

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

CAMPINAS - S.P.

BRASIL

ESTUDOS SOBRE PROPRIEDADES MECÂNICAS DO

COLMO DA CANA-DE-AÇÚCAR

CLAUDIO BIANOR SVERZUT

Orientador: CHEU-SHANG CHANG

Tese apresentada à Faculdade de  
Engenharia de Alimentos e Agrí-  
cola para cumprimento de parte  
dos requisitos para obtenção do  
título de MESTRE em Engenharia  
Agrícola.

MAIO 1982

UNICAMP

A doutrina do homem conhece-se pela  
sua paciência e a sua glória é pas  
sar pelas injúrias a ele feitas.

Provérbios (19-11)

À minha esposa,  
Jeanne  
aos meus filhos,  
Danilo e Alessandra  
pelo carinho que dispensam à mim;  
e aos meus pais,  
Altino e Ilídia  
por inestimáveis esforços.

## AGRADECIMENTOS...

...ao Dr. CHEU-SHANG CHANG, pela sua dedicação e orientação segura;

...ao Dr. INÁCIO M. DAL FABBRO, pelas sugestões, apoio e incentivo;

...ao Prof. EUCLIDES DE MESQUITA NETO, pela sua colaboração;

...ao Dr. OSCAR BRAUMBECK, pelo seu esforço para o envio da matéria prima;

...ã COPERSUCAR, pela doação da matéria prima;

...ao GEPRON, pela gentileza em ceder o laboratório para a realização de análises dos dados;

...ã Faculdade de Engenharia de Alimentos e Agrícola, em especial ao Departamento de Engenharia Agrícola;

...aos amigos, pela colaboração, incentivo e apoio para a realização deste trabalho;

...aos colegas e todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

## ÍNDICE

RESUMO

SUMMARY

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO .....	1
1.1 - ASPECTOS GERAIS .....	2
1.2 - IMPORTÂNCIA DA CANA-DE-AÇÚCAR NO BRASIL E NO ESTADO DE SÃO PAULO .....	2
1.3 - PRODUÇÃO NACIONAL E PAULISTA DE CANA-DE-AÇÚ- CAR E SEUS DERIVADOS .....	3
CAPÍTULO 2 - REVISÃO DE LITERATURA .....	5
2.1 - GENERALIDADES .....	6
2.2 - DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES ELÁSTICAS DO TE- CIDO VEGETAL .....	6
2.3 - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO E DEFORMAÇÃO EM ESPE- CIMENS VEGETAIS .....	7
2.4 - O TECIDO VEGETAL INTERPRETADO COMO VISCOELÁS- TICO LINEAR .....	7
2.5 - ESTUDOS DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DO COLMO DA CANA-DE-AÇÚCAR .....	8
2.6 - OBSERVAÇÃO .....	11
CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS .....	13
3.1 - MATERIAIS .....	14
3.1.1 - Amostras .....	14
3.1.2 - Banco de Testes .....	15
3.1.3 - Instrumentação .....	16
3.1.3.1 - Luz Estroboscópica .....	16
3.1.3.2 - Ponte Amplificadora de medidas Phi lips - modelo =R9308 .....	16

3.1.3.3 - Gravador de frequência Modulada Hewlett-Packard - modelo 3664A ...	17
3.1.3.4 - Sistema Automático da Aquisição de Dados .....	18
3.2 - MÉTODOS .....	23
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	32
4.1 - RESULTADOS .....	33
4.2 - ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	52
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES .....	57
APÊNDICES .....	59
APÊNDICE 1 . PROJETO E CONSTRUÇÃO DO TORQUIMETRO .....	60
APÊNDICE 2 - CALIBRAÇÃO DO TORQUIMETRO .....	66
APÊNDICE 3 - PROGRAMA UTILIZADO PELO COMPUTADOR HP-9845A ..	68
APÊNDICE 4 - ESQUEMAS DO BANCO DE TESTES .....	70
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	73

## RESUMO

A cana-de-açúcar é uma das mais importantes culturas do Estado de São Paulo. Este trabalho evidenciou o estudo de propriedades mecânicas do colmo da cana-de-açúcar. A literatura disponível à respeito de propriedades mecânicas de produtos biológicos afirma que estes materiais exibem propriedades viscoelásticas. Além desta afirmação, os trabalhos científicos à respeito do assunto concluem que as propriedades viscoelásticas são não somente lineares.

Como à respeito do assunto, viscoelasticidade, a literatura não está disponível para cana-de-açúcar. Visando isto, este trabalho foi dirigido para investigar esta propriedade da cana-de-açúcar.

Através da equação generalizada de Hooke, para viga em balanço, estipulou-se várias velocidades de deformação, onde foi calculada a deformação no local de aplicação da carga e o momento na secção de engaste do colmo da cana-de-açúcar.

Para cada velocidade de deformação foi calculado um módulo de elasticidade. Com os valores obtidos, fez-se uma regressão e encontrou-se que a variação do módulo de elasticidade, para a faixa de velocidades estudadas, variou de forma quadrática, ou seja,  $E = f(v^2)$ .

Com este resultado, pode-se concluir que a cana-de-açúcar não exhibe só propriedades elásticas, mas também viscoelásticas.

## SUMMARY

Sugar-cane is one of the most important crops in the State of São Paulo. This research work emphasizes the mechanical properties of sugar-cane. The available literature on mechanical behavior of biological materials states that these material exhibit viscoelastic properties. Some literature reports non-linear viscoelastic behavior of vegetative tissue. However the literature does not give any information on viscoelastic behavior of sugar-cane. This research work was designed to test the existence of viscoelastic behavior of sugar-cane tissue. A sugar-cane stalk was interpreted as a cantilever beam whose behavior is described by the classical formulation derived from the general Hooke's Law. Velocity of deformation was controlled. Deformation at the point of load application was obtained and the momentum at the cross-section area of the clamped portion was calculated. For each deformation velocity the modulus  $E$  was calculated and, from these two parameters, an equation was obtained by regression techniques. It was found that the modulus  $E$  and the velocity  $v$  varies approximately according to the equation  $E = f(v^2)$ . With this results, one can conclude that sugar-cane stalks also exhibits viscoelastic properties.



## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

## 1.1 - ASPECTOS GERAIS

A cana-de-açúcar com seus sub-produtos coloca o Brasil em posição de destaque no mercado mundial de açúcar e propriedades mecânicas da cana-de-açúcar são de extrema importância para o seu manuseio. Esta afirmação é devida ao fato que pouco se conhece sobre propriedades mecânicas da cana-de-açúcar e que ao se projetar equipamentos para processamento ou colheita mecânica essas propriedades são fundamentais.

Pouca literatura sobre propriedades mecânicas da cana-de-açúcar estão disponíveis, e quase nenhuma afirma que a cana-de-açúcar exibe comportamentos mecânicos viscoelásticos.

## 1.2 - IMPORTÂNCIA DA CANA-DE-AÇÚCAR NO BRASIL E NO ESTADO DE SÃO PAULO

Originária da Índia, região de Bengala, a cana de açúcar foi introduzida no Brasil em época que não se pode precisar. Atribuiu-se o início do plantio a Martim Afonso de Souza, que, em 1532, fundou um engenho na capitania de São Vicente. O importante é que a cana-de-açúcar está intimamente ligada à história do Brasil.

No Século XIX, época da proclamação da República, o açúcar era o terceiro produto nas exportações brasileiras, com 6,1% do total do valor das vendas no mercado externo, contra 73,9% do café e 10,9% da borracha. Esse distanciamento prosseguia no século XX, pois em 1910 o café estava com 44,9%, a borracha com 43,8%, enquanto que o açúcar aparecia com apenas 1,5% do valor total das exportações.

A recuperação da agroindústria açucareira brasileira

foi processando-se lenta e progressivamente, de tal forma que, a partir de 1972, o açúcar de cana começou a liderar os produtos exportáveis do país, colocando o Brasil atualmente como um dos maiores produtores e exportadores mundiais.

### 1.3 - PRODUÇÃO NACIONAL E PAULISTA DE CANA-DE-AÇÚCAR E SEUS DERIVADOS

O Estado de São Paulo conta hoje com um dos maiores parques industriais de cana-de-açúcar do país, contribuindo com praticamente 50% da produção nacional.

A tabela seguinte mostra a produção nacional, paulista e da Copersucar, de cana-de-açúcar e derivados.

ITEM	BRASIL	SÃO PAULO	COPERSUCAR
Área cultivada	2.730.000 ha	1.240.000 ha	1.039.000 ha
Produção de cana	131.100.000 ton	70.766.000 ton	56.095.000 ton
Produção de açúcar	7.937.000 ton	3.915.000 ton	3.928.000 ton
Produção de álcool	4.273.000 m³	2.833.741 m³	2.082.060 m³
Produtividade de cana de açúcar	48 ton/ha	73 ton/ha	72 ton/ha

Fonte: Instituto do Açúcar e Alcool e Copersucar-Safra 81/82

Da tabela acima, podemos reafirmar que o Estado de São Paulo é o mais importante produtor de açúcar e álcool do Brasil, contribuindo com 54,0% da produção de cana, 49,3% da produção de açúcar e 66,3% da produção de álcool e com 45,4% da área total cultivada com cana no Brasil.

O Brasil também se coloca em destaque, pois atingiu um total de exportação de açúcar da ordem de 2.661.913 toneladas métricas, sendo que 602.431 toneladas métricas de açúcar branco e 650.208 toneladas métricas de açúcar branco refinado e 1.409.274 toneladas métricas de açúcar demerara . O açúcar branco e o açúcar refinado constituíram na safra de 81/82 34,3% do mercado mundial destes produtos exportados\*.

Com base nesses valores, fica evidente a grande importância da cultura de cana-de-açúcar para o nosso país, com especial ênfase para o Estado de São Paulo, que é o maior responsável pelo crescimento do valor econômico desta cultura.

---

\* Fonte: Instituto do Açúcar e Alcool.

## CAPÍTULO 2

### REVISÃO DE LITERATURA

## 2.1 - GENERALIDADES

O comportamento mecânico do tecido vegetativo tem sido objeto de inúmeros trabalhos de pesquisa. Propriedades mecânicas deste material têm precedido os estudos de análise de tensões e de formações com espécimens vegetativos. Para tais intentos, o material vegetal tem sido considerado como pertencente a um meio contínuo, isotrópico e homogêneo. Tal aproximação poderia ser considerada como uma primeira fase antes de se estudar o material real como anisotrópico e composto de sólidos, espaços preenchidos por componentes gasosos e líquidos.

## 2.2 - DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES ELÁSTICAS DO TECIDO VEGETAL

O tecido vegetativo considerado como elástico linear e exibe propriedades mecânicas descritas pelas constantes conhecidas como módulo de elasticidade ( $E$ ), número de Poisson elástico ( $\nu$ ), módulo de cisalhamento elástico ( $G$ ) e "bulk módulos" ( $K$ ). O uso de tensão hidrostática em espécimens cilíndricos de batata inglesa tem sido utilizado na determinação dos módulos  $E$ ,  $K$  e  $\nu$  [1,2]. Módulos  $E$  também foi determinado por compressão axial de espécimens cilíndricos de batata inglesa [3]. A aplicação de compressão hidrostática em espécimens de diversos frutos tem sido utilizada para o cálculo do módulo  $\nu$  e  $K$  [4]. Teste de punção, utilizando a solução elástica de Boussinesq foi também utilizado para a obtenção do módulo  $K$  [5]. Compressão uniaxial e compressão biaxial com constituição radial em espécimens cilíndricos foram combinadas para se obter o módulo  $\nu$  [6]. Compressão radial de espécimens vegetais resultou o módulo  $E$  pela interpretação da teoria de contato de Hertz [7].

### 2.3 - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO E DEFORMAÇÃO EM ESPECIMENS VEGETAIS

A distribuição de tensão e deformação em espécimens vegetais é importante para o estudo da ruptura do tecido, quer se ja objetivar-se a minimização da injúria mecânica, quer seja romper o tecido. Modelos elásticos foram utilizados para correlacionar a distribuição de tensão e deformação em espécimens vegetais através de teste de punção e placas paralelas (carga uniaxial) [8]. Maçã interpretada como uma esfera elástica com cargas axi-simétricas resultou importante análise de tensão [9]. Tecido de batata inglesa tem sido considerado aproximadamente incompressível em modelos elásticos não lineares, cujos espécimens foram semi-esféricos [3].

Modelos mais recentes consideraram o tecido vegetal como sendo composto de múltiplas fases, ou seja, gás, sólido e líquido [10,11]. Modelo de elementos finitos foi também utilizado para se estudar a distribuição de tensão em espécimens vegetativos esféricos em condições axi-simétricas [11]. Tecido da batata inglesa foi interpretado como a interação de fases líquida, gasosa e sólida [12]. Mais tarde, o meio celular e intercelular em interação com o potencial aguoso do tecido foi levado em conta como um novo parâmetro nas equações elásticas lineares [13].

### 2.4 - O TECIDO VEGETAL INTERPRETADO COMO VISCOELÁSTICO LINEAR

Muitos trabalhos indicaram que as propriedades mecânicas do tecido vegetal exibem dependência do tempo. Testes de impacto em materiais biológicos indicaram uma significativa dependência do tempo [14]. Razão de compressão também influenciaram a ruptura de tecidos de batata inglesa [1]. Testes de tensão em es

pecimens de maça indicaram significativa dependência da razão de carga [15]. O módulo  $\nu(t)$ , ou seja, número de Poisson viscoelástico foi determinado pelo princípio da correspondência elástica-viscoelástica [16]. A medida direta de  $\nu(t)$  foi também determinada pelo deslocamento horizontal, vertical e tempo em espécimens cilíndricos [17].

## 2.5 - ESTUDOS DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DO COLMO DA CANA-DE-AÇÚCAR

O consumo de potência para corte do colmo de cana-de-açúcar foi estudado [18,19] com o objetivo de melhorar a eficiência do corte. O sistema utilizado [19] foi um par de pêndulos acoplado a uma mola de torção. Revelou ser a geometria do órgão cortante um importante fator que afeta a resistência ao corte e, particularmente, pelo afiamento dos bordos cortantes. O autor utilizou diversos elementos cortantes de diferentes fabricantes. A diferença de resistência ao corte entre um cortador manual afiado e um cortador comercial de colhedeira mecânica chega a ser de 3 a 6 vezes [19].

Resistência ao corte do colmo de cana é uma característica composta, não é somente uma função das propriedades mecânicas do colmo da cana de açúcar mas também da geometria e afiamento das lâminas e velocidade de corte. Testes de corte por impacto foram executados com lâminas comerciais. Os fatos revelaram ser a película do colmo de grande importância no fenômeno de corte. O uso de lâminas com ângulo de corte de  $14^{\circ}$  e espessura de 3,00mm indicaram uma resistência ao corte de 3,55 a 6,10 Kgf/cm<sup>2</sup> que varia com a localização no colmo.



A velocidade ótima de corte, no momento de impacto, foi de 6 m/s num colmo de 3,5 cm [19] de diâmetro.

Ainda extensivas discussões sobre a importância das propriedades mecânicas do colmo da cana-de-açúcar, bem como o estágio de maturação e suas propriedades podem ser encontradas na literatura [20,21,22].

Durante o processo de colheita, a cana-de-açúcar é defletida como uma viga [20]. Porém, o tipo de viga a ser interpretada depende da carga aplicada [20].

Foram experimentalmente determinados cargas de ruptura em compressão, deformação em compressão, carga em tensão, deformação em tensão, força de flexão na ruptura e deformação na ruptura. Demais propriedades incluem: peso, porcentagem de fibra e dureza [18]. A amostra para ensaio de tensão consistia de um colmo de seis nós e seis internós. Uma força de tensão numa razão de deformação de 0,015 polegadas/minuto foi aplicada e a deformação relativa foi anotada a cada 100 libras de intervalo [20]. Para o teste de compressão, espécimens de 1,5 polegadas de comprimento foram utilizados. A compressão foi aplicada a razão constante e a deformação foi lida a cada 100 libras de intervalo de força. Para o ensaio de flexão, o colmo foi suportado nas extremidades distanciadas 24 polegadas. A deflexão da viga medida através de "strain gauges" e anotada juntamente com a tensão aplicada através de um anel calibrado.

A dureza foi medida por um durômetro modelo 1604 tipo "B". A densidade foi medida pelo método do deslocamento de volume [20]. O autor concluiu que a ruptura dos internódios não foi possível determinar devido à não homogeneidade do colmo. Dados

de deformação-tensão foram coletados e uma regressão foi sucedida.

A ruptura por compressão mostrou ser do tipo paralelo aos grãos. O módulo de elasticidade foi calculado, resultando em  $E=24.960$  psi.

Para o teste de flexão, a força de flexão para a ruptura decrescia enquanto que a deflexão máxima decrescia. Os experimentos obtidos da parte inferior do colmo demonstraram necessitar maior força para ruptura. A densidade medida mostrou não variar significativamente da parte inferior para a parte superior [20], a dureza medida da parte inferior para a parte superior mostrou ser significativa. Também a dureza foi significativa entre variedades [20].

Tensão, deflexão, deformação relativa, resistência a flexão, densidade, dureza e porcentagem de fibra foram analisados para se verificar se existia correlação entre essas propriedades. Existe significativa correlação entre tensão e deformação ou deflexão bem como dureza e porcentagem de fibras entre as variedades estudadas.

A correlação entre resistência e outras propriedades, tais como densidade, porcentagem de fibra e dureza, não apresentaram significância ao nível de 5%. Uma extensa discussão foi apresentada com respeito aos diversos meios de colheita de cana-de-açúcar, incluindo custos operacionais e vantagens no sistema de corte [21]. Também problemas mecânicos envolvidos no corte mecânico da cana-de-açúcar, tanto quanto o desenvolvimento da colheita mecanizada da cana-de-açúcar já apresentado [22]. Discussões mais detalhadas a respeito da colheita mecanizada da cana

de-açúcar quanto aos métodos tradicionais de corte têm sido verificados na literatura [23].

O desenvolvimento da colhedora de cana australiana foi detalhado quanto às fases iniciais e finais [24].

A mecanização e manuseio da cana-de-açúcar também tem sido o objeto de preocupação o aspecto econômico do desenvolvimento do projeto [25].

## 2.6 - OBSERVAÇÃO

A presente literatura se limita a descrever certas propriedades mecânicas de materiais biológicos, quer sejam estas elásticas ou viscoelásticas. Especificamente quanto ao estudo mecânico do colmo da cana-de-açúcar, a literatura refere-se à obtenção do módulo de elasticidade das diversas partes do colmo, para diferentes variedades, tentando até correlacionar certas propriedades mecânicas com porcentagem de fibras, conteúdo de açúcar ou variedade. Os trabalhos mais significativos estudam impacto de lâminas [18,19], tanto quanto sua geometria. Nada nos é dado a conhecer a respeito do fator tempo nas propriedades mecânicas, ou seja, indícios de que o colmo da cana-de-açúcar se comporta como material viscoelástico. Tampouco, a literatura é omissa quanto a implementação tecnológica da obtenção de dados.

O método proposto pelo presente trabalho, ou seja, gravação contínua de deformação do colmo com equipamento de frequência modulada, permite uma boa reproducibilidade de dados, o que é essencial para materiais biológicos onde a variação de propriedades é alta, necessitando um número maior de repetições. Isto também é verdade no que se refere ao parâmetro tempo, o qual é

mantido em contínua gravação. A deterioração do produto altera as propriedades mecânicas, a facilidade e reproducibilidade dos experimentos pelo método a ser proposto por este trabalho, é de maneira afetiva a tal problema.

### CAPÍTULO 3

#### MATERIAIS E MÉTODOS

## 3.1 - MATERIAIS

### 3.1.1 - Amostras

As amostras foram obtidas de um canavial com a idade de aproximadamente 14 meses. As canas-de-açúcar apresentavam-se praticamente eretas, com a altura variando de 1,50 m a 1,80 m. O local do corte foi escolhido aleatoriamente e de cada variedade escolhida foram colhidas duzentas canas. Estas canas foram amarradas em feixes (Fig.3.1), com aproximadamente dez canas e etiquetadas, para uma fácil identificação posterior.



Fig. 3.1 - Amostras de cana para o ensaio

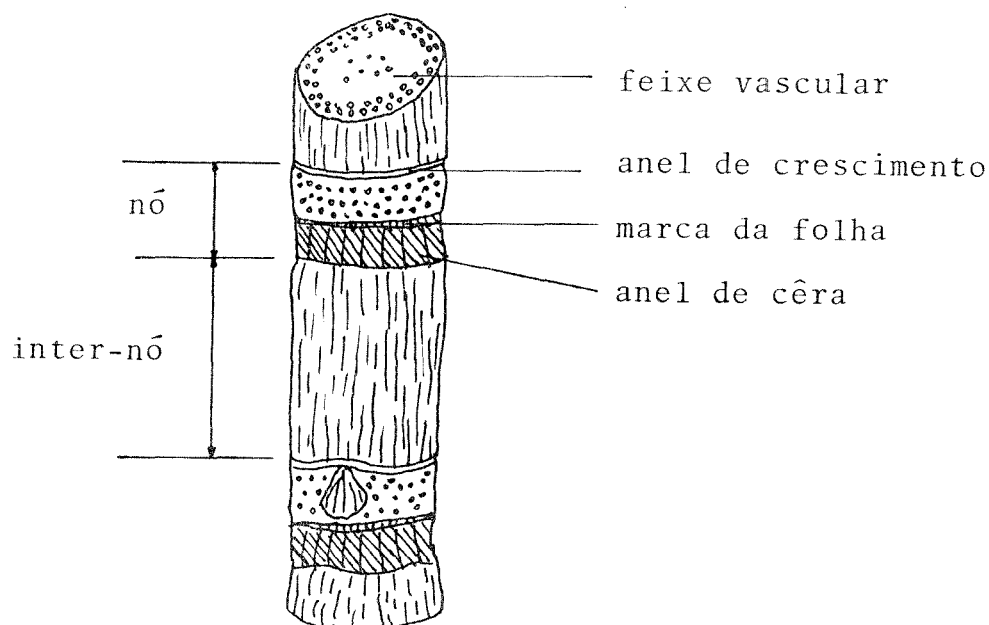


Fig. 3.2 - Diagrama de um pedaço de colmo de cana-de-açúcar

### 3.1.2 - Banco de Testes

O banco de testes foi construído para possibilitar o ensaio da cana-de-açúcar. O ensaio proposto pelo presente trabalho é de deformar a cana com velocidades de deformações diferentes para verificar o comportamento do módulo de elasticidade da cana, tomando-se como base as equações e o princípio de uma viga em balanço, assunto que será discutido no parágrafo 3.2.

O banco de testes montado sobre uma estrutura metálica, onde, no primeiro nível, colocou-se o motor elétrico de 2Hp, acoplado a um variador de velocidades SHIMPO, que exibe uma faixa de variação de 150 a 1500 rpm no eixo de saída.

Para movimentar a cana, foi utilizado um fuso com rosca quadrada e uma porca onde fica preso o torquímetro e o prendedor da cana.

No eixo do motor foi acoplada uma engrenagem para transmissão por corrente com  $Z_1=56$  dentes e no eixo do fuso foi acoplada uma engrenagem de  $Z_2=23$  dentes, permitindo assim uma rotação máxima no fuso de 3650 rpm. Como o passo do fuso é de 0,8 cm, tem-se então uma velocidade de deslocamento máxima de 487 mm/s e uma velocidade mínima de 49 mm/s.

Sobre a porca do fuso foi montado o torquímetro dimensionado para um torque de 50 Kgfxm (Apêndice I). Foi acoplada uma morça no torquímetro para engastar a cana-de-açúcar; os mordedores da morça foram modificados de forma que estes pudessem prender a cana eficientemente e não provocar danos mecânicos à mesma, provendo uma boa área de contato. Os mordedores modificados com forma côncava, nesta face foram revestidos de borracha para serem providos de uma ajustagem melhor com o formato da cana

e não provocarem contusões à mesma.

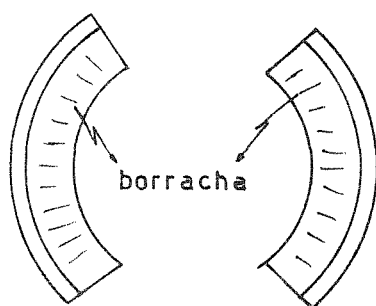


Fig. 3.3 - Mordedores modificados

Na parte superior da estrutura do banco de teste, onde fica o fuso, foi montado um anteparo sobre rolamentos, permitindo assim movimentos relativos entre o anteparo e a cana de açúcar provocando o mínimo de resistência possível.

### 3.1.3 - Instrumentação

#### 3.1.3.1 - Luz estroboscópica

Este aparelho se destina às medidas de rotação sem contato, possuindo um gerador de pulsos com frequência controlada. Quando o gerador está emitindo pulsos na mesma frequência da rotação a ser medida, o ponto do eixo a ser determinada a rotação será iluminado na mesma posição. Quando ocorre isso, pode-se ler a rotação no mostrador do aparelho.

Com este equipamento, se pode ler rotações de 150 a 15000 rpm.

#### 3.1.3.2 - Ponte amplificadora de medidas Philips - modelo PR9308

A ponte possui vários circuitos elétricos, sendo um pa



ra pontes completas incluídos um transdutor para medidas de deformações, pressões, torque, torção, etc.

A ponte é provida de onze escalas para medidas e um ajustador fino que serve para ajustar a amplificação de acordo com a sensibilidade do transdutor.

A faixa de medidas é bem grande para a entrada, isto é, de 80µVolts até 500mVolts, relativa aos sinais nominais de saída que é de 1 Volt.

Um mostrador com escala de -100...0...+100 serve para ajuste em zero, calibração e "display" para medidas estáticas. Uma lâmpada piloto indica "overrange" em medidas dinâmicas.

O sistema PR9308 pode ser alimentado com corrente alternada (45 até 400Hz) 115 ou 215 Volts reversível com desvios permitidos de  $\pm 15\%$ .

### 3.2.3.3 - Gravador de Frequência Modulada Hewlett - Packard - modelo 3964A

O gravador HP modelo 3964A possui quatro canais de gravação e seis velocidades de operação. Tal gravador utiliza fita magnética de 1/4 polegadas de largura e grava dados em frequência modulada e reproduz na faixa de corrente contínua até 5 KHz, ou diretamente de 100 Hz a 64 KHz.

Uma combinação de dois tipos de gravação de dados pode ser instalado no instrumento. A descrição geral inclui a descrição de uma simbologia lógica utilizada no manual, e a descrição da estrutura de transporte, montagens eletrônicas e informações operacionais dos seguintes circuitos de gravação: módulo de controle, velocidade de controle, servo-mecanismo, dados eletrô

nicos de frequência modulada, dados eletrônicos diretos, voz eletrônica, fontes de potência para gravação, superposição eletrônica. A montagem de transporte é eletromecânica e contém cabeçote de reprodução e gravação, motor piloto, esticador e guia da fita, motor dos carretéis, microinterruptor-sensor de final da fita, sensores eletrônicos de sobreposição, chave seletora e um contador mecânico com indicação das revoluções do carretel.

#### 3.1.3.4 - Sistema Automático da Aquisição de Dados

As leituras dos dados gravados na fita magnética foi utilizado o sistema automático de aquisição de dados do laboratório de dinâmica (GEPROM) do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia de Campinas, UNICAMP.

Este sistema consiste basicamente de três componentes, a saber:

- a) Voltímetro digital capaz de efetuar medidas com frequência de amostragem de até 5 KHz. Este voltímetro pode ser programado em termos de número de pontos a serem amostrados e do intervalo de tempo entre as amostragens. O sistema pode ser programado interno ou externamente através de uma interface que o conecta com um computador digital. Os dados amostrados passam por uma conversão analógica/digital e são enviados à memória do computador controlador.
- b) Um voltímetro digital de maior resolução, capaz de medir diferenças de potencial, correntes e resistências além de possuir diversas outras funções programáveis. Como o instrumento anterior, ele pode ser programado interna ou externamente. O seu funciona

mento é análogo ao anterior e a sua velocidade de amostragem é inferior a 30 Hz.

- c) Um "scanner", ou seja, um instrumento capaz de fechar e abrir relês na sequência em que ele foi programado. Este "scanner" só pode ser programado internamente por uma interface com computador digital. Os relês que o "scanner" abre ou fecha representam canais por onde passam informações vindas de transdutores. O "scanner" possui diversos canais de entrada e somente um de saída, que pode estar conectado ao voltímetro de leitura rápida ou ao voltímetro de maior resolução.

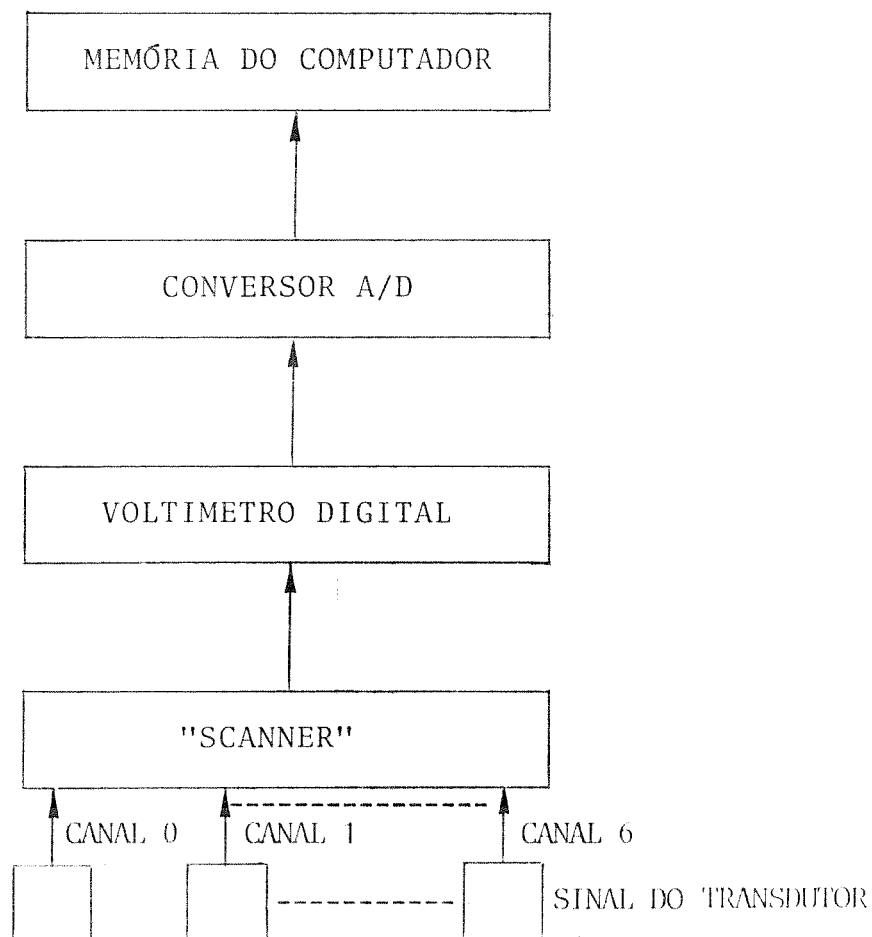


Fig. 3.4 - Esquema da aquisição de dados

O computador acoplado ao sistema de aquisição de dados é o computador de mesa Hewlett-Packard 9845A, utilizando-se da linguagem "BASIC-BEGINNER'S ALL-PURPOSE SYMBOLIC INSTRUCTION COPE".

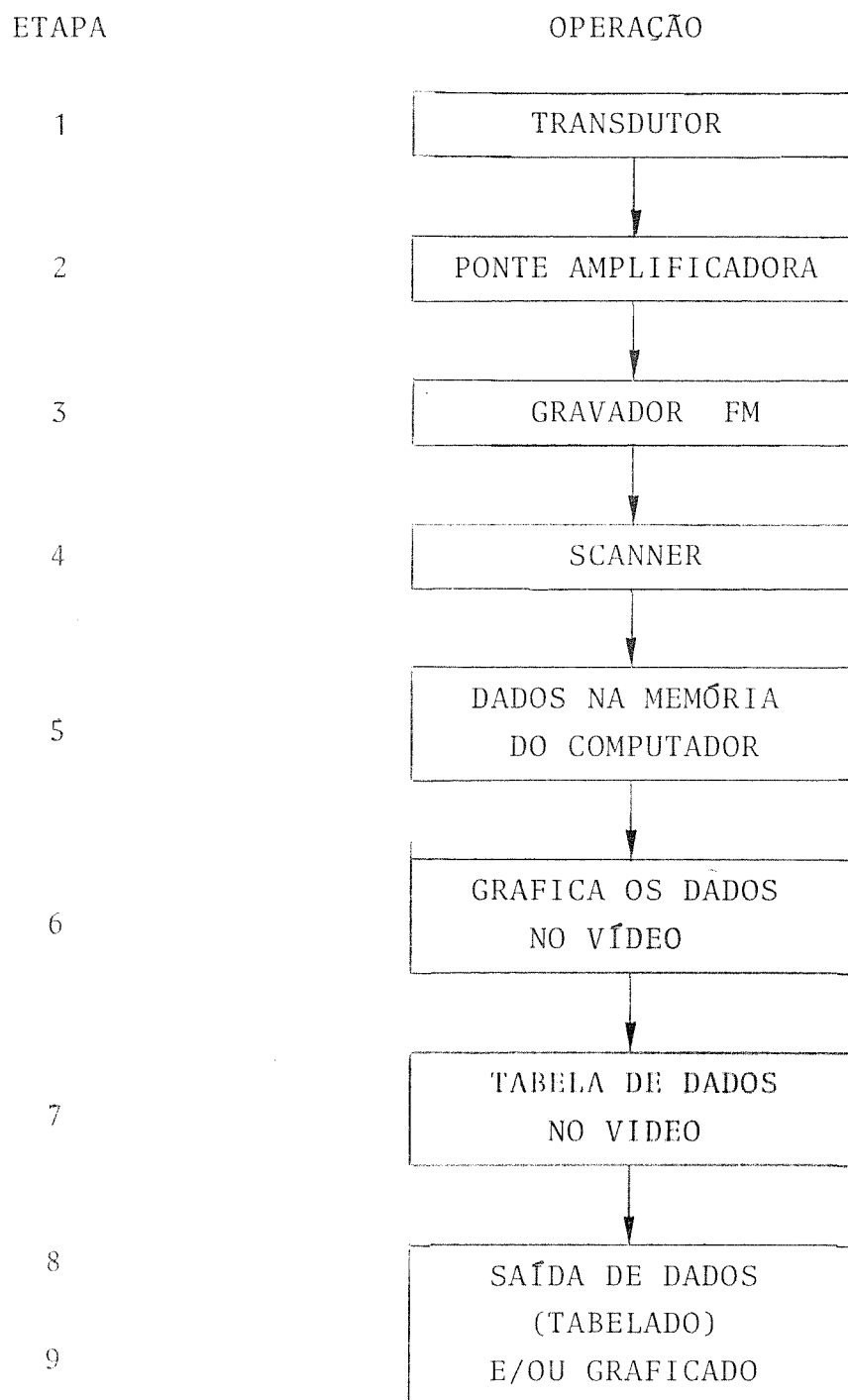


Fig. 3.5 - Sequência de aquisição de dados

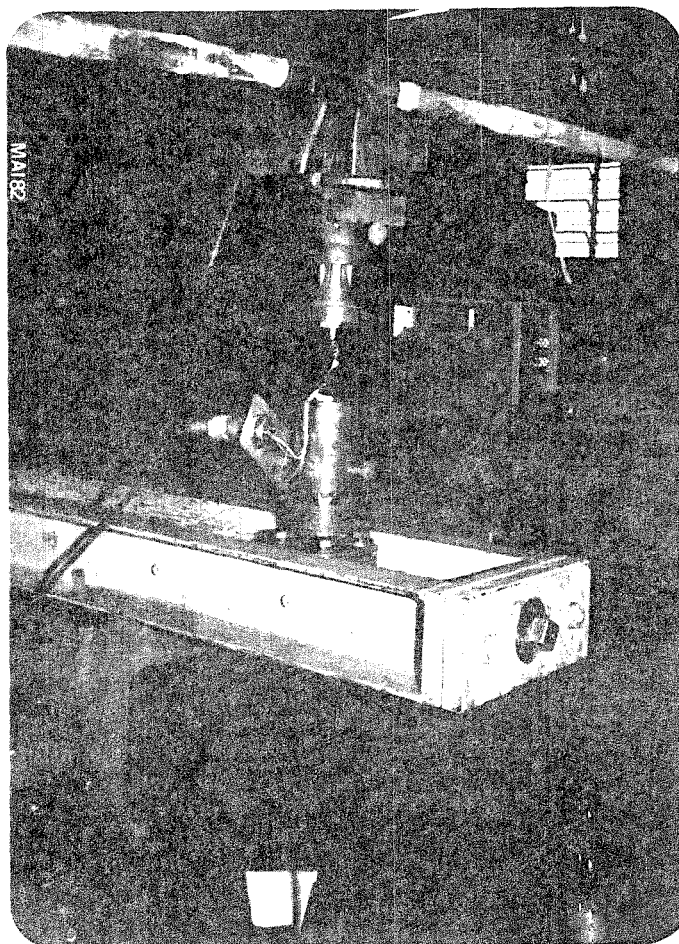


Fig. 3.6 - Instrumentos - suporte do fuso, morsa e torquimetro

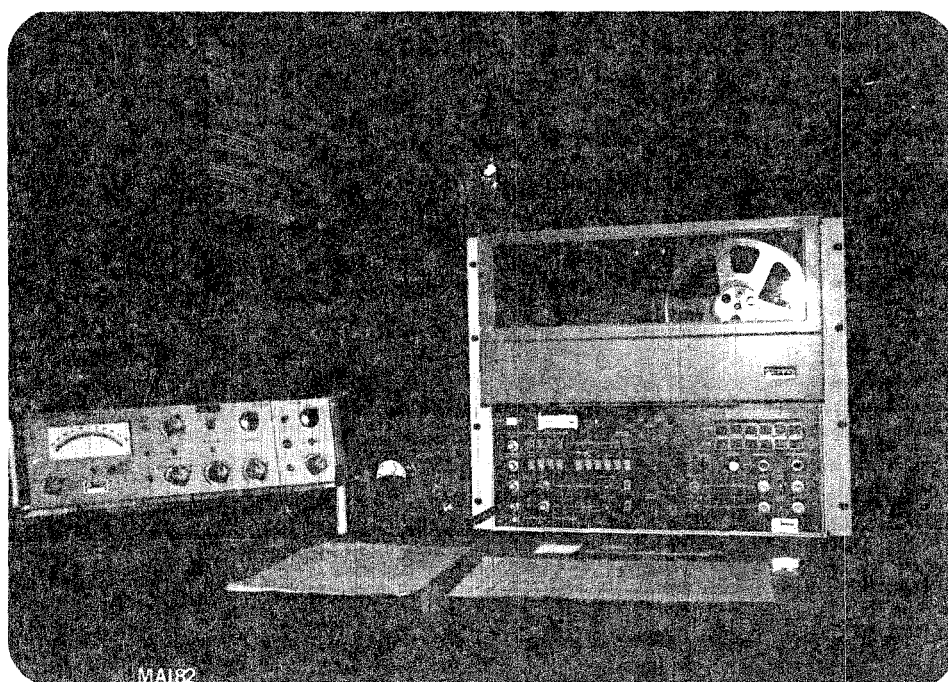


Fig. 3.7 - Instrumentos - ponte amplificadora, gravador FM

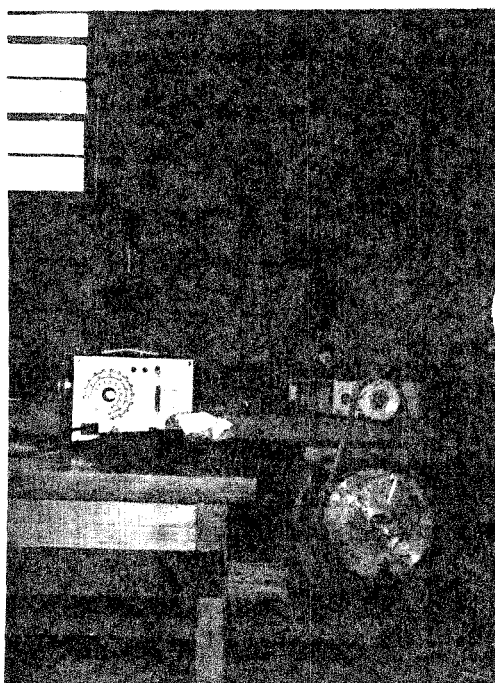


Fig. 3.8 - Instrumentos - luz estroboscópica e variador de velocidade

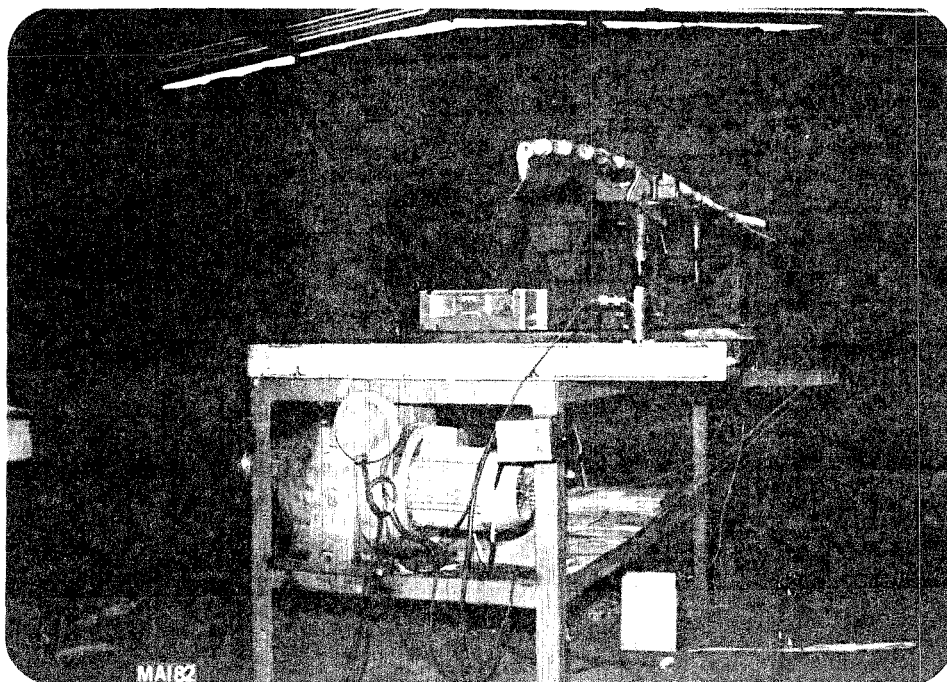


Fig. 3.9 - Vista geral do banco de testes

### 3.2 - MÉTODOS

Foram selecionadas três variedades de cana de açúcar , as quais são mais representativas, em acordo com pesquisas da Copersucar [29]. Tais variedades selecionadas foram desenvolvidas quanto ao teor de açúcar, adaptação a certos tipos de solos, época de maturação e produtividade. Essas variedades codificadas por SP70-1078, SP70-1284 e SP70-1143, atualmente ocupam posição de destaque em relação à área cultivada [29].

As variedades foram testadas na forma de uma viga em balanço onde foram medidas a deformação no local de aplicação da carga e o momento\* produzido pela carga conforme figura abaixo:

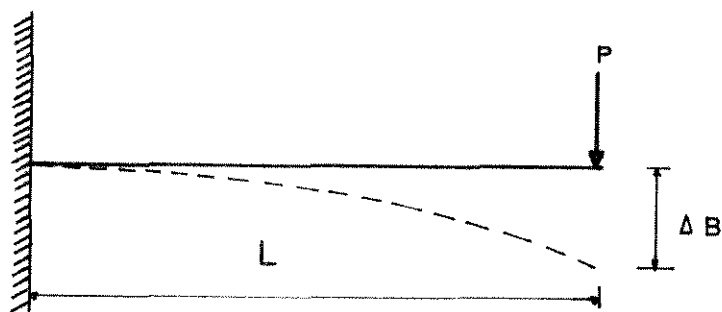


Fig. 3.10 - Viga em balanço - modelo utilizado

A equação abaixo relaciona a deformação máxima no ponto de aplicação da carga de uma viga em balanço. Tal equação se origina da Lei Generalizada Hooke, a qual descreve o comportamento mecânico de corpos elásticos lineares,

$$\Delta_B = \frac{P \cdot L^3}{3EI} \quad (3.1)$$

onde:  $\Delta_B$  = deflexão máx

---

\* O termo técnico para esta medida é conjugado mas durante a dissertação desta trabalho será usado o termo momento.

P = carga

L = distância do engaste à aplicação da carga

E = módulo de elasticidade

I = momento de inércia da secção

representa a deformação no ponto de aplicação da carga.

No presente trabalho, a medida da deformação ( $\Delta_B$ ) foi feita indiretamente, pois conhecendo-se a rotação e passo do fuso, estipulando-se o intervalo de tempo entre leituras no sistema de aquisição de dados, pode-se determinar a deformação:

$$\Delta_B = \frac{\text{rpm}}{60} \times p \times \Delta t \times n \quad (3.2)$$

onde:  $\Delta_B$  = deformação no ponto de aplicação de carga [cm]

rpm = rotação do fuso [1/mm]

p = passo do fuso [cm]

$\Delta t$  = intervalo de tempo entre leituras (s)

n = número da leitura

A rotação do fuso foi medida através de estroboscópio e associando-se os valores pode-se determinar  $\Delta_B$  (eq. 3.2).

O momento foi medido através do torquímetro que o transformava em sinal elétrico amplificado por meio da ponte amplificadora e gravado na fita magnética do gravador de frequência modulada. A transformação do sinal elétrico analógico para digital foi efetuada através do sistema automático de aquisição de dados.

Previamente foi feita uma calibração do torquímetro colocando-se um braço conhecido (L) e várias cargas (P), e para cada carga foi registrado o sinal elétrico.



Com tais dados, fez-se uma regressão linear determinando-se uma equação polinomial do primeiro grau (Apêndice II). Esta equação possibilita fazer a conversão do sinal digital lido para momento. O plano onde se desejava conhecer o valor do momento não continha exatamente o ponto central do engastamento, mas sim estava deslocado do centro.

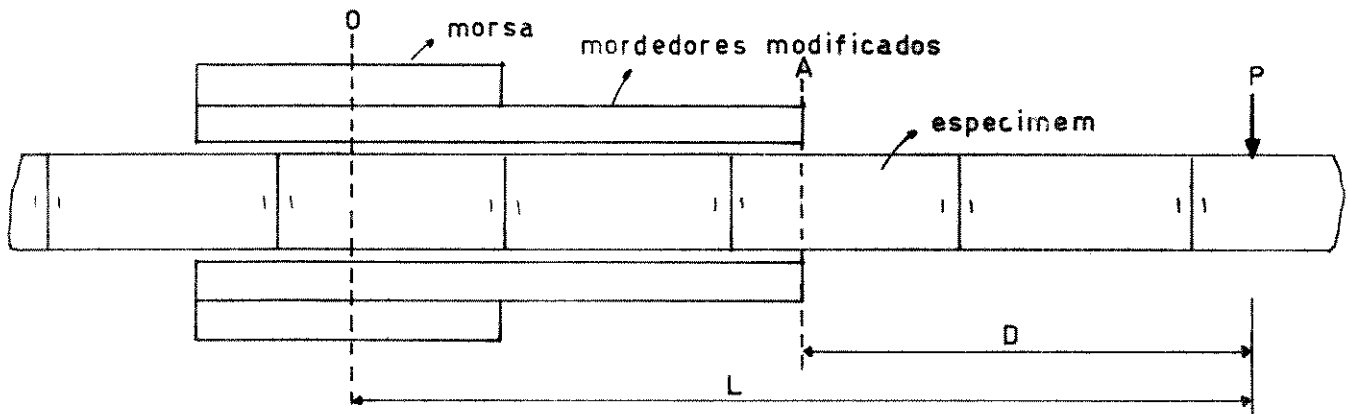


Fig. 3.11 - Engastamento da cana

$$M_0 = P \cdot L \quad (3.3)$$

onde:  $M_0$  = momento no plano 0

$P$  = carga

$L$  = braço

$$M_A = P(L-D) \quad (3.4)$$

onde:  $M_A$  = momento no plano A

$D$  = distância do plano A ao plano 0

Das equações (3.3) e (3.4), obtém-se:

$$\frac{M_A}{M_0} = \frac{P(L-D)}{PL} = \frac{L-D}{L}$$

$$M_A = \left(1 - \frac{D}{L}\right) M_0 \quad (3.5)$$

Através desta equação, pode-se calcular o momento aplicado na secção A. A deformação do segmento  $\overline{OA}$  não foi considerada, pois o módulo de elasticidade do aço é da ordem de 100 vezes o valor do módulo de elasticidade da cana de açúcar podendo - se considerar como rígido o engaste que prende a cana.

Foi selecionada uma faixa de velocidades de deformação e nesta faixa foram feitas 10 variações. Para cada velocidade de deformação foram testadas 10 amostras de cada variedade. Os números de repetições foram baseados em dados de significância estatística.

Para cada amostra a ser testada na secção A, foram tomadas quatro medidas do diâmetro para se calcular o momento de inércia desta secção. O formato da cana-de-açúcar para se calcular o momento de inércia [26] foi considerado como circular e para tal secção o momento de inércia é:

$$I = \frac{\pi d^4}{64} \quad (3.6)$$

onde:  $I$  = momento de inércia da secção em relação ao plano  $x-x$

$d$  = diâmetro médio da cana de açúcar

Com a medida do diâmetro da cana, rotação do fuso e a variedade a ser testada, pode-se iniciar o ensaio. A cana colocada no banco de teste conforme Fig. 3.9 , ligando-se o gravador e o motor, foram registrados os momentos, e ao mesmo tempo, foram gravados sinais elétricos em outro canal do gravador para indicar o início de cada leitura. Tal sinal funciona como "trigger" (inicializador de leitura) do sistema de aquisição de dados.

O computador de mesa HP9845A acoplado ao sistema de a

quisição mostrava na tela o gráfico dos dados obtidos (voltagem x tempo) traduzido como um diagrama de tensão x deformação.

Tal gráfico indica o início e o final da fase elástica do material, ou seja, a parte da curva que se apresentava visualmente reta.

Tais dados expressos em tabela foram posteriormente analisados através de regressão linear, tomando como base o melhor coeficiente de correlação dos pontos.

Para cada amostra foi feita uma tabela onde a primeira coluna mostrava a voltagem lida; a segunda, transformação para momento; a terceira coluna, cálculo do momento na secção A (eq. 3.5) e a quarta coluna, a deformação  $\Delta_B$  (eq. 3.2).

A eq. (3.1) foi analisada da seguinte forma:

$$\Delta_B = \frac{L^2}{3EI} \cdot P \cdot L$$

onde:  $P \cdot L$  = momento

$$\text{então, } \Delta_B = \frac{L^2}{3EI} \cdot M \quad (3.7)$$

que foi interpretado como a equação de uma reta de forma  $y = ax$ , onde  $a = L^2/3EI$  é o coeficiente angular da reta.

Com os pontos da tabela, terceira e quarta colunas, com momento na secção A e com a deformação correspondente, foi feita uma regressão linear e calculado o coeficiente angular da reta:

$$\text{tg}\alpha = \frac{L^2}{3EI} \quad (3.8)$$

onde:  $\text{tg}\alpha$  = coeficiente angular da reta.

Para cada amostra, foi determinado o momento de inércia da secção A. Com as repetições do experimento, foi possível obter uma média e um desvio padrão do módulo de elasticidade.

A média foi calculada como:

$$\bar{E} = \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{n} \quad (3.9)$$

onde:  $\bar{E}$  = módulo de elasticidade média

$E_i$  = módulo de elasticidade do experimento i

n = número total de repetições

O desvio padrão foi calculado utilizando-se a seguinte equação:

$$S = \sqrt{\frac{n \sum E_i^2 - (\sum E_i)^2}{n(n-1)}} \quad (3.10)$$

Com estes métodos, pode-se obter para cada velocidade de deformação e cada variedade um módulo de elasticidade e um desvio padrão.

E = módulo de elasticidade

$\bar{E}$  = módulo de elasticidade médio

S = desvio padrão

Com estes resultados, pode-se analisar o comportamento do módulo de elasticidade em função da velocidade de deformação.

Os dados foram graficados; ( $\bar{E} \times v$ ) módulo de elasticidade médio em função da velocidade.

Através deste gráfico, pode-se concluir se esta propriedade é somente elástica ou viscoelástica.

Como a maioria da literatura afirma que os materiais

biológicos exibem comportamento viscoelástico [26], procurou-se determinar a característica da função  $E = f(v)$  (módulo de elasticidade em função da velocidade de deformação) através de uma regressão. Com os valores da regressão pode-se determinar o raio de correlação e um teste de hipótese para determinar a significância do resultado. O coeficiente de correlação é dado pela seguinte equação:

$$r = \frac{S_{xy}}{S_x S_y} \quad (3.11)$$

onde:  $S_{xy}$  = covariação  
 $S_x$  = desvio padrão de x (valor experimental)  
 $S_y$  = desvio padrão de y (valor estimado)

e

$$S_{xy} = \frac{1}{n-1} \left( \sum x_i y_i - \frac{1}{n} \sum x_i \sum y_i \right) \quad (3.12)$$

onde:  $x_i$  = valores experimentais  
 $y_i$  = valores estimados  
 $n$  = número de dados

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum x_i^2 - (\sum x_i)^2/n}{n-1}} \quad (3.13)$$

$$S_y = \sqrt{\frac{\sum y_i^2 - (\sum y_i)^2/n}{n-1}} \quad (3.14)$$

As equações de regressão do polinômio são:

$$y = ax^2 + bx + c \quad (3.15)$$

$$S(x-x) = \sum x_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n} \quad (3.16)$$

$$S(x \ y) = \sum x_i y_i - \frac{\sum x_i \sum y_i}{n} \quad (3.17)$$

$$S(x \ x^2) = \sum x_i^3 - \frac{\sum x_i \sum x_i^2}{n} \quad (3.18)$$

$$S(x^2 y) = \sum x_i^2 y_i - \frac{\sum x_i^2 \sum y_i}{n} \quad (3.19)$$

$$S(x^2 x^2) = \sum x_i^4 - \frac{(\sum x_i^2)^2}{n} \quad (3.20)$$

$$a = \frac{S(x^2 y) \ S(x \ x) - S(xy) \ S(x \ x^2)}{S(x \ x) \ S(x^2 x^2) - [S(x \ x^2)]^2} \quad (3.21)$$

$$b = \frac{S(x \ y) \ S(x^2 x^2) - S(x^2 y) \ S(x \ x^2)}{S(x \ x) \ S(x^2 x^2) - [S(x \ x^2)]^2} \quad (3.22)$$

$$c = \frac{\sum y_i}{n} - \frac{b \sum x_i}{n} - \frac{a \sum x_i^2}{n} \quad (3.23)$$

As equações 3.15 a 3.23 foram obtidas do manual de operação da calculadora Cassio FX-502P.

Com os resultados, procedeu-se a ajustagem da curva, cálculo do coeficiente de correlação (eq. 3.11) e um teste de hipótese para a verificação da validade do raio de correlação.

Para se fazer a avaliação estatística dos dados estimados, foi utilizada a distribuição de student, que é uma distribuição

ção para pequenas amostragens ( $n < 30$ ) e neste caso o valor de  $n$  é 10.

O teste de hipótese para o  $t$  de student tem a seguinte equação para calcular o seu valor, e com este valor encontrar a significância em tabela [30].

$$t = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{n-r^2}} \quad (3.24)$$

onde:      $t$  -  $t$  de student  
           $r$  - raio de correlação  
           $n$  - nº de valores

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS E DISCUSSÕES



#### 4.1 - RESULTADOS

Com os resultados dos experimentos, obteve-se uma curva de regressão, baseando-se no modelo matemático que representa a lei generalizada de Hooke. Esta equação possibilitou a análise dos dados experimentais.

As tabelas seguintes mostram os resultados obtidos e em seguida o resumo de cada série de experimentos.

Serão tabelados os valores usando-se a seguinte simbologia:

variedade SP70-1078 - Var 1

variedade SP70-1284 - Var 2

variedade SP70-1143 - Var 3

módulo de elasticidade -  $E$  [Kgf/cm<sup>2</sup>]

média do Módulo de Elasticidade -  $\bar{E}$  [Kgf/cm<sup>2</sup>]

velocidade de deformação -  $v$  [cm/s]

momento de inércia -  $I$  [cm<sup>4</sup>]

raio de correlação -  $r$

coeficiente angular da reta -  $tg$

desvio padrão -  $S$

momento na secção A -  $x$  [Kgfxcm]

deformação  $\Delta_B$  -  $y$  [cm]

sendo na fig. 3.11  $L = 54$  cm e  $D = 44$  cm procedeu-se os cálculos do módulo de elasticidade.

Tabela 4.1 - Resultados

Variedade	v	Curva de regressão	r	tgα	I	Ex10 <sup>3</sup>	$\bar{E}x10^3$	Sx10 <sup>3</sup>
var 1	14,33	y=0,023x+0,121	0,98	0,028	1,857	18,7		
		y=0,043x-2,327	0,99	0,043	0,973	23,2		
		y=0,043x-0,574	0,92	0,043	1,917	11,8		
		y=0,017x+0,322	0,97	0,017	3,149	18,2		
		y=0,021x-0,566	0,99	0,021	2,848	16,3		
		y=0,018x-0,493	0,99	0,018	4,417	12,2		
		y=0,013x-1,499	0,99	0,013	5,751	13,0		
		y=0,029x-0,999	0,86	0,029	1,171	28,6	17,8	5,85
var 1	16,7	y=0,017x-0,380	0,94	0,017	2,496	22,9		
		y=0,016x-0,860	0,96	0,016	3,284	18,5		
		y=0,025x-4,269	0,84	0,025	3,104	12,5		
		y=0,018x+1,025	0,93	0,018	3,061	17,6		
		y=0,026x+1,006	0,83	0,026	2,570	14,5		
		y=0,015x+1,455	0,85	0,015	5,147	12,6		
		y=0,015x+0,673	0,98	0,015	3,520	18,4		
		y=0,029x-1,846	0,97	0,029	2,767	12,1	16,1	3,8

Variedade	v	Curva de regressão	r	tgα	I	Ex10 <sup>3</sup>	$\bar{E}x10^3$	Sx10 <sup>3</sup>
var 1	20,0	y=0,016x+1,988	0,90	0,016	3,618	16,8		
		y=0,016x-0,437	0,996	0,016	3,667	16,6		
		y=0,022x+0,028	0,99	0,022	3,424	12,9		
		y=0,015x+0,764	0,996	0,015	4,360	14,9		
		y=0,010x-0,256	0,98	0,010	7,536	12,9		
		y=0,059x+0,363	0,91	0,059	1,303	12,6		
		y=0,034x-0,769	0,91	0,034	1,917	14,9	14,5	1,7
var 1	23,3	y=0,023x-0,177	0,92	0,023	3,193	13,2		
		y=0,012x-0,901	0,96	0,012	5,751	14,1		
		y=0,015x-0,360	0,95	0,015	4,248	15,3		
		y=0,015x+0,941	0,98	0,015	4,360	14,9		
		y=0,032x-1,090	0,74	0,032	3,819	8,0		
		y=0,024x-0,784	0,92	0,024	3,061	13,2		
		y=0,027x-0,159	0,96	0,027	2,495	14,4		
		y=0,038x-0,436	0,88	0,038	1,398	18,3		
		y=0,039x+0,298	0,89	0,039	1,497	16,6	14,4	2,7

Variedade	v	Curva de regressão	r	tga	I	$E \times 10^3$	$\bar{E} \times 10^3$	$S \times 10^3$
var 1	26,7	$y=0,017x+0,021$	0,98	0,017	4,029	14,2		
		$y=0,019x-2,382$	0,97	0,019	3,923	13,0		
		$y=0,016x+0,054$	0,99	0,016	3,976	15,3		
		$y=0,016x-0,389$	0,94	0,016	5,544	11,0		
		$y=0,023x-1,473$	0,94	0,023	3,193	13,2		
		$y=0,021x-0,260$	0,99	0,021	4,083	11,3		
		$y=0,023x-1,135$	0,97	0,023	2,932	14,4		
		$y=0,023x+1,036$	0,96	0,023	5,147	8,2		
		$y=0,031x-1,506$	0,91	0,031	4,083	7,7		
		$y=0,021x-0,168$	0,98	0,021	3,239	14,3	12,3	2,6
var 1	30,7	$y=0,026x+0,377$	0,97	0,026	2,767	13,5		
		$y=0,012x+0,200$	0,99	0,012	4,029	20,1		
		$y=0,020x+0,105$	0,99	0,020	2,609	18,6		
		$y=0,025x-1,357$	0,94	0,025	2,890	13,5		
		$y=0,018x+1,142$	0,96	0,018	3,618	14,9	16,1	3,0

Variedade	v	Curva de regressão	r	tga	I	Ex10 <sup>3</sup>	$\bar{E}x10^3$	Sx10 <sup>3</sup>
var 1	34,3	y=0,014x-2,375	0,96	0,014	4,711	14,7		
		y=0,018x-0,157	0,97	0,018	3,520	15,3		
		y=0,021x+1,606	0,96	0,021	2,609	17,7		
		y=0,022x+0,747	0,95	0,022	2,648	16,7		
		y=0,018x-0,189	0,95	0,018	3,193	16,9		
		y=0,039x-3,474	0,96	0,039	1,980	12,6		
		y=0,024x+0,680	0,99	0,024	x,193	12,7		
		y=0,025x+2,046	0,83	0,025	1,827	21,3		
		y=0,038x+0,431	0,94	0,038	1,575	16,2	16,0	2,6
var 1	39,0	y=0,020x-2,956	0,90	0,020	3,017	16,1		
		y=0,040x-5,664	0,95	0,040	1,398	17,4		
		y=0,023x-0,500	0,97	0,023	3,424	12,3		
		y=0,032x+1,442	0,97	0,032	1,374	22,1		
		y=0,025x-0,459	0,93	0,025	1,857	20,9		
		y=0,023x+0,418	0,94	0,023	2,313	18,3		
		y=0,047x-8,136	0,93	0,047	2,807	7,4		
		y=0,024x-0,222	0,92	0,024	2,108	19,2		
		y=0,026x-1,048	0,98	0,026	2,141	17,5	16,8	4,5

Variedade	v	Curva de regressão	r	tga	I	Ex10 <sup>3</sup>	$\bar{E}x10^3$	Sx10 <sup>3</sup>
var 1	44,0	y=0,019x+1,491	0,95	0,019	3,239	15,8		
		y=0,022x-3,056	0,88	0,022	1,980	22,3		
		y=0,019x+1,174	0,95	0,019	2,209	23,2		
		y=0,013x-0,754	0,98	0,013	4,083	18,3		
		y=0,014x+0,919	0,98	0,014	3,718	18,7		
		y=0,018x+0,782	0,98	0,018	2,767	19,5		
		y=0,021x-0,207	0,96	0,021	3,472	13,3		
		y=0,018x+1,250	0,99	0,018	3,330	16,2		
		y=0,039x+0,575	0,98	0,039	2,384	10,5	17,5	4,0
var 1	46,7	y=0,015x-1,660	0,98	0,015	2,609	24,8		
		y=0,015x+1,614	0,93	0,015	3,239	20,0		
		y=0,025x-0,182	0,92	0,025	2,495	15,6		
		y=0,015x+1,280	0,98	0,015	2,932	22,1		
		y=0,031x+0,198	0,87	0,031	1,602	19,6		
		y=0,030x+0,108	0,88	0,030	2,108	15,4	17,5	4,9

Variedade	v	Curva de regressão	r	tgα	I	Ex10 <sup>3</sup>	$\bar{E}x10^3$	Sx10 <sup>3</sup>
var 2	14,3	y=0,015x-0,938	0,95	0,015	5,751	11,5		
		y=0,023x-3,309	0,999	0,023	4,138	10,2		
		y=0,011x-1,377	0,98	0,011	11,011	8,0		
		y=0,014x-0,617	0,99	0,014	8,617	8,1		
		y=0,011x-0,200	0,998	0,011	8,063	11,0		
		y=0,014x-0,930	0,98	0,014	4,417	15,7		
		y=0,018x-0,492	0,94	0,018	4,083	13,2		
		y=0,013x-1,149	0,99	0,013	6,715	11,1		
		y=0,028x-0,475	0,91	0,028	1,769	19,6		
		y=0,032x-0,051	0,98	0,032	1,684	18,0	12,6	3,9
var 2	16,7	y=0,042x+0,731	0,95	0,042	2,108	11,0		
		y=0,041x-0,628	0,99	0,041	2,043	11,6		
		y=0,017x-0,164	0,995	0,017	4,711	12,1		
		y=0,050x-5,694	0,99	0,050	1,629	11,9		
		y=0,032x+0,221	0,95	0,032	2,890	10,5		
		y=0,045x+0,360	0,96	0,045	1,948	11,1		
		y=0,032x-0,273	0,99	0,032	2,011	15,0		
		y=0,039x-7,355	0,99	0,039	1,656	14,9		
		y=0,030x-0,955	0,96	0,030	2,687	12,1	12,3	1,7

Variedade	v	Curva de regressão	r	tga	I	Ex10 <sup>3</sup>	$\bar{E}x10^3$	Sx10 <sup>3</sup>
var 2	20,0	y=0,027x-0,083	0,98	0,027	3,718	9,7		
		y=0,030x+1,953	0,93	0,030	2,848	11,4		
		y=0,014x+1,562	0,83	0,014	7,622	9,1		
		y=0,011x+1,218	0,90	0,011	7,884	11,2		
		y=0,013x+1,724	0,96	0,013	6,256	12,0		
		y=0,023x+0,500	0,99	0,023	2,313	18,3		
		y=0,009x+1,180	0,99	0,009	12,194	8,9		
		y=0,018x-4,847	0,99	0,018	3,618	14,9		
		y=0,025x+0,566	0,995	0,025	3,472	11,2		
		y=0,020x-4,195	0,992	0,020	4,417	11,0	11,8	2,8
var 2	23,3	y=0,023x-0,109	0,92	0,023	3,377	12,5		
		y=0,034x-0,392	0,89	0,034	3,618	7,9		
		y=0,023x-0,336	0,91	0,023	4,417	9,6		
		y=0,030x-1,160	0,91	0,030	3,330	9,7		
		y=0,026x+0,669	0,95	0,026	4,651	8,1		
		y=0,031x-1,365	0,90	0,031	2,848	11,0		
		y=0,021x+0,990	0,95	0,021	3,768	12,3		
		y=0,025x+0,772	0,96	0,025	4,138	9,4		
		y=0,046x-3,242	0,97	0,046	1,629	13,0		
		y=0,023x+0,853	0,98	0,023	4,360	9,7	10,5	1,8



Variedade	v	Curva de regressão	r	tgα	I	Ex10 <sup>5</sup>	$\bar{E}x10^3$	Sx10 <sup>3</sup>
var 2	26,7	y=0,034x+0,960	0,96	0,034	2,609	11,0		
		y=0,018x-0,679	0,96	0,018	6,794	8,0		
		y=0,047x+2,258	0,78	0,047	2,011	10,5		
		y=0,023x+0,952	0,91	0,023	4,417	9,6		
		y=0,039x+1,457	0,86	0,039	4,029	6,2		
		y=0,041x-0,266	0,87	0,041	1,980	12,0		
		y=0,044x-1,508	0,95	0,044	2,141	10,5		
		y=0,042x+0,123	0,99	0,042	2,570	9,0		
		y=0,043x+0,045	0,99	0,043	3,149	7,2	9,3	1,9
var 2	30,7	y=0,020x-0,460	0,97	0,020	4,895	9,9		
		y=0,015x+0,549	0,97	0,015	5,147	12,6		
		y=0,032x+1,171	0,93	0,032	2,209	13,8		
		y=0,030x+0,058	0,96	0,030	2,011	16,1		
		y=0,022x-2,099	0,91	0,022	4,711	9,4		
		y=0,021x+0,566	0,95	0,021	4,138	11,2		
		y=0,044x+0,550	0,97	0,044	1,575	14,0		
		y=0,022x+0,118	0,96	0,022	5,409	8,2		
		y=0,025x-1,507	0,98	0,025	3,618	10,7	11,8	2,5

Variedade	v	Curva de regressão	r	tga	I	Ex10 <sup>3</sup>	$\bar{E}x10^3$	Sx10 <sup>3</sup>
var 2	34,3	y=0,019x+0,240	0,98	0,019	4,248	12,0		
		y=0,033x-0,200	0,94	0,033	2,384	12,4		
		y=0,026x-1,375	0,98	0,026	2,890	12,9		
		y=0,016x-0,106	0,98	0,016	5,277	11,5		
		y=0,026x-0,504	0,94	0,026	2,974	12,6		
		y=0,030x-2,077	0,81	0,030	2,848	11,4		
		y=0,030x+1,330	0,94	0,030	2,687	12,1		
		y=0,025x+0,992	0,95	0,025	3,718	10,5	11,9	0,8
var 2	39,0	y=0,020x-0,364	0,98	0,020	3,667	13,3		
		y=0,020x-0,474	0,96	0,020	3,976	12,2		
		y=0,049x+1,487	0,81	0,049	1,656	12,0		
		y=0,031x+1,772	0,87	0,031	2,076	15,1		
		y=0,024x-0,334	0,95	0,024	4,592	12,5		
		y=0,027x-1,522	0,97	0,027	3,193	11,3		
		y=0,035x+1,961	0,94	0,035	2,141	13,0	12,5	1,3

Variedade	v	Curva de regressão	r	tgα	I	Ex10 <sup>3</sup>	$\bar{E}x10^3$	Sx10 <sup>3</sup>
var 2	44,0	y=0,024x-0,182	0,98	0,024	3,330	12,2		
		y=0,016x-0,750	0,99	0,016	7,035	8,6		
		y=0,028x+0,997	0,95	0,028	2,532	13,7		
		y=0,024x-1,303	0,998	0,024	3,718	10,9		
		y=0,016x-0,122	0,93	0,016	4,192	14,5		
		y=0,009x+0,534	0,99	0,009	7,536	14,3		
		y=0,035x-6,374	0,980	0,035	2,175	12,4		
		y=0,018x-0,448	0,96	0,018	4,895	11,0		
		y=0,015x+1,565	0,98	0,015	4,475	14,5	12,5	2,0
var 2	46,7	y=0,026x-2,165	0,97	0,026	2,532	14,8		
		y=0,041x-0,976	0,94	0,041	1,575	15,1		
		y=0,020x+0,925	0,97	0,020	3,520	13,8		
		y=0,020x-0,543	0,98	0,020	3,718	13,1		
		y=0,016x-0,119	0,98	0,016	4,592	13,2		
		y=0,015x-0,127	0,99	0,015	7,117	9,1		
		y=0,018x+1,185	0,97	0,018	4,192	12,9		
		y=0,019x+0,348	0,98	0,019	5,147	9,9	12,7	2,1

Variedade		Curva de regressão	r	tga	I	Ex10 <sup>3</sup>	$\bar{E}x10^3$	Sx10 <sup>3</sup>
var 3	14,3	y=0,034x+0,810	0,90	0,034	1,214	23,5		
		y=0,037x-2,358	0,96	0,037	1,169	24,6		
		y=0,050x-1,988	0,90	0,050	0,955	20,4		
		y=0,014x-0,169	0,997	0,014	5,819	18,2		
		y=0,043x-0,712	0,97	0,043	1,258	18,0		
		y=0,027x-0,669	0,99	0,027	1,684	21,4		
		y=0,061x-0,893	0,91	0,061	0,695	22,9		
		y=0,023x-1,056	0,99	0,023	1,887	22,4		
		y=0,015x-0,034	0,98	0,015	2,532	25,6		
		y=0,015x+0,100	0,99	0,015	2,495	26,0	22,3	2,8
var 3	16,7	y=0,012x+1,361	0,96	0,012	2,974	27,2		
		y=0,030x-1,701	0,98	0,030	1,497	21,6		
		y=0,011x-0,810	0,897	0,011	4,475	19,7		
		y=0,021x+0,206	0,995	0,021	2,349	19,7		
		y=0,027x-0,820	0,94	0,027	1,602	22,5		
		y=0,026x+0,493	0,995	0,026	2,209	16,9	21,3	3,5

Variedade	v	Curva de regressão	r	tga	I	Ex10 <sup>3</sup>	$\bar{E}x10^3$	Sx10 <sup>3</sup>
var 3	20	y=0,028x+1,363	0,98	0,028	2,278	15,2		
		y=0,039x+0,551	0,92	0,039	2,209	11,3		
		y=0,032x+1,123	0,94	0,032	1,171	25,9		
		y=0,021x+1,158	0,98	0,021	3,017	15,3		
		y=0,034x+0,334	0,99	0,034	2,243	12,7		
		y=0,046x-0,897	0,90	0,046	0,973	21,7		
		y=0,027x-1,804	0,95	0,027	2,890	12,5		
		y=0,026x+1,594	0,96	0,026	1,472	25,4		
		y=0,031x+0,740	0,87	0,031	1,192	26,3	18,5	6,2
var 3	23,3	y=0,016x-0,476	0,96	0,016	3,871	15,7		
		y=0,012x-1,191	0,98	0,012	3,976	20,4		
		y=0,020x-0,275	0,96	0,020	2,011	24,2		
		y=0,017x-0,620	0,95	0,017	3,104	18,2		
		y=0,019x-0,697	0,99	0,019	3,193	16,0		
		y=0,018x-1,133	0,91	0,018	2,974	18,2		
		y=0,018x-1,830	0,94	0,018	2,807	19,2		
		y=0,013x-0,459	0,99	0,013	3,923	19,1		
		y=0,030x-1,947	0,95	0,030	2,532	12,8	18,2	3,2

Variedade	v	Curva de regressão	r	tg $\alpha$	I	Ex10 <sup>3</sup>	$\bar{E}x10^3$	Sx10 <sup>3</sup>
var 3	26,7	y=0,030x-2,268	0,94	0,030	1,010	32,1		
		y=0,028x-1,693	0,93	0,028	2,209	15,7		
		y=0,045x-0,908	0,98	0,045	1,497	14,4		
		y=0,054x-3,280	0,93	0,054	1,327	13,6		
		y=0,031x-0,339	0,91	0,031	1,236	25,3		
		y=0,033x-2,519	0,90	0,033	1,575	18,7		
		y=0,032x-1,962	0,98	0,032	1,887	16,1	19,4	6,8
var 3	30,7	y=0,017x-3,038	0,98	0,017	5,147	11,1		
		y=0,014x+0,750	0,98	0,014	3,871	17,9		
		y=0,012x+0,409	0,99	0,012	9,400	8,6		
		y=0,013x-0,574	0,99	0,013	3,569	20,9		
		y=0,018x+0,406	0,99	0,018	2,243	24,1		
		y=0,016x-0,237	0,99	0,016	,3330	18,2		
		y=0,019x+0,844	0,96	0,019	1,980	25,8		
		y=0,028x+1,549	0,96	0,028	2,384	14,6		
		y=0,020x+1,057	0,90	0,029	1,887	17,8		
		y=0,034x-0,643	0,99	0,034	1,192	24,0	17,8	6,0

Variedade	v	Curva de regressão	r	tga	I	Ex10 <sup>3</sup>	$\bar{E}x10^3$	Sx10 <sup>3</sup>
var 3	34,3	y=0,019x+0,411	0,99	0,019	3,061	16,7		
		y=0,016x+0,286	0,99	0,016	4,711	12,9		
		y=0,024x+1,741	0,90	0,024	2,175	18,6		
		y=0,018x+0,923	0,96	0,018	3,330	16,2		
		y=0,025x+0,857	0,98	0,025	2,043	19,0		
		y=0,032x-1,613	0,89	0,032	1,303	23,3		
		y=0,014x+0,036	0,98	0,014	4,360	15,9		
		y=0,045x-1,267	0,93	0,045	1,258	17,2		
		y=0,031x+0,263	0,96	0,031	1,549	20,2		
		y=0,047x+1,308	0,92	0,047	0,901	23,0	18,3	3,2
var 3	39,0	y=0,021x-0,293	0,99	0,021	3,569	13,0		
		y=0,025x-2,466	0,97	0,025	2,108	18,4		
		y=0,023x+1,900	0,95	0,023	1,887	22,4		
		y=0,032x+1,795	0,89	0,032	2,108	14,4		
		y=0,032x-2,554	0,94	0,032	1,109	27,4		
		y=0,036x-1,487	0,95	0,036	1,171	23,1		
		y=0,033x+1,293	0,99	0,033	1,948	15,1		
		y=0,035x-2,703	0,95	0,035	1,030	27,0		
		y=0,030x-1,383	0,91	0,030	1,684	19,2	20,0	5,3

Variedade	v	Curva de regressão	r	tgα	I	Ex10 <sup>3</sup>	$\bar{E}x10^3$	Sx10 <sup>3</sup>
var 3	44,0	y=0,035x+0,974	0,98	0,035	0,955	29,1		
		y=0,011x+0,450	0,996	0,011	3,377	26,2		
		y=0,013x-0,949	0,99	0,013	5,277	14,2		
		y=0,017x-0,722	0,94	0,017	3,472	16,5		
		y=0,016x+0,479	0,99	0,016	3,239	18,8		
		y=0,015x+1,051	0,99	0,015	5,020	12,9		
		y=0,017x-0,776	0,97	0,017	3,061	18,7		
		y=0,024x-1,060	0,83	0,024	1,948	20,8	19,8	6,0
var 3	46,7	y=0,018x-2,549	0,99	0,018	2,141	25,2		
		y=0,011x-0,620	0,98	0,011	4,360	20,3		
		y=0,011x+0,394	0,998	0,011	4,529	19,5		
		y=0,021x-1,333	0,99	0,021	2,384	19,4		
		y=0,011x-0,293	0,97	0,011	4,248	20,8		
		y=0,019x-0,059	0,99	0,019	2,349	21,8		
		y=0,011x+0,190	0,99	0,011	4,711	18,8		
		y=0,023x-1,010	0,86	0,023	1,769	23,9		
		y=0,023x+1,070	0,96	0,023	2,076	20,4	21,1	2,1



Tabela 4.3

Resumo dos resultados para a variedade SP70-1284

Velocidade de deformação (v) [mm/s]	Módulo de elasticidade experimental ( $\bar{E}$ ) [Kgf/cm <sup>2</sup> ]	Módulo de elasticidade estimado ( $E_{EST}$ ) [Kgf/cm <sup>2</sup> ]
143,3	$12,6 \times 10^3$	$12,4 \times 10^3$
166,7	$12,3 \times 10^3$	$11,9 \times 10^3$
200,0	$11,8 \times 10^3$	$11,5 \times 10^3$
233,3	$10,3 \times 10^3$	$11,2 \times 10^3$
266,7	$9,3 \times 10^3$	$11,0 \times 10^3$
306,7	$11,8 \times 10^3$	$11,0 \times 10^3$
343,3	$11,9 \times 10^3$	$11,2 \times 10^3$
390,0	$12,5 \times 10^3$	$11,7 \times 10^3$
440,0	$12,5 \times 10^3$	$12,6 \times 10^3$
466,7	$12,7 \times 10^3$	$13,2 \times 10^3$

Os resultados experimentais forneceram, através de regressão, o seguinte polinômio:

$$E_{EST} = 0,0693v^2 - 39,627v + 16627,9 \quad (4.2)$$

O raio de correlação entre os valores experimentais e estimados foi de

$$r = 0,679$$

O teste de hipótese para verificação do raio de correlação, dado pela eq. (3.24) originou  $t = 2,620$  e  $t_{0,990} = 2,900$ ,  $t_{0,975} = 2,310$  para específicos níveis de confiança.

Tabela 4.2

Resumo dos resultados para a variedade SP70-1078

Velocidade de deformação (v) [mm/s]	Módulo de elasticidade experimental médio ( $\bar{E}$ ) [Kgf/cm <sup>2</sup> ]	Módulo de elasticidade estimado ( $E_{EST}$ ) [Kgf/cm <sup>2</sup> ]
143,4	$17,8 \times 10^3$	$16,7 \times 10^3$
166,7	$16,1 \times 10^3$	$16,0 \times 10^3$
200,0	$14,5 \times 10^3$	$15,3 \times 10^3$
233,3	$14,4 \times 10^3$	$14,8 \times 10^3$
266,7	$12,3 \times 10^3$	$14,6 \times 10^3$
306,7	$16,1 \times 10^3$	$14,7 \times 10^3$
343,3	$16,0 \times 10^3$	$15,0 \times 10^3$
390,0	$16,8 \times 10^3$	$15,9 \times 10^3$
440,0	$17,5 \times 10^3$	$17,4 \times 10^3$
466,7	$17,5 \times 10^3$	$18,4 \times 10^3$

Os resultados experimentais forneceram, através de regressão, o seguinte polinômio:

$$E_{EST} = 0,111v^2 - 62,468v + 23372,74 \quad (4.1)$$

O raio de correlação entre os valores experimentais e estimados foi de

$$r = 0,746$$

O teste de hipótese para verificação do raio de correlação dado pela eq. (3.24) originou  $t = 3,168$  com os seguintes valores para específicas significâncias:  $t_{0,995} = 3,360$  e  $t_{0,990} = 2,900$ .

Tabela 4.4

Resumo dos resultados para a variedade SP70-1143

Velocidade de deformação (v) [mm/s]	Módulo de elasticidade experimental médio ( $\bar{E}$ ) [Kgf/cm <sup>2</sup> ]	Módulo de elasticidade estimado [E] [Kgf/cm <sup>2</sup> ]
143,3	22,3x10 <sup>3</sup>	21,8x10 <sup>3</sup>
166,6	21,3x10 <sup>3</sup>	20,9x10 <sup>3</sup>
200,0	18,5x10 <sup>3</sup>	19,8x10 <sup>3</sup>
233,3	18,2x10 <sup>3</sup>	18,9x10 <sup>3</sup>
266,7	19,4x10 <sup>3</sup>	18,3x10 <sup>3</sup>
306,7	17,8x10 <sup>3</sup>	18,2x10 <sup>3</sup>
343,3	18,3x10 <sup>3</sup>	18,3x10 <sup>3</sup>
390,0	20,0x10 <sup>3</sup>	19,0x10 <sup>3</sup>
440,0	19,8x10 <sup>3</sup>	20,3x10 <sup>3</sup>
466,6	21,3x10 <sup>3</sup>	21,3x10 <sup>3</sup>

Os resultados experimentais forneceram, através de regressão, o seguinte polinômio:

$$E_{EST} = 0,129v^2 - 80,295v + 30653,47 \quad (4.3)$$

O raio de correlação entre os valores experimentais e estimados foi de

$$r = 0,870$$

O teste de hipótese para verificação do raio de correlação, dado pela eq. (3.24) originou  $t = 4,991$  e  $t_{0995} = 3,36$  para o específico nível de confiança.

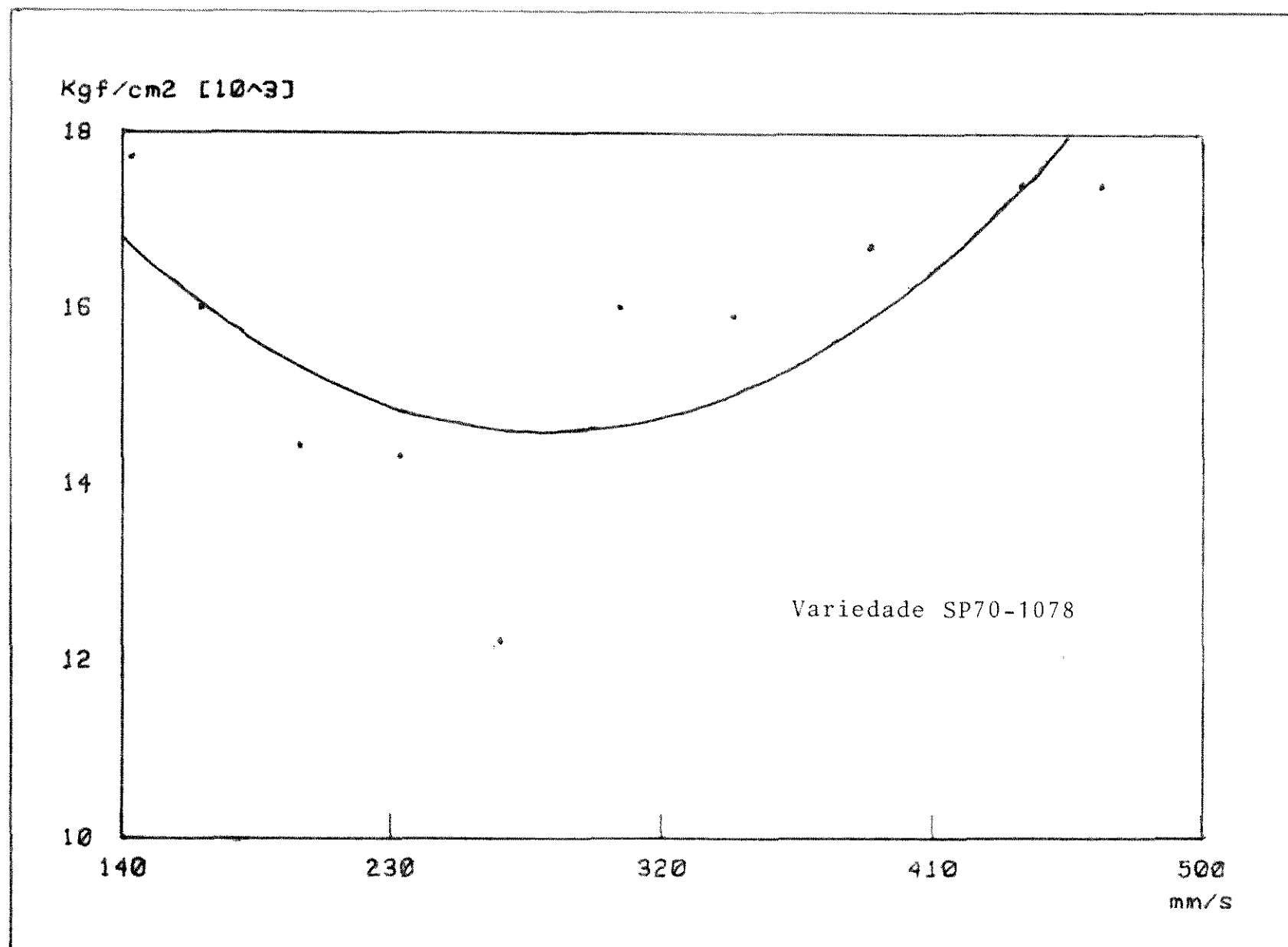


Fig. 4.1 - Valor médio do módulo de elasticidade em função da velocidade e polinômio ajustado (eq. 4.1)

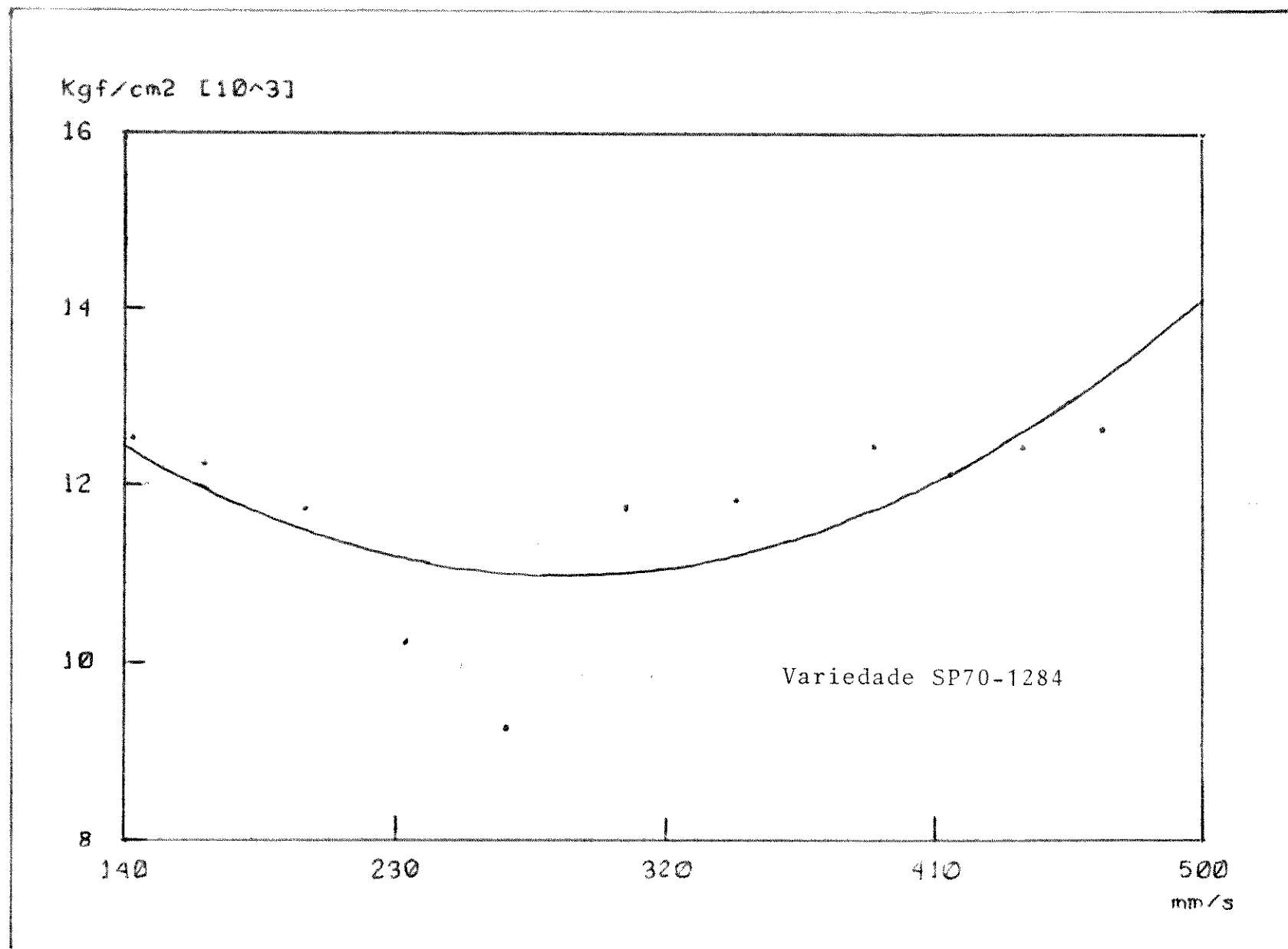


Fig. 4.2 - Valor médio do módulo de elasticidade em função da velocidade e polinômio ajustado (eq. 4.2)

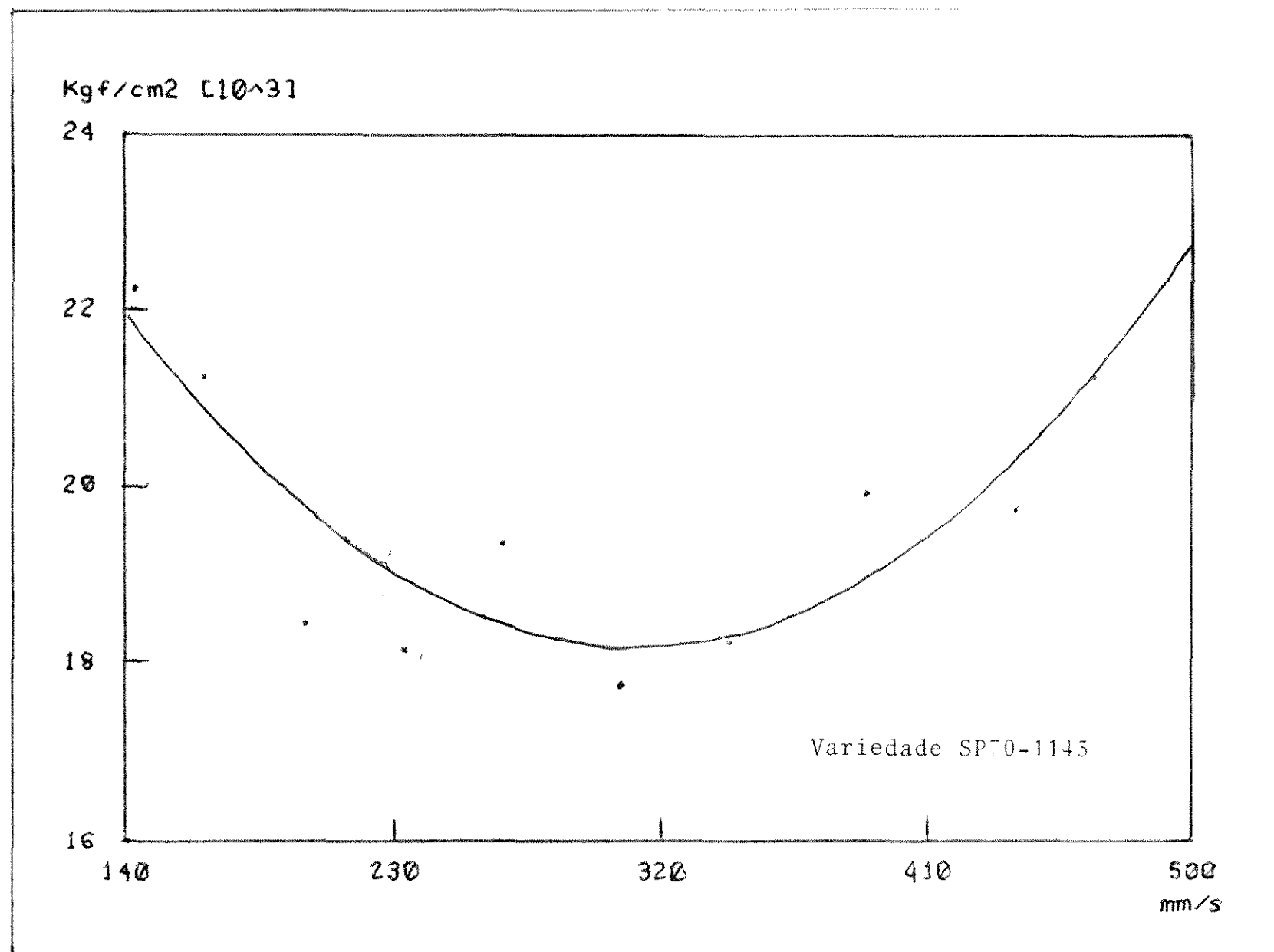


Fig. 4.3 - Valor médio do módulo de elasticidade em função da velocidade e polinômio ajustado (eq. 4.3)

Pela disposição dos pontos nas Tabelas 4.2, 4.3 e 4.4 chegou-se à conclusão que a curva que melhor descreve o processo é um polinômio. Procedendo-se a ajustagem do polinômio para a Tabela 4.2, correspondendo à variedade SP70-1078, chegou-se ao polinômio (eq. 4.1):  $E = 0,111v^2 - 62,468v + 23372,74$ , onde  $v$  é dado em mm/s e  $E$  em Kgf/cm<sup>2</sup>. Para este resultado, obteve-se um raio de correlação  $r = 0,746$  e o  $t$  de student,  $t = 3,039$ , sendo que isto representa uma significância a nível de 1% para que o raio de correlação não tenha ocorrido por acaso, pois a equação é razoável.

No caso da Tabela 4.3, a ajustagem com o polinômio resultou em (eq. 4.2):  $E = 0,0693v^2 - 39,627v + 16627,9$ , onde  $v$  é dado em mm/s e  $E$  em Kgf/cm<sup>2</sup>. Para este caso, conseguiu-se o raio de correlação mais baixo  $r = 0,679$ , que não deixa de expressar alguma semelhança com o polinômio, pois para este caso o valor de  $t$  de student é  $t = 2,62$ . Este valor representa uma significância a nível de 2,5% para os valores experimentais correlacionados com os valores estimados.

A Tabela 4.4 se refere à variedade SP70-1143. A equação encontrada através da regressão foi (eq. 4.3):  $E = 0,129v^2 - 80,295v + 30653,47$ , onde  $v$  é expresso em mm/s e  $E$  em Kgf/cm<sup>2</sup>. Neste caso, encontrou-se um raio de correlação  $r = 0,870$  e neste caso  $t = 4,991$ , sendo que existe uma significância a nível de 0,5% para os valores estimados pela equação.

Pelo polinômio encontrado através da regressão pode-se calcular que para a variedade SP70-1078 a velocidade de deformação que se obtém o menor módulo de elasticidade é  $v = 281,4$  mm/s e esta velocidade corresponde a um módulo de elasticidade de  $E = 14,6 \times 10^3$  Kgf/cm<sup>2</sup>.

Para a variedade SP70-1284, a velocidade de deformação para a qual  $E$  é mínimo é  $v = 285,9$  mm/s e esta velocidade corresponde a um módulo de elasticidade  $E = 11,0 \times 10^3$  Kgf/cm<sup>2</sup>.

Para a variedade SP70-1143 a velocidade de deformação para a qual  $E$  é mínimo é  $v = 311,2$  mm/s e para esta velocidade o valor correspondente de  $E$  é  $E = 18,2 \times 10^3$  Kgf/cm<sup>2</sup>.

Comparando-se os resultados com (29), encontrou-se que a variedade SP70-1284 é a mais suscetível ao tombamento. Neste trabalho encontrou-se que para esta variedade o seu módulo de elasticidade é a menor entre as três variedades.

O oposto ocorre com a variedade SP70-1143, que em (29) afirma que esta variedade não chega a tombar. Nos resultados deste trabalho, esta variedade exhibe o maior módulo de elasticidade.



## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÕES

Do que foi anteriormente exposto, pode-se concluir o seguinte:

- a) O material analisado exibe propriedades não só elásticas, mas também viscoelásticas. Isto está evidenciado na dependência do parâmetro tempo para o módulo de elasticidade.
- b) O módulo de elasticidade varia com a velocidade de deformação de forma quadrática.
- c) As variedades estudadas exibem diferentes funções quadráticas que expressam o valor do módulo de elasticidade em função da velocidade de deformação.
- d) A variedade SP70-1284, que segundo (29) é a mais suscetível ao tombamento, exibe módulo de elasticidade menor.
- e) A variedade SP70-1143 que, segundo (29) não apresenta problemas de tombamento exibe módulo de elasticidade maior.
- f) a metodologia apresentada por este trabalho mostrou ser eficiente no estudo de propriedades mecânicas do colmo da cana-de-açúcar.
- g) Os resultados obtidos pelo presente trabalho são de significativa valia para o projeto de componentes destinados ao manuseio mecânico da cana-de-açúcar.

## APÊNDICES

## APÊNDICE I

### PROJETO E CONSTRUÇÃO DO TORQUIMETRO

segundo [29]

O projeto do torquimetro para um torque de 50 Kgfxm (estático) e nesta solicitação atinge uma deformação no sentido helicoidal à 45° de

$$\epsilon_{45^{\circ}} = \frac{M_t \times R_e}{\pi G (R_e^4 - R_i^4)} \quad (\text{AI.1})$$

onde:  $\epsilon_{45^{\circ}}$  - deformação relativa helicoidal à 45°

$M_t$  - momento torçor

$R_e$  - raio externo

$G$  - módulo de rigidez à torção.

$R_i$  - raio interno

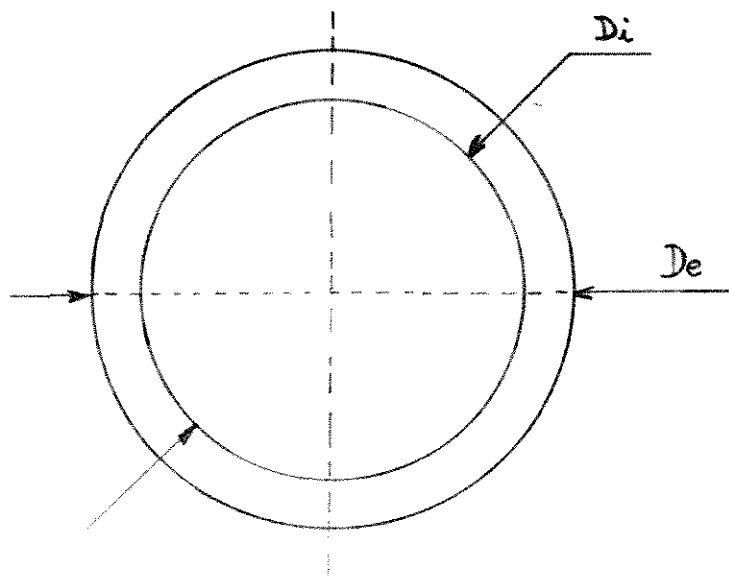


Fig. AI.1 - Seccção central do torquimetro

De acordo com Faires [27], pag. 47:

$$G = 7,42 \times 10^5 \text{ Kgf/cm}^2$$

com as dimensões do torquimetro

$$D_e = 2,57 \text{ cm}$$

$$D_i = 2,03 \text{ cm}$$

material AISI C5150 (INCOFER).

Sendo

$$M_t = 5.000 \text{ Kgfxcm}$$

$$R_e = 1,29 \text{ cm}$$

$$R_i = 1,02 \text{ cm}$$

$$\epsilon_{45^\circ} = \frac{5000 \times 1,29}{\pi \times 7,42 \times 10^5 (1,29^4 - 1,02^4)}$$

$$\epsilon_{45^\circ} = 1,64 \times 10^{-3} \text{ cm/cm}$$

$$\epsilon_{45^\circ} = 1,640 \times 10^{-3} \text{ mm/mm}$$

$$\epsilon_{45^\circ} = 1640 \text{ micron-strain}$$

Com estas dimensões não se atinge a deformação máxima do strain-gauge, a qual pode suportar até 2000 micron-strain.

Para as dimensões mecânicas do torquimetro o fator de segurança será:

$$\tau = \frac{\text{momento torçor}}{\omega \text{ polar}} \quad (\text{A1.2})$$

onde:  $\tau$  - tensão de cisalhamento

$\omega$  polar - momento polar de inércia

$$\omega \text{ polar} = \frac{\pi(d_e^4 - d_i^4)}{32 \times d_e/2} \quad (\text{AI.3})$$

$$\omega \text{ polar} = \frac{\pi(2,57^4 - 2,03^4)}{32 \times 2,57/2}$$

$$\omega \text{ polar} = 2,04 \text{ cm}^3$$

$$\tau = \frac{5000}{2,04}$$

$$\tau = 2451 \text{ Kgf/cm}^2$$

de [27]

$$\tau = 0,588 \sigma \quad (\text{AI.4})$$

$$\sigma = 4168 \text{ Kgf/cm}^2$$

para o material AISI C5150 TR & 540

$$\sigma_r = 112 \text{ Kgf/mm}^2 \quad \sigma_e = 104,5 \text{ Kgf/mm}^2$$

Faires [27] Tab.8

$$F.S = \frac{\sigma_e}{\sigma} \quad (\text{AI.5})$$

onde: F.S - fator de segurança

$\sigma_e$  - tensão de escoamento do material

$\sigma$  - tensão

$$F_S = \frac{104,5}{24,51}$$

$$F_S = 4,26$$

O fator teórico que identifica o torquimetro.

Para um torque de 50 Kgfxm, o strain-gauge atinge uma deformação de 1640 micron-strain e, desta forma, a tensão de saída na ponte de Wheatstone será:

$$\Delta V = V.F \epsilon \quad (AI.6)$$

onde:  $\Delta V$  - tensão de saída na ponte

$V$  - tensão de alimentação da ponte

$F$  - gauge factor

$\epsilon$  - deformação relativa do strain-gauge

Gauge factor é uma característica do extensometro usado, e neste caso o fabricante especifica como

$$F = 3,2 \frac{\Omega/\Omega}{mm/mm}$$

então  $\Delta V = 10 \times 3,2 \times 1640 \times 10^{-6}$

$$\Delta V = 0,052V$$

$$V = 52mV$$

$$(K)_{\text{teórico}} = \frac{\text{tensão de saída da ponte}}{\text{tensão aplicada na ponte} \times \text{torque aplicado}}$$

(AI.7)

$$K = \frac{52}{10 \times 50}$$

$$K = 104 \times 10^{-3} \frac{mV}{\text{Volt.Kgfm}}$$

As outras dimensões do torquímetro estão adequadas para ser adptado em tomada de potência de tratores e podendo-se acoplar anéis coletores de sinais de acordo com a norma padrão da ASAE 5203-9 para TDP com 540 rpm para que este equipamento possa ter várias aplicações.



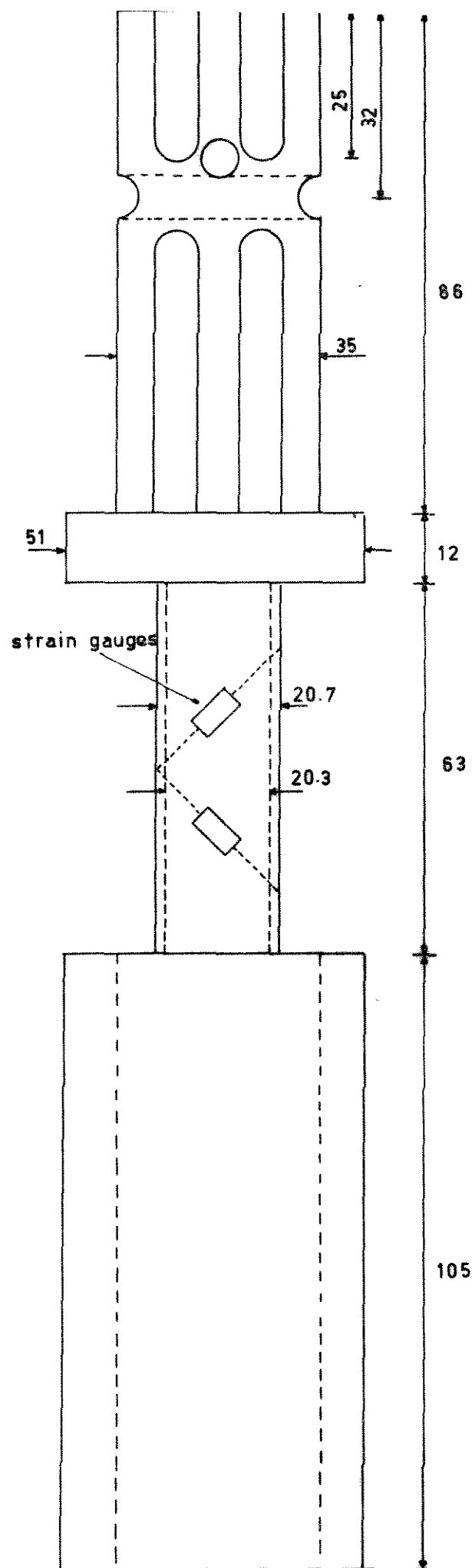


Fig. A1.2  
TORQUÍMETRO

unidade: mm

## APÊNDICE 2

### CALIBRAÇÃO DO TORQUIMETRO

A calibração do torquimetro foi realizada com a colocação de uma carga conhecida  $P$  com um braço conhecido  $L$ , e então se calculou o momento sendo a voltagem gravada para posterior leitura através do sistema automático de aquisição de dados.

Tabela A2.1 - Dados de calibração para um braço de 40,5 cm

P[Kgf]	Momento [Kgfxcm]	Voltagem [mV]	Desvio Padrão [mV]
0	0	-1	4
4	179	183	4
6	260	263	5
8	341	340	6
10	422	424	6
12	503	499	9
14	584	575	11
16	665	662	11
18	746	747	12
20	827	827	12

Através destes valores, foi feito uma regressão linear

$$y = ax + b$$

onde:  $x(\text{mV})$  - voltagem lida

$y(\text{Kgfxcm})$  - momento

$$y = 1,0028x - 1,230 \quad \text{com} \quad r^2 = 0,9998 \quad (\text{A2.1})$$

Este valor é bem próximo do valor teórico, pois a ponte estava alimentada com 10V e K para este torquímetro é:

$$K = 104 \times 10^{-3} \frac{\text{mV}}{\text{Volt.kgf.cm}} \quad (\text{ver Apêndice 1})$$

então a conversão teórica (G) seria:

$$C_T = 104 \times 10^{-3} \frac{\text{mV}}{\text{Volt.Kgf.cm}} \times 10\text{Volt}$$

$$C_T = 1040 \times 10^{-3} \frac{\text{mV}}{\text{Kgf.cm}}$$

e como o valor da calibração está encontrando-se aproximadamente 1mV/Kgf.cm a aproximação teórica é semelhante.

### APÊNDICE 3

#### PROGRAMA UTILIZADO PELO COMPUTADOR HP

9845A

```
10 DIM Voltage(105),D(105)
20 DATA 7,724
30 READ Bus,Sum
40 Number=100
50 RESET Sum
60 OUTPUT Sum;"F2T2R2N0100SE2SD.060S"
70 REDIM Voltage(1:Number)
80 ENTER Sum BFHS 2*Number USING "#,Y";Voltage(*)
90 STATUS Sum;Sta
100 WRITE IO Bus,6;95
110 Hand: IF NOT IOFLAG(Bus) THEN Hand1
120 OUTPUT Sum USING "2A";"T3"
130 CALL Unpack(Voltage(*))
140 ! GRAFICOS
150 PLOTTER IS 13,"GRAPHICS"
160 GRAPHICS
170 FRAME
180 LOCATE 12,112,12,87
190 SCALE 0,100,-1.25,1.25
200 AXES 10,.25,0,0,2,2
210 K=100
220 FOR I=1 TO K STEP 2
230 MOVE I,Voltage(I)
240 LABEL USING "K";"."
250 NEXT I
260 PAUSE
261 FOR I=1 TO Number
262 D(I)=Voltage(I)
263 NEXT I
264 PRINTER IS 16
265 FOR L=1 TO Number/5-1
266 W=L*5
267 PRINT USING "DDD,5X,5(D.DDDD,3X)";W,D(W),D(W+1),D(W+2),D(W+3),D(W+4)
268 NEXT L
269 PAUSE
270 PRINTER IS 0
271 INPUT H,B
272 ! H=
273 ! B=80
274 PRINT H,B
275 FOR J=H TO B STEP 12
276 PRINT USING "12(D.DDD,X)";D(J),D(J+1),D(J+2),D(J+3),D(J+4),D(J+5),D(J+6),D(
+7),D(J+8),D(J+9),D(J+10),D(J+11)
280 MOVE J,Voltage(J)
290 LABEL USING "K";"."
291 NEXT J
300 PAUSE
```

.../.

# Apêndice 3 - (Cont.)

```

301 CALL Grafaq
302 PEN 2
303 FOR R=1 TO Number STEP 2
304 MOVE R,D(R)
305 LABEL USING "K";"."
306 NEXT R
310 END
320 SUB Unpack(Pack(*))
330 INTEGER Ind,Pak
340 FOR Ind=1 TO ROW(Pack)
350     Pak=Pack(Ind)
360     Pack(Ind)=(2*BIT(Pak,13)-1)*(10*BIT(Pak,12)+BINAND(SHIFT(Pak,8),15)+.1*
BINAND(SHIFT(Pak,4),15)+.01*BINAND(Pak,15))*10^(BIT(Pak,14)*(BIT(Pak,15)-2))
370 NEXT Ind
380 SUBEND
390 SUB Grafaq
400 PLOTTER IS 7,5,"9872A"
410 PLOTTER 7,5 IS ON
420 LIMIT 10,10+210,10,10+150
430 PEN 3
440 LINE TYPE 1
450 FRAME
460 LOCATE 12,112,12,87
470 SCALE 0,100,-1.25,1.25
480 AXES 10,.25,0,-1.25,2,2
490 CSIZE 3
500 LDIR 0
510 LORG 8
520 Ymin=-1.25
530 Ymax=1.25
540 Ystep=.25
550 Xmin=0
560 Xmax=105
570 Xstep=20
580 FOR Ypos=Ymin TO Ymax STEP Ystep
590 MOVE Xmin,Ypos
600 LABEL USING "DD.DDX";Ypos
610 NEXT Ypos
620 DEG
630 LDIR 270
640 LORG 2
650 FOR Xpos=Xmin TO Xmax STEP Xstep
660 MOVE Xpos,Ymin
670 LABEL USING " DDD.";Xpos
680 NEXT Xpos
690 PENUP
700 PEN 0
710 SUBEND

```

...

APÊNDICE 4

ESQUEMAS DO BANCO DE TESTES

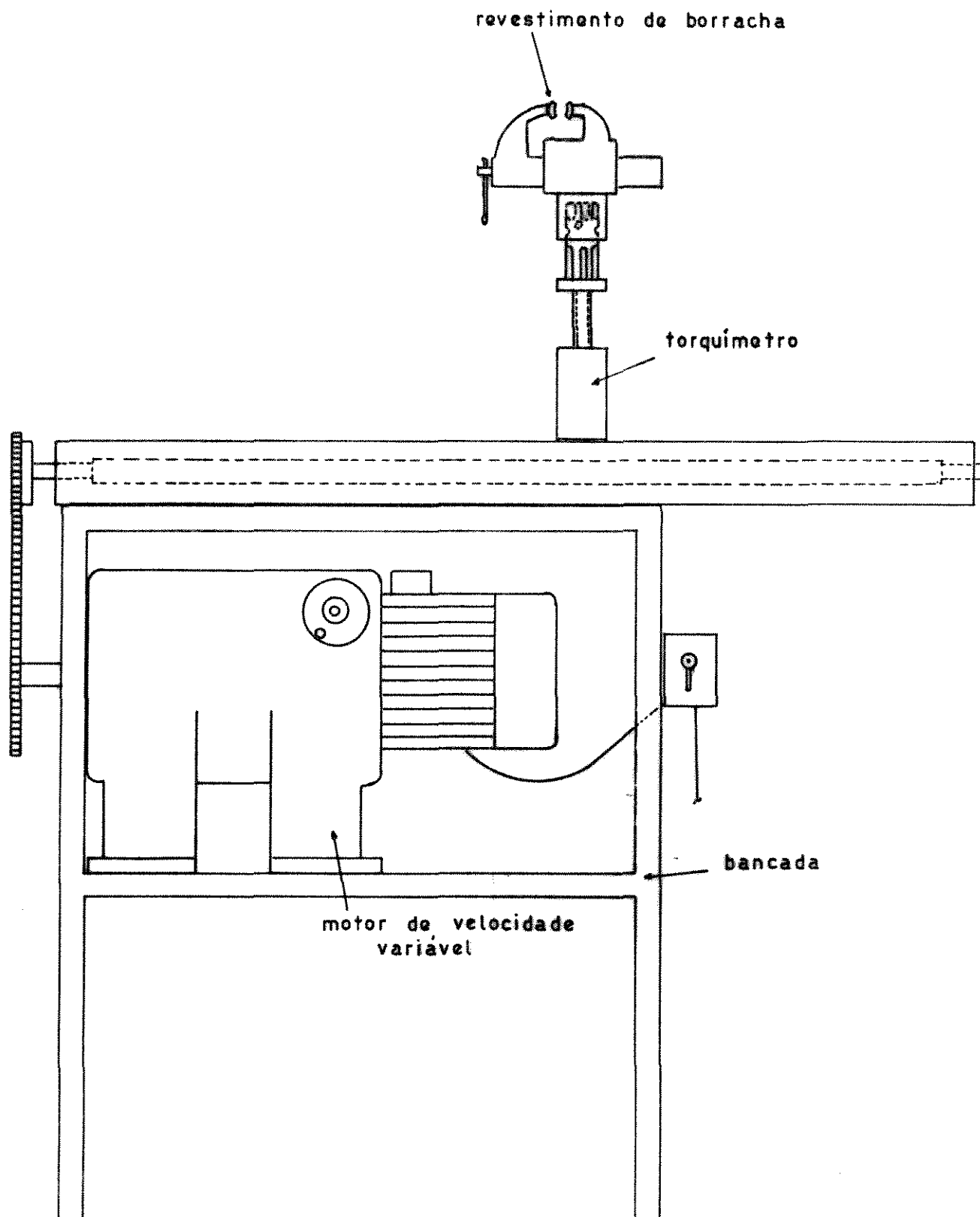
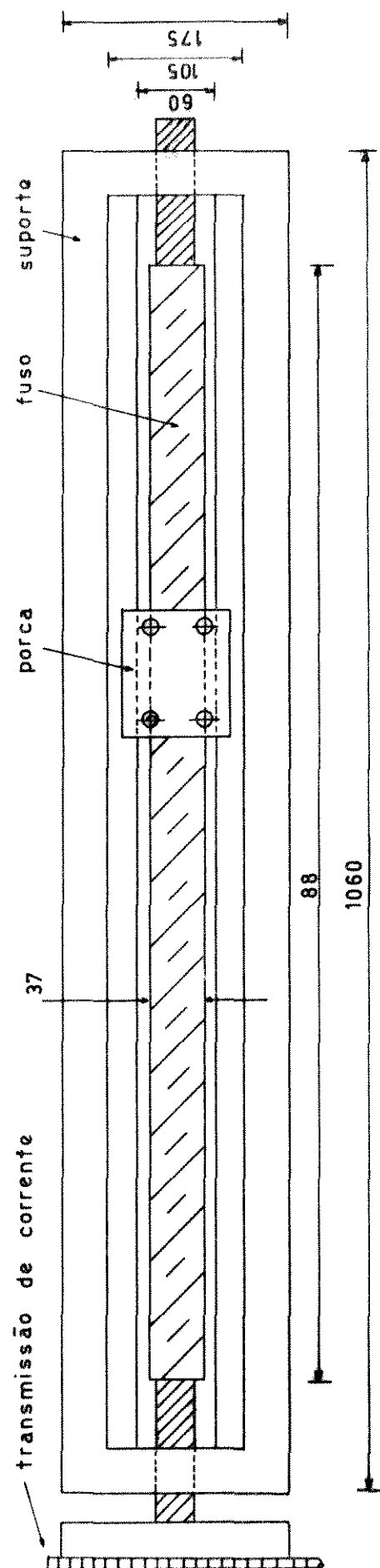


Fig. A4.1 - BANCO DE TESTES



unidade: mm

Fig. A4.2 - DETALHE DO BANCO DE TESTES

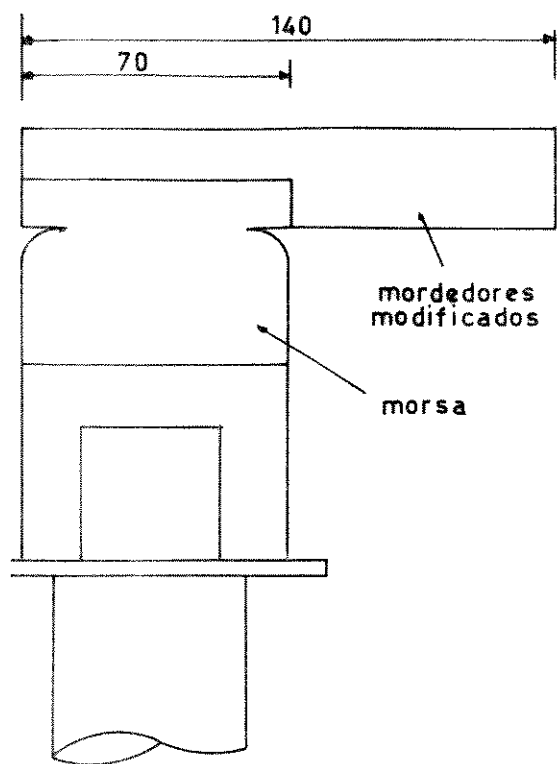
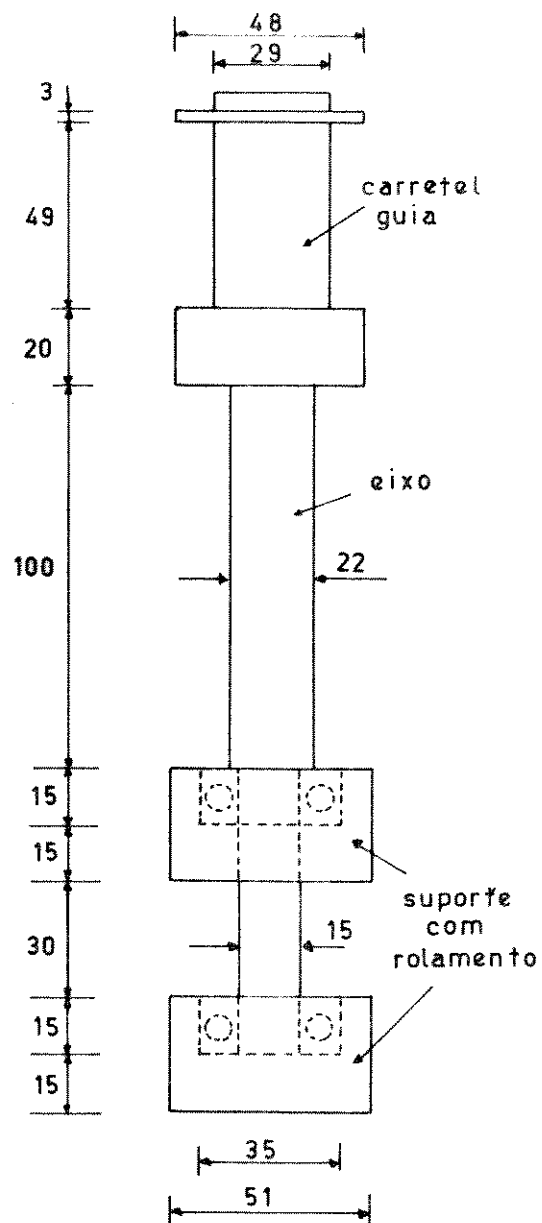


Fig. A4.3  
DETALHE DO BANCO  
DE TESTES

450



anteparo

540

unidade : mm



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] - FINNEY, E.E., 1963. The viscoelastic behavior of potato, *solanum tuberosum*, under quasi-static loading. Unpublished Ph.D. thesis - Agricultural Engineering Department, Michigan State University.
  
- [2] - FINNEY, E.E. and C.W. Hall, 1967. Elastic properties of potatoes. Transactions of the ASAE, 10 (10): 4-8.
  
- [3] - SHERIF, S.M., 1976. The quasi-static contact problem for nearly-incompressible agricultural products. Unpublished Ph.D. Thesis. Agricultural Engineering Department, Michigan State University.
  
- [4] - WHITE, R.K. and N.N. Mohsemin, 1967. Apparatus for determination of bulk modulus of compressibility of materials. Transactions of the ASAE, 10 (5): 670-671.
  
- [5] - MORROW, C.T., 1965. Viscoelasticity in a selected agricultural product. Unpublished M.S. Thesis. Pennsylvania State University.
  
- [6] - HUGHES, H. and L.J. Segerlind, 1972. A rapid mechanical method for determining Poisson's ratio in biological materials. ASAE paper n° 71-310.
  
- [7] - SNOBAR, B.A., 1973. Engineering parameters related to the hardness of carrots. Unpublished Ph.D. Thesis. Agricultural Engineering Department, Michigan State University.

- [8] - FRIDLEY, R.B., et al., 1968. Some aspects of elastic behavior of selected fruits. Transactions of the ASAE, 11 (1):46-49.
  
- [9] - APACLLA, R., 1973. Stress analysis in agricultural products using finite elements method. Unpublished Ph.D. thesis. Agricultural Engineering Department, Michigan State University.
  
- [10] - AKYURT, M., 1969. Constitutive relations for plant materials. Unpublished Ph.D. Thesis. Purdue University.
  
- [11] - GURTAFTON, R.J., 1974. Continuum theory for gas-solid-liquid media. Unpublished Ph.D. Thesis, Michigan State University.
  
- [12] - BRUSERWITS, G.H., 1969. Consideration of plant materials as an interacting continuum. Unpublished Ph.D. Thesis. Agricultural Engineering Department, Michigan State University.
  
- [13] - MURASE, H., 1977. Elastic stress-strain constitutive equations for vegetable materials. Unpublished Ph.D. thesis. Agricultural Engineering Department. Michigan State University.
  
- [14] - ZOERB, G.C., 1958. Mechanical and rheological properties of grain. Unpublished Ph.D. Thesis. Agricultural Engineering Department, Michigan State University.
  
- [15] - CLEVENGER, J.T. and D.D. Hamann, 1968 - The behavior of apple skin under tensile loading. Transactions of the ASAE, 11(1): 34-37.

- [16] - DEBAERDEMACKER, J., L.J. Segerlind, H. Murase and G.E. Merva, 1978. Water potential effect on tensile and compressive failure of apple and potato tissue. ASAE paper nº 78 - 3057.
- [17] - CHAPPELL, T.W. and D.D. Hamann, 1968. Poisson's ratio and Yong's modulus of apple flesh under compressive loading. Transactions of the ASAE, 11 (5): 608-610.
- [18] - CHANG, C.S. 1977. Measuring resistense of sugar cane stalks. Proceedings of the XVI Congress, International Society of Sugar Cane Technologists.
- [19] - CHANG, C.S, J.A.B e J.V.G.M., 1979. Medição da resistência ao corte do colmo da cana-de-açúcar com pendulo duplo. IX Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola.
- [20] - COCHRAN, B.J. & Baker, G., 1970. Engineering properties of sugar cane and their relationship to mechanical harvester. American Society of Agricultural Engineers, Paper nº 70-359.
- [21] - RIBEIRO PINTO, L.A. - 1977. Colheita da cana-de-açúcar. Brasil Açucareiro. Abril-77, pag. 51.
- [22] - BRIEGER, FRANS O. - 1977. A cana-de-açúcar colhida, picada e carregada sob a luz da indústria. Brasil Açucareiro, Junho/77, pag. 41.

- [23] - RIGHI, José Carlos. Colheita mecanizada da cana-de-açúcar e métodos tradicionais de corte. Boletim COPERSUCAR - DTMA.
- [24] - SPARGO, R.F. et al, 1974. The development of the Australian Sugar Cane Harvester. ASAE paper 74-1925.
- [25] - HART, C.W., 1972. C.Brewer. Harvesting and cane handling development. C.Brewer & Company, Ltd.
- [26] - MOHSENIN, N.N, 1970. Physical properties of plant and animal materials. Gordon and Breach Science Publishers, New York.
- [27] - FAIRES, V.M. Elementos orgânicos de Máquinas. 2ª edição. Rio de Janeiro. Ao Livro Técnico. 1976.
- [28] - PERRY, C.C. The Strain Gauge Primer. Editora McGraw-Hill, New York. 1973.
- [29] - Características das Variedades SP da série 70. Anais I Seminário de Tecnologia Agronômica, Março 1982. Copersucar.
- [30] - SPIEGEL, N.R. 1979. Estatística. Coleção Schaum, Ed. McGraw-Hill do Brasil Ltda.