

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

CAMPINAS - SÃO PAULO

BRASIL

Parecer

Este exemplar corresponde a redação final da tese defendida por Antonio Carlos de Oliveira Ferraz e aprovada pela Comissão julgadora em 31 de março de 1987.

Campinas, 31 de março de 1987



Presidente da Banca

PROPRIEDADES MECÂNICAS DO INTERNÓDIO

DA CANA-DE-AÇÚCAR :

UMA CONTRIBUIÇÃO METODOLÓGICA

Antonio Carlos de Oliveira Ferraz .

Orientador : Inácio M. Dal Fabbro .

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Agrícola , para cumprimento parcial dos requisitos para a obtenção do título de MESTRE em Engenharia Agrícola .

UNICAMP

BIBLIOTECA CENTRAL

Aos meus pais ,
José Luiz (in memorian)

e

Adelina ,
pelo exemplo , suporte e incenti-
vo nos primeiros passos de minha
formação .

A minha esposa ,
Maria Inês
e a nossa filha ,
Joana ,
pelo apoio e amor que
me dedicam .

AGRADECIMENTOS :

Ao Prof. Dr. Inácio M. Dal Fabbro , pela liberdade concedida na exploração do tema , permitindo que este trabalho se tornasse um desafio ;

A Gerson da Silva Tabossi , pelo auxílio na confecção dos dispositivos mecânicos e nos ensaios ;

Ao professor Antonio J. da S. Maciel , pela amizade , pelas sugestões e pelo estímulo ;

Ao Departamento de Máquinas Agrícolas pela total disponibilidade de seus equipamentos ;

A Faculdade de Engenharia Agrícola , pela manutenção de um ambiente propício à troca de idéias e ao auxílio mútuo ;

Ao Instituto Agronômico de Campinas , através da Seção de Cana-de-Açúcar , pelo material cedido para os ensaios e pelo auxílio dos técnicos Ari de Camargo , Elcio da Silva Coelho e Salvador Justino Lira .

Ao Instituto de Tecnologia de Alimentos , através da Seção de Embalagens Flexíveis , pela cessão do INSTRON e da téc-

nica Gina Maria Bueno Quirino .

Ao Laboratório de Eletrônica e Dispositivos pela cessão da oficina mecânica e do técnico Reginaldo da Silveira Lima .

Ao Instituto de Física "Gleb Watashin" ,através do Laboratório de Propriedades Mecânicas , do Departamento de Física Aplicada , pela cessão da máquina teste e do técnico Juscelino M. Yamamoto .

Ao Departamento de Engenharia de Alimentos pela cessão do INSTRON ;

Aos colegas e amigos , professores da FEAGRI e a todos que direta ou indiretamente contribuíram nas diversas fases do trabalho , pelo carinho e apoio sempre demonstrados ;

A prof. Roseana Moraes Garcia , pelo trabalho computacional para o armazenamento dos dados ;

Aos técnicos Dagoberto Favoretto e Francisco Ferreira de Oliveira , do Laboratório de Matérias Primas , pelo pronto atendimento nas determinações físicas realizadas ;

A Gracia A. Lopez pelo esmêro nos desenhos ;

A Kellen Maria Junqueira pelos trabalhos iniciais de digitação ;

Ao prof. Carlos Antonio Vélez , da Universidade del Valle , Colômbia , pela pronta colaboração na execução dos últimos ensaios ;

A Maria Aparecida Padovani , Secretária do D.M.A. , pelo paciente trabalho de datilografia das equações e símbolos ;

A Associação Brasileira das Indústrias da Alimentação - ABIA - pelo auxílio na confecção de exemplares deste trabalho.

INDICE

DEDICATÓRIA

AGRADECIMENTOS

RESUMO

ABSTRACT

0. INTRODUÇÃO 01

1. REVISÃO DE LITERATURA 04

1.1 Introdução

1.2 Interpretação da curva tensão-deformação

1.3 Ensaio de tração

1.4 Ensaio de compressão diametral

2. TEORIA BÁSICA 12

2.1 Introdução

2.2 Análise de tensões

2.3 Deformação e Deformação Específica

2.4 Teoria das pequenas deformações

2.5	Interpretação dos tensores lineares de deformação	
2.6	Deformação Principal .Invariantes da deformação	
2.7	Elasticidade linear	
2.8	Teoria das tensões de contato de Hertz	
3.	MATERIAL E MÉTODOS	34
3.1	Introdução	
3.2	O material	
3.3	Preparação dos corpos de prova	
3.4	Descrição dos Ensaios	
3.5	Metodologia de análise das curvas	
4.	RESULTADOS	60
4.1	Introdução	
4.2	Resultado do teste uniaxial com corpos de prova TIPO 1	
4.3	Resultado do teste uniaxial com corpos de prova TIPO 2	
4.4	Resultado do teste de tração na casca	
4.5	Resultado do teste diametral com corpos de prova TIPO 1	
4.6	Resultado do teste diametral com corpos de prova TIPO 2	
4.7	Resultado do teste comparativo com corpos de prova TIPO 2 e TIPO 4 .	

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS E COMENTÁRIOS	67
---	----

- 5.1 Sobre o teste uniaxial com corpos de prova TIPO1
- 5.2 Sobre o teste uniaxial com corpos de prova TIPO2
- 5.3 Sobre a tração na casca
- 5.4 Sobre os testes diametrais
- 5.5 Sobre o teste comparativo

6. CONCLUSÕES	77
-------------------------	----

- 6.1 Conclusões
- 6.2 Sugestões para trabalhos futuros

ANEXO 1	79
ANEXO 2	83
ANEXO 3	85

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95
--------------------------------------	----

RESUMO

A cultura de cana-de-açúcar participa marcadamente da economia brasileira . No entanto , para o desenvolvimento de máquinas adequadas ao seu cultivo , ainda se tem muito a percorrer . O conhecimento das propriedades mecânicas dos produtos agrícolas consiste numa das ferramentas fundamentais para o desenvolvimento de novas máquinas .

O presente trabalho enfoca uma metodologia preliminar para a obtenção do módulo elástico da parte mediana do internódio da cana-de-açúcar . Por ser um material composto , considerado simplificado, de casca e parênquima , investigou-se a participação de cada um desses componentes na sua estrutura atentando-se somente para o seu comportamento elástico. A casca , em forma de lâminas delgadas foi submetida a ensaios de tração . Corpos de prova cilíndricos, extraídos da parte mediana do internódio e da parte mediana central do parênquima , foram submetidos a ensaios de compressão uniaxial e diametral . Um teste adicional , comparativo , foi realizado entre amostras cilíndricas e amostras prismáticas, da porção mediana central do parênquima . A ação de compressão dessas amostras ocorreu paralelamente às fibras .

Os resultados evidenciam o anisotropismo do material , a grande contribuição que a casca fornece à resistência total do internódio e a adequabilidade da metodologia sugerida na confecção dos corpos de prova .

ABSTRACT

Sugarcane makes a major contribution to the Brazilian economy, however, the development of appropriate machinery has much to go yet. The knowledge of mechanical properties of the agricultural products is an important tool for a better design of agricultural machinery.

This work emphasises a preliminary methodology to obtain the elastic modulus of the medial portion of the internode of the sugar cane stem. As a composite material, for the sake of simplicity, it was considered to have just two elements, an external rind of skin and the parenchima (storage cells). The mechanical behavior was considered elastic. Thin layers of the skin were submitted to traction. Cylindrical specimens of the median portion of the internode and cylindrical specimens of the median portion of the parenchima were submitted to uniaxial and diametral compression tests. An additional compression test was run between cylindrical and prismatic specimens of the median section of the parenchima to compare their elastic modulus. The prismatic specimens had the compression action parallel to the grain direction while the cylindrical ones had a diametral compression.

The differences found between the values of the elastic modulus in different directions showed the anisotropy of the material and a main contribution of the skin to the total strength of the internode. The suggested specimen preparation methodology seemed to be appropriated.

0 . INTRODUÇÃO .

0 . INTRODUÇÃO

A prática da engenharia moderna tem exigido materiais bem caracterizados quanto às suas propriedades mecânicas, por constituírem elementos básicos para qualquer projeto mais arrojado. Por isso, os materiais de uso comum, por exemplo, são manipulados com muita destreza pelo projetista mecânico, uma vez que já dispõe dos parâmetros necessários ao dimensionamento e para o planejamento de seu manejo.

Nos últimos quinze anos, desenvolveu-se através da Mecânica dos Meios Contínuos investigações para conhecer e caracterizar um material atípico, bastante variado e, por este prisma, desconhecido até então, o material biológico. A determinação e utilização deste tipo de conhecimento se reveste de evidente importância diante do processo produtivo da agricultura, pois manuseia intensamente esse material. Também o projetista de máquinas e equipamentos pode se utilizar desses conhecimentos, como subsídios para um projeto mais adequado funcionalmente e de maior rendimento energético. O material biológico apesar de sua dinâmica de crescimento e das funções biológicas inerentes ao tecido vegetal, pode, mesmo assim, ser bem caracterizado e se enquadrar perfeitamente dentro dos parâmetros da engenharia.

Este estudo visa contribuir para com a metodologia de investigação sobre as propriedades mecânicas do colmo da cana-

de-açúcar .

O que representa o colmo da cana-de-açúcar como uma entidade mecânica e qual seu comportamento diante das múltiplas solicitações mecânicas, são perguntas que suscitam naturalmente.

Para tais questões as respostas não são imediatas. O elemento em foco apresenta heterogeneidades, anisotropismos e variações estruturais marcantes ao longo de sua extensão , que somadas a sucessiva composição de nós e internódios, geram, aparentemente, unidades estruturais estanques e bem definidas. O conjunto estrutural resultante é bastante complexo e as dificuldades de abordá-lo são inúmeras.

Por onde começar, então? Esta investigação inicial pausou-se, primeiramente, pela simplificação do objeto de estudo dedicando-se apenas a um componente estrutural do colmo da cana-de-açúcar: a parcela mediana do internódio. Mas, apesar da visível simplificação imposta depara-se com um material composto e ainda complexo pois a casca e o parênquima interagem imprimindo características peculiares ao material. Apesar da presença abundante das células parenquimáticas este primeiro estudo considera apenas o aspecto elástico do material deixando para uma próxima etapa as considerações quanto ao comportamento viscoelástico.

Assim, diante dessas considerações, os objetivos principais deste trabalho, são:

a) Desenvolver técnicas para a obtenção de corpos de prova cilíndricos, com e sem casca, extraídos da porção mediana do internódio da cana-de-açúcar;

b) Desenvolver técnicas de obtenção de lâminas delgadas da casca para ensaios de tração;

c) Realizar os ensaios uniaxiais, diametrais e de tra-

ção, com os corpos de prova obtidos;

d) Analisar as curvas tensão-deformação obtidas nos ensaios;

e) Evidenciar a metodologia de obtenção do módulo de elasticidade, para cada tipo de solicitação imposta aos corpos de prova .

Buscou-se, portanto, conhecer algumas propriedades mecânicas do internódio da cana-de-açúcar, não com o intuito de tornar essa investigação extensa, definitiva ou mesmo hermética, mas para evidenciar uma abordagem prospectiva de uma metodologia de ensaio para que, no futuro, aliado a outras contribuições, se possa chegar, para as mais diversas variedades e condições, à caracterização e modelagem de todo o colmo, facilitando a simulação e a tomada de decisões. Nessa etapa final, então, estariam presentes as informações e parâmetros que pragmaticamente contribuiriam para um melhor projeto de máquinas processadoras de cana-de-açúcar, desde o campo, na colheita, até a usina , em seus múltiplos processos.

1 . REVISÃO DE LITERATURA .

1 . REVISÃO DE LITERATURA

1.1 Introdução .

A aplicação dos conhecimentos da Mecânica dos Meios Contínuos aos materiais biológicos tem se intensificado nas últimas décadas. Seus postulados básicos têm sido alvo da atenção dos pesquisadores envolvidos com o comportamento mecânico do tecido animal e do tecido vegetal . Os testes de compressão e de tração aparecem frequentemente como metodologia de investigação.

Apresenta-se neste capítulo uma breve revisão de trabalhos publicados ,principalmente de autores norte-americanos , onde salienta os aspectos particulares do comportamento mecânico do material biológico e a avaliação das curvas tensão-deformação . De todo o conjunto de propriedades mecânicas , o módulo de elasticidade ou módulo elástico (E) ,recebeu atenção especial .

1.2 Interpretação da curva tensão-deformação .

Zoerb(1960) enfatiza a necessidade de uma instrumentação apropriada para os ensaios de determinação das propriedades elásticas e reológicas dos tecidos vegetais . Trabalhou com grãos inteiros de milho e de ervilha para conhecer , principal-

mente , a relação tensão- deformação. Obtem o módulo elástico sem , no entanto , exhibir seu procedimento ou considerações.

O mesmo Zoerb(1967) realiza uma revisão dos trabalhos referentes a materiais biológicos numa tentativa de traduzir o seu estado de arte , externando sua preocupação em se organizar uma comissão para estudos de padronização dos ensaios .Das propriedades de maior interesse cita as seguintes : empuxo aerodinâmico , compressibilidade , fricção e abrasão , impacto admissível , energia de recuperação , resistência ao rolamento , resistência a tração , cisalhamento , volume , peso , densidade global , porosidade ,etc.

Apresenta curvas típicas , força-deformação , de forma sigmoidal ,sem , no entanto , discutí-las . Apresenta o trabalho de Mohsenin(1963) , ilustrado pela figura 1.1 , evidenciando as curvas força-deformação ,correspondentes ao teste uniaxial para as várias velocidades de aplicação da deformação .

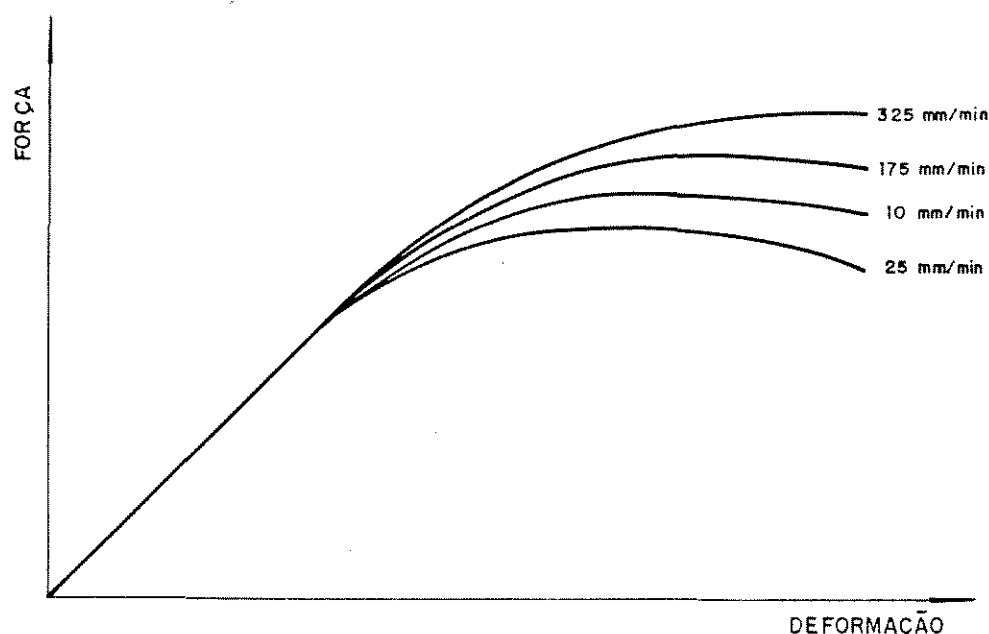


Figura 1.1 Efeito da velocidade de deformação .

Mohsenin(1963) comenta que os métodos de compressão , de uma maneira geral ,raramente conseguem mensurar uma única propriedade . Considera que os testes de compressão , quase sem excessão ,consistem na medida de uma combinação de esforços de tração , compressão e cisalhamento . Em consequencia as curvas força-deformação são bastante complexas e difíceis de se analisar matematicamente utilizando-se as conhecidas relações entre tensão e deformação . A essa complexidade atribui ,parcialmente , à grande variabilidade das medições resultantes de um mesmo método ou mesmo entre métodos distintos para uma mesma propriedade .

Nesse mesmo trabalho se evidencia a importância do módulo elástico associando-o aos vários estágios de maturação de maçãs.O módulo foi obtido através de ensaios uniaxiais e, por envolver dois parâmetros distintos , força e deformação ,foi o indicador mais consistente dos distintos estágios de maturação que outros indicadores tradicionais .

Leora Shelef(1967) apresenta quatro métodos distintos de compressão uniaxial para grãos de trigo : a)compressão através de pratos paralelos e planos(grãos inteiros) ; b)"indenter" cilíndrico ; c) "indenter" esférico ; d) compressão através de pratos paralelos e planos(parcela dos grãos) .

Discute ,amplamente , a curva força-deformação e a obtenção do módulo de elasticidade para os espécimes de faces planas e paralelas . Utiliza-se da equação :

$$E = \frac{F \ell}{AD_e} = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (1.1)$$

onde :

E = módulo elástico ;

F = força ;

σ = tensão normal ;

A = área da secção transversal ;

ϵ = deformação específica ;

D_e = deformação elástica ;

l_0 = altura inicial do espécime ;

Para a determinação da curva força-deformação , submeteu os grãos a ciclos de carregamento-descarregamento dentro da faixa linear de resposta . Cada ciclo foi repetido quatro ou cinco vezes . Observou que a deformação residual , D_r , figura 1.2. , tende a um valor constante após poucos ciclos . Seguida a esta estabilização o valor da deformação elástica , D_e , era lido da curva e aplicada a equação (1.1) .

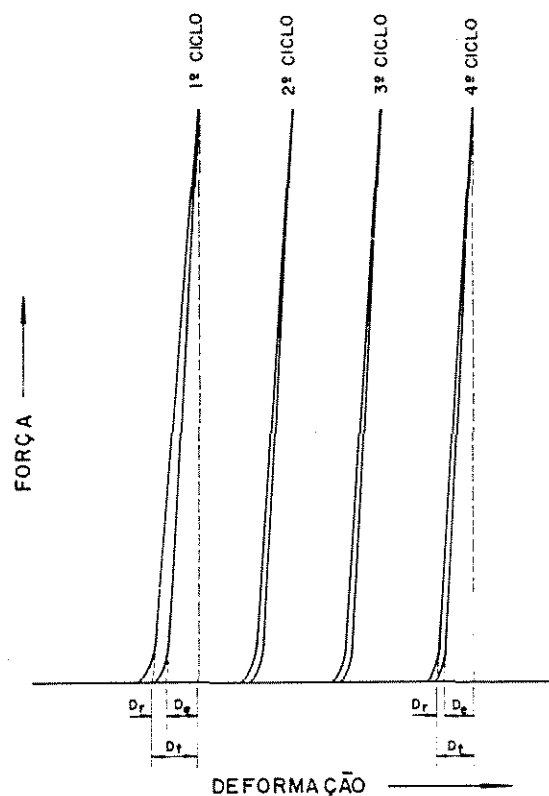


Figura 1.2. Material biológico sendo submetido a ciclos de carga-descarga.

Shelef(1968) , semelhantemente , conduz os mesmos tipos de ensaios para grãos de milho , considerando o fator umidade. As curvas obtidas são qualitativamente semelhantes e o procedimento analítico idêntico . Calcula também o "módulo de deformabilidade" , proposto por Shpolyanskaya(1952) . Esse módulo considera a deformação total do material no primeiro ciclo de carregamento .

De acordo com Mohsenin(1970) , mostrado na figura 1.2 , a parte inicial da curva tensão- deformação é côncava com relação ao eixo das ordenadas . Apesar de não ser explicado o fato, é possível que a presença de umidade no material biológico ofereça pequena resistência ao cisalhamento causando grandes deformações iniciais associadas à baixas tensões . Por isso , nessa região , o módulo elástico cresce exponencialmente e deve estar sempre acompanhado da força e deformação correspondentes. Essas afirmações de Mohsenin estão de acordo com o trabalho de Shelef(1968) , sobre a variação do módulo elástico com a umidade do produto, mostrado na figura 1.3.

Fung(1967) trabalhou com tecido animal , uma porção do mesentério de coelho , submetendo-o a tração .As curvas tensão- deformação resultantes , revelaram uma relação exponencial e uma grande capacidade de extensão associadas a tensões quase nulas , como mostra a figura 1.4.

1.3 Ensaios de tração com tecido vegetal .

Cochran(1970) relata uma tentativa de se obter a resistência à tração do internódio da cana-de-açúcar . Porém , devido a não homogeneidade do colmo , a ruptura ocorreu na altura do nó

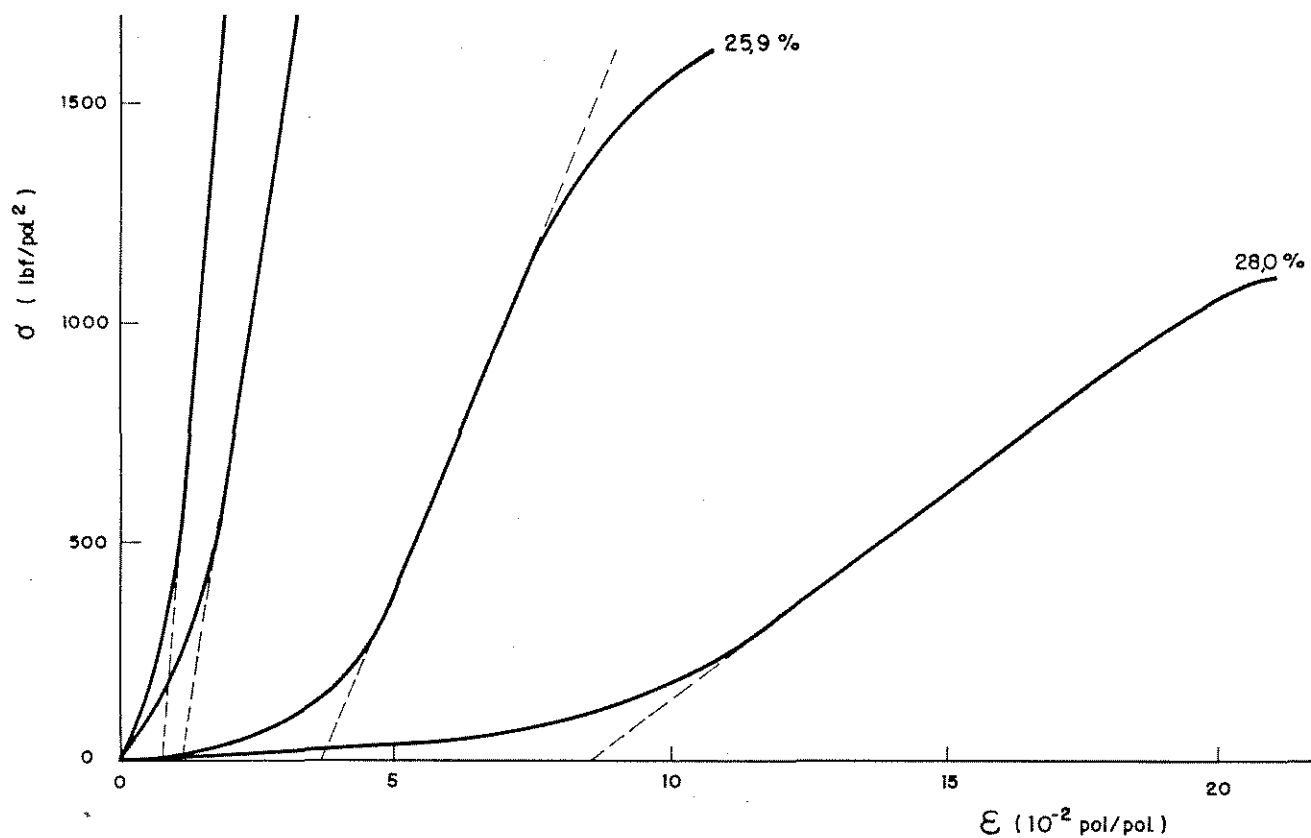


Figura 1.3 Variação do módulo elástico de grãos de milho de acordo com a umidade dos grãos, de acordo com Shelef (1968).

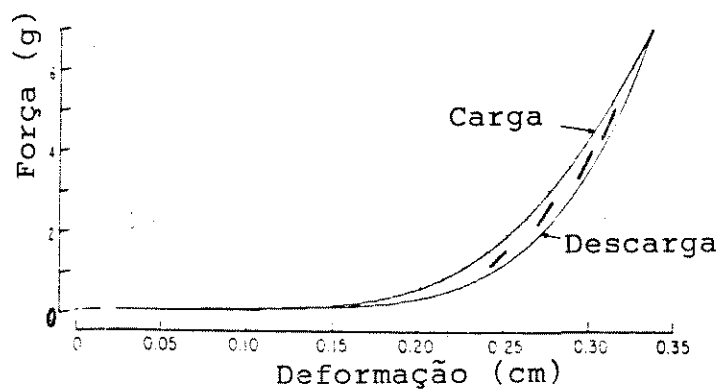


Figura 1.4 Curva tensão-deformação de tecido animal submetido à tração, segundo Fung (1967).

para todos os espécimes ensaiados , não rompendo um internódio sequer . As falhas , concluiu , ocorreram sempre no anel de crescimento , na união entre o nó e o internódio .

1.4 Ensaios de compressão diametral .

Sherif(1976a) refere-se ao teste diametral com espécimes cilíndricos como Teste Brasileiro . Consiste na compressão de um espécime cilíndrico entre dois pratos planos e paralelos.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas através da MB-212 , de 1958 , padroniza o teste diametral para a determinação do limite de resistência à tração simples para o concreto . A expressão ,

$$\sigma = \frac{2F}{\pi DL} \quad (1.2)$$

onde :

σ = limite de resistência à tração simples ;

F = carga máxima no momento da ruptura;

D = diâmetro do corpo de prova;

L = comprimento do corpo de prova ;

sugerida pelo método é consequência da contribuição do brasileiro , Fernando Luiz Lobo Carneiro , mencionada por Petrucci(1982) , originada no Instituto Nacional de Tecnologia , Rio de Janeiro , em 1937 .

Sherif(1976b) desenvolveu uma expressão para o estudo das tensões em um cilindro comprimido entre dois pratos planos e paralelos . Recorre aos trabalhos de Shtaerman(1949) , Poritsky(1950) , DePater(1960) e Hertz(1896) para obter um equa-

cionamento de mais fácil utilização pelo pesquisador ,do que aquela apresentada por Timoshenko(1970) . Assim , obtem a seguinte equação ,tendo como princípio as tensões superficiais de Hertz :

$$E = \frac{8(1-\mu^2)Z^2F}{\pi D} \quad (1.3)$$

onde :

E = módulo elástico ;

F = força por unidade de comprimento ;

μ = coeficiente de Poisson ;

D = diâmetro inicial do cilindro e

Z , obtido iterativamente através de (1.4)

$$\frac{\Delta}{D} = \frac{1}{2Z^2} \left(\ln 2Z + \frac{1}{2} \right) \quad (1.4)$$

onde :

Δ = deformação total associada à força F ;

Para facilidade ,Sherif(1976a) fez constar em seu trabalho de tese , em forma tabular ,os valores mais comuns de Z e Δ/D , obtidos através da aplicação do método de Newton ,Conte (1960) , em (1.4) .

Anazodo(1980) , aplica o equacionamento de Sherif para espigas de milho . Utiliza a força de ruptura para o cálculo do módulo elástico .

2 . TEORIA BÁSICA .

2. TEORIA BÁSICA

2.1 Introdução .

Apresenta-se neste capítulo alguns conceitos da Mecânica dos Meios Contínuos que formarão o embasamento teórico à obtenção dos parâmetros mecânicos . As considerações teóricas se limitam ao comportamento elástico , não sendo considerados os aspectos viscoelásticos . A referência utilizada foi o trabalho de Mase(1970) , capítulos 2 ,3 e 6 .

2.2 Análise de tensões .

2.2.1. O meio contínuo .

Muito embora a matéria possua uma estrutura molecular ou celular , em muitas investigações sobre o comportamento do material , as células , individualmente , não são consideradas , importando somente o comportamento do material como um todo . Para esses casos o aspecto macroscópico do comportamento é explicado assumindo-se que o material é distribuído continuamente através de seu volume , preenchendo completamente o espaço que ocupa . Este conceito da matéria como meio contínuo consiste num dos postulados básicos da Mecânica dos Meios Contínuos .

Um material é dito homogêneo quando possui propriedades

idênticas em todos os pontos . Algumas propriedades se mantem as mesmas em todas as direções enquanto que outras variam de acordo com a direção . No primeiro caso , o material é dito isotrópico , enquanto que no segundo , anisotrópico .

2.2.2. Forças de superfície e vetor tensão .

A mecânica dos sólidos contínuos e a reologia têm por objeto de estudos o comportamento dos materiais sob a ação de forças . A reologia associa aos parâmetros mecânicos do material , o fator tempo .

As forças que atuam num elemento de superfície de um corpo são chamadas de forças superficiais . As forças de contato entre dois corpos são exemplo desse tipo de força .

Um material contínuo , ocupando uma região R do espaço e sujeito a forças f_i e a forças de campo b_i , é mostrado na figura 2.1 .

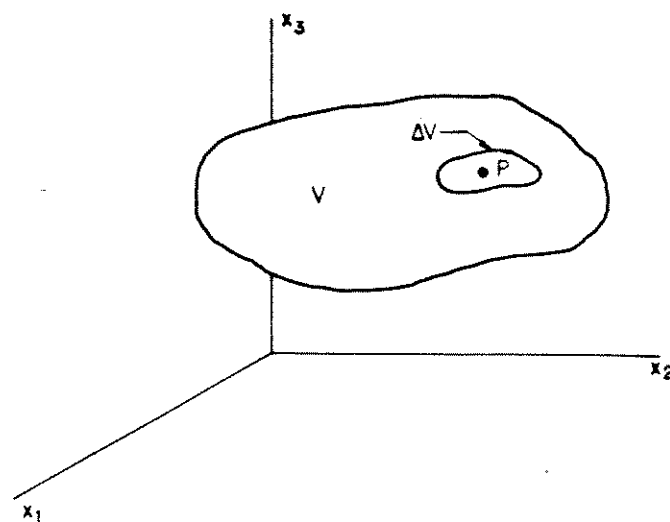


Figura 2.1 Material contínuo representado pelo volume V

Como resultado das forças transmitidas de uma parte do meio contínuo para outra , o material ,restrito num volume arbi-

trário V e delimitado pela superfície S , interage com o material presente exteriormente a este volume. Sendo n_i a normal externa da superfície num ponto P de um pequeno elemento de superfície ΔS , pertencente a S , seja Δf_i a força externa resultante sobre ΔS . Pela equipolência de forças e momentos, os seus efeitos podem ser representados por Δf_i e ΔM_i .

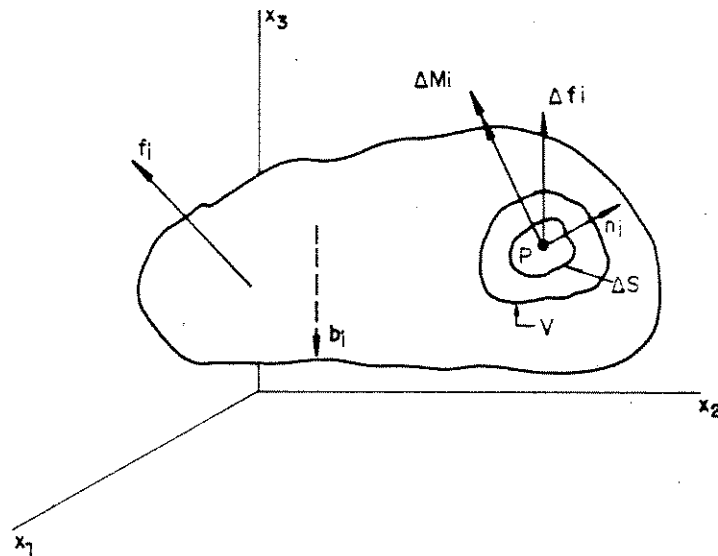


Figura 2.2. Forças atuantes num volume V qualquer.

Assim, a força média por unidade de área em ΔS é dada por $\Delta f_i / \Delta S$. O princípio de tensão de Cauchy afirma que esta razão, $\Delta f_i / \Delta S$, tende a um limite bem definido, df_i / dS , quando ΔS tender a zero, no ponto P , enquanto que o momento de Δf_i , nas proximidades de P , se anula no processo de limite. O vetor resultante df_i / dS (força/área) é chamado de vetor tensão $t_i^{(\hat{n})}$, mostrado na figura 2.3.

Matematicamente define-se o vetor tensão

$$t_i^{(\hat{n})} = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta f_i}{\Delta S} = \frac{df_i}{dS} \quad (2.1)$$

A notação $t_i^{(\hat{n})}$ enfatiza que o vetor tensão num dado ponto P do meio contínuo depende explicitamente de um elemento particular de superfície ΔS , representado pela sua normal n_i ($\hat{n}$).

2.2.3. Estado de tensão num ponto .

Todos os pares possíveis dos vetores $t_i^{(\hat{n})}$ associados às normais n_i , em P , figura 2.3, definem o estado de tensão naquele ponto. No entanto, em vez de descrever todos estes pares, basta fornecer o vetor tensão para cada um dos tres planos mutuamente perpendiculares em P . Uma representação esquemática é mostrada na figura 2.4.

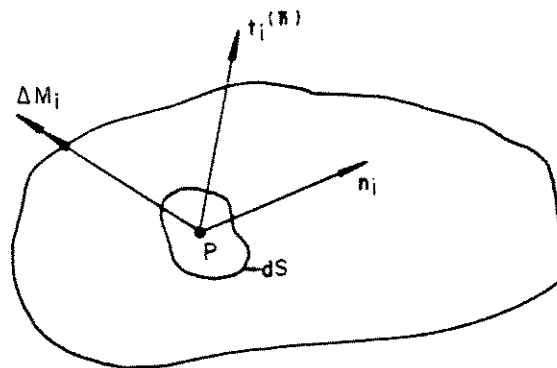


Figura 2.3. Representação do vetor tensão .

Em termos das componentes Cartesianas, os vetores tensão podem ser escrito :

$$t^{(\hat{e}_1)} = t_1^{(\hat{e}_1)} e_1 + t_2^{(\hat{e}_1)} \hat{e}_2 + t_3^{(\hat{e}_1)} \hat{e}_3 = t_j^{(\hat{e}_1)} \hat{e}_j$$

$$t^{(\hat{e}_2)} = t_1^{(\hat{e}_2)} \hat{e}_1 + t_2^{(\hat{e}_2)} \hat{e}_2 + t_3^{(\hat{e}_2)} \hat{e}_3 = t_j^{(\hat{e}_2)} \hat{e}_j \quad (2.3)$$

$$t^{(\hat{e}_3)} = t_1^{(\hat{e}_3)} \hat{e}_1 + t_2^{(\hat{e}_3)} \hat{e}_2 + t_3^{(\hat{e}_3)} \hat{e}_3 = t_j^{(\hat{e}_3)} \hat{e}_j$$

As nove componentes do vetor tensão ,

$$t_j^{(\hat{e}_i)} \equiv \sigma_{ij} \quad (2.3)$$

são as componentes do tensor cartesiano de 2ª ordem , conhecido como tensor tensão , que pode ser representado na forma matricial

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Essas coordenadas podem ser visualizadas através da representação dos planos coordenados , mostrado na figura 2.4 .

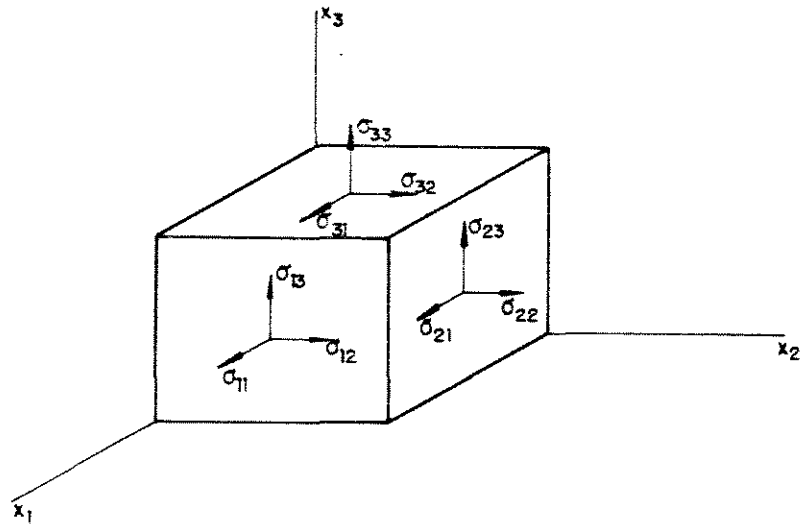


Figura 2.4. Representação do tensor através dos planos coordenados.

As componentes $(\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33})$, perpendiculares aos planos, são chamadas de tensões normais. Aquelas atuando tangencialmente aos planos $(\sigma_{12}, \sigma_{13}, \sigma_{21}, \sigma_{23}, \sigma_{31}, \sigma_{32})$, são ditas tensões cisalhantes.

2.2.4 Relação entre o tensor e o vetor tensão.

A relação entre o tensor tensão σ_{ij} e o vetor tensão num ponto P contido num plano qualquer pode ser estabelecido através de um equilíbrio de forças e de momentos e expresso através de

$$t_i^{(\hat{n})} = \sigma_{ji} n_j \quad (2.5)$$

que na forma matricial resulta em

$$\begin{bmatrix} t_{ij}^{(\hat{n})} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_{ik} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{kj} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

ou

$$\begin{bmatrix} t_1^{(\hat{n})}, t_2^{(\hat{n})}, t_3^{(\hat{n})} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_1, n_2, n_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

2.2.5 Tensões principais

No ponto P , para o qual as componentes do tensor tensão são σ_{ij} , a equação (2.5) associa à cada direção n_i o vetor tensão $t_i^{(\hat{n})}$. Estas direções, para as quais $t_i^{(\hat{n})}$ e n_i são colineares, são chamadas de direções principais de tensão.

Para uma direção principal de tensão, tem-se:

$$t_i^{(\hat{n})} = \sigma n_i \quad (2.8)$$

onde, a magnitude do vetor tensão, é chamado de valor da tensão principal. Substituindo (2.8) em (2.5) e utilizando a identidade, $n_i = \delta_{ij} n_j$, onde $\delta_{ij} = 1$, se $i=j$, $\delta_{ij} = 0$, se $i \neq j$ e $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$, resulta na equação:

$$(\sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma) n_j = 0 \quad (2.9)$$

Para resolver o sistema (2.9), além da solução tri-

vial($n_j = 0$) , o determinante dos coeficientes deve ser nulo . Assim,

$$|\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma| = 0 \quad \text{ou} \quad \begin{vmatrix} \sigma_{11}-\sigma & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22}-\sigma & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33}-\sigma \end{vmatrix} = 0 \quad (2.10)$$

cuja expansão conduz ao polinômio de grau três em σ ,

$$\sigma^3 - A\sigma^2 + B\sigma - C = 0 \quad (2.11)$$

onde ,

$$A = \Sigma \sigma_{ii} \quad (2.12)$$

$$B = \frac{1}{2} (\sigma_{ii}\sigma_{jj} - \sigma_{ij}\sigma_{ij}) \quad (2.13)$$

$$C = |\sigma_{ij}| \quad (2.14)$$

As raízes de (2.11) constituem os valores das tensões principais .

2.3 Deformação e Deformação Específica .

2.3.1 Generalidades

Entende-se por deformação à mudança de forma de um meio contínuo, entre uma configuração inicial, indeformada, para uma subsequente configuração, deformada.

Quando um meio contínuo sofre deformação, as partículas do meio se movem por várias trajetórias no espaço. Esse movimento pode ser expresso por

$$x_i = x_i(X_1, X_2, X_3, t) = x_i(X, t) \quad (2.15)$$

que fornece a localização instantânea x_i da partícula que ocupou o ponto (X_1, X_2, X_3) num tempo qualquer $t=0$, mostrada na figura 2.5. Essa descrição da deformação expressa em (2.15) é conhecida como a formulação de Lagrange.

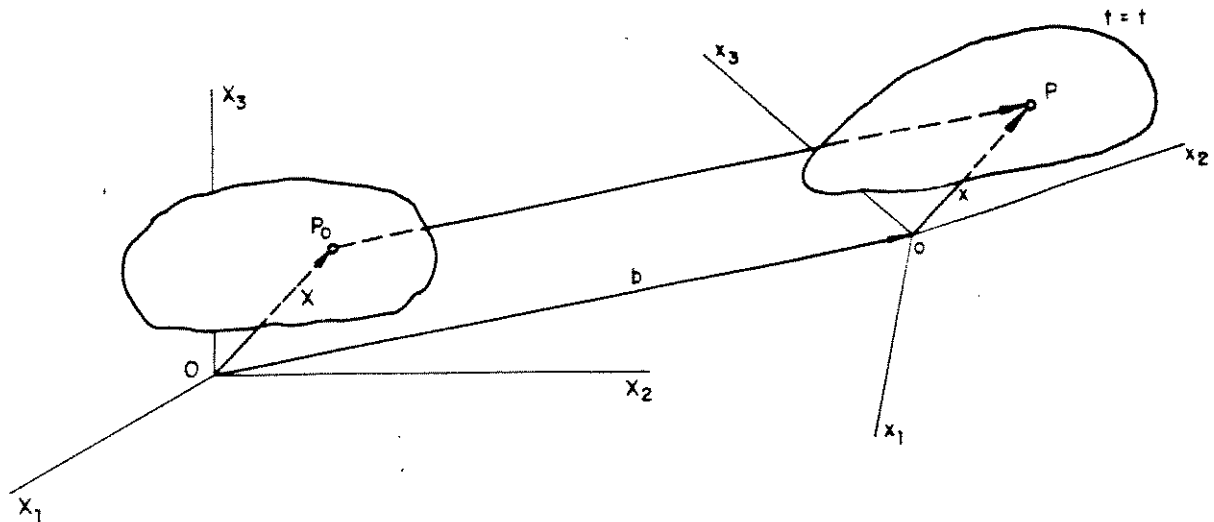


Figura 2.5 Ilustração para os referenciais de Euler e Lagrange.

Por outro lado, quando a deformação é fornecida pelas equações da forma

$$X_i = X_i(x_1, x_2, x_3, t) = X_i(x, t) \quad (2.16)$$

nas quais as variáveis independentes são x_i e t , a descrição é conhecida como formulação de Euler. Essa descrição fornece a trajetória para a localização da posição inicial da partícula que agora ocupa a posição (x_1, x_2, x_3) .

2.3.2 Gradiente de deformação .Gradiente de deslocamento

Diferenciando-se parcialmente (2.15) em relação à x_j obtém-se o tensor $\frac{\partial x_i}{\partial X_j}$, chamado de gradiente de deformação material, simbolizado por

$$F_{ij} = \frac{\partial x_i}{\partial X_j} = \frac{\partial x}{\partial X_1} \hat{e}_1 + \frac{\partial x}{\partial X_2} \hat{e}_2 + \frac{\partial x}{\partial X_3} \hat{e}_3 \quad (2.17)$$

e tendo sua forma matricial

$$F_{ij} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial X_1} & \frac{\partial}{\partial X_2} & \frac{\partial}{\partial X_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_i}{\partial X_j} \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

Analogamente, diferenciando-se parcialmente (2.16) com relação a x_j , obtém-se o tensor $\frac{\partial X_i}{\partial x_j}$, simbolizado por

$$H_{ij} = \frac{\partial X_i}{\partial x_j} = \frac{\partial X}{\partial x_1} \hat{e}_1 + \frac{\partial X}{\partial x_2} \hat{e}_2 + \frac{\partial X}{\partial x_3} \hat{e}_3 \quad (2.19)$$

possuindo a forma matricial :

$$H_{ij} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \left[\frac{\partial}{\partial x_1}, \frac{\partial}{\partial x_2}, \frac{\partial}{\partial x_3} \right] = \left[\frac{\partial X_i}{\partial x_j} \right] \quad (2.20)$$

Diferenciando-se parcialmente o vetor deslocamento , $u_k = x_k - X_k$, com relação as coordenadas , obtem-se o gradiente de deslocamento material $\frac{\partial u_i}{\partial X_j}$, ou o gradiente de deslocamento espacial $\frac{\partial u_i}{\partial x_j}$. Considerando-se , $u_k = x_k - X_k$ que expressa u_i como sendo a diferença das coordenadas , estes tensores são dados em termos dos gradientes de deformação . Como gradiente material ,

$$J_{ij} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} \left[\frac{\partial}{\partial X_1}, \frac{\partial}{\partial X_2}, \frac{\partial}{\partial X_3} \right] = \left[\frac{\partial u_i}{\partial X_j} \right] \quad (2.21)$$

e, como gradiente espacial ,

$$K_{ij} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} \left[\frac{\partial}{\partial x_1}, \frac{\partial}{\partial x_2}, \frac{\partial}{\partial x_3} \right] = \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] \quad (2.22)$$

2.3. Tensor deformação .Tensor finito de deformação .

A figura 2.6 mostra duas configurações de um meio contínuo, a posição inicial e a deformada. Os eixos coordenados estão superpostos, $OX_1X_2X_3$ e $ox_1x_2x_3$. As partículas que ocupam, inicialmente, pontos P_0 e Q_0 , muito próximos, antes da deformação, se movem para os pontos P e Q , respectivamente, na configuração deformada.

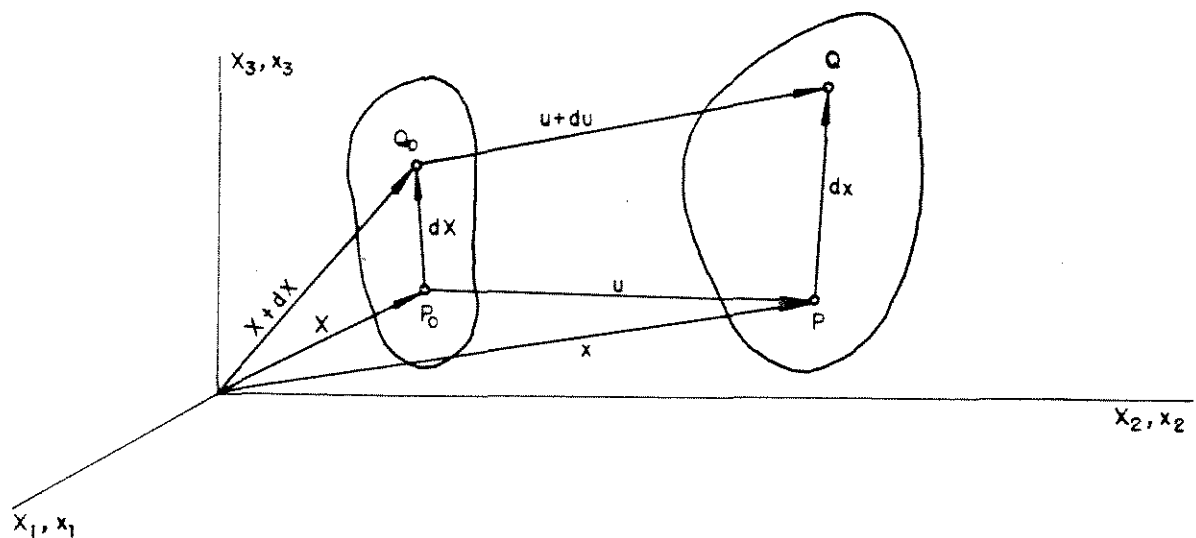


Figura 2.6 Configuração inicial e configuração deformada .

O quadrado do elemento diferencial de comprimento entre P_0 e Q_0 , é

$$(dx)^2 = dx_i dx_i = \delta_{ij} dx_i dx_j \quad (2.23)$$

De (2.16) , a distância diferencial dx_i pode ser vista como

$$dx_i = \frac{\partial x_i}{\partial x_j} dx_j \quad (2.24)$$

e portanto (2.23) pode ser escrita

$$(dx)^2 = \frac{\partial x_k}{\partial x_i} \frac{\partial x_k}{\partial x_j} dx_i dx_j = C_{ij} dx_i dx_j \quad (2.25)$$

no qual o tensor de 2ª ordem ,

$$C_{ij} = \frac{\partial x_k}{\partial x_i} \frac{\partial x_k}{\partial x_j} \quad (2.26)$$

é conhecido como o tensor de deformação de Cauchy .

Na configuração deformada , analogamente ao procedimento anterior , o quadrado do elemento diferencial de comprimento entre P e Q é

$$(dx)^2 = dx_i dx_i = \delta_{ij} dx_i dx_j \quad (2.27)$$

Por (2.15) , tem-se que

$$dx_i = \frac{\partial x_i}{\partial X_j} dX_j \quad (2.28)$$

resultando , em (2.27)

$$(dx)^2 = \frac{\partial x_k}{\partial X_i} \frac{\partial x_k}{\partial X_j} dx_i dx_j = G_{ij} dx_i dx_j \quad (2.29)$$

onde o tensor de 2ª ordem ,

$$G_{ij} = \frac{\partial x_k}{\partial X_i} \frac{\partial x_k}{\partial X_j} \quad (2.30)$$

é conhecido como o tensor de deformação de Green .

A diferença $(dx)^2 - (dX)^2$ para duas partículas próximas de um contínuo é utilizada como a medida de deformação que ocorre entre a conformação inicial e final .

Utilizando -se (2.30) e (2.23) , essa diferença pode ser expressa na forma

$$(dx)^2 - (dX)^2 = \left(\frac{\partial x_k}{\partial X_i} \frac{\partial x_k}{\partial X_j} - \delta_{ij} \right) dx_i dx_j = 2L_{ij} dx_i dx_j \quad (2.31)$$

onde o tensor de 2ª ordem

$$L_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial x_k}{\partial X_i} \frac{\partial x_k}{\partial X_j} - \delta_{ij} \right) \quad (2.32)$$

é chamado de tensor de deformação finita de Lagrange .

Utilizando-se (2.27) e (2.25) , de modo análogo , se obtém

$$(dx)^2 - (dX)^2 = \left(\delta_{ij} - \frac{\partial X_k}{\partial x_i} \frac{\partial X_k}{\partial x_j} \right) dx_i dx_j = 2E_{ij} dx_i dx_j \quad (2.33)$$

onde o tensor de 2ª ordem

$$E = \frac{1}{2} \left(\delta_{ij} - \frac{\partial x_k}{\partial x_i} \frac{\partial x_k}{\partial x_j} \right) \quad (2.34)$$

é dito tensor deformação finita de Euler .

De uma forma mais útil os tensores deformação finita de Lagrange e de Euler são colocados em função dos gradientes de deslocamento . Assim se $\frac{\partial x_i}{\partial X_j}$, de (2.21) , for substituído em (2.32) , obtém-se o tensor de Lagrange na forma

$$L_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial X_j} + \frac{\partial u_j}{\partial X_i} + \frac{\partial u_k}{\partial X_i} \frac{\partial u_k}{\partial X_j} \right) \quad (2.35)$$

Analogamente , se $\frac{\delta u_i}{\delta x_j}$, de (2.22) , for substituído em (2.34) , o resultado é o tensor deformação finita de Euler na forma

$$E_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \frac{\partial u_k}{\partial x_j} \right) \quad (2.36)$$

2.4 Teoria das pequenas deformações . Tensor deformação infinitesimal .

A teoria das pequenas deformações baseia-se na exigência de que os gradientes de deslocamento sejam relativamente pequenos . A medida fundamental da deformação é a diferença $(dx)^2 - (dX)^2$, que pode ser expressa em termos dos gradientes de deslocamento , inserindo (2.35) e (2.36) em (2.31) e (2.33),

respectivamente . Se os gradientes de deslocamento são pequenos , os tensores de deformação finita em (2.31) e (2.33) se reduzem a tensores de deformação infinitesimal e as equações resultantes representam pequenas deformações .

Em (2.35) , se cada componente $\frac{\partial u_i}{\partial X_j}$ do gradiente são pequenas quando comparadas com a unidade , os termos do produto são muito pequenos e podem ser desprezados. O tensor resultante é o tensor infinitesimal de Lagrange , denotado por

$$\hat{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial X_j} + \frac{\partial u_j}{\partial X_i} \right) \quad (2.37)$$

Semelhantemente , para $\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \ll 1$, em (2.36) , o tensor de deformação infinitesimal de Euler é expresso por

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.38)$$

Se ocorrer que tanto os gradientes de deslocamento como os deslocamentos forem pequenos , existirá uma diferença muito pequena nas coordenadas materiais e espaciais de uma partícula do meio contínuo . Assim , as componentes do gradiente material $\frac{\partial u_i}{\partial X_j}$ e as componentes do gradiente espacial , $\frac{\partial u_i}{\partial x_j}$, estarão próximos da igualdade e , portanto , os tensores de deformação infinitesimal de Euler e de Lagrange podem ser considerados iguais,

$$\hat{\epsilon}_{ij} = \epsilon_{ij} \quad (2.39)$$

2.5 Interpretação dos tensores lineares de deformação .

Uma vez que (2.39) ocorre , o tensor L_{ij} , em (2.31), pode ser substituído pelo tensor linear de deformação de Lagrange e a expressão fica sendo

$$(dx)^2 - (dX)^2 = (dx-dX)(dx + dX) = 2l_{ij}dX_i dX_j \quad (2.40)$$

Como $dx \approx dX$ para pequenas deformações , esta equação pode ser colocada na forma

$$\frac{dx - dX}{dX} = l_{ij} \frac{dX_i}{dX} \frac{dX_j}{dX} \quad (2.41)$$

O lado esquerdo de (2.41) representa a razão de variação do comprimento por unidade do comprimento original e é chamado de deformação normal , para o elemento que possua originalmente cossenos diretores $\frac{dX_i}{dX}$.

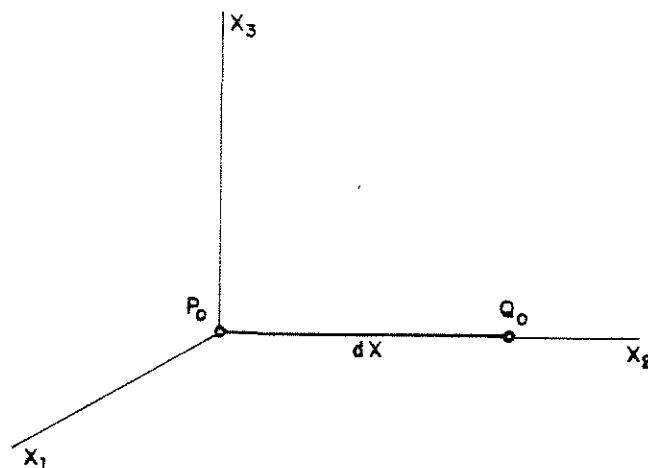


Figura 2.7 Localização de P_0Q_0 no sistema coordenado .

Se (2.41) for aplicado a um elemento diferencial linear, P_0Q_0 , localizado de acordo a figura 2.7, o resultado será uma deformação normal para o elemento. Como P_0Q_0 se localiza ao longo de X_2 , $\frac{dx_1}{dX} = \frac{dx_3}{dX} = 0$ e $\frac{dx_2}{dX} = 1$, portanto, (2.41) se torna

$$\frac{dx - dX}{dX} = l_{22} = \frac{\partial u_2}{\partial X_2} \quad (2.42)$$

Da mesma forma, para elementos ao longo de X_1 e X_3 , obteríamos l_{11} e l_{33} . Assim, os termos da diagonal do tensor linear de deformação representam as deformações normais nas direções coordenadas.

2.6 Deformações Principais . Invariantes da Deformação .

Fisicamente, uma direção principal do tensor deformação é aquela na qual a orientação de um elemento num dado ponto não é alterada por uma deformação pura. O valor da deformação principal é simplesmente o deslocamento relativo unitário que ocorre na direção principal.

Para o tensor deformação de Lagrange, l_{ij} , o vetor unitário de deslocamento relativo é dado por

$$\frac{du_i}{dX} = \frac{\partial u_i}{\partial X_j} \frac{\partial X_j}{\partial X} = \frac{\partial u_i}{\partial X_j} v_j \quad (2.43)$$

e pode ser escrito como

$$\frac{du_j}{dx} = (\ell_{ij} + W_{ij})v_j \quad (2.44)$$

onde, v_j é o vetor unitário e W_{ij} é o wronskiano.

Chamando de $\ell_i^{(\hat{n})}$ a deformação normal na direção do vetor unitário n_i , (2.44) nos conduz, para uma deformação pura ($W_{ij} = 0$), à relação

$$\ell_i^{(\hat{n})} = \ell_{ij}n_j \quad (2.45)$$

Se a direção principal n_i for uma direção principal com um valor de deformação principal ℓ , então,

$$\ell_i^{(\hat{n})} = \ell n_i = \ell \delta_{ij}n_j \quad (2.46)$$

Re-arranjando (2.45) e (2.46), obtém-se

$$(\ell_{ij} - \delta_{ij}\ell)n_j = 0 \quad (2.47)$$

que juntamente com a condição $n_i n_i = 1$ dos vetores unitários completa o número de equações necessárias para se determinar o valor da deformação principal ℓ e os seus cossenos diretores n_i . A solução não trivial de (2.47) existe se e somente se o determinante dos coeficientes for igual a zero. Portanto,

$$|\ell_{ij} - \delta_{ij}\ell| = 0 \quad (2.48)$$

o que nos conduz a equação característica de ℓ_{ij} ,

$$\ell^3 - A\ell^2 + B\ell - C = 0 \quad (2.49)$$

onde ,

$$A = \ell_{ii} \quad (2.50)$$

$$B = \frac{1}{2} (\ell_{ii}\ell_{jj} - \ell_{ij}\ell_{ij}) \quad (2.51)$$

$$C = \ell_{ii} \quad (2.52)$$

correspondem ao 1º, 2º e 3º invariantes da deformação de Lagrange , respectivamente .

As raízes de (2.49) representam os valores das deformações principais .

2.7 Elasticidade Linear

2.7.1 Lei de Hooke generalizada .

A elasticidade linear clássica assume que os deslocamentos e os gradientes de deslocamento são suficientemente pequenos de tal forma a não haver distinção entre a descrição de Lagrange e a de Euler .Portanto , em termos do vetor deslocamento u_i , o tensor linear de deformação pode ser dado pelas expressões equivalentes

$$\epsilon_{ij} = \epsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.53)$$

A equação constitutiva para um sólido elástico linear associando os tensores tensão e deformação ,

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \epsilon_{kl} \quad (2.54)$$

é conhecida como lei de Hooke generalizada .

2.8 Teoria das tensões de contato de Hertz .

Esta teoria é atribuída originalmente a Hertz e tem sido amplamente aplicada no dimensionamento de elementos de máquinas , Shigley (1963) .

Timoshenko(1970) , apresenta no desenvolvimento da teoria clássica da elasticidade as equações para se calcular a tensão de contato entre dois corpos . Quando dois cilindros estão em contato ao longo de suas geratrizes , a deformação , figura 2.8 , é dada por

$$b = \sqrt{\frac{4P'(k_1+k_2)R_1R_2}{R_1 + R_2}} \quad (2.55)$$

onde ,

P' = Força por unidade de comprimento da superfície de contato ,

b = Metade da largura da superfície de contato ,

R_1 e R_2 = Raios dos cilindros ,

μ_1 e μ_2 = Coeficientes de Poisson ,

E_i = Módulos elásticos .

$$k_i = \frac{1-\mu_i^2}{\pi E_i}$$

A distribuição de tensão , ao longo da superfície de contato é semi-elíptica e expressa por

$$q_o = \frac{2P'}{\pi b} \quad (2.56)$$

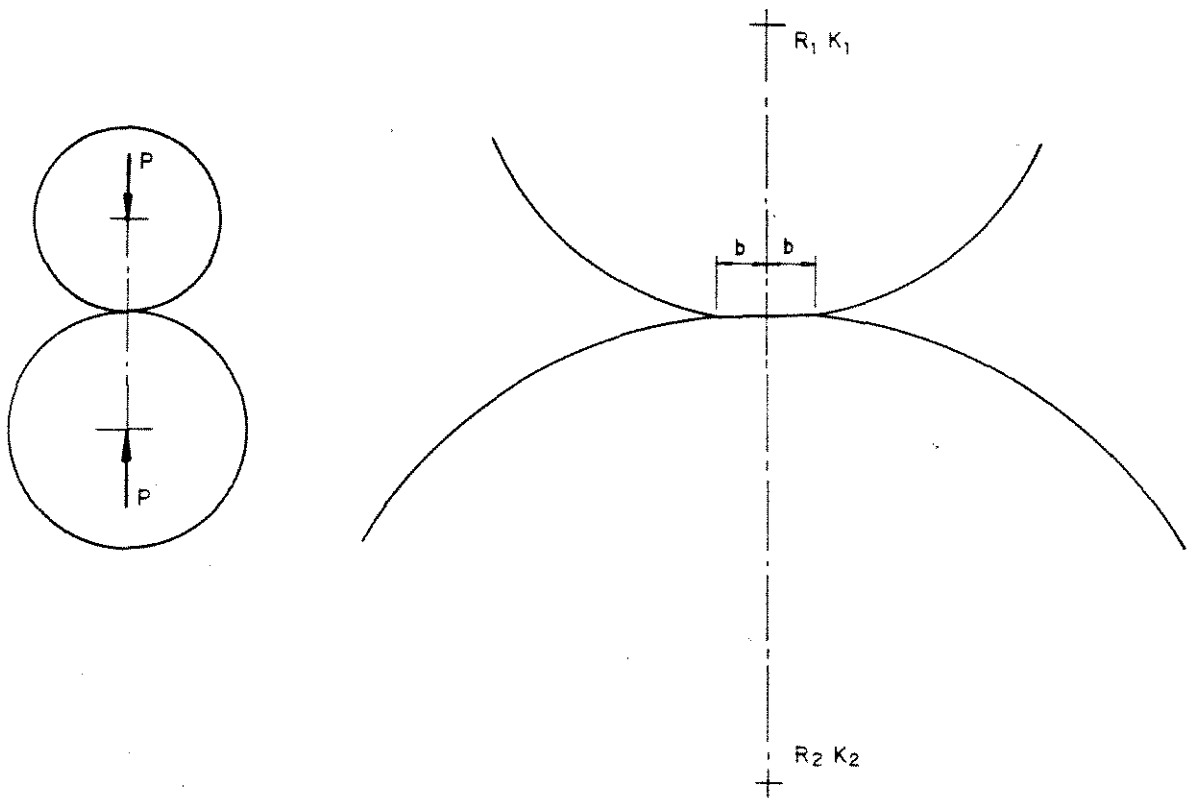


Figura 2.8 Representação esquemática de dois cilindros em contato .

3 . MATERIAL E MÉTODOS .

3 . MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Introdução

Apresenta-se neste capítulo o material e a metodologia adotada.

3.2 O material

A variedade de cana-de-açúcar escolhida para os ensaios é denominada IAC 64257 ,plantada em 15.07.84 . Representa significativamente, em porcentagem de fibra, as variedades mais empregadas nas usinas de açúcar paulistas.

As amostras foram retiradas aleatoriamente do campo. De cada colmo, para a confecção dos corpos de prova para os ensaios, foram aproveitados desde o quinto até o décimo quinto internódios.

3.3 Preparação de Corpos de Prova.

O estudo foi dirigido para uma parte específica do colmo da cana-de-açúcar, a porção mediana do internódio, mostrada

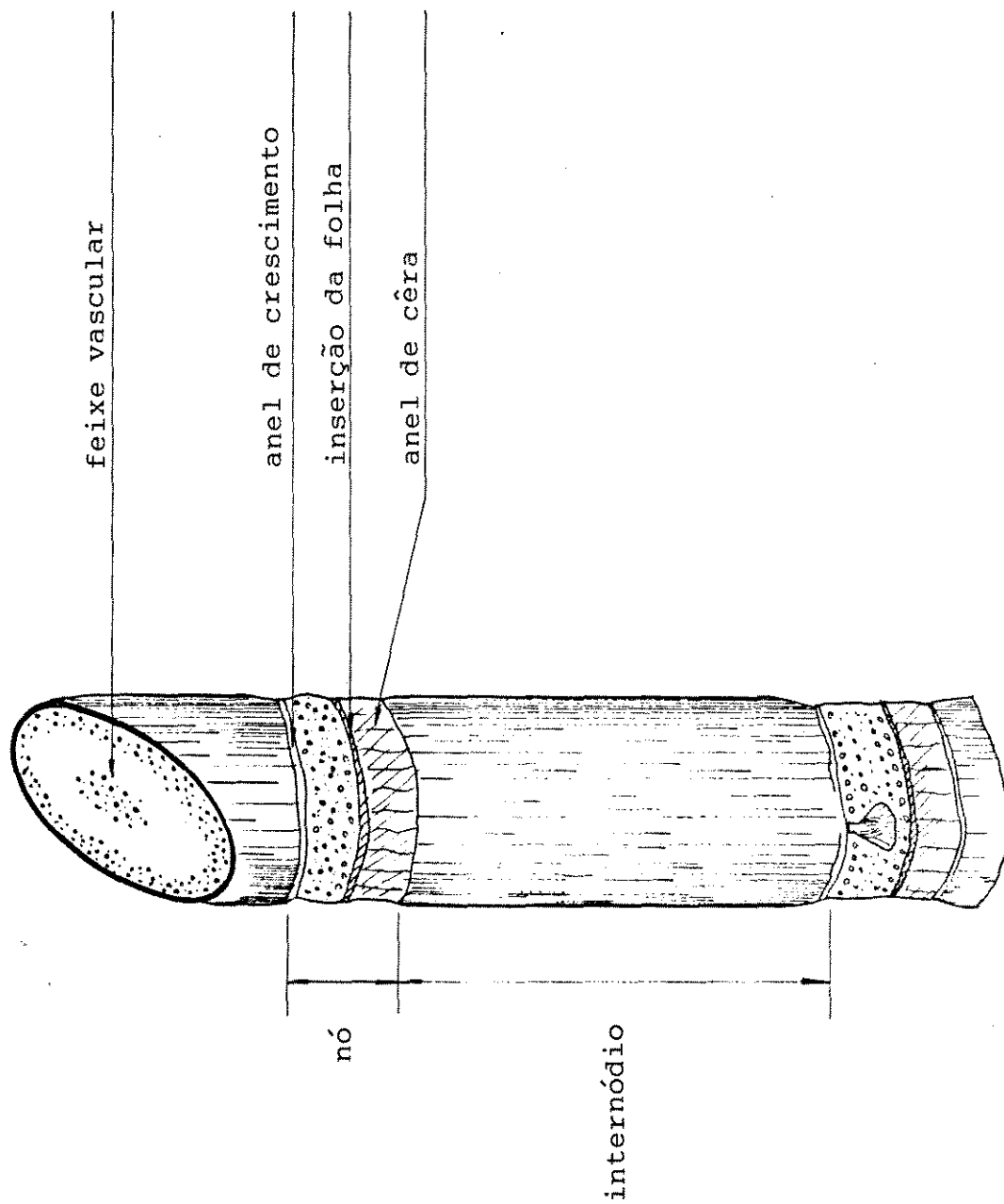


Figura 3.1 Aspectos da anatomia da cana-de-açúcar , se-
gundo Dillewijn(1952) .

esquemáticamente na figura 3.1.

Quatro procedimentos foram utilizados na preparação dos espécimes, resultando em quatro tipos distintos de corpo de prova, denominados, doravante, de TIPO 1, TIPO 2 , TIPO 3 e TIPO 4.

3.3.1 Corpo de prova TIPO 1

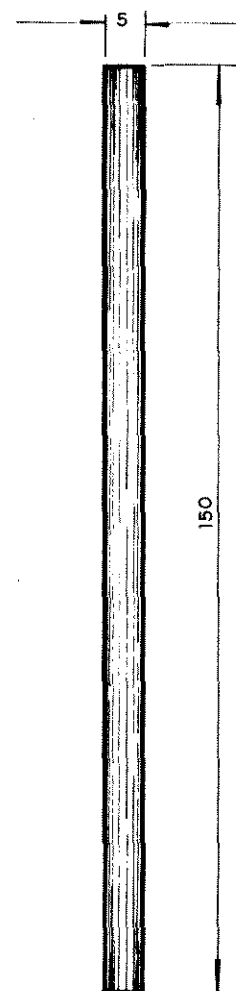
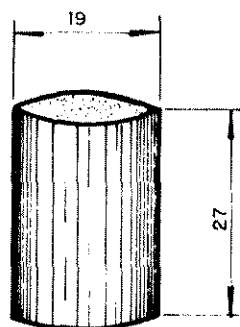
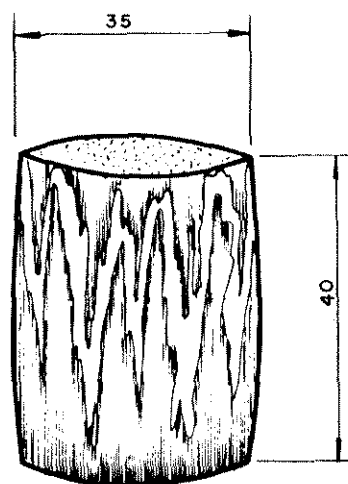
Caracteriza-se pela sua forma aproximadamente cilíndrica, típica do material "in natura", apresentando integralmente casca e parênquima, com altura de 40 mm e diâmetro medial de 34 mm, aproximadamente.

Esquemáticamente o corpo de prova TIPO 1 é mostrado na figura 3.2.

Sua obtenção na dimensão citada foi conseguida através um dispositivo especial de corte mostrado nas figuras 3.4 a 3.6. Duas garras côncavas preênséis direcionam e matém o corpo imobilizado durante toda a ação de corte, executada por uma serra circular para metais de 125 mm de diâmetro. A serra foi acionada por uma fresadora universal, marca Kondia, à 3000 rpm.

Realizou-se testes preliminares para verificar a aptidão desse processo na obtenção de corpos de prova com faces paralelas. Assim, de um conjunto de 17 corpos de prova foram medidos, com o auxílio de um paquímetro, as alturas l_1 , l_2 , l_3 e l_4 , conforme mostra a figura 3.3.

3.3.2 Corpo de prova TIPO 2



MEDIDAS EM mm

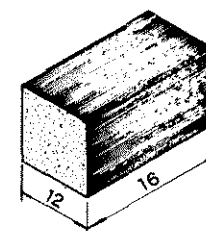


Figura 3.2 Representação esquemática dos corpos de prova TIPO 1 ,2, 3 e 4 . As dimensões mostradas equivalem a valores médios .

Consiste num espécime cilíndrico extraído da parte meridiana-central do parênquima do internódio. Não contém casca e apresenta altura e diâmetro aproximados de 27 mm e 19 mm, respectivamente. Esquemáticamente é mostrado na figura 3.2.

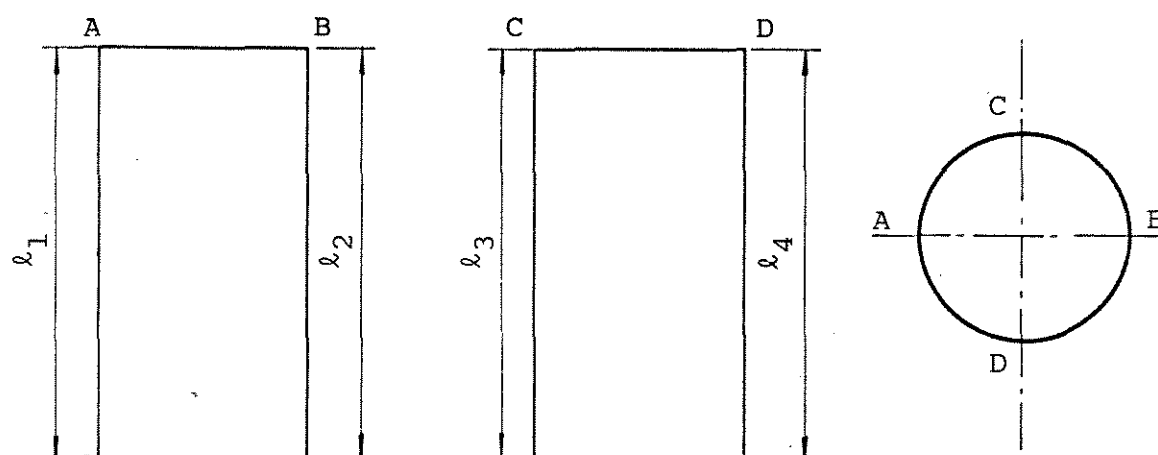


Figura 3.3 Medida das alturas l_1, l_2, l_3, l_4 para a verificação do paralelismo entre as faces do corpo de prova.

As amostras foram obtidas através de um processo especial mostrado nas figuras 3.7 e 3.8. O dispositivo prende, através de garras planas, parte do colmo, previamente preparado, direcionando o vazador para que sua ação de corte seja, o mais paralela possível, à direção das fibras.

Em continuação ao processo uma ação mecânica é aplicada no batedor, figura 3.9, promovendo a penetração total do vazador. O excesso de parênquima é removido manualmente com o auxílio de uma lâmina afiada. As bases do vazador atuam como apoio da lâmina para se obter as faces paralelas no corpo de prova.

As ilustrações complementares do processo estão nas figuras 3.9 a 3.12.

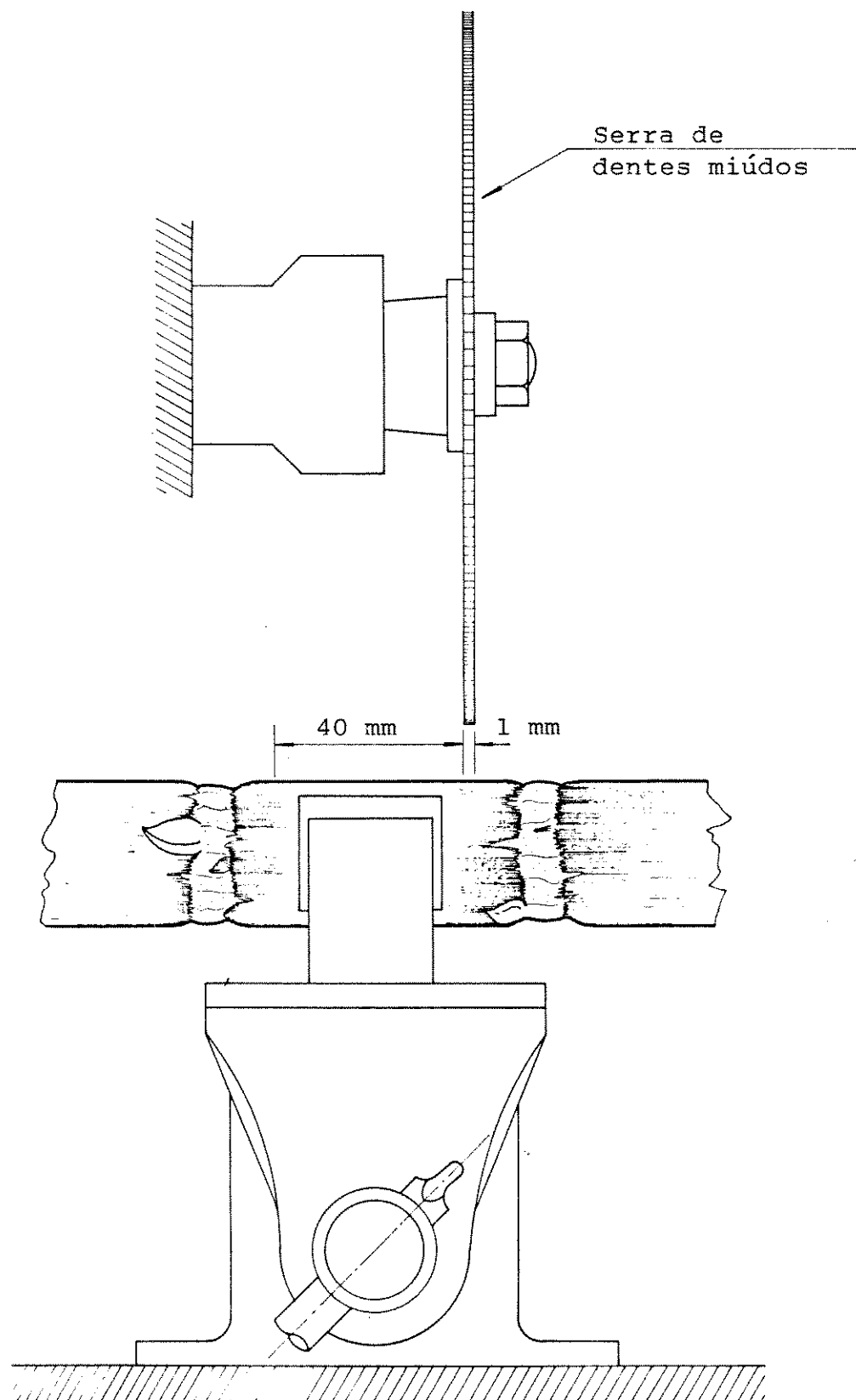


Figura 3.4. Aspecto geral do dispositivo de corte para corpos de prova TIPO 1 .

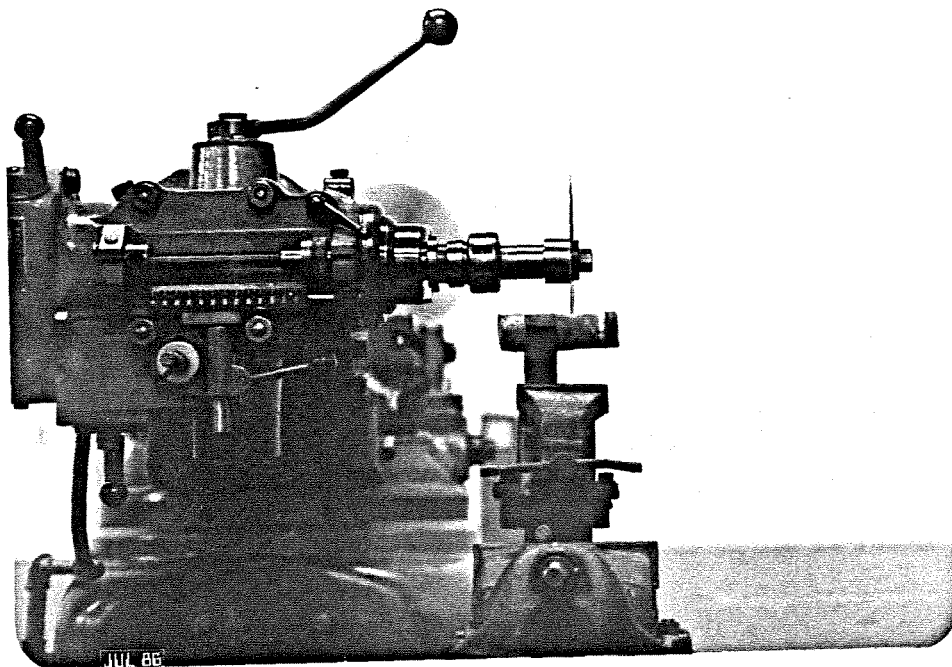


Figura 3.5 Aspecto geral do dispositivo de corte .

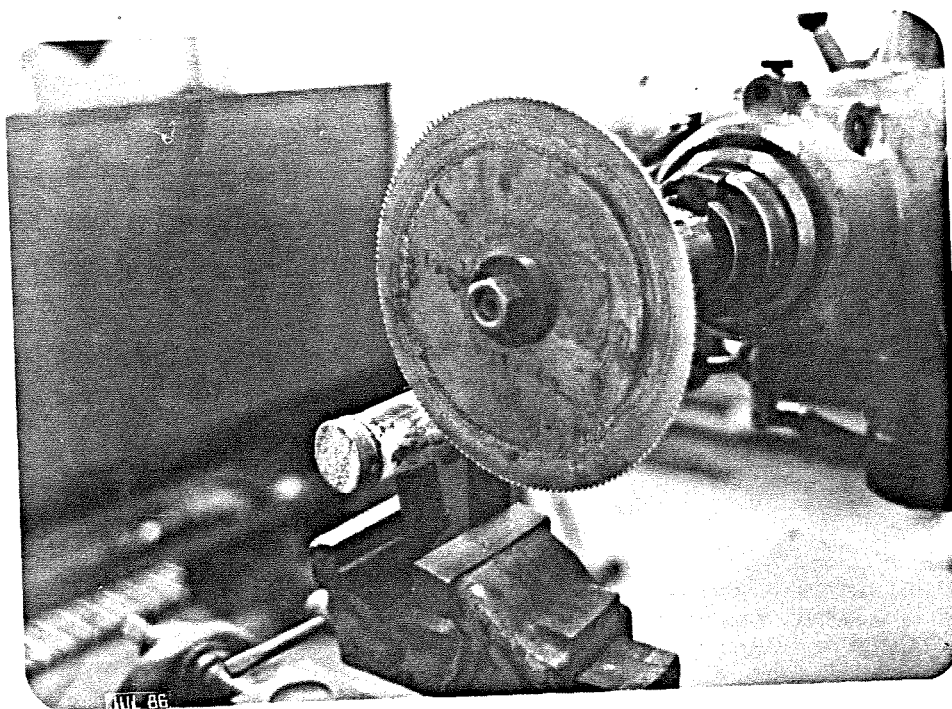


Figura 3.6 Ação da serra circular sobre o internódio .

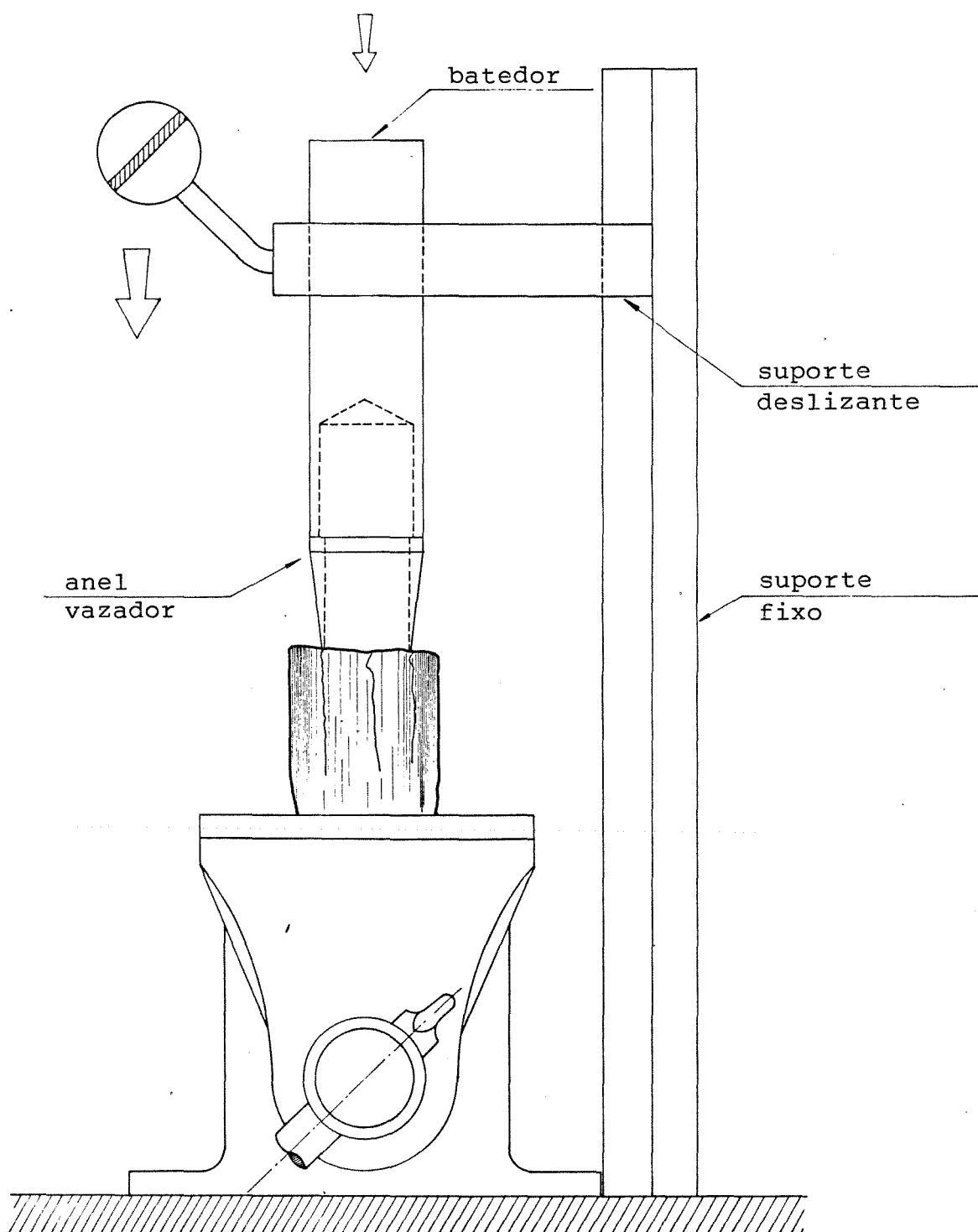
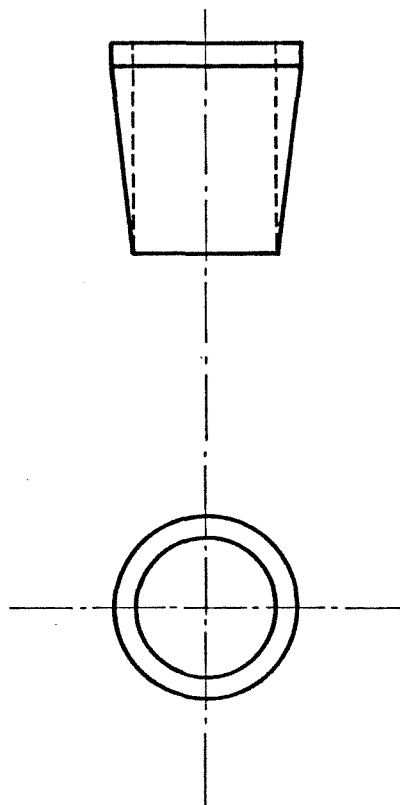
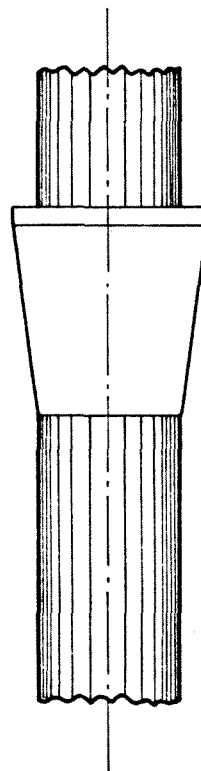


Figura 3.7. Esquema do dispositivo para obtenção de corpos de prova TIPO 2 .

anel vazador



etapa intermediária



corpo de prova

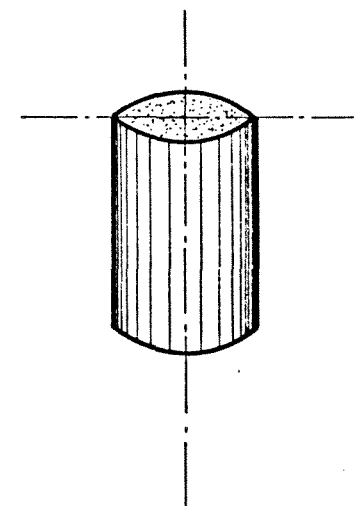


Figura 3.8. Etapa final para obtenção de corpos de prova TIPO 2.

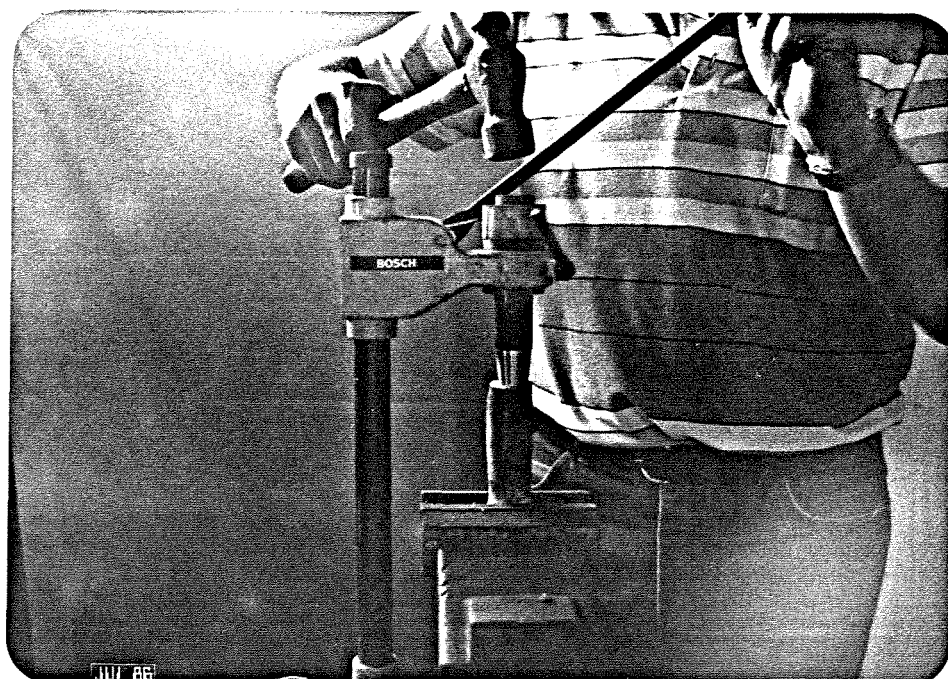


Figura 3.9. Penetração do anel vazador .

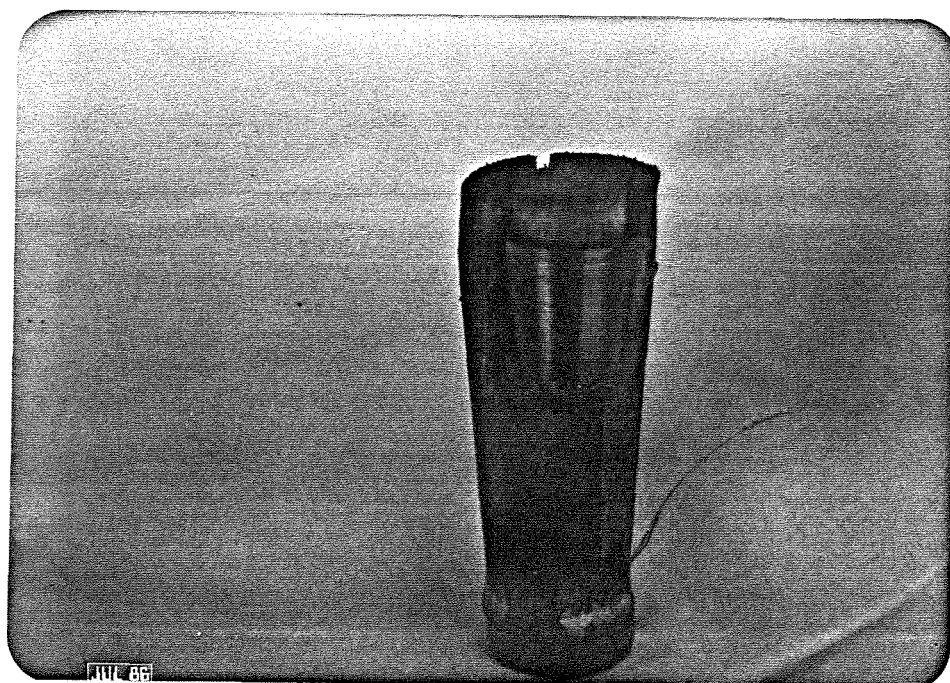


Figura 3.10. Etapa intermediária do processo .



Figura 3.11. Eliminação do excesso de parênquima obtendo-se faces paralelas .

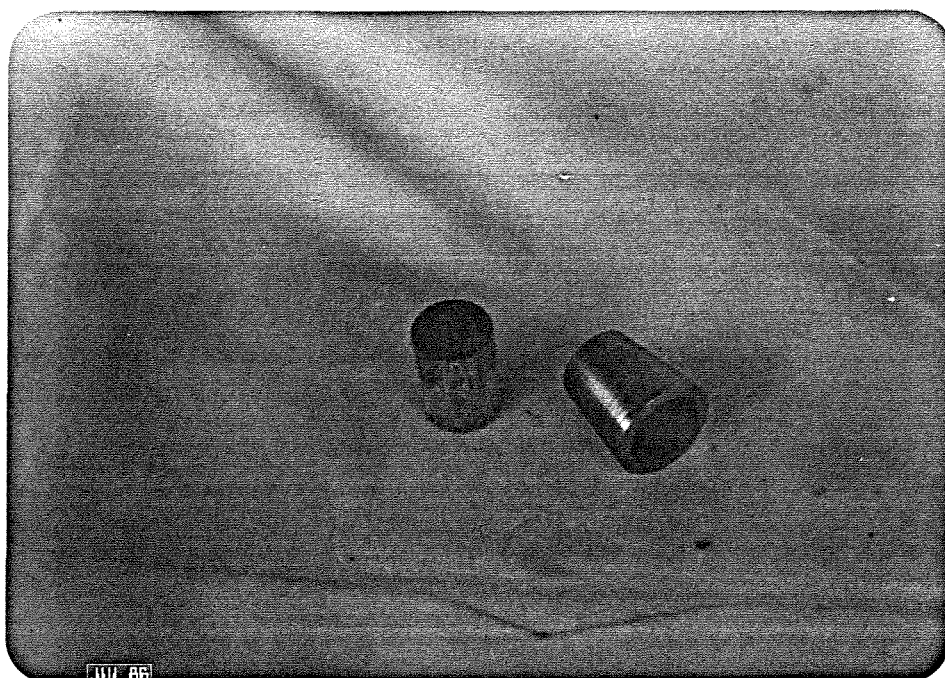


Figura 3.12. Anel vazador e corpo de prova .

3.3.3 Corpo de prova TIPO 3.

Este corpo de prova, bem distinto dos demais, foi utilizado somente para ensaios de tração, onde o elemento testado foi a casca do internódio colocada em forma de "tiras" de, aproximadamente, $6 \times 120 \times 0,25$ mm, (figura 3.2). As tiras são extraídas do colmo, grosseiramente, através de uma lâmina afiada, com aproximadamente 8 mm de largura, após o que são colocadas numa canaleta guia, figura 3.13, com a face parenquimática exposta. A canaleta, de secção transversal retangular, confeccionada numa base de aço inoxidável, com $8 \times 160 \times 0,25$ mm, permite o desbaste do parênquima excedente até a espessura uniforme de, aproximadamente, 0,25 mm. Ver figuras 3.13 e 3.14, para o procedimento esquemático. Em seguida, a dimensão final na largura é estabelecida pelo corte longitudinal da amostra através de uma guilhotina, mostrada na figura 3.15.

3.3.4 Corpos de prova TIPO 4

Os corpos de prova TIPO 4 consistem em espécimes prismáticos, extraídos do parênquima do colmo da cana-de-açúcar, através da utilização de um vazador aproximadamente quadrado, acionado para o corte na direção das fibras, em processo semelhante ao já descrito anteriormente. Resulta em um prisma de dimensões $12 \times 10 \times 16$ mm, aproximadamente, mostrado na figura 3.2.

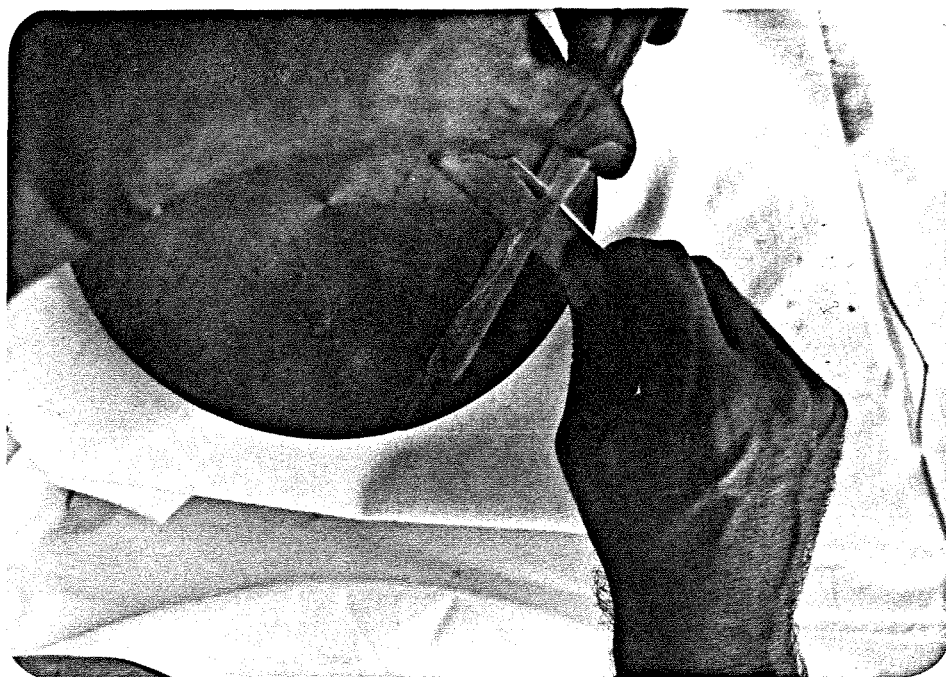


Figura 3.13. Desbaste do parênquima para obtenção de uma lâmina delgada e uniforme da casca.

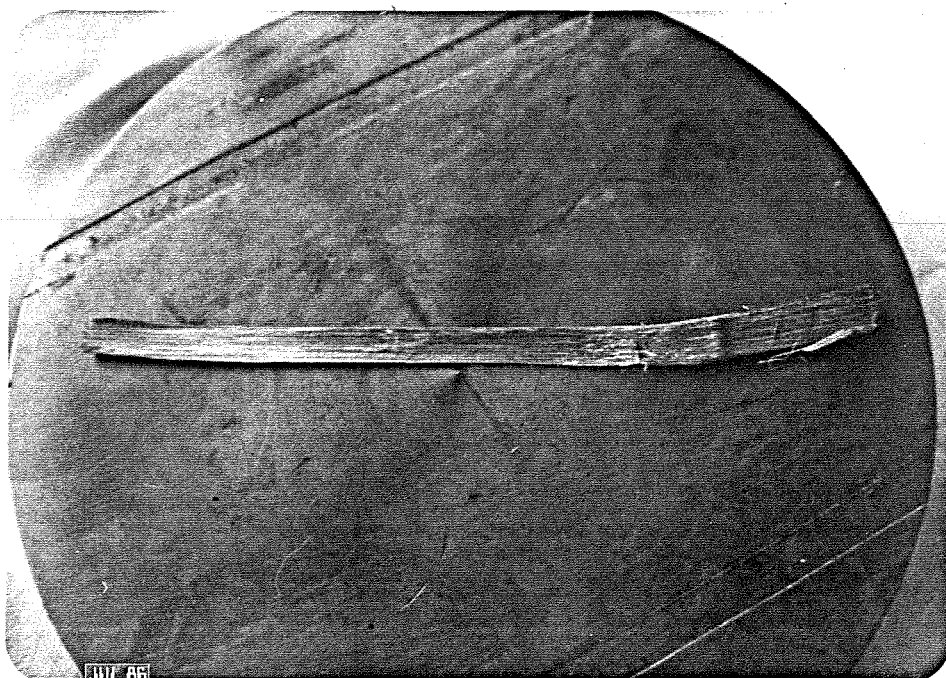


Figura 3.14. Final do desbaste e detalhe da canaleta-guia em base de aço inox .

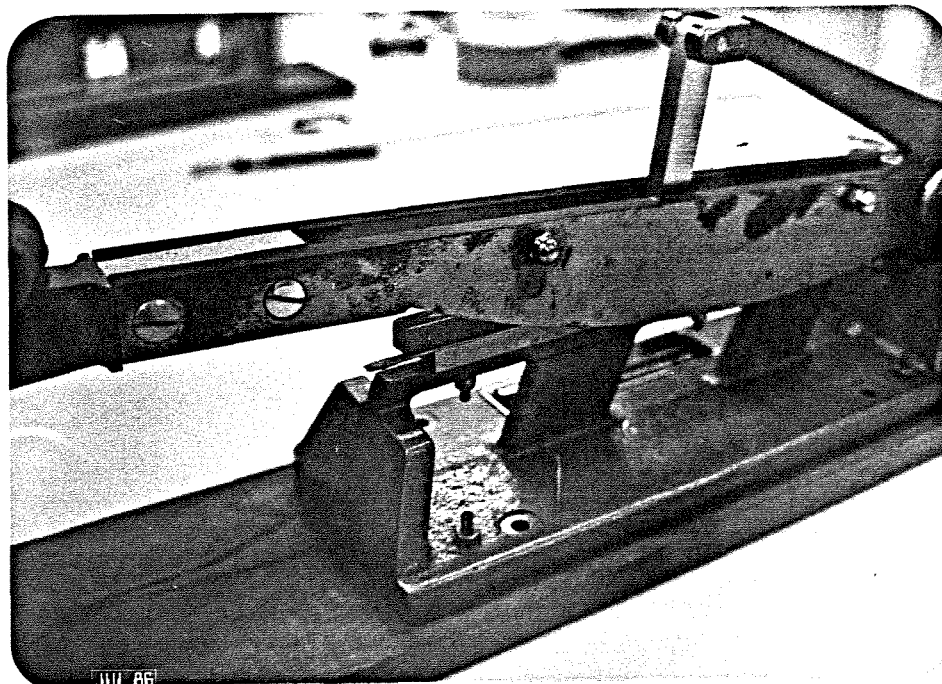


Figura 3.15. Guilhotina utilizada para o corte final da lâmina de casca .

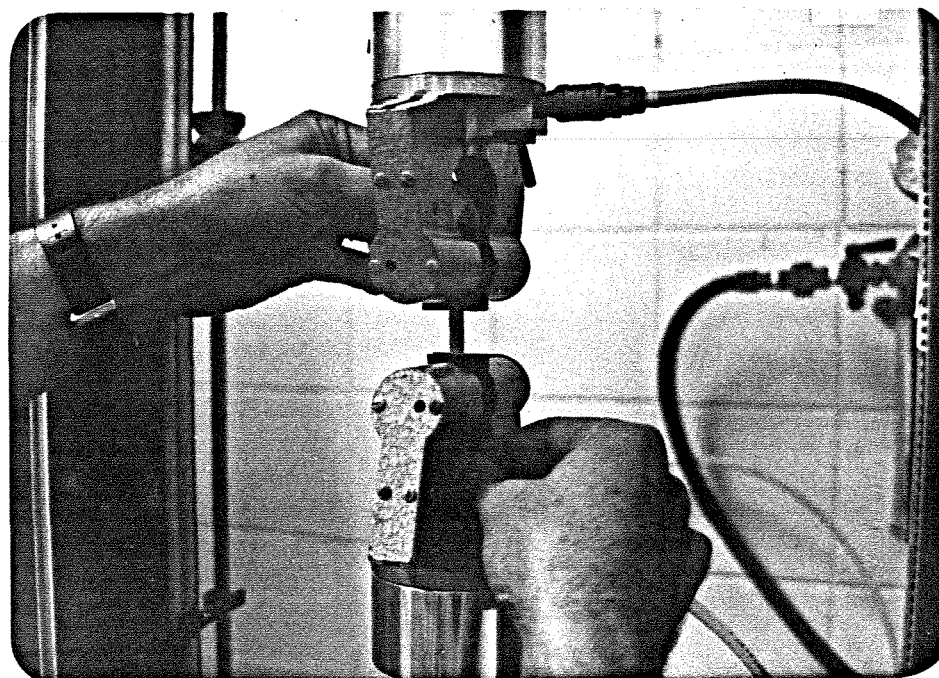


Figura 3.16. Dispositivo de tração com garras planas e detalhe da fixação do corpo de prova .

3.4 DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS

Amostras TIPO 1 e TIPO 2 foram submetidas ao teste uniaxial e ao teste diametral, com velocidade de deformação entre 4 e 5 mm/min. Devido à magnitude das cargas geradas durante os ensaios das amostras TIPO 1 foi necessário recorrer a uma máquina teste de maior capacidade (MTS - Material Testing Sistem). Para os demais ensaios utilizou-se de máquinas teste marca INSTRON e OTMS. Esses equipamentos, já tradicionais neste tipo de ensaio, permitem o controle de um dos parâmetros (deformação), enquanto se registra a outra variável (força).

Nos testes de compressão as amostras do TIPO 1 e TIPO 2 foram solicitadas, axial e diametralmente, através de pratos planos, não articulados e paralelos.

Os corpos de prova TIPO 4 foram utilizados também para os ensaios uniaxiais, porém, com as fibras dispostas paralelamente aos pratos. Dessa forma as fibras ficam identicamente dispostas como foi estabelecido para os testes diametrais com espécimes cilíndricos.

Para o ensaio de tração utilizou-se o dispositivo Instron de tração, figura 3.16, consistindo de garras metálicas planas de formato retangular, medindo 25x40 mm, e acionadas por um sistema de ar comprimido. As faces das garras foram revestidas com lixa fina evitando-se o deslizamento da amostra. A pressão de trabalho foi estabelecida em 0,28kgf/mm² e o espaçamento inicial entre garras de 20 mm.

O comprimento total das tiras obtidas é limitado pelo comprimento do internódio, que no geral, não foi inferior a 120 mm.

O tamanho dos demais corpos de prova utilizados nos ensaios foi delimitado, em parte, pelas próprias dimensões do material ensaiado. Para os corpos cilíndricos, o valor da altura foi superior ao valor do diâmetro.

3.4.1 Resumo das Condições de Realização dos Ensaios.

3.4.1.1 Ensaio uniaxial com corpo de prova TIPO 1.

TESTE Nº1.

a. Material : Internódios de cana-de-açúcar do cultivar IAC 64257. De cada colmo extraíram-se o 10º, 11º e 12º internódios.

b. DATA DE COLETA : 16.10.1985 , pela manhã.

c. DATA DE ENSAIO : 16.10.1985 , à tarde.

c. DIMENSÕES DO CORPO DE PROVAS : altura média 40mm
diâmetro médio 30mm

d. EQUIPAMENTO : Máquina Universal de Teste (MTS)

Capacidade da célula de carga : 1000 Kgf

Velocidade de deslocamento = 4 mm/minuto

e. REGISTRO DE DADOS : Registrador X-Y.

Registro do deslocamento em X

Fator de escala = 0,05 (uma unidade de deslocamento do prato correspondendo à vinte unidades no papel).

Registro da força em Y

Fator de escala = 0,2 (1 mm = 5 Kgf)

Precisão de leitura - em X -> $\pm 0,025$ mm
em Y -> ± 5 Kgf

f. DENSIDADE : 1,135 [g/cm³]

(Média de 10 medidas c/ D.P. = 0,04029 e C.V. = 3,5%).

3.4.1.2 Ensaio uniaxial com corpo de prova TIPO 2.
TESTE Nº2.

a. MATERIAL : Internódios de cana-de-açúcar do cultivar IAC
64257.

De cada colmo utilizou-se do 10º ao 15º internó
dios .

b. DATA DE COLETA : 20.01.86

c. DATA DO ENSAIO : 27.01.86

d. DIMENSÕES DO CORPO DE PROVA : altura 27mm
diâmetro 19mm

e. EQUIPAMENTO : Máquina Universal de Teste (INSTRON)

Capacidade da célula de carga : 500 Kgf

Fundo de escala : 200 Kgf

Velocidade de deslocamento: 5 mm/min

e. REGISTRO DE DADOS : Registrador Oscilográfico.

Registro do deslocamento em X

Fator de escala = 0,025

Registro da força em Y

Fator de escala = 0,5 (1 divisão do papel
= 2 Kgf)

- Precisão de leitura - em X - $\pm 0,02$ mm.

em Y - ± 1 Kgf.

3.4.1.3 Teste diametral com corpo de prova TIPO 1.
TESTE Nº3.

- a. MATERIAL : Internódios de cana-de-açúcar do cultivar IAC 64257. De cada colmo utilizaram-se o 10º, 11º e 12º internódios .
- b. DATA DA COLETA : 16.10.85 , pela manhã.
- c. DATA DO ENSAIO : 16.10.85 , à tarde.
- d. DIMENSÕES DO CORPO DE PROVA : altura média 40mm.
diâmetro médio 33mm.
- e. EQUIPAMENTO : Máquina Universal de Teste (MTS).
Capacidade da célula de carga : 1000 Kgf.
Velocidade do cabeçote : 4 mm/min.
- f. REGISTRO DE DADOS : Registrador X-Y
Registro do deslocamento em X
Fator de escala = 0,05
Registro da força em Y
Fator de escala 1:1 (1 mm = 1 Kgf)
Precisão de leitura - em X $\pm 0,025$ mm.
em Y $\pm 0,5$ Kgf.
- g. DENSIDADE MÉDIA : 1,135 g/cm³.

3.4.1.4 Condições para o teste diametral com corpos de prova TIPO 2..
TESTE Nº4.

- a. MATERIAL : Internódios de cana-de-açúcar do cultivar IAC 64257.
De cada colmo foi utilizado o 10º internódio.

e. EQUIPAMENTO : Máquina Universal de Testes (INSTRON)

Capacidade da célula de carga : 500 Kgf

Fundo de escala : 50 Kgf

Velocidade do cabeçote : 5 mm/min

f. REGISTRO DE DADOS : Registrador Oscilográfico

Registro do deslocamento em X

Fator de escala = 0,025

Registro da força em Y

Fator de escala = 0,5 Kgf/divisão

Precisão de leitura - em X - $\pm 0,875$ mm

em Y - $\pm 0,25$ Kgf

g. UMIDADE MÉDIA base seca (%) = 19,37

Representa a média de 16 amostras mantidas a 105°C por 24 horas.

3.4.1.6. Condições para a realização do teste comparativo com corpos de prova TIPO 2 e TIPO 4.

TESTE Nº6.

a. MATERIAL : Internódios de cana de açúcar do cultivar IAC 52 150. De cada colmo utilizou-se do 5º ao 10º internódio.

b. DATA DA COLETA : 11.12.86 , à tarde .

c. DATA DO ENSAIO : 17.12.86 , à tarde .

d. DIMENSÕES DE CORPO DE PROVA : comprimento 16 mm
largura 10 mm
altura 12 mm

e. EQUIPAMENTO : Máquina Universal de Teste (OTMS) .

Capacidade da célula de carga : 50 Kgf.

Velocidade do cabeçote : 12.9 mm/min .

f. REGISTRO DE DADOS : Registrador Oscilográfico.

Registro do deslocamento em X

Fator de escala : 0.129

Registro da força em Y

Fator de escala : 0.250 (1 div=0.25 Kgf)

3.5 Método de análise da curva Força x Deslocamento.

Para cada teste determinou-se a curva força x deformação ($F \times u$), com o objetivo de se obter o módulo de Young ,E, e a força máxima na faixa linear da curva . Os registros foram feitos em papel milimetrado, com escala adequada para facilitar a leitura. Para a obtenção do módulo de Young foi identificado, com o auxílio de uma régua, um trecho aproximadamente linear, na curva $F \times u$, que caracteristicamente ocorre logo após a acomodação inicial da amostra. Ver figura 3.17. Esse trecho foi delimitado na sua maior extensão por dois pontos, definindo uma reta, de inclinação em relação ao eixo u . Sua tangente é expressa por:

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\Delta F}{\Delta u} \quad (3.1)$$

A intersecção da reta com o eixo das deformações define uma nova origem para o sistema coordenado , a partir da qual foram feitas as medidas da deformação.

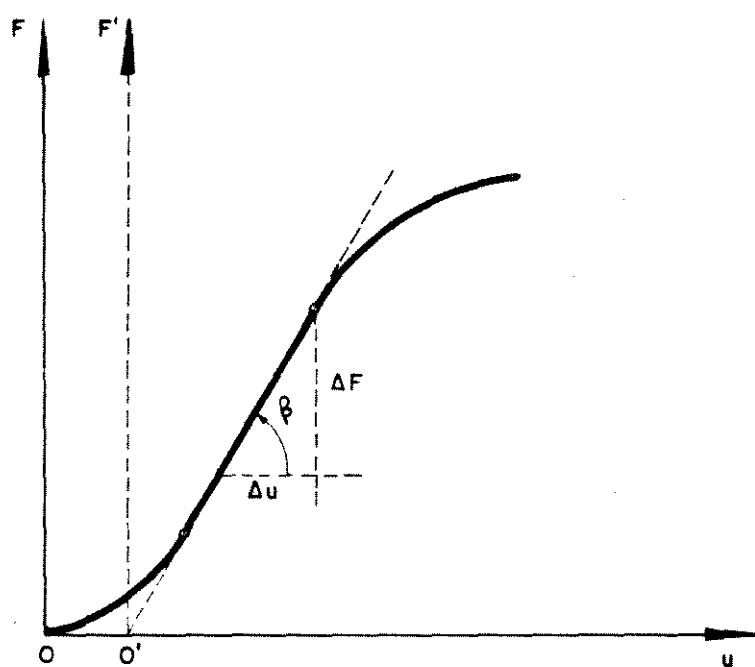


Figura 3.17. Para a leitura da curva , $F \times u$, foram escolhidos pontos do trecho linear.

Os valores de Δu e ΔF , lidos da curva, serão denominados Δx e Δy , respectivamente. Assumiu-se o modelo elástico de Hooke:

$$\sigma_{ij} = E \epsilon_{ij} \quad (3.2)$$

Onde:

σ_{ij} = Tensor tensão ;

E = Módulo de Young ;

ϵ_{ij} = Tensor deformação específica .

A equação (3.2) toma a forma

$$E = \frac{\Delta F l_0}{A \Delta u} \quad (3.3)$$

Onde:

A = Área da secção transversal;

l_0 = Comprimento inicial.

Essa forma de obtenção do Módulo de Young (E), foi aplicada para os testes uniaxiais e testes de tração. Os dados de leitura da carta, ΔF e Δu foram introduzidos num micro computador (Rádio-Shack) para os devidos cálculos e manipulações estatísticas.

O valor máximo da força, F_{max} , para cada repetição, foi tomado como o maior valor ocorrido no trecho linear, delimitado anteriormente.

Diferencialmente, os Testes Diametraes (Teste Brasileiro) possuem modelo e análise particulares. O módulo elástico foi obtido através da equação sugerida por Sherif (1976) :

$$E = \frac{8(1-\mu^2)}{\pi D} Z^2 F \quad (3.4)$$

onde:

μ : coeficiente de Poisson;

D: diâmetro inicial do cilindro;

F: força de compressão normal à superfície por unidade de comprimento.

Z: representa a razão R/b , sendo $R=D/2$ e b a metade da largura de contato, como mostra a figura 3.18.

O valor de Z é obtido através da relação :

$$\frac{\Delta}{D} = \frac{1}{2Z^2} (\ln(2Z) + \frac{1}{2}) \quad (3.5)$$

onde :

Δ : representa a deformação total aplicada ao corpo de prova para o respectivo valor da força F. Conhecendo-se, assim, o valor de Δ/D , obtém-se Z iterativamente.

Nas curvas força-deformação obtidas através do teste brasileiro, traçou-se também, com o auxílio de uma régua, uma reta que coincidisse com sua porção linear, até encontrar o eixo das abcissas, determinando o ponto O'. Todas as deformações foram lidas na curva a partir de O'. Tomaram-se dois valores de força, contidos na porção linear, para cada curva, associando suas respectivas deformações, como indica a figura 3.17.

Para o teste Nº3 os valores da força foram 11.8 Kgf e 31.8 Kgf .Para o teste Nº4 o valor da força foi estabelecido em 11.5 Kgf .

A partir desses valores calculou-se o valor do módulo elástico empregando-se as equações (3.4) e (3.5) .

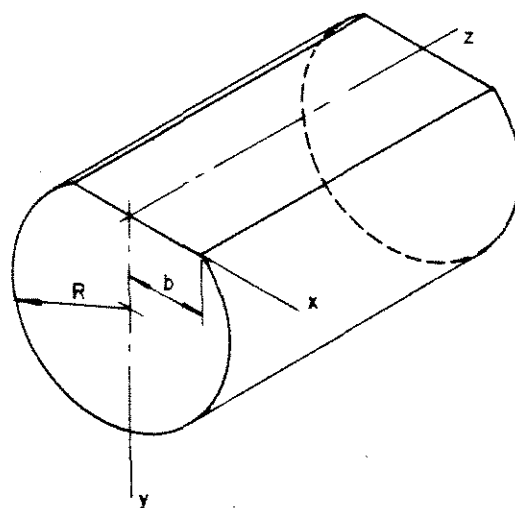


Figura 3.18. Dimensões do corpo de prova cilíndrico associadas a variável Z .

4 . RESULTADOS .

4. RESULTADOS

4.1 Introdução .

Apresenta-se neste capítulo o resultado dos ensaios a que foram submetidos os corpos de provas TIPO 1, TIPO 2 , TIPO 3 e TIPO 4 .

4.2 Resultado do teste uniaxial com corpos de prova TIPO1.

TESTE Nº1 .

Quadro 4.1 Valor Médio do Diâmetro , Força Máxima, Tensão Máxima e Módulo de Elasticidade

	M.	D. P.	C. V.(%)	Repetições
D[mm]	34	5,31	15,6	74
F _{máx} [Kgf]	363,5	86,11	23,7	37
T _{máx} [Kgf.mm-2]	0,417	0,0698	16,8	37
E[Kgf.mm-2]	22,09	3,94	17,8	37

A equação utilizada para a obtenção do módulo de elasticidade, em Kgf.mm-2, foi a seguinte:

$$F = \frac{\Delta y f_y}{A(\Delta x f_x)} l_0 \quad (4.1)$$

onde :

$$A = \pi \cdot [(D_1 + D_2) / 2]^2 / 4 \quad [\text{mm}^2],$$

l_0 = altura inicial do corpo de prova = 40 mm ;

f_x = fator de escala = 0,05;

f_y = fator de escala = 0,02;

D_i = diâmetros perpendiculares ;

Δx e Δy = lidos da curva.

Para o cômputo dos resultados foram utilizados os dados do ANEXO 1 .

Quadro 4.2 Resultado das Medições das Dimensões do Corpo de Prova TIPO 1.

	M	D.P.	C.V.(%)	Repetição
l_i [mm]	39,97	0,1177	0,3	74
D [mm]	30,67	2,98	9,7	74

4.3 Resultado do teste uniaxial com corpos de prova TIPO 2.

TESTE Nº2 .

Quadro 4.3 Valores médios da Altura, Força Máxima, Tensão Máxima e Módulo de Elasticidade.

	M.	D.P.	C.V.(%)	Repetições
l_0 [mm]	27,42	2,202	7,10	106
$F_{\text{máx}}$ [Kgf]	40,34	6,85	16,9	53
$T_{\text{máx}}$ [Kgf.mm-2]	0,285	0,049	17,2	53
E [Kgf.mm-2]	5,42	1,01	18,7	53

A equação utilizada para a obtenção do módulo de elasticidade, em [Kgf.mm-2], foi a seguinte:

$$E = \frac{\Delta y f_y}{A(\Delta x f_x)} \left(\frac{l_1 + l_2}{2} \right) \quad (4.2)$$

Onde:

$$A = \pi \cdot D^2 / 4 = \pi \cdot 19^2 / 4 = 283,39 \text{ mm}^2;$$

l_1, l_2 = alturas diametralmente opostas do corpo de provas [mm];

$\Delta x, \Delta y$ = leituras da curva, [divisões];

f_x = fator de escala = 0,05 [mm/divisão];

f_y = fator de escala = 2 [Kgf/divisão];

Para o cômputo das grandezas mostradas na tabela 4.3 foram utilizados os dados do ANEXO 2.

Quadro 4.4 Resultado das Medições das Dimensões do Corpo de Prova TIPD 2.

	M.	D.P.	C.V.(%)	Repetições
l_i [mm]	27,42	2,202	7,1	106
D [mm]	19,05	0,201	1,0	40

4.4 Resultados do teste de tração na casca .

TESTE Nº 5

Quadro 4.5 Valores Médios da Força Máxima ,Tensão Máxima e Módulo de Elasticidade.

	M.	D.P.	C.V.(%)	Repetições
F _{máx} [Kgf]	25,08	3,236	12,9	54
T _{máx} [Kgf.mm-2]	10,41	1,360	13,1	54
E[Kgf.mm-2]	604,42	82,360	13,7	54

A equação utilizada para a obtenção do módulo de elasticidade, em [Kgf.mm-2], foi a seguinte:

$$E = \frac{\Delta y f_y}{A(\Delta x f_x)} l_0 \quad (4.3)$$

Onde:

$A = L.(t_1 + t_2)/2$ [mm²];

l_0 = distância inicial entre as garras = 20 [mm];

f_x = fator de escala = 0,05 [mm/divisão];

f_y = fator de escala = 0,5 [Kgf/divisão];

$\Delta y, \Delta x$ = [divisões]; →

O cômputo dos resultados foi efetuado mediante o emprego dos dados do ANEXO 3.

Quadro 4.6 Valores Médios da Largura e Espessura do Corpo de Prova TIPO 3.

	M.	D.P.	C.V.(%)	Repetições
t[mm]	0,239	0,024	9,87	128
L[mm]	5,075	0,297	5,0	64

4.5 Resultado do Teste Diametral com corpos de prova TI PO 1.

TESTE N°3.

Quadro 4.7. Valores Médios do Diâmetro , Deformação e Módulo de Elasticidade para uma Força de 11,8 Kgf .

	M.	D.P.	C.V.(%)	Repetições
Diâmetro[mm]	33,43	2,60	7,68	15
Deformação[mm]	0,252	0,041	16,1	15
E[Kgf.mm-2]	4,735	0,784	16,56	15

Quadro 4.8. Valores Médios da Deformação e do Módulo Elástico para uma Força de 31,8 Kgf.

	M.	D.P.	C.V.(%)	Repetições
Deformação[mm]	0,684	0,098	14,2	15
E[Kgf.mm-2]	4,032	0,603	14,94	15

Quadro 4.9. Valores Médios da Deformação e do Módulo Elástico para a Força Máxima no Intervalo Linear.

	M.	D.P.	C.V.(%)	Repetições
Deformação[mm]	0,967	0,292	30,20	15
Força[Kgf]	44,46	9,90	22,29	15
E[Kgf.mm-2]	3,761	0,581	15,49	15

4.6 Resultado do Teste Diametral com corpos de prova TIPO 2

TESTE Nº4.

Quadro 4.10. Valores Médios do Diâmetro , Deformação , Módulo Elástico para uma Força de 11,5 Kgf e Valor Médio da Força Máxima no Trecho Linear.

	M.	D.P.	C.V.(%)	Repetições
Diâmetro[mm]	19,05	0,18	0,93	30
Deformação	0,669	0,041	6,10	15
F[Kgf]	17,87	4,67	26,13	15
E[Kgf.mm-2]	1,883	0,139	7,39	15

4.7 Resultado do Teste Uniaxial com Corpos de Prova TIPO 4 e Teste Diametral com Corpo de Prova TIPO 2.

TESTE Nº6.

Quadro 4.11. Valores Médios de Área , Tensão e Módulo Elástico para o Teste Uniaxial.

	M.	D.P.	C.V.(%)	Repetições
Área[mm2]	188,5	4,95	2,6	16
Tmax[Kgf.mm-2]	0,044	0,008	18,0	16
E[Kgf.mm-2]	0,613	0,079	12,8	16

Quadro 4.12. Valores Médios da Deformação e do Módulo Elástico Resultantes do Teste Diametral para uma Força de 10,0 Kgf .

	M.	D.P.	C.V.(%)	Repetições
Deformação[mm]	1,064	0,141	13,2	18
E[Kgf.mm-2]	0,964	0,155	16,0	18

Quadro 4.13. Valores Médios da Deformação e do Módulo Elástico Resultantes do Teste Diametral para uma Força de 2,5 Kgf .

	M.	D.P.	C.V.(%)	Repetições
Deformação[mm]	0,266	0,035	13,2	18
E[Kgf.mm-2]	1,241	0,198	16,0	18

5 . ANÁLISE DOS RESULTADOS E COMENTÁRIOS .

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS E COMENTÁRIOS

5.1 Sobre o teste uniaxial com corpos de prova TIPO 1 .

Existe uma dificuldade na preparação dos corpos de prova TIPO 1 que reside na obtenção de faces perfeitamente paralelas e perpendiculares ao eixo longitudinal , na direção das fibras do colmo da cana-de-açúcar . Devido as irregularidades naturais da conformação da superfície do colmo , a porção mediana do internódio não apresenta uma superfície perfeitamente cilíndrica , dificultando sua fixação na execução do corte .

A média das medidas das alturas dos corpos de prova , obtidas pelo processo já descrito , Quadro 4.2 , foi de 39,97 mm , com um coeficiente de variação de 0,3% . Este valor está muito próximo dos 40 mm ,desejados para a altura dos espécimes .

Com relação ao paralelismo das faces , a média das diferenças das alturas tomadas diametralmente , foi de 0,050 mm com desvio padrão de 0,096 mm . Adicionando-se a essa média três desvios padrões obtem-se uma diferença de 0,336 mm , o que representa uma variação ao longo do diâmetro médio de 1,1% . Essas medidas , evidentemente , não garantem o perpendicularismo com o eixo longitudinal .

Observou-se durante os testes que quando as amostras foram comprimidas entre os pratos paralelos , a acomodação do material permitiu , após pequena deformação ,o contato total en-

tre os pratos e suas faces

O tempo médio dispendido para o corte de cada espécime foi de aproximadamente 3 minutos .

Observaram-se trincas longitudinais na casca após o ensaio . Decorrido um breve espaço de tempo as trincas não mais puderam ser notadas a olho nú .

No Quadro 4.1 , o valor médio da força máxima no intervalo linear foi de 363,5 Kgf com um coeficiente de variação de 23,7% , enquanto que o valor médio da tensão máxima foi 0,417 Kgf.mm⁻² e um coeficiente de variação ,bem menor , de 16,8% .

O módulo elástico atingiu valores médios de 22,90 Kgf.mm⁻² com um coeficiente de variação de 17,8% .

De acordo com Mohsenin(1970) , para os ensaios com material biológico é aceitável um coeficiente de variação em torno de 15% . Podem-se , assim , considerar aceitáveis os valores do coeficiente de variação obtidos para a tensão máxima e para o módulo elástico .

5.2 Sobre o teste uniaxial com corpos de prova TIPO 2 .

As medidas das dimensões dos corpos de prova TIPO 2 ,Quadro 4.4 , revelam que a variação no diâmetro e no comprimento foi muito pequeno . Em 106 medidas do comprimento obteve-se uma média de 27,42 mm e um coeficiente de variação de 7,1% .O diâmetro médio para 40 medidas foi 19,05 com um coeficiente de variação de 1,0% .Optou-se , para fins de cálculo , pelo valor constante de 19 mm para o diâmetro .

O processo utilizado produziu corpos de prova visual-

mente perfeitos , com superfície lisa e sem escoriações . A maioria deles também apresentou faces suficientemente paralelas , não prejudicando a acomodação da amostra entre os pratos paralelos .

A deterioração deste tipo de corpo de prova é bastante rápida , apresentando variações visíveis na cor e na umidade , em poucas horas . É necessário realizar os ensaios logo após sua confecção .

O Quadro 4.3 mostra que a força máxima atingiu valores médios de 40,34 Kgf , muito abaixo daqueles atingidos pelos corpos de prova TIPO1 . A tensão máxima apresentou valores médios de 0,285 Kgf.mm⁻² , aproximadamente , 70% menor que o obtido com corpos TIPO 1 , e coeficiente de variação de 17,2% .

O valor médio do módulo elástico foi 5,42 Kgf.mm⁻² com um coeficiente de variação de 18,7% . Este valor é , aproximadamente , 4 vezes menor que o obtido para os espécimes com casca (TIPO 1) .

Para as comparações entre os testes uniaxiais não consideramos o tempo de três meses decorrido entre os ensaios . À rigor isto deveria ser obedecido se o objetivo fosse determinar as propriedades mecânicas para uma determinada variedade de cana-de-açúcar . O enfoque , neste caso , está direcionado para a metodologia de estudo .

Mesmo assim , observa-se através dos valores do módulo elástico que a contribuição da casca na resistência do internódio é marcante . Cochran(1970) , utilizando a tensão máxima de ruptura , obteve resultados qualitativamente semelhantes ao comprimir uniaxialmente anéis de casca do internódio (casca sem o parênquima) e compará-los com amostras semelhantes às do TIPO 1.

Cochran , no entanto , não avaliou o módulo elástico .

Observou-se ligeira deposição de suco celular no prato inferior de compressão .

5.3 Sobre a tração da casca .

A obtenção de lâminas delgadas pelo processo sugerido anteriormente forneceu corpos de prova com pequena variação na espessura . Os dados do Quadro 4.6 mostram que a média das espessuras em 128 medições foi de 0,239 mm com coeficiente de variação de 9,87% . As medições foram executadas em 64 lâminas ocorrendo duas leituras em cada lâmina , medidas , equidistantemente , a 1,0 cm do comprimento médio da lâmina .

A largura da lâmina , obtida através de uma guilhotina, teve valores médios de 5,075 mm e coeficiente de variação de 5% .

A figura 5.1 ilustra aspectos das lâminas após o ensaio de tração. Não se verificou um único padrão de ruptura. Alguns espécimes foram rompidos numa direção bem definida, transversalmente às fibras. Porém, a maioria deles apresentou, progressivamente, rupturas sucessivas de parcelas da lâmina, até atingir a ruptura total.

Observou-se , também , que a ruptura ocorreu , parcialmente próximo às garras . Isso pode ser um indicativo de que a

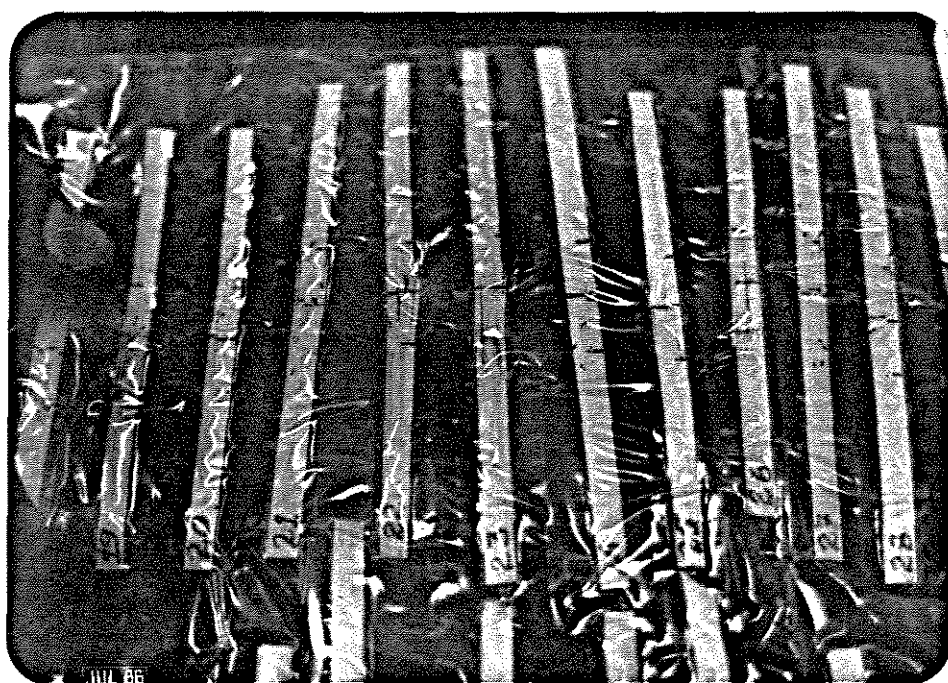


Figura 5.1 Aspectos da ruptura das lâminas delgadas da casca .

pressão das garras ou a falta adequada de alinhamento possam ter concentrado tensões, iniciando ali a ruptura .Talves por causa disso é que a força máxima tenha variado pouco no decorrer dos ensaios .

5.4 Sobre os testes diametrais (TESTE BRASILEIRO) .

Os ensaios diametrais , apesar de ainda pouco utilizados ,são de importância fundamental para o estudo de produtos agrícolas pois permitem explorar ,como o próprio nome diz ,a direção diametral do corpo de prova . Snobar(1973) observou que os testes uniaxiais aplicados em espécimes cilíndricos de cenoura não eram sensíveis ao processo de degradação de partes dos tecidos ,mesmo quando se notava , pela manipulação , alteração no módulo elástico . Constatou também que os testes diametrais respondiam a esse tipo de variação .

A equação para avaliação do módulo elástico nas condições do ensaio diametral,exposta por Timoshenko(1970) , necessita do valor da largura da área de contato . Sua obtenção é muito trabalhosa e dificultada pelo fato de só se conseguir registrar a área de contato para a última deformação imposta . A inércia e o tempo de alívio das cargas no equipamento disponível também não permitem obter dados confiáveis , representativos da ultima força aplicada . Alem disso , as irregularidades da superfície dos corpos de prova TIPO 1 e a presença abundante de células parenquimáticas nos corpos TIPO 2 dificultam e mascaram as impressões .

Sherif(1976a) desenvolveu a equação (3.4) tendo em mente

esse problema . Para sua utilização é necessário conhecer a força , a deformação total , o coeficiente de Poisson e as dimensões iniciais do corpo de prova.

Apesar da equação ser utilizada em várias publicações , para se obter o módulo elástico , sua resposta não é constante quando aplicada a uma relação linear entre força e deformação. Por exemplo , se aplicada na equação $F = 50 \cdot u$, para $\mu=0,5$, $D = 20 \text{ mm}$ e $l_0 = 40 \text{ mm}$, o valor do módulo , apresenta as variações mostradas no Quadro 5.1 .

Quadro 5.1 Variação do valor de E calculado pela equação (3.4)

F[Kgf]	u[mm]	E[Kgf.mm-2]
3,0	0,06	2,985
4,0	0,08	2,888
5,0	0,10	2,868
7,5	0,15	2,720
15,0	0,30	2,455
30,0	0,60	2,182

O menor valor de E ,apresentado no quadro acima , representa o início do trecho linear e o maior valor o final do referido trecho . Os cálculos de E, efetuados pelo valor mínimo e depois com o máximo, apresentam uma diferença de 26,9% .

O próprio Sherif(1976b) , em sua dissertação , não menciona os valores de força e deformação para os módulos elásticos obtidos através de (3.4) .

Anazodo(1980) realizou os cálculos do módulo para a

força de ruptura na espiga de milho . Mas , o que representa esse valor ? Pode ser considerado como o módulo aparente ?

Os Quadros 4.7 , 4.8 e 4.9 apresentam os valores do módulo elástico ,para vários níveis de carga ,para corpos TIPO 1. Os coeficientes de variação se situam dentro da faixa recomendada para todos os casos . Para a força de 11,8 Kgf o módulo teve seu valor médio de 4,735 Kgf.mm⁻² com coeficiente de variação de 16,56% . Para a força máxima média de 44,46 Kgf o valor do módulo foi de 3,761 Kgf.mm⁻² e o coeficiente de variação de 15,49% . A diferença entre esses valores é de 20,6% .

Para que as comparações pudessem ser efetuadas manteve-se o mesmo nível de força .

Nos ensaios com corpos TIPO 2 , Quadro 4.10 ,para uma força de 11,5 Kgf , obteve-se o valor de 1,883 Kgf.mm⁻² ,para o módulo , com coeficiente de variação de 7,39% . O valor do módulo foi 2,5 vezes menor , em média , que o obtido para os espécimes com casca .

O coeficiente de variação da força máxima foi elevado, tanto para o TIPO 1 como para o TIPO 2 ,apresentando valores de 22,29% e 26,13% ,respectivamente .

Para os testes diametrais adotou-se para o coeficiente de Poisson o valor de 0,49 . Finney (1967) , obteve o valor de 0,492 para espécimes de batata .

5.5 Sobre o teste comparativo .

A teoria elástica das tensões de contato de Hertz é baseada no fato do material possuir uma resposta linear quanto a

tensão e deformação , e ser isotrópico .

Os resultados até aqui apresentados indicam que o material estudado não é isotrópico . Sabe-se também que o material não é homogêneo .

Por isso , numa tentativa de se avaliar a exatidão do emprego da equação (3.4) recorreu-se ao teste uniaxial com corpos TIPO 4 , comparando-o com o ensaio diametral . Evidentemente , os testes não se equivalem . Em um , o fator forma influencia grandemente na variação da área de contato e na distribuição de tensões ,durante a compressão , enquanto que no outro essa variação é desconsiderada . Porém ,durante a compressão , o corpo TIPO 2 será grandemente deformado e a sua secção transversal resistente se aproxima de um quadrilátero como ilustra a figura 5.2 .

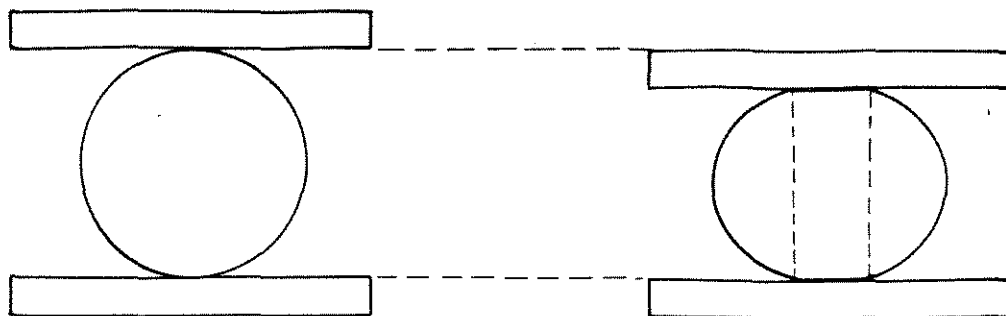


Figura 5.2 Corpo TIPO 2 sendo comprimido diametralmente.

Os resultados obtidos , mostrados nos Quadros 4.11 a 4.13 , evidenciam que o valor obtido de (3.4) para uma força de

10,0 Kgf , 0,964 Kgf.mm⁻² , foi o mais próximo do valor médio obtido no teste uniaxial de 0,613 Kgf.mm⁻² . Observe-se que o valor da força , 10,0 Kgf , corresponde , aproximadamente , ao extremo superior do trecho linear , para esse ensaio .

Nos testes uniaxiais com corpos TIPO 4 foi encontrado um valor menor para o módulo elástico daqueles encontrados , para qualquer nível da força , no teste diametral . Isso pode ser atribuído ao fato de que as amostras TIPO 4 são retiradas da região parenquimática onde está presente o feixe vascular .

6 . CONCLUSÕES .

6. CONCLUSÕES

6.1 Conclusões .

A metodologia sugerida para a obtenção de corpos de prova TIPO 1 , TIPO 2 e TIPO 3 foi satisfatória ,obtendo-se valores consistentes em suas dimensões e no módulo elástico .

Considerando-se os dados comparáveis , a parte mediana do internódio da cana- de- açúcar apresenta características de um material anisotrópico .

A casca contribui grandemente para a resistência do internódio .

As curvas tensão-deformação , em todos os testes realizados , apresentaram um trecho linear sendo possível ,portanto, exprimir o seu módulo elástico aparente .

Existe a necessidade de investigações para o desenvolvimento de equações que expressem o módulo elástico para espécimes cilíndricos carregados diametralmente .

6.2 Sugestões para trabalhos futuros .

Obter o módulo elástico para um anel de casca da porção mediana do internódio .

Investigar o internódio com seus respectivos nós , considerando-os como uma unidade estrutural .

Investigar a influencia do nó na flexão de dois internódios sucessivos .

Desenvolver um equacionamento que reproduza um valor do módulo elástico para os trechos lineares das curvas obtidas através de ensaios diametrais em espécimes cilíndricos .

Investigar as possíveis associações entre o processo de moagem de cana de açúcar e o Teste Brasileiro .

Projeto de um dispositivo de corte para colmos de cana-de-açúcar .

Relacionar as propriedades dos elementos distintos do internódio para o equacionamento de seu comportamento mecânico .

Associar a dureza da casca ao seu módulo elástico .

Obter o módulo elástico da casca submetida a flexão .

ANEXOS .

ANEXO 1 . Dados para o cômputo dos resultados do teste uniaxial
com corpos de prova TIPO 1 .

Simbologia :

D_1 e D_2 = Diâmetros mediais perpendiculares , [mm] ;

D = Média aritmética entre D_1 e D_2 , [mm] ;

Δx e Δy = Variação do deslocamento e da força , respectivamente , [divisões] ;

F_{max} = Valor máximo da força no trecho linear , [divisões] ;

T_{max} = Tensão normal associada a F_{max} , [Kgf.mm⁻²] ;

E = Módulo elástico , [Kgf.mm⁻²] .

Espécime	D ₁	D ₂	D	Δx	Δy	Fmax	Tmax	E
1	30.9	32	31.45	11	40	60	0.368	18.7239
2	35.4	34.4	34.9	16	75	90	0.471	19.6002
3	35.7	36.8	36.25	10	70	90	0.436	27.1301
4	32.4	32.5	32.45	7	40	60	0.362	27.6377
5	34.1	34.8	34.45	9	40	70	0.376	19.0725
6	30.8	30.3	30.55	5	25	35	0.239	27.2845
7	29.6	30.5	30.05	10	40	50	0.353	22.5601
8	31	31.4	31.20	12	50	60	0.392	21.7996
9	34.9	35.2	35.05	8	40	70	0.363	20.7283
10	32.1	32.9	32.5	18	60	70	0.422	16.0724
11	33.9	32.4	33.15	13	50	65	0.377	17.825
12	33.4	32.7	33.05	10	60	70	0.408	27.9755

(continua)

(continuação)

Espécime	D ₁	D ₂	D	Δx	Δy	F _{max}	T _{max}	E
13	35.1	33.7	34.4	11	50	70	0.377	19.5627
14	34.1	33.8	33.95	7.5	40	60	0.332	23.5661
15	37.4	38.6	38.0	11	60	70	0.309	19.238
16	33.6	33.6	33.6	13.5	60	80	0.451	20.0497
17	36.4	37.2	36.8	14	70	100	0.470	18.8037
18	37.7	39.1	38.4	11	70	100	0.432	21.9792
19	31.2	32.2	31.7	12	45	65	0.412	19.0056
20	36.4	35.4	35.9	14	80	100	0.494	22.5809
21	31.6	31.9	31.75	10	40	60	0.379	20.2089
22	33.2	33.5	33.35	18.5	90	90	0.515	17.3262
23	35.1	35.8	35.45	13.5	80	100	0.507	24.0156
24	33.4	32.6	33	10	50	70	0.409	23.3836

(continua)

(continuação)

Espécime	D ₁	D ₂	D	Δx	Δy	F _{max}	T _{max}	E
25	30.7	31.4	31.05	8	30	50	0.330	19.8097
26	31.3	30.7	31	12	50	70	0.464	22.0818
27	34.5	34	34.25	11.5	55	95	0.515	20.7641
28	30.4	30.6	30.5	12.5	50	70	0.479	21.8993
29	30.1	31.4	30.75	10	40	70	0.471	21.5446
30	29.6	31.2	30.40	7	30	50	0.344	23.6181
31	37.5	36.5	37	10	80	110	0.512	29.7615
32	32	33.5	32.75	8	35	75	0.445	20.7742
33	34.9	34.7	34.8	10.5	50	80	0.420	20.0259
34	29.8	30.4	30.1	15	50	70	0.492	18.7376
35	30.9	31.4	31.15	8	55	85	0.558	36.0849
36	31	31.8	31.4	7	30	50	0.323	22.1377
37	30.1	30.9	30.5	9	40	60	0.411	24.3325

ANEXO 2 . Dados para o cômputo dos resultados do teste uniaxial
com corpos de prova TIPO 2 .

Simbologia :

l_1, l_2 = Alturas do corpo de prova diametralmente opostas , [mm] ;

l = Média aritmética das alturas l_1 e l_2 , [mm] ;

Δx e Δy = Variação do deslocamento e da força , respectivamente , [divisões] ;

F_{max} = Força máxima no trecho linear , [divisões] ;

T_{max} = Tensão normal associada a F_{max} , [Kgf.mm⁻²] ;

E = Módulo elástico , [Kgf.mm⁻²] .

Espécime	ℓ_1	ℓ_2	ℓ	Δx	Δy	Fmax	Tmax	E
1	27.2	26.7	26.95	60	47.5	47.5	0.335063	6.01996
2	27.2	27.1	27.15	66	37	42	0.296266	4.29457
3	27	27.4	27.2	58.5	44	47	0.331536	5.77242
4	27.3	27.3	27.3	49	40	44	0.310374	6.28810
5	27.5	27.3	27.4	50	44	44	0.310374	6.80340
6	27.1	27.2	27.15	55	46	49	0.345644	6.40704
7	27.4	27.4	27.4	50	39	44	0.310374	6.03028
8	27.6	27.3	27.45	58	43	45.5	0.320955	5.74216
9	27.2	27.3	27.25	58	43	45	0.317428	5.70032
10	27.4	27.6	27.5	50	37.5	42.5	0.299793	5.81951
11	27.3	27.2	27.25	65.5	38.5	43	0.30332	4.51938
12	27.7	27.3	27.5	65	48.5	52	0.366806	5.78967

(continua)

(continuação)

Espécime	l_1	l_2	l	Δx	Δy	Fmax	Tmax	E
13	27.3	27	27.15	55	43.5	48	0.33859	6.05883
14	27.1	27.5	27.3	57	43.5	48	0.33859	5.87854
15	27.3	27.2	27.25	50	41	45	0.317428	6.30482
16	27.6	27	27.3	55	54	58	0.409129	7.56286
17	27.7	27.8	27.75	43	40	44	0.310374	7.28362
18	27.6	27.6	27.6	55	50	53.5	0.377386	7.07960
19	27.6	27.5	27.55	50	48	51	0.359752	7.46252
20	27.4	27.4	27.4	48.5	41.5	47	0.331536	6.61530
21	27.4	27.2	27.3	56	46	48	0.338590	6.32740
22	27.5	27.3	27.4	45	41.5	47	0.331536	7.12982
23	27.5	27.3	27.4	53	47	50	0.352698	6.85591
24	27.3	27.7	27.5	45	32.5	35.5	0.250415	5.60397

(continua)

(continuação)

Espécime	l_1	l_2	l	Δx	Δy	Fmax	Tmax	E
25	27.3	27.4	27.35	53	30	32	0.225726	4.36813
26	27.9	27.3	27.6	44	29	33	0.23278	5.13271
27	27.2	27.4	27.6	48	36	39	0.275104	5.77719
28	27.5	27.5	27.5	48	36.5	38.5	0.271577	5.90034
29	27.3	27.3	27.3	57	36.5	38.5	0.271577	4.93257
30	27.7	27.3	27.5	58	37	39	0.275104	4.94993
31	27.2	27.4	27.3	58	33.5	35.5	0.250415	4.44910
32	27.5	27.8	27.65	48	29	34.5	0.243361	4.71351
33	27.7	27.4	27.55	50	33	35	0.246888	5.13048
34	27.5	27.3	27.4	51	33	34	0.239834	5.00250
35	27.9	27.3	27.6	55	30	32	0.225726	4.24776
36	27.4	27.3	27.35	58	37	38	0.268050	4.92293

(continua)

(continuação)

Espécime	l_1	l_2	l	Δx	Δy	Fmax	Tmax	E
37	28	27.6	27.8	57	36	39	0.275104	4.95410
38	27.2	27.2	27.2	47	36	38	0.26805	5.87849
39	27.4	27.5	27.45	59	33.5	33.5	0.236307	4.39472
40	27.4	27.3	27.35	65	34	34	0.239834	4.03660
41	27.4	27.6	27.50	60	34	34	0.239834	4.39696
42	27.3	27.4	27.35	63	33.5	35	0.246888	4.10350
43	27.3	27.3	27.3	50	35.5	37	0.260996	5.46900
44	27.8	27.6	27.7	48.5	32.5	34	0.239834	5.23738
45	27.5	27.4	27.45	50	35.5	37.5	0.264523	5.49912
46	27.4	27.4	27.40	63	30	31	0.218673	3.68149
47	27.4	27.5	27.45	54	29.5	29.5	0.208092	4.23120
48	27.2	27.4	27.3	59.5	34.5	36.5	0.257469	4.46640

(continua)

(continuação)

Espécime	ℓ_1	ℓ_2	ℓ	Δx	Δy	Fmax	Tmax	E
49	28.1	28	28.05	64	28	31	0.218673	3.46261
50	28.2	27.5	27.85	52	29.5	34.5	0.243361	4.45796
51	27.2	27.1	27.15	54	32.5	34	0.239834	4.61054
52	27.3	27.4	27.35	55	31.5	34	0.239834	4.41975
53	28	27.5	27.75	48	33.5	34.5	0.243361	5.46461

ANEXO 3 . Dados para o cômputo dos resultados do teste de tração
com corpos de prova TIPO 3 .

Simbologia :

L = Largura da lâmina de casca , [mm] ;

t = Espessura da lâmina de casca , [mm] ;

Δx e Δy = Variação do deslocamento e da força , respectivamente , [divisões] ;

Fmax = Força máxima no trecho linear , [divisões] ;

Tmax = Tensão normal associada a Fmax , [Kgf.mm⁻²] ;

E = Módulo elástico , [Kgf.mm⁻²] ;

Espécime	L	t	Δx	Δy	Fmax	Tmax	E
1	5.2	0.275	27.5	53.5	31.25	10.9266	544.183
2	5.2	0.25	24	53.5	26.75	10.2885	685.897
3	5.4	0.2	19	38	20	9.25926	740.741
4	4.7	0.225	20	39	19.5	9.21986	737.589
5	5	0.275	25.5	49.5	25	9.09091	564.706
6	5	0.25	24.5	45	27.75	11.1	587.757
7	5.3	0.25	26	60	29.75	11.2264	696.662
8	5.1	0.275	23	46	23	8.19964	570.410
9	5	0.25	22.5	52	25.75	10.3	739.556
10	5.2	0.225	23.5	39.5	21.5	9.18803	574.650
11	4.8	0.175	19.5	38	19.5	11.6071	927.961
12	5	0.2	25.5	44	26	13	690.196

(continua)

(continuação)

Espécime	L	t	Δx	Δy	Fmax	Tmax	E
13	5	0.25	25	47	23.75	9.5	601.600
14	5.25	0.25	31	56	28.25	10.7619	550.538
15	4.7	0.25	27.5	44	23.75	10.1064	544.681
16	5	0.275	25	49.5	26.25	9.54546	576.000
17	5.1	0.25	22	42	23.5	9.21569	598.931
18	5	0.25	29.5	50	26.5	10.6	542.373
19	4.9	0.275	24	45.5	24	8.90538	562.771
20	4.9	0.25	29.5	52	28.5	11.6327	575.579
21	5.4	0.25	28.5	51	27.5	10.1852	530.214
22	5	0.25	26	46	23.5	9.4	566.154
23	5.1	0.225	31	45	22.25	9.69499	506.009
24	5.3	0.25	32	59	31	11.6981	556.604

(continua)

(continuação)

Espécime	L	t	Δx	Δy	Fmax	Tmax	E
25	5.15	0.25	22	37.5	20	7.76699	529.568
26	5.2	0.225	28	58	31.5	13.4615	708.181
27	5.2	0.225	24.5	45.5	24	10.2564	634.921
28	5.4	0.25	23	45.5	23.75	8.7963	586.151
29	5.3	0.225	20.5	40	21	8.80503	654.497
30	4.9	0.2	26	45	23	11.7347	706.436
31	5	0.25	32	52.5	8	11.2	525.000
32	5.1	0.25	33	55	29.25	11.4706	522.876
33	5	0.25	28.5	57.5	31.25	12.5	645.614
34	4.9	0.275	27	47	24.75	9.18367	516.732
35	4.8	0.25	26.5	44	23.5	9.79167	553.459
36	5	0.25	28.5	47	23.5	9.4	527.719

(continua)

(continuação)

Espécime	L	t	Δx	Δy	Fmax	Tmax	E
37	5	0.25	29	47	26.25	10.5	518.621
38	5.3	0.2	23	37	21	9.90566	607.055
39	5.2	0.225	27	52	28.25	12.0727	658.436
40	5	0.25	23	36.5	19.75	7.9	507.826
41	5.1	0.2	30	51	25.75	12.6226	666.667
42	4.9	0.225	24.5	47.5	23.75	10.771	703.411
43	5.1	0.25	29.5	58	30.5	11.9608	616.816
44	4.9	0.25	27	42	22	8.97959	507.937
45	5.3	0.225	28	51	27	11.3208	610.961
46	5.1	0.225	26	44	24	10.4575	589.911
47	5	0.275	26.5	46.5	25.25	9.18182	510.463
48	4.9	0.25	25.5	48	26	10.6122	614.646

(continua)

(continuação)

Espécime	L	t	Δx	Δy	Fmax	Tmax	E
49	5.2	0.225	27	53	28	11.9658	671.098
50	4.9	0.2	31	44	22	11.2245	579.329
51	5	0.2	28.5	48	25.5	12.75	673.684
52	5.2	0.2	29	49	24.5	11.7788	649.867
53	5	0.25	26	43.5	21.5	8.6	535.385
54	4.9	0.25	31.5	50	25.5	10.4082	518.303

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) - ANAZODO ,U.G.N. -1982- Elastic and visco-elastic properties of agricultural products in relation to harvesting and post-harvest processes Agricultural Mechanization in Asia , vol XIII Nº 2 : 59-65 , 70 .
- (2) - COCHRAN ,B.J. e BAKER ,G.-1970- Engineering properties of sugar cane and their relationship to mechanical harvesting . ASAE paper nº 70-59 .
- (3) - COMPRESSION TEST OF FOOD MATERIAL OF CONVEX SHAPE .-1979- ASAE Standard : S 68.1 .Agricultural Engineers Yearbook 1981 , pg 49- 52 .
- (4) - CONTE , S.D.- 1965 - Elementary numerical analysis: an algorithmic approach.MacGraw Hill. USA.
- (5) - DILLEWIJN ,C.VAN -1952- Botany of sugar cane . The Chronica Botanica CO. Book Department . Massachussets . USA .
- (6) - FINNEY ,E.E. e HALL ,C.W.-1967- Elastic proper-

ties of potatoes . Transaction of the ASAE
10(1):4-8 .

- (7) - FRIDLEY ,R.D. , et alii , -1968- Some aspects of elastic behavior of selected fruits . Transactions of the ASAE 11(1):46-49 .
- (8) - FUNG ,Y.C.B.-1967- Elasticity of soft tissues in simple elongation . American Journal of Physiology 21 (6) :152-1544 .
- (9) - MASE ,G.E.-1970- Theory and problems of continuum mechanics . Schaum's Series .MacGraw Hill Book CO. .USA .
- (10) - MOHSENIN ,N.N.,et alii -1963- Engineering approach to evaluating textural factors in fruits and vegetables .Transactions of the ASAE 6(2):85-88,92 .
- (11) - MOHSENIN ,N.N.-1970- Physical properties of plant and animal materials .Vol I .
Gordon and Breach Science Publishers ,N.York.
- (12) - PETRUCCI ,E.G.R.-1982- Concreto de cimento portland .9ª edição .Editora Globo .Porto Alegre-Rio .
- (13) - PRUSSIA ,S.E.-1985- Apparent modulus of elasti-

city of maturing pecans . Transactions of the
ASAE 28(4):1290-1296 .

(14) - RESISTÊNCIA A TRAÇÃO SIMPLES DE ARGAMASSAS E
CONCRETOS POR COMPRESSÃO DIAMETRAL DE CORPOS
DE PROVA CILÍNDRICOS-1958- MB212 - Associação
Brasileira de Normas Técnicas .

(15) - SHELEF ,L e MOHSENIN ,N.N.-1967- Evaluation of
the modulus of elasticity of wheat grain .Cere-
real Chemistry 44(4): 92-402 .

(16) - SHELEF ;L e MOHSENIN ,N.N.-1968- Effect of mois-
ture content on mechanical properties of
shelled corn .Cereal Chemistry 46(3):242-25.

(17) - SHERIF ,S.M. , et alli -1976- An equation for
the modulus of elasticity of a radially com-
pressed cylinder .Transactions of the ASAE
19(4):782-785 .

(18) - SHERIF ,S.M.-1976- The quasi-static contact pro-
blem for nearly-imcompressible agricultural
products .Ph.D.Thesis . Agricultural Enginee-
ring Department .Michigan State Univesity .

(19) - SHIGLEY J.,E.-1963- Mechanical Engineering Di-
sign . Third edition ,MacGraw Hill Book Co.
USA .

- (20) - SNEDECOR ,G.W. e COCHRAN ,W.G.-1969- Statistical Methods ,sixth edition -The Iowa State University Press ,USA .
- (21) - SNOBAR ,B.-1973- Engineering parameters related to the hardness of carrots .Unpublished Ph.D. disertation ,Michigan State University ,USA .
- (22) - TIMOSHENKO ,S.P. e GOODIER ,J.N.-1970- Theory of Elasticity , third edition ,MacGraw-Hill ,pg 418 e 419 .
- (23) - ZOERB ,G.C. e HALL ,C.W.-1960- Some mechanical and rheological properties of grains . Journal of Agricultural Engineering Research 5:8 -92 .
- (24) - ZOERB ,G.C.-1967- Instrumentation and measurement techniques for determining physical properties of farm products .Transactions of the ASAE 10(1):100-109 .