorreu em virtude da necessidade de se apoiar o elemento móvel, Figura 4.3, que fixava o colmo até o início do ensaio de tração. Feito isso, iniciava-se o processamento dos dados e concomitantemente o elemento móvel era liberado. Observou-se que o peso do elemento móvel juntamente com a cana, ocasionou um movimento de avanço não uniforme e com solavancos sucessivos causando uma sobrecarga constante até o final dos testes. Esse efeito é mostrado graficamente nas Figuras 5.10, 5.11 e 5.12. Nota-se que o incremento da força em função da deformação no ângulo de 135° é maior que nos ângulos de 45 e 90°, devido ao efeito da sobrecarga, a qual não foi observada nos demais casos onde o movimento do elemento aconteceu de maneira uniforme e sem sobrecargas. Desta maneira, a energia de ruptura do ângulo de 135° deve ser desconsiderada. Apresenta-se no Anexo 2 o procedimento utilizado no cálculo da energia de ruptura da folha da cana-de-açúcar.

Durante os ensaios de tração foi verificado que 96% das folhas romperam-se na região de inserção desta com o colmo, a ruptura da folha após o término do ensaio é ilustrada na Figura 5.17.

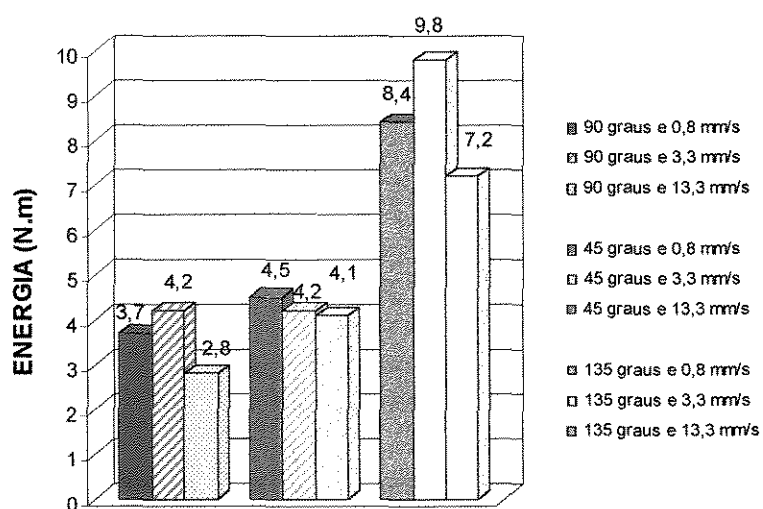


Figura 5.3 - Energia média de ruptura para os ângulos de tração 90°, 45° e 135° nas três diferentes taxas de deformação

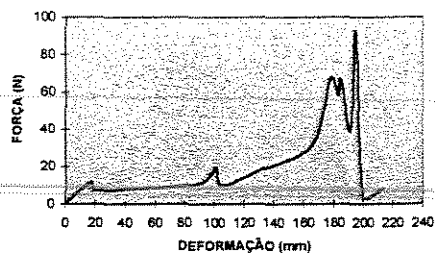


Figura - 5.4 – Força de tração em folha de cana-de-açúcar em função da deformação a uma taxa de 0,8 mm/s e ângulo de 90°.

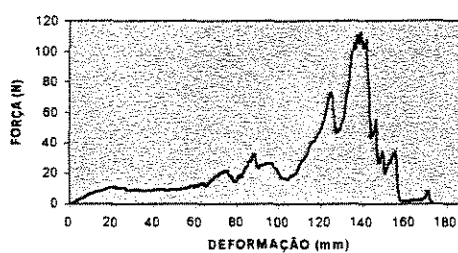


Figura 5.5 – Força de tração em folha de cana-de-açúcar em função da deformação a uma taxa de 3,3 mm/s e ângulo de 90°.

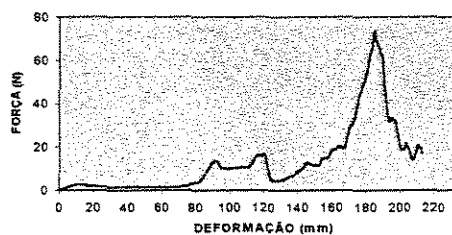


Figura 5.6 – Força de tração em folha de cana-de-açúcar em função da deformação a uma taxa de 13,3 mm/s e ângulo de 90°.

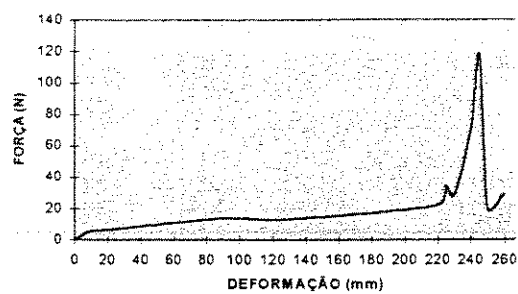


Figura 5.7 – Força de tração em folha de cana-de-açúcar em função da deformação a uma taxa de 0,8 mm/s e ângulo de 45°.

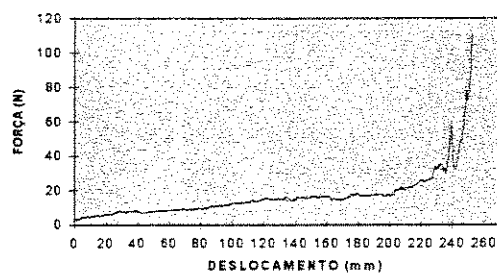


Figura 5.8 – Força de tração em folha de cana-de-açúcar em função da deformação a uma taxa de 3,3 mm/s e ângulo de 45°.

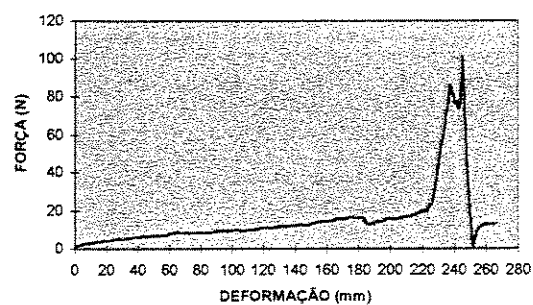


Figura 5.9 – Força de tração em folha de cana-de-açúcar em função da deformação a uma taxa de 13,3 mm/s e ângulo de 45°.

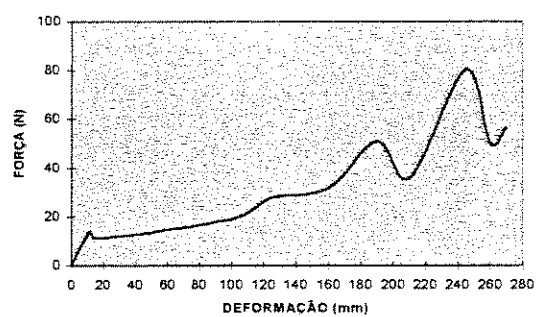


Figura 5.10 – Força de tração em folha de cana-de-açúcar em função da deformação a uma taxa de 0,8 mm/s e ângulo de 135°.

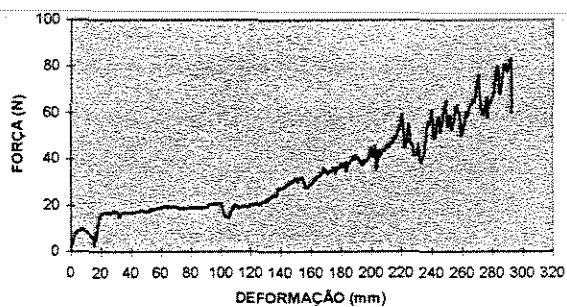


Figura 5.11 – Força de tração em folha de cana-de-açúcar em função da deformação a uma taxa de 3,3 mm/s e ângulo de 135°.

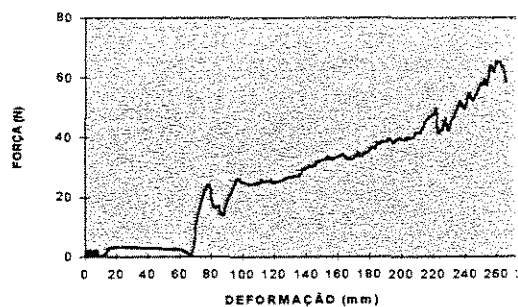


Figura 5.12 – Força de tração em folha de cana-de-açúcar em função da deformação a uma taxa de 13,3 mm/s e ângulo de 135°.

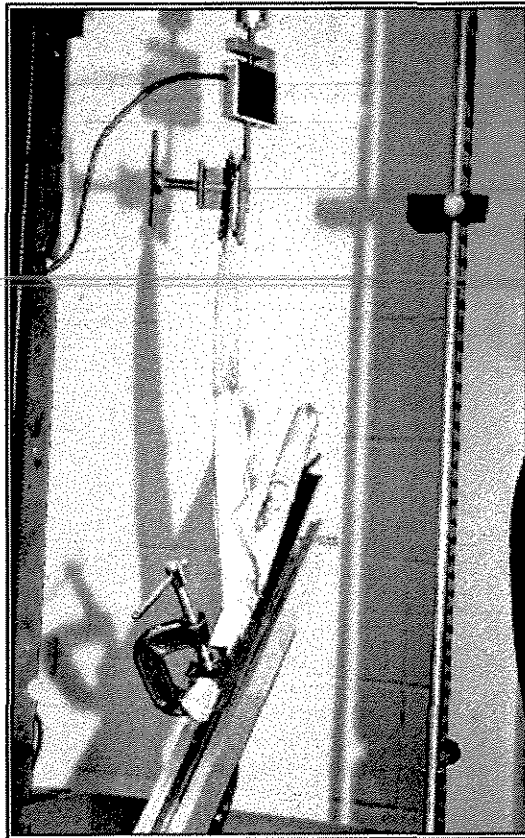


Figura 5.13 – Ensaio uniaxial de tração no ângulo de 45°

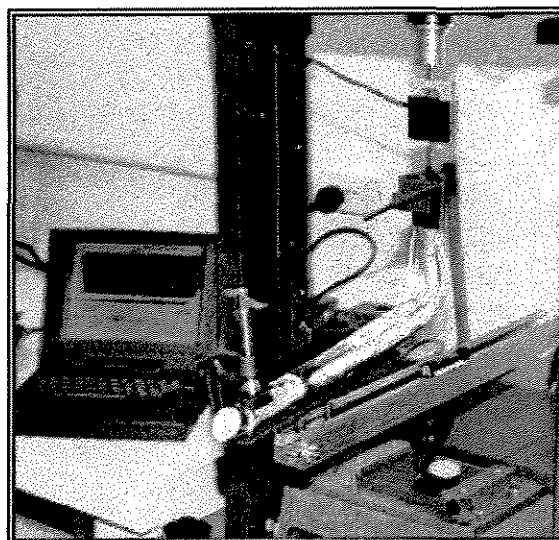


Figura 5.14 – Ensaio uniaxial de tração no ângulo de 90°

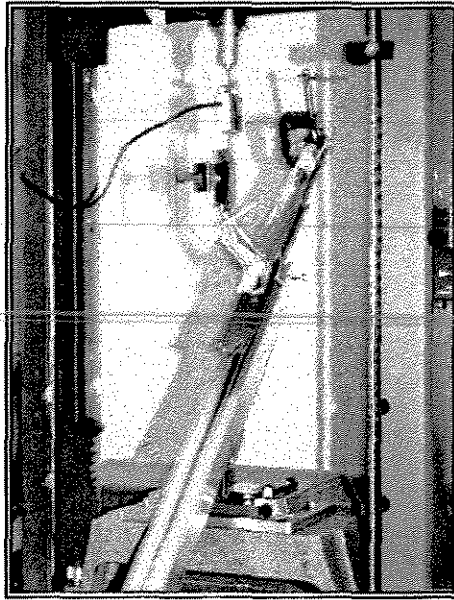


Figura 5.15 – Ensaio uniaxial de tração no ângulo de 135°

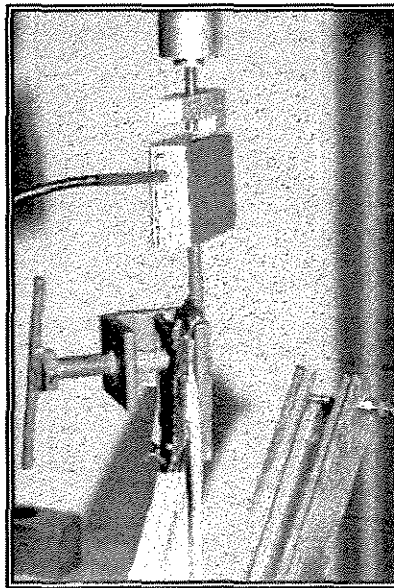


Figura 5.16 – Garra fixadora da folha

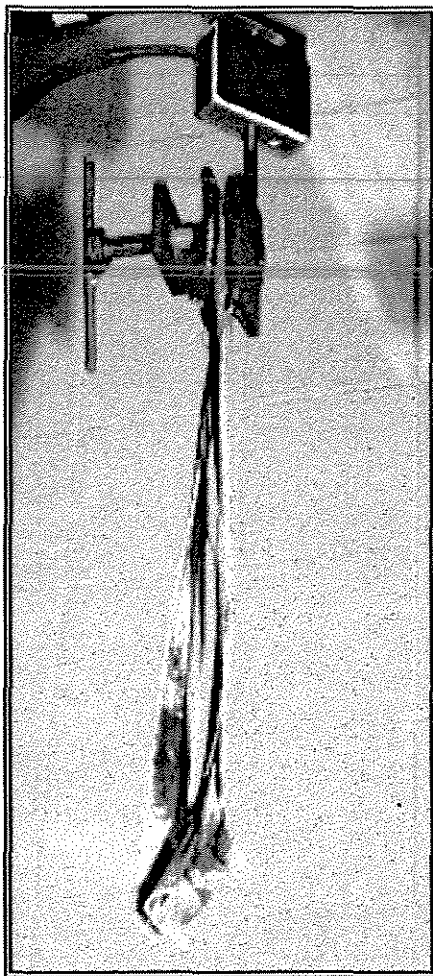


Figura 5.17 – Ruptura da folha submetida a diferentes taxas de deformação

5.2 Considerações básicas sobre o mecanismo de limpeza de folhas

A equação apresentada a seguir e cujo desenvolvimento se encontra no Anexo 3, permite o cálculo das forças de equilíbrio para seleção dos diâmetros dos rolos de forma a não causar danos nos colmos durante a operação de limpeza.

$$F_{eq} = \frac{W_c \left(1 + \frac{D_c}{D_r} \right)}{2 \left(\sqrt{\left(\frac{D_c}{D_r} \right)^2 + 2 \frac{D_c}{D_r} - \mu_{cb}} \right)} \quad 5.1$$

A tabela 5.7 foi obtida através das equações 4.1 e 5.1 e dos dados levantados da variedade estudada, tais como, peso da cana 1,3 N correspondente ao comprimento de colmo de 300 mm, sendo este a largura útil do limpador de folhas; diâmetro no 12º internódio 21,4 mm; coeficiente de atrito do colmo com a superfície de borracha dos rolos 0,8 para escolha do diâmetro dos rolos do mecanismo limpador.

Tabela 5.7- Quadro da força de equilíbrio da cana para diferentes diâmetros dos rolos.

Wc (N)	Dc (mm)	Dr (mm)	μ_{cb}	F_{eq} (N)
1,3	21,4	50	0,8	4,2
1,3	21,4	64	0,8	10,0
1,3	21,4	76	0,8	177,8
1,3	21,4	89	0,8	-12,8
1,3	21,4	102	0,8	-6,8

Os valores positivos de força de equilíbrio do colmo (F_{eq}) da Tabela 5.7 são interpretados como sendo valores aceitáveis dos diâmetros dos rolos para construção do mecanismo limpador, a escolha por qualquer um desses valores mantém a condição de equilíbrio entre os rolos e o colmo. Já os valores negativos de força de equilíbrio do colmo (F_{eq}) para um dado diâmetro como é apresentados na Tabela 5.7 são interpretados fisicamente como sendo uma condição de ausência de equilíbrio entre os rolos e o colmo. A escolha por diâmetros de rolos que geram valores negativos de força de equilíbrio, ocasionará em danos por arraste e esmagamento do colmo, quando estiver em contato com os rolos do mecanismo. O diâmetro de 50 mm foi escolhido nesse trabalho para a construção do mecanismo

Com intuito de se levantar maiores informações a respeito do diâmetro escolhido para a construção do mecanismo, variou-se os diâmetros dos colmos para se verificar qual faixa de diâmetro que fica sujeito ao arraste pelos rolos, conforme ilustra a Tabela 5.8.

Tabela 5.8 - Quadro diâmetro crítico da cana em relação ao arraste no mecanismo de limpeza

Wc (N)	Dc (mm)	Dr (mm)	μ_{fb}	F_{eq} (N)
0,6	10	50	0,8	-2,7
0,9	15	50	0,8	16,9
1,5	25	50	0,8	3,5
1,8	30	50	0,8	3,2
2,1	35	50	0,8	3,1

Através da tabela anterior observa-se que, o diâmetro escolhido de 50 mm mostrou-se satisfatório dentro da faixa de diâmetros dos colmos usualmente encontrados nas

condições de colheita no campo. Porém, somente colmos finos, por volta de 10 mm, ficam sujeitos ao arraste pelo contato com os rolos.

5.3 Dimensionamento do mecanismo de limpeza pelos parâmetros mecânicos da folha

A força de ruptura obtida experimentalmente foi de 118 N e o coeficiente de atrito estático entre a folha e a borracha de revestimento dos rolos foi de 1,3 (Anexo 5). Com auxílio da equação (4.1) a força de compressão entre os rolos calculada foi de 91 N, suficiente para remover a folha de maior resistência. Para transmitir essa força de compressão (91 N) aos rolos, utilizou-se um peso fixo a um braço articulado unido por duas buchas de aço, sendo a primeira fixada ao chassi do mecanismo e a segunda aos rolos do mecanismo, conforme ilustram as Figura 4.1 e 5.19. A determinação do peso na extremidade do braço foi determinada através da somatória de momentos, encontrando dois valores de forças de 47 N e 61 N em função de haver dois comprimentos dos braços de alavanca devido restrições construtivas do mecanismo.

5.4 Avaliação do mecanismo de limpeza

Para a realização dos ensaios no mecanismo de limpeza foi utilizada a mesma variedade da primeira etapa de testes, com a idade da planta de 10 meses.

Como procedimento experimental dividiu-se o material em 30 parcelas com 5 canas por parcela. Feito isso, realizou-se a contagem das folhas secas antes e depois de duas passagens pelo mecanismo de limpeza. As velocidades tangenciais dos rolos utilizadas foram de 0,52, 1,05 e 1,56 m/s, sendo que para velocidades abaixo de 0,52 m/s não houve deslocamento da cana sobre os rolos e valores superiores a 1,56 m/s o mecanismo não removeu as folhas. Em condição real de operação de limpeza, este mecanismo teria que

operar com velocidades tangenciais nos rolos superiores a 4,0 m/s, para assegurar que o mecanismo mantenha a alimentação da cana dentro da colhedora (TANAKA, 1996). Desta forma, o atual mecanismo de limpeza torna-se inviável como dispositivo de alimentação para colhedoras de cana.

Analisando-se a Figura 5.18 nota-se que a maior eficiência de remoção de folhas foi de 9,6 e 11,3% após a primeira e a segunda passagem pelo mecanismo, respectivamente, totalizando uma eficiência de 20,9% após as duas passadas, numa velocidade tangencial dos rolos de 0,52 m/s com a alimentação feita pelo topo. Isso é justificado por duas razões, a primeira, é que na velocidade de 0,52 m/s as folhas permanecem maior tempo sobre o mecanismo limpador quando comparado com as demais velocidades tangenciais. A outra razão, está associado à arquitetura da planta, onde as folhas estando projetadas para frente durante a alimentação do mecanismo, ficaram numa condição mais favorável a remoção destas pelos rolos. Quando alimentação foi realizada pela base do colmo houve um total de limpeza de 5,6%, após duas passadas, sendo esta a condição de alimentação da cana na colhedora durante a operação em campo, conforme ilustrado na Figura 5.19. Esta eficiência de limpeza é considerada baixa quando comparado com outros sistemas de limpeza que são utilizados nas colhedoras comerciais e os que estão sendo estudados em nível de protótipos.

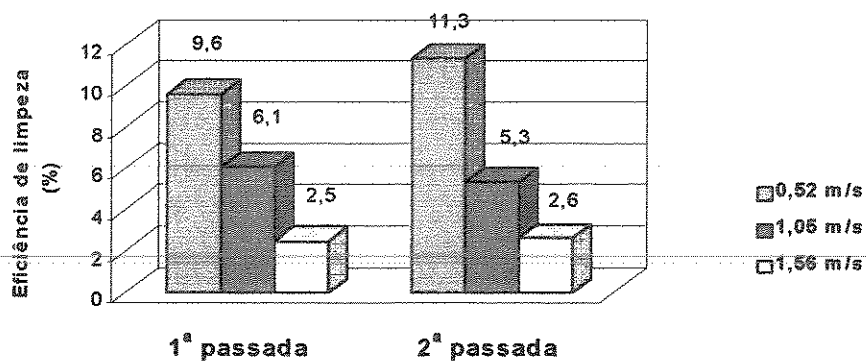


Figura 5.18 - Eficiência de limpeza do mecanismo quando a alimentação do colmo foi realizada pelas pontas

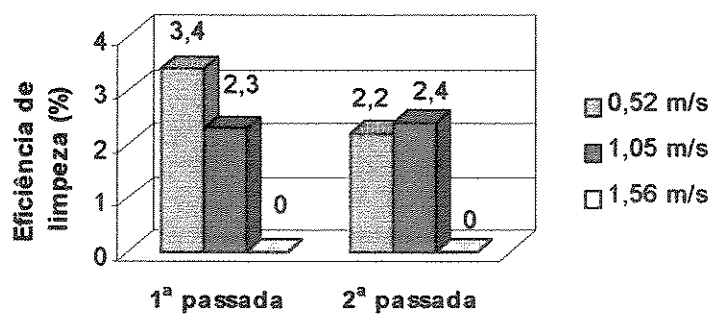


Figura 5.19 - Eficiência de limpeza do mecanismo quando a alimentação do colmo foi realizada pela base

Um dos fatores que influenciou a eficiência de remoção das folhas foi o pequeno comprimento útil da bancada de rolos limpadores (270 mm), sendo que esse parâmetro poderia ser otimizado com o aumento das dimensões do mecanismo, conforme ilustra a Figura 5.20 e 5.21. Notou-se que as folhas que tiveram contato com os rolos ativos do mecanismo foram removidas. Dessa forma os parâmetros mecânicos força de ruptura e coeficiente de atrito da folha com a borracha de revestimento dos rolos, as quais foram aplicadas no mecanismo de limpeza através de pesos de compressão entre os rolos para promover a remoção das folhas, mostraram ser os parâmetros de maior importância no desenvolvimento do mecanismo. Apesar da baixa eficiência de limpeza (5,6 %) para uma condição real de trabalho desse mecanismo de limpeza, notou-se que princípio de remoção de folhas por tração entre os rolos de borracha são válidos. Porém a baixa eficiência inviabiliza esse protótipo como mecanismo de remoção de folhas.

Apesar do baixo desempenho do mecanismo de limpeza, foi notado que não houve qualquer injúria mecânica nos colmos e nas gemas após a operação de remoção das folhas, mostrando assim, que mecanismos de limpeza com revestimento de borracha ou com órgãos ativos construídos com este material são uma alternativa interessante na implementação de dispositivos mecânicos na colheita da cana-semente.

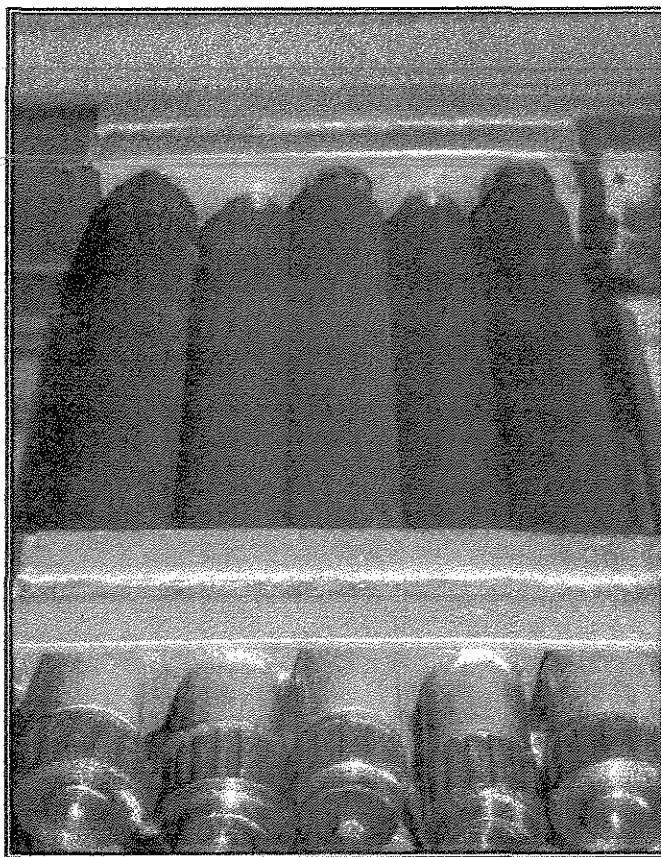


Figura 5.20 – Vista superior da bancada de rolos justapostos (snappers) do mecanismo de limpeza

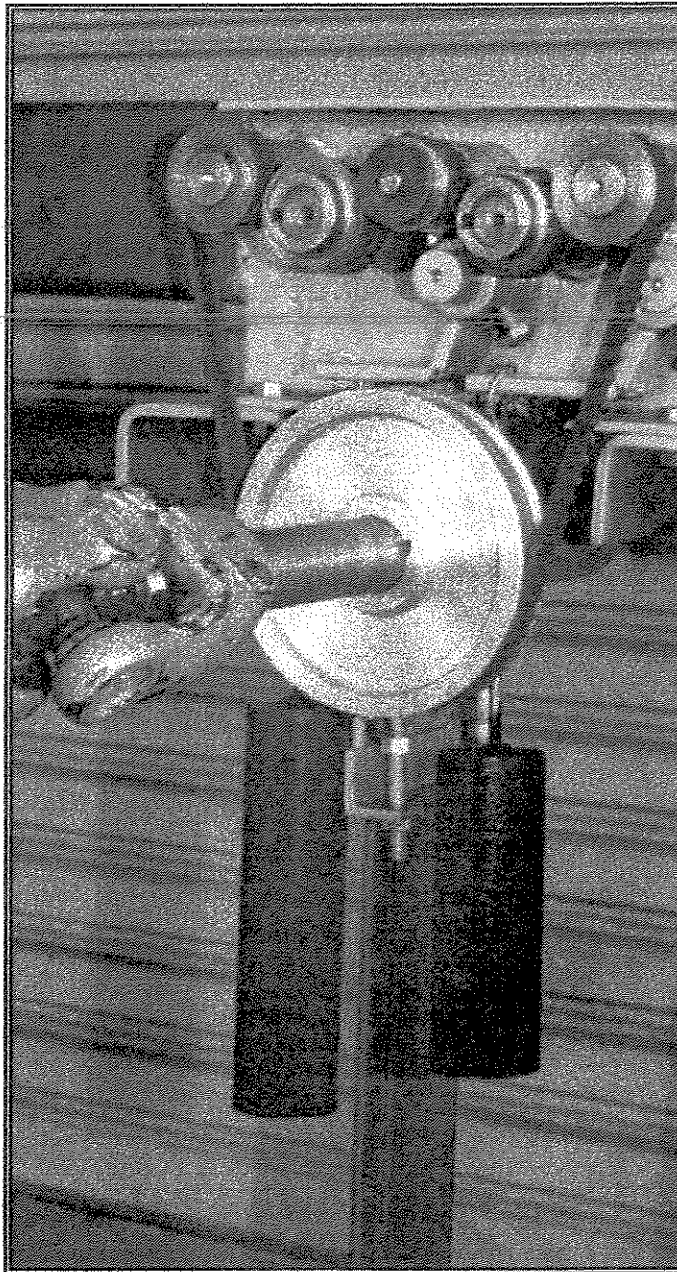


Figura 5.21 – Vista lateral do mecanismo de limpeza

VI. CONCLUSÕES

Os maiores valores das forças médias de ruptura foram obtidos no ângulo de tração de 45°.

A tração da folha, para as taxas de deformação de 0,8, 3,3 e 13,3 m/s não apresentaram dependência do tempo, isto é, os efeitos da variação de $\dot{\varepsilon}(t)$ não caracterizaram um comportamento viscoelástico.

A variabilidade, demonstrada pelo alto coeficiente de variação, dificultou a interpretação dos dados em todos os ensaios realizados.

O mecanismo de limpeza, com alimentação pela base do colmo, ou seja, simulando condições reais de operação de colhedoras comerciais de cana-de-açúcar, apresentou uma eficiência de remoção de folhas de 5,6 %.

A maior eficiência do mecanismo foi observada com alimentação pela base do colmo, numa velocidade tangencial de 0,52 m/s, sendo esta velocidade, porém, cerca de 10 vezes inferior às condições de trabalho da uma colhedora comercial.

A ineficiente de remoção de folhas somada a baixa velocidade tangencial dos rolos, torna o mecanismo proposto inviável como dispositivo de limpeza.

Apesar da baixa eficiência de remoção de folhas (5,6 %) para uma condição real de trabalho desse mecanismo de limpeza, notou-se que princípio de despalhe das folhas por tração entre os rolos de borracha são válidos.

A inexistência de danos mecânicos nos colmos e nas gemas após a operação de limpeza, indica que os dispositivos revestidos ou construídos com borracha podem ser uma alternativa viável na colheita da cana-semente.

VII. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

7.1 Comportamento mecânico da ruptura da folha da cana-de-açúcar

Estudar o comportamento mecânico de ruptura da folha para diferentes taxas de força, buscando subsídios teóricos para o desenvolvimento de mecanismos de limpeza por impacto.

7.2 Mecanismo de limpeza

Através de programas computacionais simular as cargas próximas condições reais de operação para verificar possíveis deflexões em mecanismos de rolos, as quais poderiam comprometer a remoção das folhas.

VIII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANAZODO, U. G. N. Elastic and visco-elastic properties of agricultural products in relation to harvesting and post-harvest processes. **Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America**, p.59-65,70 spring 1982.

BRAUNBECK, O.A. & MAGALHÃES, P.S.G. Colheita da cana crua inteira. **Jornal Cana** n. 41, p. 26-27, Ribeirão Preto, maio, 1997.

COPERSUCAR. Quarta geração de variedades da cana-de-açúcar. **Boletim Técnico**, Piracicaba-SP, dezembro, 1993, 15 p.

CLAYTON, J. E. Florida - Progressos en el cosechamiento y limpeza en seco de la caña de azúcar. **Sugar y Azúcar**, agosto, 1971.

CLAYTON, J. E.& WHITTEMORE, H. D. Systems for cleaning immature tops and Other trash from sugarcane. In: **Proceedings of the XIV Congress of the Internacional Society of Sugar Cane Technologists**. New Orleans, Luisiana, USA. October 22-November 5, 1971.

FERRAZ, A.C. O. **Propriedades mecânicas do internódio da cana-de-açúcar: Uma contribuição metodológica**. Faculdade de Engenharia Agrícola, UNICAMP, 1987, 98p. (Tese de Mestrado).

FURLANI NETO, V. L. & RIPOLI, T. C. & VILLANOVA, N. A. (a) Colheita mecânica: perdas de matéria - prima em canaviais com e sem queima prévia. **STAB** v.14, n.14, p.19-24, julho-agosto, 1996.

FURLANI NETO, V. L. & RIPOLI, T. C. & VILLANOVA, N. A. (b) Avaliação de desempenho operacional de colhedora em canaviais com e sem queima prévia. **STAB** v.15, n.2, p.18-23, novembro-dezembro, 1996.

GANERIWALA, S. N. Relationship between morphology and mechanical properties of tobacco leaf lamina. **Journal of Material Science**, v.25, n.4, p.2199-2206, apr, 1990.

GREENBERG, R. A. & MEHLING, A. & MICHELE, L. & BOCK, H. J. Tensile behavior of grass **Journal of Material Science**, 24, p. 2549-2554, 1989.

MASE, G. E. **Theory and problems of continuum mechanics**. New York, McGraw-Hill, 1970. 221 p. il(Schaum's outline series).

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

_____; _____ & KOJIMA, S. (a) Fundamental studies on the development of a leaf-stripping-machine for sugarcane. II - The penetration, bending, cutting and crushing resistance of a sugar cane stalk. **Boletim of the Faculty of Agriculture**, Kagoshima University Japan, n.29, p.231-243, 1979.

_____; _____; _____ (b) Fundamental studies on the development of a leaf-stripping-machine for sugarcane. III - The impact resistance of a sugarcane stalk. **Boletim of the Faculty of Agriculture**, Kagoshima University Japan, n.29, p.245-248, 1979.

MOHSENIN, N.N. Engeneering approach to evaluating textural factors in fruits and vegetables. **Transactions of the ASAE**, v.6, n.2, p.85-88, 1963.

MOHSENIN, N.N. **Physical properties of plant and animal materials**. Gordon and Breach Science Publishers, New York, 1986, 879 p.

MUTTON, M. J. R. & STUPIELLO, J.P. & MUTTON, M. A. & MARTINS, M.S. Influência das impurezas vegetais sobre a qualidade da matéria prima destinada à indústria sucroalcooleira. In: **Congresso Nacional da Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil - STAB**, p.57-62, Maceió, novembro, 1996.

PAGNANO, N.B. **Despalhador inercial de facas oscilantes para cana-de-açúcar (*Saccharum spp*)**. Faculdade de Engenharia Agrícola, UNICAMP, 1997, 77 p. (Tese de Mestrado).

_____; & MAGALHÃES, P.S.G. & BRAUNBECK, O.A. Estudo de algumas propriedades mecânicas da Cana-de-açúcar : Resistência à compressão e remoção de folhas. In: **XXIV Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola**, Viçosa, MG, 1995

PATENTE: Brasil PI 203.875 de 11 de nov. de 1968 "Despalhador de Cana-de-açúcar com bastões e ou chicotes de material flexível". **Código de Recuperação: PMA/BR 004**.

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

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

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

TANAKA, F.O. **Despalhe de colmos de açúcar-de-açúcar inteira (*saccharum spp*) por rolos oscilantes com diferencial de velocidades**. Faculdade de Engenharia Agrícola, UNICAMP, 1996, 130p. (Tese de mestrado).

URQUIAGA, S. & BODDEY, R.M. & LIMA, E. & OLIVEIRA, O.C. & LIRA, L. Balanço de nitrogênio em cana de açúcar em condições de campo. Efeito da queima, aplicação de vinhaça e nitrogênio. In: **Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 22**, Recife, PE. programa e Resumos. Recife. SBCS, p.101, 1989

____;____;____ & GUIMARÃES, D.H.V. A importância de não queimar a palha na cultura da Cana-de-açúcar. **EMBRAPA - Comunicado Técnico n.5**, Seropédica, Itaguaí, RJ, 12 p. 1991.

ANEXOS

Anexo 1. Comparação de médias através do Teste de t de Student a nível de 5% de significância, o qual compara as duas médias entre si.

Anexo 1.1. Comparação das médias para ângulos de tração

Quadro de Médias

variáveis	médias (N)	F calculado	F tabelado
tração 45 e 90°	58 e 50	0,0003 (n.s.)	1,96
tração 45 e 135°	58 e 39	0,1225 (n.s.)	1,96
tração 90 e 135°	50 e 39	0,01816 (n.s.)	1,96

Anexo 1.2 Comparação das médias para taxas de deformações

Quadro de Médias

variáveis	médias (N)	F calculado	F tabelado
tx. de deformação de 0,8 e 3,3 mm/min	55 e 51	0,5 (n.s.)	1,96
tx. de deformação de 0,8 e 13,3 mm/min	55 e 43	0,03 (n.s.)	1,96
tx. de deformação de 3,3 e 13,3 mm/min	51 e 43	0,13 (n.s.)	1,96

Anexo 2. Energia de ruptura da folha da cana-de-açúcar
(cálculo através do programa MATLAB for Windows 4.b)

```
% Energia de ruptura da folha para ângulo de 90 graus e taxa de 3.3 mm/s
» load ft12078.m
» load d78.m
» area=trapz(d78,ft12078) % Calculo da área através de integração
numérica pelo métodos dos trapézios, onde: d78= deformação(mm) e
ft12078=força(N), portanto, área=energia(N*mm)
```

area =

4.1650e+003

```
% Energia de ruptura da folha para ângulo de 90 graus e taxa de 0.8 mm/s
% Calculo da área foi realizado em 3 etapas por limitações do bloco de
notas
em carregar o arquivo numa unica vez.
» load ft1213b.m
» load d213b.m
» load ft1213a.m
» load d213a.m
» load ft1213.m
» load d213.m
» ab=trapz(d213b,ft1213b)
```

ab =

2.1315e+003

```
» aa=trapz(d213a,ft1213a)
```

aa =

1.1079e+003

```
» a=trapz(d213,ft1213)
```

a =

461.4521

```
» area=a+aa+ab
```

area =

3.7008e+003

```
% Energia de ruptura da folha para ângulo de 90 graus e taxa de 13.3 mm/s
» load ft180119.m
» load d119.m
» area=trapz(d119,ft180119)
```

```
area =
```

```
2.8122e+003
```

```
% Energia de ruptura da folha para ângulo de 45 graus e taxa de 3.3 mm/s
```

```
» load d142.m
» load f142.m
» ac=trapz(d142,f142)
```

```
ac =
```

```
4.1552e+003
```

```
» ac
```

```
ac =
```

```
4.1552e+003
```

```
% Energia de ruptura da folha para ângulo de 45 graus e taxa de 0.8 mm/s
% Calculo da área foi realizado em 4 etapas por limitações do bloco de
notas
```

```
em carregar o arquivo numa única vez.
```

```
» load f94.m
» load d20594.m
» a=trapz(d20594,f94)
```

```
a =
```

```
625.3304
```

```
» load f94a.m
» load d94a.m
» aa=trapz(d94a,f94a)
```

```
aa =
```

```
1.2319e+003
```

```
» load d94b.m
» load f94b.m
» ab=trapz(d94b,f94b)
```

```
ab =
```

```
1.6004e+003
```

```
» load d94c.m
```

```
» load f94c.m
» ac=trapz(d94c,f94c)
```

```
ac =
```

```
1.0130e+003
```

```
» area=a+aa+ab+ac
```

```
area =
```

```
4.4707e+003
```

```
% Energia de ruptura da folha para ângulo de 45 graus e taxa de 13.3 mm/s
```

```
»load f184.m
```

```
» load d184.m
```

```
» ac=trapz(d184,f184)
```

```
ac =
```

```
4.1215e+003
```

```
% Energia de ruptura da folha para ângulo de 135 graus e taxa de 3.3 mm/s
```

```
» load f178.m
```

```
» load d178.m
```

```
» a=trapz(d178,f178)
```

```
a =
```

```
9.7571e+003
```

```
% Energia de ruptura da folha para ângulo de 135 graus e taxa de 0.8 mm/s
```

```
% Calculo da área foi realizado em 3 etapas por limitações do bloco de  
notas
```

```
em carregar o arquivo numa unica vez.
```

```
» load d220.m
```

```
» load d220a.m
```

```
» load d220b.m
```

```
» load f220b.m
```

```
» load f220a.m
```

```
» load f220.m
```

```
» a=trapz(d220,f220)
```

```
a =
```

```
1.6388e+003
```

```
» aa=trapz(d220a,f220a)
```

```
aa =
```

```
3.1476e+003
» ab=trapz(d220b,f220b)
ab =
3.5735e+003
» area=a+aa+ab
area =
8.3600e+003
```

```
% Energia de ruptura da folha para ângulo de 135 graus e taxa de 13.3
mm/s
» load f178.m
» load d178.m
» a=trapz(d178,f178)
a =
9.7571e+003
» load d205.m
» load f205.m
» a=trapz(d205,f205)
a =
7.1500e+003
```

Anexo 3. Desenvolvimento da equação estática a partir da Figura 4.4 a para seleção dos diâmetros dos rolos do mecanismo despalhador

$$\cos \beta = \frac{H}{D_r + D_c}$$

$$H = D_r \text{ (condição máxima)}$$

$$\cos \beta = \frac{D_r}{D_r + D_c} = \frac{1}{1 + \frac{D_c}{D_r}}$$

$$\sum F_Y = 0$$

$$2N \sin \beta - 2\mu N \sin (90^\circ - \beta) - W_c = 0$$

onde:

$$\sin (90^\circ - \beta) = \cos \beta$$

$$\Rightarrow 2N(\sin \beta - \mu \cos \beta) = W_c \Rightarrow 2N \left[\left(\sqrt{1 - \left(\frac{D_r}{D_r + D_c} \right)^2} \right) - \mu \frac{D_r}{D_r + D_c} \right] = W_c$$

$$\Rightarrow 2N \left[\left(\sqrt{\frac{D_r^2 + D_c^2 + 2D_r D_c - D_r^2}{(D_r + D_c)^2}} \right) - \mu \frac{D_r}{D_r + D_c} \right] = W_c$$

$$\Rightarrow \frac{2N}{D_r + D_c} \left[\left(\sqrt{D_c^2 + 2D_r D_c} \right) - \mu D_r \right] = W_c$$

$$\Rightarrow \frac{2N}{\left(1 + \frac{D_c}{D_r} \right)} \left[\left(\sqrt{\left(\frac{D_c}{D_r} \right)^2 + 2 \frac{D_c}{D_r}} \right) - \mu \right] = W_c$$

$$N = F_{eq} = \frac{W_c \left(1 + \frac{D_c}{D_r} \right)}{2 \left[\sqrt{\left(\frac{D_c}{D_r} \right)^2 + 2 \frac{D_c}{D_r}} - \mu \right]}$$

Anexo 4. Caracterização do material experimental

A borracha de revestimento dos rolos do mecanismo de limpeza segundo informações do fabricante apresenta um valor de dureza de 75 Sh.

A cana-de-açúcar utilizada nos ensaios de laboratório apresentava as seguintes características:

- ⇒ teor de água na folha de 7,9%
- ⇒ teor de fibra bruta na folha de 41,5%
- ⇒ idade da cana de 10 meses (nos ensaios do mecanismo apresentava mesma idade)
- ⇒ peso do corpo de prova de 138 gramas
- ⇒ cana de segundo corte (laboratório) e cana planta (mecanismo de limpeza)

ANEXO 5. Coeficientes de atrito da folha e colmo da cana-de-açúcar com a borracha de revestimento dos rolos limpadores

O coeficiente de atrito da folha com a borracha dos rolos foi encontrado com auxílio de um equipamento instalado na máquina universal de ensaios e com auxílio do sistema de aquisição de dados. Registrou-se as curvas de força de atrito versus deslocamento Figura 1, 2. e 3. Destas foram obtidas a força de atrito média estática (6,32 N) e dinâmica (5,92 N), a força normal no ensaio foi de 4,90 N. Portanto, os coeficientes de atrito calculados são 1,29 (estático) e 1,21 (dinâmico).

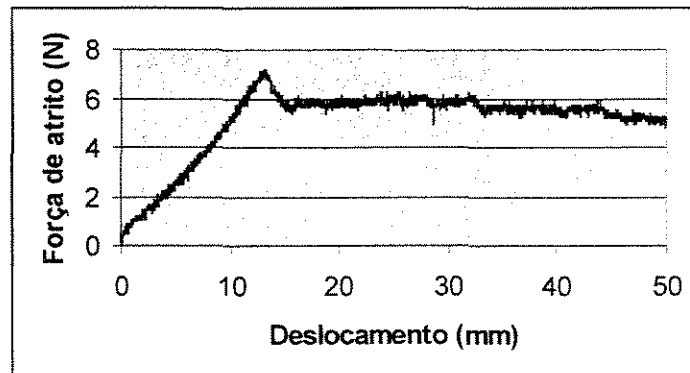


Figura 1. Força de atrito x deslocamento da folha com a borracha dos rolos

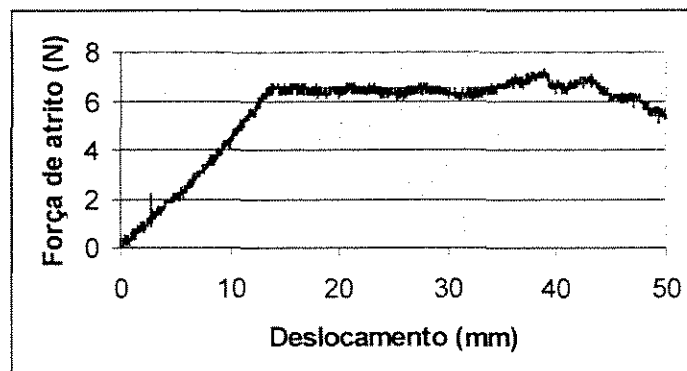


Figura 2. Força de atrito x deslocamento da folha com a borracha dos rolos

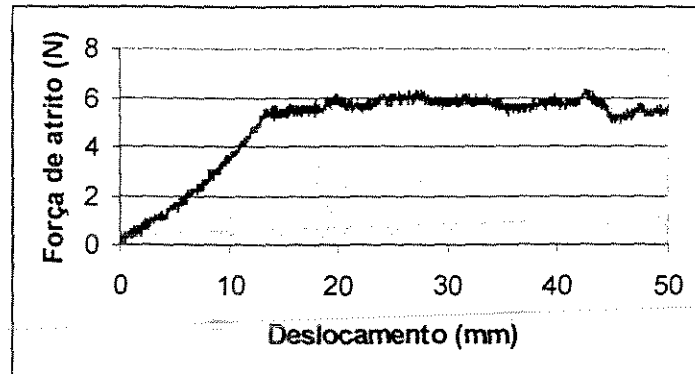


Figura 3. Força de atrito x deslocamento da folha com a borracha dos rolos

O coeficiente de atrito estático da cana com a borracha foi obtido de forma direta através da inclinação do plano até promover o movimento do espécime do material, e valor encontrado foi de 0,79, obtida de 5 ensaios, que são apresentados abaixo:

cateto oposto= 200 mm cateto adjacente = 243,9 mm

cateto oposto= 200 mm cateto adjacente = 270.3 mm

cateto oposto= 200 mm cateto adjacente = 235.3 mm

cateto oposto= 200 mm cateto adjacente = 266.7 mm

cateto oposto= 200 mm cateto adjacente = 253.2 mm