

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DOS  
GRÃOS DE MAMONA 'GUARANI' VISANDO  
ARMAZENAGEM EM SILOS VERTICAIS**

**SHEIZI NAKA**

CAMPINAS

JULHO DE 2010

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DOS  
GRÃOS DE MAMONA 'GUARANI' VISANDO  
ARMAZENAGEM EM SILOS VERTICAIS**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Campinas como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola na área de concentração de Tecnologia Pós-colheita, sob orientação do Prof. Dr. Antonio Carlos de Oliveira Ferraz e co-orientação da Prof<sup>a</sup> Dra. Maria Cecília A. Teixeira da Silva.

**SHEIZI NAKA**

CAMPINAS  
JULHO DE 2010

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

N145d Naka, Sheizi  
Determinação das propriedades físicas dos grãos de mamona 'Guarani' visando armazenagem em silos verticais / Sheizi Naka. --Campinas, SP: [s.n.], 2010.

Orientadores: Antonio Carlos de Oliveira Ferraz,  
Maria Cecília Amorim Teixeira da Silva.  
Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de  
Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Mamona. 2. Silos. 3. Cisalhamento. I. Ferraz,  
Antonio Carlos de Oliveira. II. Silva, Maria Cecília  
Amorim Teixeira da. III. Universidade Estadual de  
Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. IV.  
Título.

Título em Inglês: Determination of physical properties of castor beans 'Guarani' aiming  
the storage in vertical silos

Palavras-chave em Inglês: Castor beans, Silos, Shear cells

Área de concentração: Tecnologia Pós-colheita

Titulação: Mestre em Engenharia Agrícola

Banca examinadora: Carlito Calil Junior, Benedito Carlos Benedetti

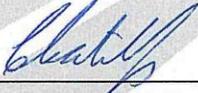
Data da defesa: 12/07/2010

Programa de Pós Graduação: Engenharia Agrícola

Este exemplar corresponde à redação final da **Dissertação de Mestrado** defendida por **Sheizi Naka**, aprovado pela Comissão Julgadora em 12 de julho de 2010, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.

**FEAGRI**

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Antonio Carlos de Oliveira Ferraz – Presidente e Orientador**  
**Feagri/Unicamp**

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Carlito Calil Junior – Membro Titular**  
**EESC/USP**

**Faculdade de Engenharia Agrícola**  
  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Benedito Carlos Benedetti - Membro Titular**  
**Feagri/Unicamp**  
**Unicamp**

À minha família

Aos meus amigos

À diretoria da A. Azevedo Indústria e Comércio de Óleos Ltda

**OFEREÇO**

À minha querida esposa Marina

À minha filha Lilian

Ao meu filho Leandro

**DEDICO**

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus e à Maria Santíssima, pela permanente presença em minha vida.

À minha esposa Marina, por todo incentivo, apoio e dedicação.

Aos meus filhos Lilian e Leandro, pela compreensão e paciência.

À direção da empresa A. Azevedo, pela permissão em participar das atividades acadêmicas e pelo fornecimento de produto para os ensaios.

Ao Professor Dr. Antonio Carlos de Oliveira Ferraz e à Professora Dra. Maria Cecília Amorim Teixeira pelos conhecimentos adquiridos, amizade, apoio e confiança durante o período de estudos.

Aos professores da FEAGRI pelo companheirismo e pelos ensinamentos recebidos.

Aos meus amigos, Adriano Bastos, Nelson Alves e Jorge Eduardo que me incentivaram e colaboraram para a realização deste trabalho.

Aos técnicos dos laboratórios de propriedades mecânicas, Leandro e de pós-colheita, Francisco e Rosália pelo auxílio nos ensaios realizados.

À UNICAMP – Faculdade de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização do mestrado.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE TABELAS.....	xiii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xiv
GLOSSÁRIO.....	xvi
RESUMO.....	xvii
ABSTRACT.....	xviii
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1 Mamona.....	6
2.2 Processo de extração e refino do óleo de mamona.....	9
2.3 Produção de grãos de mamona.....	11
2.4 Comercialização e transporte de grãos de mamona.....	11
2.5 Armazenagem de grãos.....	12
2.5.1 Armazenagem convencional para produtos ensacados.....	12
2.5.2 Armazenagem de produtos à granel em silos.....	12
2.6 Silos para armazenagem de grãos.....	13
2.7 Tipos de escoamento.....	15
2.7.1 Escoamento tipo massa.....	18
2.7.2 Escoamento tipo funil.....	19
2.7.3 Escoamento misto.....	20
2.8 Formas de tremonhas.....	20
2.9 Vantagens e desvantagens da armazenagem convencional em sacos.....	23
2.10 Vantagens e desvantagens da armazenagem a granel em silos.....	23
2.11 Comportamento dos produtos no interior dos silos.....	25

2.11.1 Produto elástico.....	26
2.11.2 Produto viscoelástico.....	26
2.11.3 Produto plástico.....	26
2.12 Critérios de deslizamento entre camadas.....	26
2.12.1 Critério de Rankine.....	26
2.12.2 Critério de Tresca.....	26
2.12.3 Critério de Mohr-Coulomb.....	27
2.12.4 Mecanismos de deformação.....	27
2.13 Aparelhos de cisalhamento.....	33
2.13.1 Aparelho de cisalhamento de Jenike.....	34
2.13.2 Aparelho de cisalhamento de Walker .....	36
2.13.3 Aparelho de cisalhamento de Schulze.....	37
2.13.4 Aparelho de cisalhamento de Peschl.....	38
2.13.5 Aparelho de cisalhamento de McGee.....	38
2.13.6 Princípio de funcionamento do aparelho de cisalhamento de Jenike.....	39
2.13.7 Princípio de funcionamento do aparelho de cisalhamento anelar.....	42
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	44
3.1 Material.....	44
3.2 Métodos.....	45
3.2.1 Grau de umidade – determinação em estufa.....	45
3.2.2 Umidade de equilíbrio.....	45
3.2.3 Peso específico.....	48
3.2.3.1 Peso específico real.....	48
3.2.3.2 Peso específico aparente.....	48
3.2.4 Porosidade.....	49

3.2.5 Ângulo de talude.....	49
3.2.6 Dimensões características e Diâmetro equivalente.....	50
3.2.7 Esfericidade.....	51
3.2.8 Força máxima de compressão do grão inteiro.....	51
3.2.9 Deformação específica na força máxima de compressão.....	52
3.2.10 Ângulo de atrito interno e Efetivo ângulo de atrito interno.....	53
3.2.11 Função fluxo.....	59
3.2.12 Propriedade viscoelástica.....	59
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	61
5 CONCLUSÃO.....	81
6 PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS.....	82
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	83

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Manuseio da mamona na descarga e na utilização no processo de extração.....	3
Figura 2 – Grãos de mamona com diferentes formas e dimensões.....	7
Figura 3 – Fluxograma da extração e refino do óleo de mamona e farelo de mamona.....	10
Figura 4 – Formas de bloqueio do escoamento de produtos.....	17
Figura 5 – Tipos de escoamento do produto no interior do silo.....	18
Figura 6 – Formas de tremonhas.....	20
Figura 7 – Tipo de escoamento em silos com tremonha em forma de cunha e cônica.....	21
Figura 8 – Representação das curvas de escoamento para diferentes produtos.....	22
Figura 9 – Classificação de acordo com a função fluxo ou escoamento.....	23
Figura 10 – Diferentes situações de armazenagem e escoamento em silos.....	25
Figura 11 – Curva característica do Lugar Geométrico de Deslizamento (LGD) e Efetivo Lugar Geométrico de Deslizamento (ELGD).....	27
Figura 12 – Tensões observadas em um silo de acordo com Janssen e Rankine.....	29
Figura 13 – Diagrama das curvas de escoamento em função do tempo de consolidação.....	31
Figura 14 – Gráfico da função fluxo ou escoamento (FF) x fator fluxo de tremonha (ff).....	32
Figura 15 – Tipos de aparelhos de cisalhamento.....	34
Figura 16 – Aparelho de cisalhamento de Jenike.....	36
Figura 17 – Aparelho de cisalhamento de Walker.....	36
Figura 18 – Aparelho de cisalhamento de Schulze.....	37
Figura 19 – Aparelho de cisalhamento de Peschl.....	38
Figura 20 – Aparelho de cisalhamento de Mc Gee.....	39
Figura 21 – Detalhes da célula de cisalhamento de Jenike mostrando posição <i>off-set</i> (vista superior).....	40
Figura 22 – Aparelho de cisalhamento de Jenike.....	41

Figura 23 – Representação da célula de cisalhamento translacional e a curva característica obtida no ensaio de cisalhamento.....	41
Figura 24 – Curvas dos estados de consolidação da etapa de pré-cisalhamento.....	42
Figura 25 – Conjunto para determinação do peso específico aparente.....	49
Figura 26 – Grão de mamona entre placas planas e paralelas para determinação da força máxima de compressão.....	52
Figura 27 – Apresentação esquemática do arranjo experimental utilizado para o cisalhamento de coluna de grãos de mamona.....	53
Figura 28 – Aparato de cisalhamento desenvolvido utilizando a máquina universal de ensaio acoplado ao condicionador de sinais e registrador.....	54
Figura 29 – Célula circulares de 100, 150, 200 e 250 mm, utilizadas nos ensaios de cisalhamento.....	55
Figura 30 – Ilustração de detalhe construtivo da tampa da célula de cisalhamento.....	55
Figura 31 – Ilustração de detalhe construtivo da tampa da célula de cisalhamento (vista interna).....	56
Figura 32 – Representação das diferentes configurações possíveis dos grãos de mamona dentro da célula de cisalhamento.....	59
Figura 33 – Aparato utilizado no ensaio de relaxação dos grãos de mamona.....	60
Figura 34 – Curva da isoterma obtida nos ensaios de umidade de equilíbrio dos grãos de mamona.....	62
Figura 35 – Curva de relaxação para grãos de mamona.....	66
Figura 36 – Movimentação dos grãos no interior da célula.....	66
Figura 37 – Ilustração da posição inclinada da tampa após ensaio de cisalhamento em grãos de mamona.....	67
Figura 38 – Mesa vibratória utilizada para promover compactação dos produtos.....	68
Figura 39 – Ilustração da acomodação do fubá de milho moído antes e após a vibração.....	68

Figura 40 – Gráficos de tensão x deslocamento resultantes dos ensaios de cisalhamento com células de diferentes tamanhos.....	69
Figura 41 – Curvas obtidas com células de 100 mm com carga normal de 30 N no pré-cisalhamento e 3 N no cisalhamento.....	70
Figura 42 – Curvas obtidas com células de 100 mm com carga normal de 30 N no pré-cisalhamento e 5 N no cisalhamento.....	71
Figura 43 – Curvas obtidas com células de 100 mm com carga normal de 30 N no pré-cisalhamento e 10 N no cisalhamento.....	72
Figura 44 – Curvas obtidas com células de 100 mm com carga normal de 30 N no pré-cisalhamento e 20 N no cisalhamento.....	72
Figura 45 – Curvas obtidas com células de 150 mm com carga normal de 67,5 N no pré-cisalhamento e 6 N no cisalhamento.....	73
Figura 46 – Curvas obtidas com células de 150 mm com carga normal de 67,5 N no pré-cisalhamento e 11,25 N no cisalhamento.....	73
Figura 47 – Curvas obtidas com células de 150 mm com carga normal de 67,5 N no pré-cisalhamento e 22,5 N no cisalhamento.....	74
Figura 48 – Curvas obtidas com células de 150 mm com carga normal de 67,5 N no pré-cisalhamento e 45 N no cisalhamento.....	74
Figura 49 – Curvas obtidas com células de 200 mm com carga normal de 120 N no pré-cisalhamento e 12 N no cisalhamento.....	75
Figura 50 – Curvas obtidas com células de 200 mm com carga normal de 120 N no pré-cisalhamento e 20 N no cisalhamento.....	75
Figura 51 – Curvas obtidas com células de 200 mm com carga normal de 120 N no pré-cisalhamento e 40 N no cisalhamento.....	76
Figura 52 – Curvas obtidas com células de 200 mm com carga normal de 120 N no pré-cisalhamento e 80 N no cisalhamento.....	76

Figura 53 – Curvas obtidas com células de 250 mm com carga normal de 187,5 N no pré-cisalhamento e 18,5 N no cisalhamento.....	77
Figura 54 – Curvas obtidas com células de 250 mm com carga normal de 187,5 N no pré-cisalhamento e 31,25 N no cisalhamento.....	77
Figura 55 – Curvas obtidas com células de 250 mm com carga normal de 187,5 N no pré-cisalhamento e 62,5 N no cisalhamento.....	78
Figura 56 – Curvas obtidas com células de 250 mm com carga normal de 187,5 N no pré-cisalhamento e 125 N no cisalhamento.....	78
Figura 57 – Representação dos círculos de Mohr obtidos a partir dos ensaios de cisalhamento.....	80

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Análise físico-química típica da semente de mamona.....	8
Tabela 2 – Análise cromatográfica dos ácidos graxos presentes nos grãos de mamona.....	9
Tabela 3 – Classificação da Função Fluxo dos produtos (FF).....	22
Tabela 4 – Valores de ângulo de atrito interno obtidos nos ensaios com diferentes tipos de aparelhos de cisalhamento.....	33
Tabela 5 – Comparativo das características dos aparelhos de cisalhamento.....	39
Tabela 6 – Relação dos sais utilizados no preparo das soluções saturadas para determinação da umidade de equilíbrio.....	47
Tabela 7 – Normais aplicadas a diferentes tamanhos de células.....	57
Tabela 8 – Resultados das determinações de umidade dos grãos de mamona utilizando diferentes métodos de análise.....	61
Tabela 9 – Valores de umidade de equilíbrio (% , b.s) encontrados nos ensaios.....	62
Tabela 10 – Valores dos resultados dos ensaios de propriedades físicas dos grãos de mamona variedade Guarani.....	64
Tabela 11 – Valores dos resultados dos ensaios de propriedades mecânicas dos grãos de mamona variedade Guarani.....	65
Tabela 12 – Valores médios obtidos nos ensaios finais de cisalhamento.....	79

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\varphi_i$  – ângulo de atrito interno (graus)

$\varphi_e$  – efetivo ângulo de atrito interno (graus)

$\alpha$  – ângulo de talude (graus)

$\rho_a$  – peso específico aparente ( $\text{kg/m}^3$ )

$\rho_r$  – peso específico real ( $\text{kg/m}^3$ )

$D_{eq}$  – diâmetro equivalente (mm)

$d_1$  – comprimento do grão de mamona (mm)

$d_2$  – largura do grão de mamona (mm)

$d_3$  – espessura do grão de mamona (mm)

$\varepsilon$  – esfericidade

$P$  – porosidade (%)

$U$  – umidade (% , b.u)

$U_{eq}$  – umidade de equilíbrio (% , b.s)

$FF$  – função fluxo ou função escoamento do produto

$ff$  – fator fluxo ou escoamento de tremonha

$\sigma_{pre}$  – tensão normal aplicada no pré-cisalhamento (kPa)

$\sigma_1$  ou TMC – tensão máxima de consolidação (kPa)

$\sigma_c$  ou TNC – tensão não confinada de deslizamento (kPa)

$\tau_{pre}$  – tensão de pré-cisalhamento (kPa)

$\tau_c$  – tensão de cisalhamento (kPa)

$\tau_n$  – tensão de cisalhamento sob tensão normal nula (kPa)

$\mu$  - coeficiente de atrito interno

$N$  – força normal (N)

$P_h$  – pressão horizontal (kPa)

$P_v$  – pressão vertical (kPa)

$k$  – constante de Janssen

LGD – lugar geométrico de deslizamento

ELGD – efetivo lugar geométrico de deslizamento

AAI – ângulo de atrito interno

EAAI – efetivo ângulo de atrito interno

TNC – tensão não confinada de cisalhamento

TMC – tensão máxima de consolidação

## GLOSSÁRIO

- Ângulo de atrito interno ( $\varphi$ ) – ângulo formado entre a tensão normal representado no eixo das abscissas e a tangente do lugar geométrico de deslizamento.
- Ângulo de talude ou repouso natural ( $\alpha$ ) – ângulo formado pelo produto com a horizontal ao escoar através de um fluxo constante.
- Círculo das tensões de Mohr – representação gráfica de um estado de tensão nas coordenadas normal e de cisalhamento representadas pelo plano ( $\sigma$ ) e ( $\tau$ ).
- Cisalhamento – deslizamento entre as camadas formadas pelo produto.
- Coesividade – força adquirida pelo produto após período de armazenagem.
- Consolidação – processo de aumento da força de um sólido quando armazenado.
- Efetivo ângulo de atrito interno ( $\varphi_e$ ) – ângulo formado entre a tensão normal representado no eixo das abscissas partindo da origem e a tangente do lugar geométrico de deslizamento.
- Efetivo lugar geométrico de deslizamento (ELGD) – curva característica do material obtida a partir da determinação dos círculos de Mohr das tensões principais, passando pela origem dos eixos das coordenadas.
- Ensaio de cisalhamento – ensaio destinado a determinar as propriedades de escoamento de um sólido a granel pela aplicação de diferentes estados de tensões.
- Lugar geométrico de deslizamento (LGD) – curva característica do material obtida a partir da determinação dos círculos de Mohr das tensões principais.
- Moega – parte convergente do silo.
- Peso específico ( $\rho$ ) – razão entre a massa de um produto pelo seu volume ocupado num determinado recipiente, a uma determinada temperatura.
- Regime estável – regime de estado consolidado criticamente.
- Sólido a granel – produto sólido, particulado, granulado ou pó.
- Tensão de cisalhamento ( $\tau$ ) – tensão que atua paralelamente a um plano considerado e que determina a condição necessária ao escoamento do material.
- Tensão de coesão ( $\tau_n$ ) – força cisalhante no produto sem consolidação.
- Tensão normal ( $\sigma$ ) – tensão que atua perpendicularmente a um plano considerado.

## RESUMO

Este trabalho foi desenvolvido para determinar as propriedades físicas, mecânicas e de escoamento dos grãos de mamona ‘Guarani’ visando o projeto e construção de silos com livre escoamento na descarga. A variedade Guarani foi escolhida em função do seu potencial para a colheita mecanizada, viabilizando o plantio em grandes áreas e tornando-se assim uma alternativa atraente no agronegócio. Foram determinados os valores das propriedades físicas e mecânicas utilizando métodos convencionais. Para os ensaios das propriedades de escoamento foi construído aparelho específico de cisalhamento com quatro diferentes tamanhos de células para operar em conjunto com a máquina universal de ensaios, seguindo a metodologia ASTM D6128. O valor médio obtido para a umidade foi de 7 %, base úmida, com pequena variação entre os três métodos de determinação utilizados. Os resultados da umidade de equilíbrio para a mamona, utilizando soluções salinas saturadas, confirmam que grãos de oleaginosas absorvem menor quantidade de água que os amiláceos. O ensaio de compressão, entre placas paralelas, resultou em valores médios da força máxima e deformação específica de 53,9 N e 11,98% com coeficientes de variação de 28,13% e 29.64%, respectivamente. O valor da função fluxo igual a 6 classifica os grãos de mamona como um produto de boa escoabilidade no estado não consolidado, segundo critério de Jenike. Nos ensaios de cisalhamento observou-se a influência do tamanho da célula nos valores das propriedades de escoamento. As células utilizadas possuíam diâmetros de 100, 150, 200 e 250 mm. As células de 100 e de 150 mm de diâmetro resultaram em valores médios de ângulo de atrito interno e efetivo ângulo de atrito interno de 29° e 33° e 26° e 32°, respectivamente, diferenciados entre si (Tukey,  $p < 0,05$ ). Nos ensaios de cisalhamento utilizando as células de 200 mm e 250 mm, manteve-se a mesma proporcionalidade da força normal aplicada nas células anteriores, porém o regime de estado criticamente consolidado no pré-cisalhamento não foi atingido e, portanto os valores obtidos não puderam ser considerados. Conclui-se que grãos de mamona interagem pouco com o ambiente e que o tamanho da célula influencia na determinação dos parâmetros de escoamento em virtude do tamanho e forma das partículas. Concluiu-se também que a consolidação dos grãos de mamona não pode ser atingida pelos procedimentos recomendados pela norma ASTM D6128, merecendo investigações futuras.

**Palavras-chave : grãos de mamona; silos; células de cisalhamento; Jenike**

## ABSTRACT

### DETERMINATION OF PHYSICAL, MECHANICAL AND FLOW PROPERTIES OF CASTOR BEANS 'GUARANI' AIMING THE STORAGE IN VERTICAL SILOS.

This study was carried out to determine physical, mechanical and flow properties of castor beans 'Guarani' to provide information to the design and construction of storage vertical silos with free flow discharge. The Guarani variety was chosen because of its potential for mechanized harvest, allowing production in large areas and thus becoming an attractive alternative business. The values of physical and mechanical properties were determined using conventional methods. To determine the flow properties values it was designed and built a specific shear device able to accommodate four different shear cell sizes to operate coupled with a universal testing machine. Values were obtained following the ASTM D6128 standard. The average value for moisture was 7,0%, wet basis, with little variation among the three methods used. The results of equilibrium moisture content for castor beans using saturated salt solutions confirm that oil seeds absorb much less water than those with high starch concentration. The compression tests between parallel plates resulted in average values of maximum force and specific deformation of 53.9 N and 11.98% with coefficients of variation of 28.13% and 29.64%, respectively. The mean value of 6 obtained for flow function ranks the castor beans in a non-consolidated state as a *good flowability* product, according to Jenike criterion. Shear tests showed the influence of cell size in the values of flow properties. The cells used had diameters of 100, 150, 200 and 250 mm. Cells with 100 and 150 mm in diameter resulted in average values of internal friction and effective internal friction angles of 29 and 33 and 26 and 32, respectively, which were significantly different from each other (Tukey,  $p < 0.05$ ). During the shear tests using 200 mm and 250 mm cells keeping the same normal pressure applied to prior tested cells it was not reached the critically consolidated state and therefore the values obtained could not be considered. It was concluded that castor beans showed little interaction with the surrounding environment and that the cell size influences the flow parameters values. It was also concluded that since the consolidation of castor beans could not be achieved by the ASTM D6128 recommended procedures, they need further investigations.

**Keywords:** castor beans; silos; shear cells; Jenike

## 1 – INTRODUÇÃO

A mamoneira (*Ricinus communis* L) é uma oleaginosa de relevante importância econômica e social, de cujas sementes é extraído um óleo de excelentes propriedades, de largo uso como insumo industrial.

A produção de mamona pode ser realizada em quase todo o país, excluindo-se alguns ecossistemas específicos como o Pantanal, a Amazônia e locais muito frios. Sua grande vantagem competitiva, no entanto, está no semi-árido da região nordeste, onde a resistência à seca, custo de produção baixo e a facilidade no manejo constituem uma das poucas opções agrícolas para a geração de renda no âmbito da agricultura familiar (AZEVEDO e BELTRÃO, 2007).

De acordo com os dados apresentados pela Companhia Nacional de Abastecimento (2006), o nordeste brasileiro, dada as condições climáticas favoráveis para o cultivo da mamona, concentra cerca de 90% de toda produção nacional favorecendo o desenvolvimento de diversas variedades desta oleaginosa, sobretudo no estado da Bahia que é o principal estado produtor. Nesta região, destacam-se as micro regiões de Irecê, Senhor do Bonfim, Jacobina, Seabra e Guanambi, onde se concentram as plantações.

A miscigenação de variedades provocou um hibridismo espontâneo com geração de frutos deiscentes, requerendo múltiplas colheitas por ano, em operação manual. A inexistência de culturas concorrentes e a instabilidade climática têm provocado pouca evolução na adoção de novas tecnologias, de acordo com relatos de Azevedo e Beltrão (2007) embora alguns pesquisadores tenham se empenhado em desenvolver variedades que permitam a colheita mecanizada.

De acordo com o diagnóstico apresentado pelo Serviço Brasileiro de Apoio a Micro e Pequenas Empresas (1995), a força de trabalho explora pequenas áreas sempre sob o modelo de tri consórcio (feijão, milho e mamona). A mamona assume papel social de grande relevância, assegurando uma contínua fonte de renda para as despesas da casa. Este sistema é pouco mecanizado, os agricultores utilizam sementes comuns e não usam insumos modernos como adubos e agrotóxicos.

Atualmente o Brasil ocupa, no contexto mundial, a terceira posição na produção de bagas e extração de óleo de mamona, ficando atrás apenas da Índia e da China, primeiro e segundo maiores produtores, respectivamente, que segundo o último relatório da Empresa

Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2006), respondem juntos por 76% da área mundial colhida e por 82% da quantidade produzida mundialmente.

Conforme Azevedo e Beltrão (2007), em termos de produção de mamona em bagas, o Brasil já ocupou a primeira posição mundial no período de 1978 a 1982, quando contribuía com 32% do montante produzido. Todavia, o país perdeu esta posição a partir de 1983 e em 2004 foi responsável apenas por 11% da quantidade mundial produzida de mamona em bagas.

Impulsionado pela expectativa de aumento de demanda em função da utilização para produção de biodiesel, a produção de mamona em baga no Brasil, safra 2008, registrou uma elevação da ordem de 34,5% em comparação à safra de 2007 de acordo com levantamento realizado pelo Grupo de Coordenação de Estatísticas Agropecuárias do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2008).

Toda a produção se destina exclusivamente à indústria de extração e refino para produção de óleo de mamona e seus derivados, utilizados em diversos segmentos industriais tais como os de resinas sintéticas, lubrificantes, adesivos, plastificantes, tintas entre muitos outros. Além do óleo, o processo de extração gera como subproduto a torta de mamona que é um fertilizante orgânico de larga utilização no cultivo de café, citros, outras frutíferas e hortaliças em geral.

Nas indústrias de extração de óleo de mamona, os grãos chegam acondicionados em sacos, geralmente plásticos de polipropileno (ráfia), apresentando grandes variações de peso. Como não existe padronização no local da colheita, o peso dos sacos com o produto, varia de 30 a 70 kg, conforme amostragem aleatória realizada nas dependências da fábrica da empresa A. Azevedo Indústria e Comércio de Óleos Ltda, localizada em Itupeva/SP.

A carga total dos caminhões é descarregada utilizando-se mão de obra da própria indústria. Os sacos com produto são empilhados em galpão coberto, podendo-se utilizar de esteiras transportadoras a fim de que o empilhamento de sacos ocorra de maneira a ocupar a máxima capacidade disponível como ilustrado na figura 1a. Durante o processo de extração do óleo, os sacos com os grãos de mamona são removidos das pilhas e transportados até o ponto de alimentação das moegas (figura 1b). Em seguida, a mamona passa pela etapa de prensagem a fim de se extrair o óleo.

Portanto, todo o manuseio dos grãos tanto na descarga dos caminhões quanto na utilização no processo de prensagem demandam mão de obra operacional como se pode

observar na figura 1c. Esta atividade em geral está associada aos problemas ergonômicos devido ao peso excessivo e a frequência das operações de carregamento e descarga.



(a)



(b)



(c)

Figura 1 – Manuseio da mamona na descarga e na utilização no processo de extração. (Fonte: A. Azevedo Indústria e Comércio de Óleos Ltda)

Por outro lado, o acondicionamento em embalagens plásticas encarece a mercadoria e provoca o inconveniente da geração de resíduos plásticos que deverão ser reciclados, quando possível, ou descartados, podendo agravar as condições ambientais já tão comprometidas por objetos que necessitam de longo período para se degradar.

Assim sendo, a armazenagem dos grãos de mamona a granel em silos se torna uma alternativa bastante atraente, uma vez que facilita o manuseio na descarga bem como na sua utilização durante o processo de extração e refino do óleo.

Informações sobre a estocagem dos grãos de mamona em silos não foram encontradas na busca bibliográfica realizada, assim como o conhecimento sobre as suas propriedades físicas associadas ao escoamento dos grãos armazenados em silos é bastante restrita.

Desta forma, o presente trabalho visa à determinação de propriedades físicas dos grãos de mamona e, assim, verificar em que condições se estabelece o livre escoamento dos grãos armazenados. Especificamente, para determinação do ângulo de atrito interno, células de cisalhamento translacional adequadas às dimensões dos grãos de mamona foram construídas para que ensaios de cisalhamento fossem realizados e a partir dos dados obtidos ser possível caracterizar as funções de escoamento.

A escolha da variedade Guarani para a realização dos experimentos deveu-se ao fato desta cultivar permitir também a colheita mecanizada e assim apresentar grande potencial de cultivo viabilizando o plantio em grandes áreas. Os grãos utilizados nos ensaios foram colhidos das mamoneiras provenientes da região de São Luiz Gonzaga/RS, safra 2008.

A colheita mecanizada da plantação de mamona variedade Guarani pode ser verificada também na região do Rio São Francisco, em Minas Gerais, especificamente no município de Manga, confirmando a potencialidade desta cultivar como boa opção para plantio até então concentrada na cultura do milho e feijão.

Como as etapas de colheita e beneficiamento, segundo próprios agricultores, são as mais complexas e dispendiosas, a mecanização torna-se uma alternativa bastante viável economicamente. Segundo informações de agricultores, a mecanização da colheita permite um rendimento da ordem de 20 toneladas por dia que representa 10 vezes mais quando comparada a colheita manual realizada por 4 pessoas.

Outras variedades, entretanto por não permitirem a mecanização, tem suas colheitas escalonadas ocupando mão de obra por longos períodos. Nestas condições, a cultura da

mamona ainda é um negócio bastante viável para a agricultura familiar do semi-árido nordestino gerando emprego e renda no meio rural (CARVALHO, 2005).

O objetivo geral do presente estudo é determinar propriedades físicas, mecânicas e de escoamento dos grãos de mamona variedade Guarani que possam fornecer elementos capazes de auxiliar no projeto de silos que permitam a armazenagem e a pronta utilização destes grãos no instante da descarga. O objetivo específico é a determinação das propriedades de escoamento, com a construção de aparato de cisalhamento translacional com células de tamanhos diferentes, para que se possa investigar a influência destas nos resultados do ângulo de atrito interno e na tensão de coesão para os grãos de mamona.

## **2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 – Mamona**

A mamona é o fruto da mamoneira que é uma planta da família das *Euforbiáceas*, do gênero *Ricinus* e da espécie *communis* L. A mamoneira cultivada no Brasil é um arbusto cuja parte aérea é ramificada, de folhas com coloração verde escura. Os tipos comerciais existentes, dependendo das condições ambientais e das variedades, podem variar, em altura, de 1 a 4 metros.

Conforme relata Carvalho (2005), os cultivares recomendados para plantio em escala comercial devem apresentar características tais como: a) produtividade acima de 1.500 kg de bagas por hectare; b) produtividade acima de 3.000 kg em regime de irrigação; c) resistência ou boa tolerância às pragas e às doenças; d) teor de óleo superior a 45% (b.u); e) teor de ácido ricinoleico acima de 89%; f) frutos semi-indeiscentes.

Trata-se de uma planta que é geralmente monóica e os racemos apresentam flores femininas na parte superior e masculinas na parte inferior. Apresenta um sistema radicular pivotante, com raízes laterais bem desenvolvidas. É uma planta tolerante à seca e exigente em calor e luminosidade, que encontrou no nordeste brasileiro condições excepcionais de desenvolvimento (CARVALHO, 2005).

É uma planta que se desenvolve preferencialmente em clima tropical e subtropical com chuvas regulares no início de seu crescimento e períodos secos durante a maturação dos frutos. Existem muitas variedades de mamoneira que são recomendadas para o plantio de acordo com cada região. Dentre as cultivares mais conhecidas destacam-se a BRS 149 Nordestina, a BRS 188 Paraguaçu, a Sangue-de-boi, a Preta-Pernambucana, a Paraibana, a Guarani, a IAC 66 entre outras.

De acordo com Beltrão et al. (2001), os frutos de mamona são geralmente compostos de 3 grãos, podendo ser classificadas como deiscentes ou indeiscentes de acordo com a abertura destes frutos durante o amadurecimento. O fruto da mamona pode ser liso ou coberto com estruturas parecidas com espinhos. No interior dos frutos da mamoneira, conhecidos como bagos ou bagas, encontram-se os grãos ou sementes que apresentam formas típicas oblongas achatadas de cor, forma, tamanho e peso variáveis.

Segundo Moshkin (1986), a semente da mamoneira varia de 8 a 30 mm de comprimento, de 6 a 15 mm de largura e 4 a 10 mm de espessura. Em média, o grão de

mamona é constituído de 65% de amêndoa e 35% de casca e pesa de 0,1 a 1,0 g por semente. A figura 2 apresenta algumas das variedades existentes.

Conforme Rittner (1996), a classificação comercial considera como sementes miúdas aquelas que na análise granulométrica passaram pela abertura oblonga de 6,5 x 13,0 mm, sementes médias as que ficaram retidas na peneira de abertura oblonga de 6,5 x 13,0 mm e passaram em peneira de abertura 7,0 x 14,0 mm e graúdas as que ficaram retidas nesta última.



Figura 2 - Grãos de mamona com diferentes formas e dimensões.

(Fonte: A. Azevedo Ind. e Com. de Óleos Ltda).

Um envoltório constituído de uma película lisa e resistente protege a polpa das ações mecânicas e da umidade. É nesta polpa branca denominada por albúmen que se concentra o óleo, constituindo quase a metade da massa de um grão inteiro.

As sementes podem variar de um cultivar para outro, em várias características, como cor, tamanho, massa, forma, presença de carúncula ou não e maior ou menor aderência do tegumento ao endosperma. Usualmente se apresenta na forma ovalada, mosqueada com manchas de cores variadas entre o preto e o marrom avermelhado (RITTNER, 1996).

Outra classificação que se pode dar às sementes é apresentada por Veiga et al. (1989), citado por Azevedo e Beltrão (2007), conforme a coloração: rajadas – sementes que possuem duas cores formando desenhos alongados; pintadas – sementes com duas cores e pintas

pequenas que dificultam a identificação da cor predominante; pontuadas – apresentam cor predominante que ocupa a maior área e uma cor secundária que surge como pontos distribuídos irregularmente; cor única – o tegumento das sementes apresenta uma única cor.

O tegumento externo da semente é representado pela casca dura e quebradiça, tendo ainda uma película interna que envolve o albúmen, que é branco, compacto e rico em óleo, conforme descreve Ribeiro Filho (1966). Uma análise típica da semente brasileira apresentada por Rittner (1996) conforme tabelas 1 e 2 mostra os seguintes resultados em base úmida:

Tabela 1 – Análise físico-química típica da semente de mamona.

<b>Propriedades</b>	<b>% Base Úmida</b>
Umidade	5,0
Teor de Óleo	45,0
Proteínas	20,0
Cinza	4,0
Fibras	16,0

Fonte : RITTNER (1996)

Tabela 2 – Análise cromatográfica dos ácidos graxos presentes nos grãos de mamona.

<b>Características</b>	<b>% Base Úmida</b>
Ácido Ricinoleico	89,5%
Ácido Oleico	3,0
Ácido Linoleico	4,2
Ácido Dihidroxi Esteárico	0,7
Ácido Esteárico	1,0
Ácido Palmítico	1,0
Ácido Eicosanóico	0,3
Ácido Linolênico	0,3

Fonte: RITTNER (1996)

## **2.2 – Processo de extração e refino do óleo de mamona**

A etapa inicial consiste na limpeza dos grãos recebidos por intermédio da utilização de peneiras vibratórias, cuja finalidade é separar os frutos que permaneceram inteiros comumente denominadas de “marinheiros ou capotes” e as impurezas residuais como terra, pedras, elementos metálicos entre outros, das sementes que serão processadas.

Os grãos selecionados são transportados por meio de roscas transportadoras ou esteiras para o cozinhador instalado sobre a prensa helicoidal “tipo expeller” de prensagem contínua, onde, após aquecimento adequado, serão prensadas mecanicamente para extração do óleo. O resíduo gerado desta prensagem é a torta de mamona que possui ainda quantidade considerável de óleo com 12 a 15% na base de torta úmida, que será retirada através da utilização de solvente específico e em equipamentos adequados. O produto obtido deste processo é denominado farelo de mamona com teor de óleo residual em torno de 1 a 2% na base de farelo úmido. O fluxograma do processo é apresentado na figura 3.

O óleo obtido é devidamente refinado, passando pelas etapas de degomagem, centrifugação e clarificação podendo ser comercializado como óleo tipo 1, tipo 3, extra pale ou refinado especial, dependendo de suas características finais de qualidade.

Conforme a tabela 2 verifica-se que o óleo de mamona possui uma característica particular que o difere de outros óleos vegetais que é a alta concentração em ácido ricinoleico. Este ácido graxo possui, em sua estrutura química, grupos funcionais bastante reativos permitindo a obtenção de vários produtos derivados tais como o ácido 12-hidróxi esteárico, óleo de mamona desidratado, ácido ricinoleico polimerizado em diferentes graus de polimerização entre outros. As aplicações do óleo de mamona e derivados são as mais diversas: fabricação de resinas poliuretano, plastificantes, graxas especiais, tintas e vernizes, espumas, emulsificantes, isolantes térmicos, espumas flexíveis, lubrificantes e muitos outros produtos.

O farelo de mamona gerado é geralmente comercializado como fertilizante orgânico devido às excelentes propriedades físico-químicas que o caracterizam como a quantidade de matéria orgânica, o pH próximo do neutro, a granulometria, etc. Pode ainda ser transformado em ração animal, após processo de destoxicação com a retirada dos elementos tóxicos e alergênico nela contidos (OLIVEIRA, 2007).

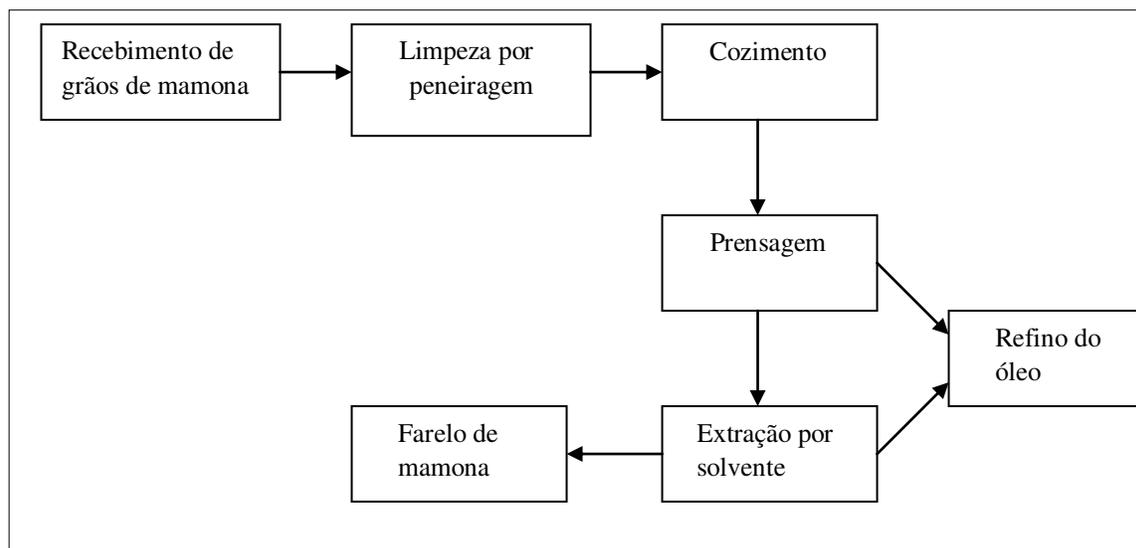


Figura 3 – Fluxograma da extração e refino do óleo de mamona e farelo de mamona. (Fonte: A. Azevedo Ind. Com. de Óleos Ltda)

### **2.3 – Produção de grãos de mamona**

No cultivo da mamona, uma vez atingido o estágio de maturação, os frutos são colhidos manual ou mecanicamente e passam pela etapa de secagem que poderá ser natural ou artificial. Na secagem natural os grãos são espalhados em terreiros de alvenaria ou mesmo de chão batido em camadas finas e uniformes de 5 a 10 cm de espessura, por um período de 4 a 15 dias. Os frutos são revolvidos periodicamente durante o dia e cobertos com lona plástica no final da tarde a fim de evitar a umidade do período da noite. (AZEVEDO e BELTRÃO, 2007).

A secagem artificial é recomendada para produções com área plantada acima de 50 hectares e consiste na utilização de secadores mecânicos para a retirada de umidade dos grãos, sendo a temperatura ideal de secagem na faixa de 50 a 55 °C

A etapa seguinte consiste em descascar os frutos e recolher os grãos por meio manual ou utilizando descascadores mecânicos. No caso de frutos deiscentes verifica-se a ocorrência da abscisão onde a semente é arremessada do próprio cacho. Os frutos semi-deiscentes, quando secos naturalmente ou artificialmente abrem-se com facilidade, porém alguns destes retêm a semente em seu interior sendo necessário o descascamento por meio de batidas com varas ou chicotes de borracha ou eventualmente com descascadores mecânicos em casos de grandes áreas de plantio.

Os grãos limpos e separados da casca são acondicionados em sacos plásticos ou fibra natural. Devidamente embalados, mas sem qualquer padronização de peso, os grãos são armazenados nas instalações dos próprios agricultores ou transferidos para os armazéns distribuidores. Em geral os sacos com grãos de mamona atingem pesos que ultrapassam 40 kg dificultando o manuseio tanto no carregamento quanto na descarga de caminhões.

### **2.4 – Comercialização e transporte dos grãos de mamona**

Da mesma forma que ocorre na movimentação de carga entre agricultor e o distribuidor, a operação se repete entre o distribuidor e a indústria que se encarrega de receber o material ensacado, descarregar e novamente armazená-los em pilhas compatíveis com a altura do galpão.

Assim, a demanda por espaço para armazenagem acarreta a necessidade de investimentos em áreas cobertas que abriguem o produto após o recebimento, fato que se evidencia ainda mais nos períodos de entre safra quando se faz necessário manter os estoques a níveis que não comprometam o curso normal da produção de óleo de mamona. No Brasil,

este período corresponde aos meses de dezembro a março na região nordeste, principal fornecedor do produto.

## **2.5 – Armazenagem de grãos**

O setor agrícola brasileiro vem contribuindo para o crescimento econômico e a ele são delegadas importantes tarefas como, por meio do aumento da produção e da produtividade, ofertar alimentos e matérias-primas para o mercado interno; gerar excedentes para exportação, ampliando a disponibilidade de divisas; transferir mão-de-obra para outros setores da economia; fornecer recursos para estes setores e consumir bens produzidos no setor industrial (SILVA, 2000).

O Brasil, segundo dados da Companhia Nacional de Abastecimento (2008), tem capacidade estática para armazenar cerca de 123 milhões de toneladas de produtos nos armazéns disponíveis, sendo que 21% são destinados à armazenagem convencional e 79% a granel.

### **2.5.1 – Armazenagem convencional para produtos ensacados**

São estruturas de fundo plano, onde os produtos são armazenados em blocos. Geralmente são construídas em alvenaria, estruturas metálicas ou mistas e apresentam características técnicas necessárias à boa armazenagem como ventilação, impermeabilização do piso, iluminação, pé direito adequado e cobertura (SILVA, 2000).

Como ocorre com outros produtos agrícolas nas indústrias, quase a totalidade do armazenamento de grãos de mamona é feita utilizando este sistema. Os caminhões após a pesagem seguem aos galpões onde serão descarregados manualmente, utilizando-se esteiras transportadoras, quando possível. Basicamente os sacos contendo os grãos de mamona são posicionados na cabeça dos operários que executam a descarga e vão sendo empilhados em camadas até atingirem a altura permitida pelo telhado do galpão. Portanto, a mão de obra empregada demanda grande esforço físico o que acarreta, com frequência, problemas de ordem ergonômica.

### **2.5.2 – Armazenagem de produtos a granel em silos**

Diferentemente do sistema convencional, a armazenagem de produtos a granel requer menos mão de obra além de ser um processo mais rápido e limpo, bastando abrir as comportas existentes nos caminhões graneleiros, a exemplo do que ocorre com a soja.

Considerando-se a importância das estruturas de armazenamento para a qualidade final da maioria dos produtos agrícolas, muita importância deve ser dada a estudos sobre as possíveis alternativas para o armazenamento, destacando-se dentre elas, a utilização de silos que, igualmente para a mamona, torna-se uma alternativa viável.

Ao manusear os produtos armazenados a granel em silos com descarga por gravidade é fundamental que os movimentos de entrada e saída destes produtos ocorram de forma efetiva e eficiente.

A granelização consiste na conversão das estruturas construídas para armazenar sacaria em estruturas para armazenagem a granel. Assim, nos casos de armazenamento granelizado a principal meta de um projeto de silo de descarga por gravidade consiste em garantir o escoamento ininterrupto dos produtos armazenados, mantendo-se também a integridade da estrutura do silo, sendo necessário para tanto, conhecer as propriedades físicas e de escoamento destes produtos (CALIL JR, 1990; MILANI, 1993).

## **2.6 – Silos para armazenagem de grãos**

Silos são células individualizadas, construídas em chapas metálicas, de concreto ou de alvenaria. Geralmente possuem forma cilíndrica, podendo ou não ser equipadas com sistema de aeração. Estas células apresentam condições necessárias à preservação da qualidade do produto, durante longos períodos de armazenagem. Quando agrupados em uma unidade de recebimento e processamento, são denominados “bateria” de silos (SILVA, 2000).

Holdich (2002) define o termo silo como sendo utilizado para designar o conjunto das partes que são: a) tremonha – secção cônica e convergente de um reservatório de armazenagem de um determinado produto sólido; b) secções paralelas, geralmente cilíndricas ou retangulares, que caracterizam a parte maior do reservatório e que também é denominada “bin” da nomenclatura americana; c) demais partes que compõem o conjunto de armazenagem.

Os silos podem ser classificados em horizontais e verticais, dependendo da relação que apresentam entre a altura e o diâmetro. Os verticais se forem cilíndricos podem possuir fundo plano ou fundo em forma de cone ou cunha para facilitar a descarga. De acordo com sua posição em relação ao nível do solo, classificam-se em elevados ou semi-enterrados.

Silva (2000) define silos horizontais como sendo os que apresentam as dimensões da base maior que a altura e, comparados aos verticais, e em geral exigem menor investimento

por tonelada armazenada. Da mesma forma que os verticais, os horizontais podem ter fundo plano ou fundo em forma de cunha sendo que a extração do produto, em geral, se faz por meio de roscas transportadoras.

Por não caracterizar um produto agrícola de grande volume de manipulação, poucos estudos foram encontrados sobre as características físicas dos grãos de mamona que possibilitem construir silos capazes de permitir seu livre escoamento após diferentes períodos de armazenamento.

Gonelli (2007) em seus estudos pesquisou e determinou a variação das propriedades físicas e mecânicas dos grãos de mamona durante a secagem e o armazenamento. Utilizando outras variedades de sementes de mamona, Olaoye (2000) determinou algumas propriedades físicas importantes para a construção de equipamentos de processamento.

Especificamente para as indústrias que produzem óleo de mamona, dentre os problemas mais comumente encontrados estão: a disponibilidade de mão de obra para carga e descarga de material assim como o manuseio na produção, espaço suficiente para armazenar quantidades que possam atender às necessidades do processo produtivo e amenizar os efeitos da sazonalidade e o descarte de sacos plásticos utilizados pelo agricultor no acondicionamento dos grãos de mamona.

Uma alternativa viável capaz de otimizar o espaço na indústria e proporcionar um manuseio com sensível redução do esforço físico humano é a armazenagem em silos, a granel, que possam comportar quantidades adequadas ao consumo de cada planta industrial ou entreposto de distribuição.

A determinação das características dos produtos sólidos e seus componentes quando armazenados em silos têm sido objeto de estudo de muitos pesquisadores ao longo dos tempos e a completa caracterização serve de base para que projetistas e engenheiros possam dimensionar não só os silos, mas também o tipo de moega capaz de promover a retirada do produto ali contido com a maior eficiência possível além dos demais equipamentos de transporte.

Mohsenin (1986) relata a importância da necessidade de primeiro conhecer as características físicas do produto a ser armazenado, sendo estas uma fonte essencial de dados para a engenharia no que se refere ao projeto de máquinas, estruturas de armazenagem, processos e controles. O valor destas informações básicas não é importante somente para os

engenheiros, mas também úteis para aqueles que de posse destas propriedades podem encontrar novos usos para este produto estudado.

Da mesma forma Schulze (2007) enfatiza a importância do conhecimento das propriedades de escoamento de um pó ou de outro tipo de produto a granel para o projeto de silos e outros equipamentos correlatos a fim de evitar problemas na operação. Ainda mais, relata a necessidade de se conhecer aspectos qualitativos dos produtos a serem armazenados tais como a distribuição granulométrica, formato das partículas, composição química, umidade e temperatura.

Pelo fato dos sólidos possuírem características diferentes dos fluídos, torna-se difícil projetar silos que garantam escoamento contínuo assegurando rapidez e viabilidade técnica e econômica capazes de atender às necessidades de utilização. Para produtos agrícolas, igualmente aos demais produtos como minérios e químicos faz-se necessário conhecer as propriedades específicas que caracterizam o escoamento após terem sido armazenados em silos.

O tipo de escoamento que irá ocorrer em um silo determina as características de descarga do produto, se haverá ou não a formação de zonas sem movimentação dentro do próprio silo, o tipo de segregação que irá ocorrer e se o silo poderá ser esvaziado completamente quando necessário. O tipo de escoamento determina também a distribuição das pressões nas paredes do silo (CALIL JR., 1990).

O tipo de escoamento que poderá ocorrer na descarga de um silo deve ser considerado quando o silo for projetado. Características como uniformidade de descarga, forma de alimentação, tempo de conservação do produto armazenado, área disponível para construção e o custo da construção interferem na escolha do tipo do projeto a ser executado (TEIXEIRA, 2006).

## **2.7 – Tipos de escoamento**

O escoamento de um sólido a granel depende das forças de coesão existentes entre as partículas individualmente sendo que elas podem ser resultado de diferentes mecanismos: interação entre partículas muito finas, presença de umidade no produto, interação de forças de Van der Waals entre as partículas do produto oriundas das condições descritas adiante.

A presença de água (umidade) pode solubilizar os sais contidos no produto e ocasionar o fenômeno da cristalização na região de contato entre as partículas deste produto e

promover assim a formação de “pontes líquidas” que dificultarão o escoamento após o armazenamento em silos.

Muitos sólidos, depois de armazenados por longo período continuam a ganhar forças de coesão que dificultarão o escoamento no momento da retirada do silo. Este efeito é chamado de consolidação com o tempo de repouso do produto. Muitos são os mecanismos que podem atuar nesta condição de armazenamento e segundo Schulze (2007) e Marinelli e Carson (2001) a formação de arcos ou pontes coesivas podem ter origem a partir de várias condições a que o produto foi submetido, a saber:

a) cristalização de substâncias que inicialmente estavam dissolvidas na água presente no próprio produto, na forma de umidade ou se formaram devido à absorção da umidade do ambiente a que estavam submetidas.

b) formação de pontes líquidas com posterior solidificação de sais devido ao armazenamento a temperaturas elevadas, próximas à temperatura correspondente ao ponto de fusão de determinadas substâncias contidas no produto.

c) formação de arco mecânico decorrente da interação de partículas de formas irregulares. Partículas fibrosas com tamanhos variados tendem a formar estruturas mecanicamente estáveis que impedem o livre escoamento.

d) deformação plástica no contato entre as partículas ocasionando aumento da área de contato entre as partículas podendo gerar um aumento das forças de coesão entre elas.

e) ocorrência de processos biológicos com desenvolvimento de fungos propiciando a aglomeração das partículas do produto armazenado.

f) aglomeração devido à presença de forças eletrostáticas entre as partículas do produto armazenado.

Os tipos de obstruções observados no momento da descarga e relatados por Marinelli e Carson (2001), podem ser basicamente identificados como arco mecânico entre partículas e coesão entre as partículas, conforme ilustrado na figura 4.

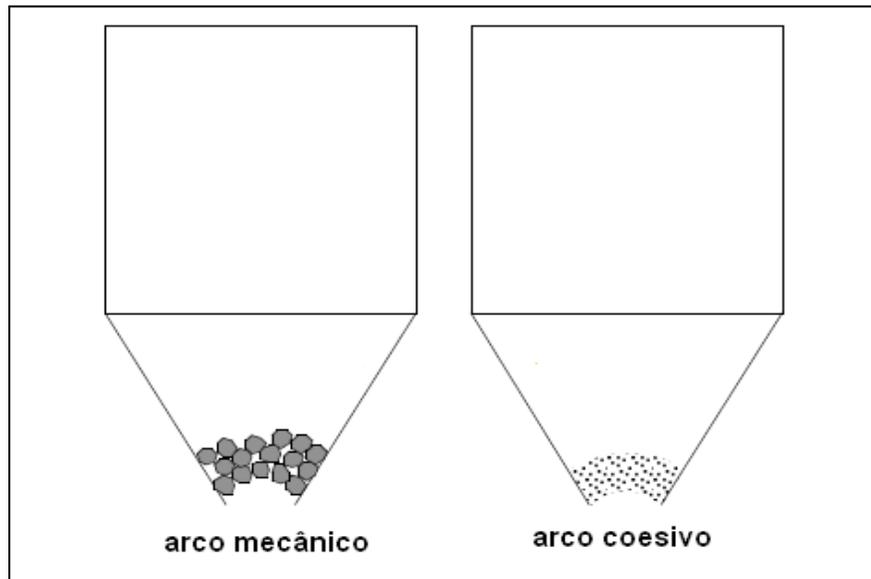
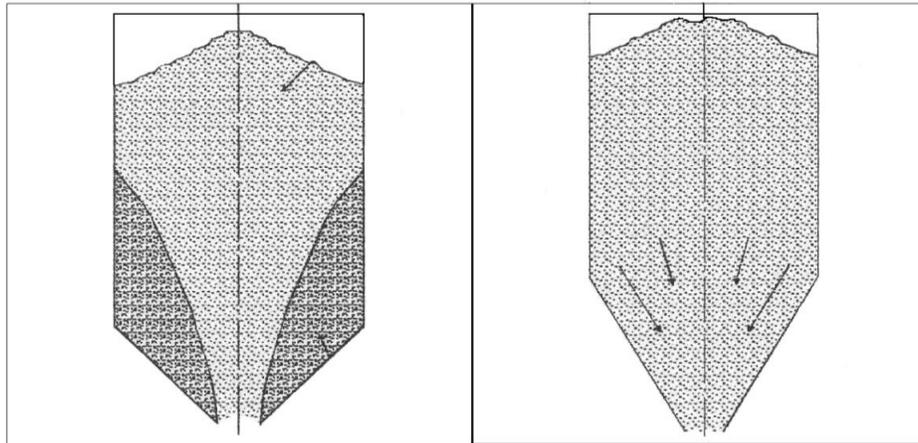


Figura 4 – Formas de bloqueio do escoamento de produtos.

(Fonte: MARINELLI e CARSON, 2001)

Como regra, em um sólido a granel as forças coesivas tendem a serem maiores com o decréscimo do tamanho das partículas. Em situações em que o produto, quando armazenado, é submetido a tensões externas verifica-se um aumento na força de compressão entre partículas gerada pelo aumento da área de contato entre elas. Esta condição poderá levar a um aumento da coesividade em função da deformação plástica dificultando a retirada do produto do interior do silo.

Para efeito de estudo foram considerados apenas dois tipos de escoamento distintos como mostra a figura 5 ou em determinadas situações a mistura deles conforme descrito por Fortes Filho (1985). O que define qual tipo de escoamento irá ocorrer no instante da descarga são as características físicas do produto armazenado, a geometria do silo e da tremonha e, para o escoamento tipo massa, a rugosidade das paredes do silo.



1- tipo funil

2 - tipo massa

Figura 5 - Tipos de escoamento do produto no interior do silo.

(Fonte: FORTES FILHO, J.,1985)

### 2.7.1 – Escoamento tipo massa

Ocorre em geral para produtos granulares pouco coesivos, onde toda a massa contida no silo se movimenta homogeneamente escoando de forma uniforme e as partículas em contato com a superfície do silo sofrem cisalhamento, como pode ser observado na figura 7. Escoamento de massa é o modelo ideal onde todo o produto se movimenta para a saída através da abertura da moega.

De acordo com Fortes Filho (1985) no escoamento tipo massa, também denominado global, o produto armazenado escoar de maneira uniforme onde raras são as ocorrências de interrupções. Outra característica importante é que as primeiras partículas que entram são as primeiras que saem evitando assim que haja segregação do produto. Nesta modalidade de escoamento o peso específico do produto retirado praticamente se mantém constante e a altura do silo exerce pouca influência no escoamento.

A definição do material da parede a ser utilizado na construção do silo é decisiva, pois a rugosidade das paredes irá interferir no escoamento do produto armazenado podendo comprometer as etapas subsequentes ao armazenamento e ainda fazer-se necessária a instalação de dispositivos auxiliares que promovam o escoamento esperado.

Marinelli e Carson (2001) em seu trabalho relatam que o escoamento tipo massa tem relação direta com o ângulo de atrito do produto armazenado e a parede do silo que por sua

vez é afetado diretamente por: a) material de construção da parede do silo – em geral, quando mais liso for a superfície da parede, menor é o ângulo de atrito com a parede e, portanto menor poderá ser a inclinação da tremonha; b) temperatura de armazenamento do produto e das paredes do silo; c) umidade – ocorrência de migração de umidade das paredes para o produto nos casos em que este produto foi introduzido a temperaturas mais elevadas que o próprio silo; d) corrosão – dependendo do material utilizado na fabricação, a oxidação das paredes do silo eleva o atrito superficial; e) tempo de armazenamento – muitos materiais aderem à superfície quando armazenados por um período sobre pressão o que resulta em ângulos de atrito com a parede maiores, necessitando assim de tremonhas com inclinações maiores.

### **2.7.2 – Escoamento tipo funil**

Um segundo tipo de escoamento, tipo funil, ocorre quando o produto inicia o movimento através de um funil, cujas paredes são formadas pelo próprio produto onde se observa um caminho preferencial de escoamento do produto. Assim, esta forma de escoamento é indesejável para produtos que sofrem deterioração após determinado período de ensilagem.

O movimento das partículas ocorre das bordas para dentro tão logo se inicie a retirada do material pela abertura da moega, sendo bastante prejudicial para produtos cujas partículas segregam. Uma vez formado o canal preferencial, todo o deslocamento restante irá acontecer por este caminho sob a forma de jorros intermitentes.

O cisalhamento ocorrerá entre as camadas das partículas, o que pode representar certa vantagem para produtos compostos de partículas duras e abrasivas por apresentar menor desgaste das paredes do silo. Para este tipo de escoamento deve-se considerar a ocorrência do fenômeno da segregação das partículas que compõem o produto armazenado.

Marinelli e Carson (2001) enfatizam também que para um produto armazenado que apresente simultaneamente, como características: partículas maiores que 6 mm, livre da presença de forças coesivas, sem problemas de degradação quando armazenados e o fenômeno da segregação não for relevante para a etapa seguinte ao armazenamento, o silo com escoamento tipo funil é a forma mais econômica de armazenar um produto a granel.

Caso seja possível a construção deste tipo de silo, com relação altura/diâmetro baixa, pode-se ter uma economia adicional na instalação devido à possibilidade de utilização de

estruturas mais baixas com redução nos custos do sistema de elevação do produto, tais como elevadores de canecas ou roscas transportadoras.

### 2.7.3 – escoamento misto

Uma terceira modalidade é a ocorrência de um escoamento misto. Inicialmente se observa o escoamento de massa e posteriormente, devido às forças de adesão das partículas com a superfície do silo, o material passa a escoar em regime de funil.

Uma vez definido o tipo de silo selecionado para um determinado produto faz-se necessário definir a geometria da tremonha mais adequada para que o escoamento possa ser o mais eficiente possível. As geometrias de tremonhas mais comumente utilizadas são a cônica, piramidal e em forma de cunha, sendo que a última apresenta determinadas vantagens sobre as demais tais como menor inclinação das paredes da tremonha, que conseqüentemente pode permitir a redução na altura do silo e assim reduzir os custos de investimento dos equipamentos necessários ao transporte do produto; menor diâmetro do bocal de saída da tremonha possibilitando a instalação de sistemas transportadores do produto de menores dimensões e, portanto, de menor custo; maior vazão na saída do produto através da tremonha pelo fato de apresentar maior área seccional de escoamento.

### 2.8 – Formas de tremonhas

A figura 6 ilustra as formas de tremonha mais comuns utilizadas em silos para produtos agrícolas. Pode-se ainda encontrar variações destas tais como saídas duplas ou triplas no caso das cônicas ou piramidais.

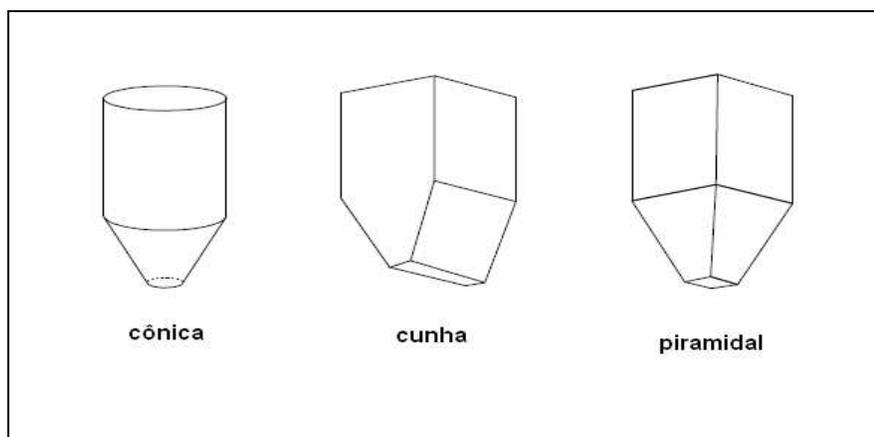


Figura 6 – Formas de tremonhas. (Fonte: TEIXEIRA, 2006)

Jenike (1964) e Calil Jr. (1990) em seus trabalhos apresentaram diagramas que mostram a relação entre o ângulo de atrito do produto com a parede do silo e os diferentes ângulos de tremonha possíveis a fim de determinar o tipo de escoamento a ser estabelecido por este produto. A figura 7 mostra diagramas comparativos que representam uma tremonha em forma de cunha e outra cônica, com as respectivas regiões de incerteza entre os tipos de escoamento tipo massa e funil de um produto. Esta região representa uma margem de segurança para suportar pequenas variações de características do produto e projeto da tremonha.

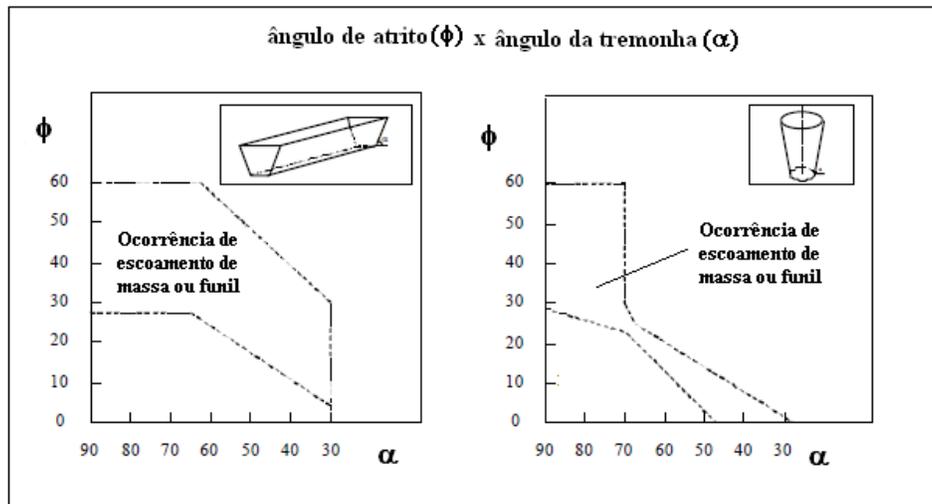


Figura 7 – Tipos de escoamento em silos com tremonha em forma de cunha e cônica. (Fonte: SILVA, F.S.,2003)

Outra propriedade importante de escoamento a ser considerada é a função fluxo ou escoamento, determinada a partir tensão máxima de consolidação e a tensão não confinada de deslizamento. A figura 8 apresenta curvas de diferentes produtos sendo que cada produto apresenta uma resistência em escoar.

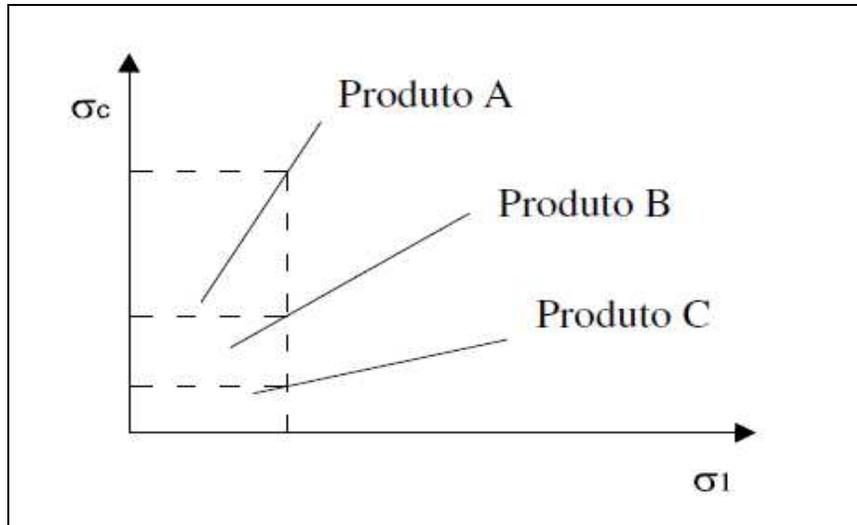


Figura 8 – Representação das curvas de escoamento para diferentes produtos.

(Fonte: TEIXEIRA, 2006).

Esta resistência decorre da tendência que cada produto apresenta ao ser armazenado. Cada produto apresenta, para o mesmo aumento de tensão de consolidação, diferentes tensões não confinadas de ruptura resultando em diferentes inclinações para os gráficos da função fluxo.

A classificação utilizada por Calil Jr. (1990), apresentada na tabela 3, assim como as curvas da figura 9 seguem critérios segundo o qual a função fluxo ou escoamento FF é a razão entre  $\sigma_1/\sigma_c$ . Como será apresentado posteriormente,  $\sigma_1$  representa a tensão máxima de consolidação e é igual a tensão principal do maior semicírculo de Mohr enquanto  $\sigma_c$ , a tensão não confinada de deslizamento, representa a tensão principal do menor semicírculo.

Tabela 3 – Classificação da Função Fluxo dos produtos (FF).

$FF < 2$	Produto muito coesivo
$2 < FF < 4$	Produto coesivo
$4 < FF < 10$	Produto que escoar com facilidade
$FF > 10$	Produto de escoamento livre

Fonte: CALIL JR, 1990

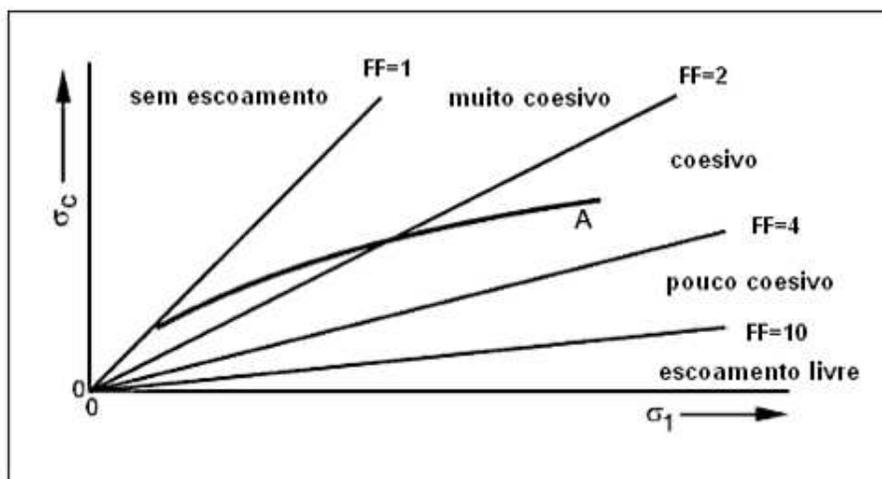


Figura 9 – Classificação de acordo com a função fluxo ou escoamento.  
(Fonte: CALIL JR, 1990)

### 2.9 – Vantagens e desvantagens da armazenagem convencional em sacos

No Brasil, de acordo com dados da Conab (2008), 21% dos grãos ainda são armazenados em sacos. Este tipo de armazenagem possui algumas vantagens em relação ao sistema a granel e, portanto devem ser consideradas no momento da decisão do empreendimento. Este sistema oferece condições de manipular quantidades e tipos variados de produtos simultaneamente; permite individualizar produtos dentro de um mesmo lote; parte do lote pode ser removida em caso de deterioração e menor investimento inicial da obra.

Como desvantagens podem ser consideradas a necessidade de grande espaço por quantidade estocada e elevado custo de movimentação por demandar muita mão-de-obra.

### 2.10 – Vantagens e desvantagens da armazenagem a granel em silos

A granelização dos grãos de mamona na indústria apresenta como vantagens a maior facilidade e rapidez na descarga dos caminhões; menor esforço físico humano aplicado na movimentação das cargas e descargas; dispensa da utilização de embalagens; possibilidade de diversificação de transporte uma vez que permite o carregamento de caminhões caçamba; e menor área de galpão destinada à armazenagem.

Como desvantagens deste sistema de armazenagem destacam-se a necessidade de investimento inicial alto em infra-estrutura civil e de equipamentos para o manuseio do produto além da manutenção de todo o sistema de descarga.

Conforme Fitzpatrick et al (2004), um dos maiores problemas da indústria que utiliza silos para armazenagem de produto é obter um escoamento do produto na moega e nos alimentadores sem que ocorra derramamento excessivo ou geração de pó em demasia. A pior situação ocorre quando não há escoamento com a abertura da tremonha. Isto ocorre quando o produto forma um arco coesivo na saída, com força suficiente para suportar a pressão sobre si próprio.

Fortes Filho (1985) relata que os fatores que influenciam o comportamento de um produto durante a descarga são a rugosidade da parede do silo, o ângulo de atrito interno, a forma e a inclinação das paredes da moega e o tamanho do orifício de saída.

O objetivo de um projeto de silo é prevenir a formação de obstruções através da determinação da dimensão da boca de descarga, da inclinação ideal para a tremonha, da quantidade de bocais de descarga e da forma construtiva da tremonha.

A armazenagem a granel em silos é bastante adotada para outras oleaginosas como a soja e o milho. Dentro dos silos que podem ser metálicos ou de alvenaria, os grãos podem escoar através da moega por meio de diferentes tipos de escoamento, conforme apresentados na figura 10.

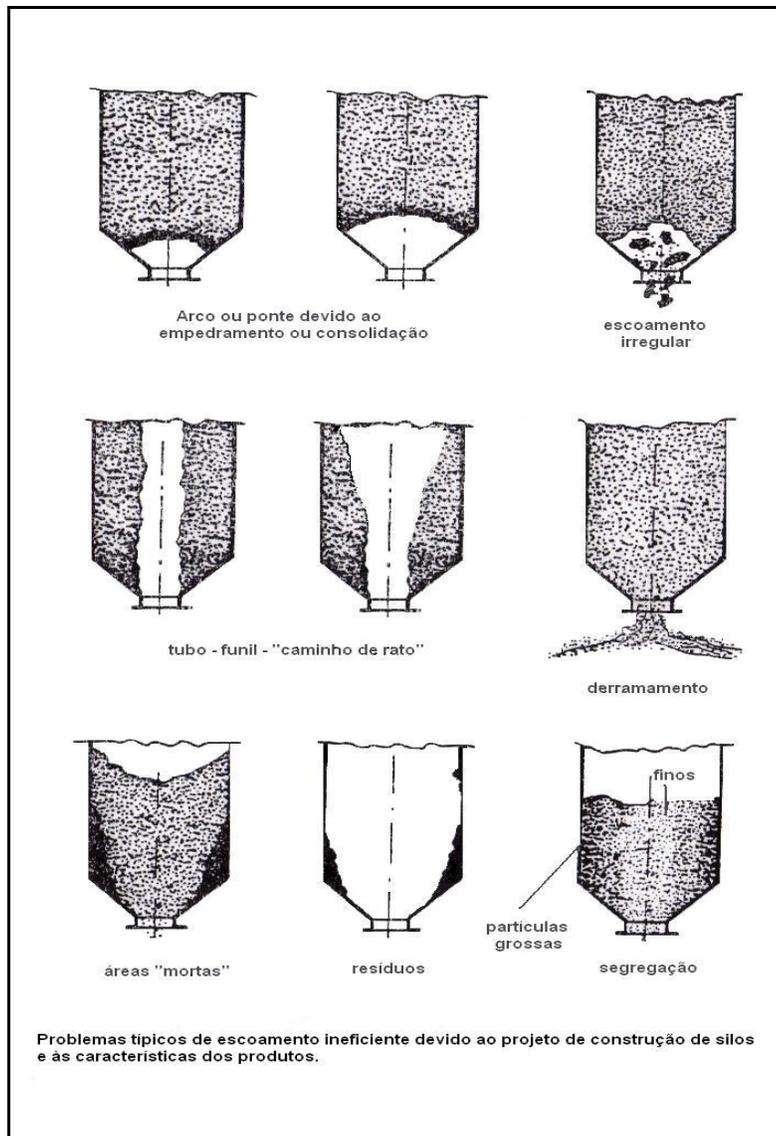


Figura 10 – Diferentes situações de armazenagem e escoamento em silos.

(Fonte: BOUMANS, 1985)

### 2.11 – Comportamento dos produtos no interior do silo

Dentro de um silo uma composição de forças atua sobre o produto armazenado e produz neste uma tensão que pode ser tração, compressão, flexão, torção ou cisalhamento. Todas as tensões produzidas sobre o produto causam, por conseguinte uma deformação.

À propriedade em que a tensão aplicada apresente níveis baixos e o corpo volta ao seu estado inicial assim que se retira a ação desta tensão dá-se o nome de elasticidade. Porém se a tensão for grande o bastante tal que após a retirada de sua ação o corpo não retorne à sua

forma inicial, diz-se que este sofreu uma deformação permanente ou plástica. Pela definição de Beer e Johnston (1995), o comportamento dos materiais pode ser considerado como:

### **2.11.1 – Produto elástico**

É aquele que quando se retira a ação de uma força exercida, tração ou tensão, retorna à sua forma inicial.

### **2.11.2 – Produto viscoelástico**

É o tipo de material que apresenta propriedades mistas pertinentes aos sólidos e líquidos. Num corpo visco elástico a relação entre tensão e deformação é dependente do tempo, ou seja, o tempo é determinante para que o corpo retorne às características iniciais. De acordo com a observação de pesquisadores, o comportamento mecânico dos grãos agrícolas é considerado como os de materiais visco elásticos.

### **2.11.3 – Produto plástico**

Aquele que após a retirada de uma força atuante, sofre algum tipo de deformação não retornando ao seu estado original, ou seja, deforma-se de forma permanente. Ainda, se a tensão for maior que a exercida sobre o limite do material plástico, poderá ocorrer ruptura do corpo. Portanto, a maior tensão que um corpo pode suportar antes de romper-se é definida como limite de resistência.

Gerskovich (2004) em seu trabalho com mecânica de solos relata que o deslizamento em si é caracterizado pela formação de uma superfície de cisalhamento contínua na massa do produto em estudo. Existe, portanto, uma camada de material que desliza sobre a outra formada a partir da zona cisalhada.

## **2.12 – Critérios de deslizamento entre camadas**

### **2.12.1 - Critério de Rankine**

O deslizamento ocorre quando a tensão de tração se iguala à tensão normal máxima ( $\sigma$  máx.) observada em ensaio de tração.

### **2.12.2 - Critério de Tresca**

O deslizamento ocorre quando a tensão de cisalhamento se iguala a tensão máxima de cisalhamento ( $\tau$  máx.) observada no ensaio de tração.

### 2.12.3 - Critério de Mohr-Coulomb

O deslizamento ocorre quando em um plano quando a combinação das tensões normais e cisalhantes ( $\sigma$  e  $\tau$ ) é tal que a tensão cisalhante é máxima, ou seja,  $\tau = f(\sigma)$ .

Esta combinação de tensões, avaliada através dos círculos de Mohr, resulta em uma curva envoltória que circunscreve os círculos correspondentes ao deslizamento e que é denominada “envelope de Mohr” conforme Jenike (1970), e ilustrada na figura 11.

No critério de Mohr a envoltória é geralmente curva embora com frequência ela seja associada a uma reta, definida por Coulomb através da expressão:

$$\tau = \tau_n + \sigma \times \tan \varphi \quad (\text{equação 1})$$

Onde,  $\tau$  é a tensão de cisalhamento,  $\tau_n$  é a tensão de cisalhamento sob tensão normal nula,  $\sigma$  representa as tensões normais aplicadas,  $\varphi_i$  é o ângulo de atrito interno. LGD representa o lugar geométrico das condições de deslizamento partindo de  $\tau_n$  e ELGD é o efetivo lugar geométrico das condições de deslizamento partindo da origem dos eixos e o respectivo efetivo ângulo de atrito interno representado por  $\varphi_e$ .

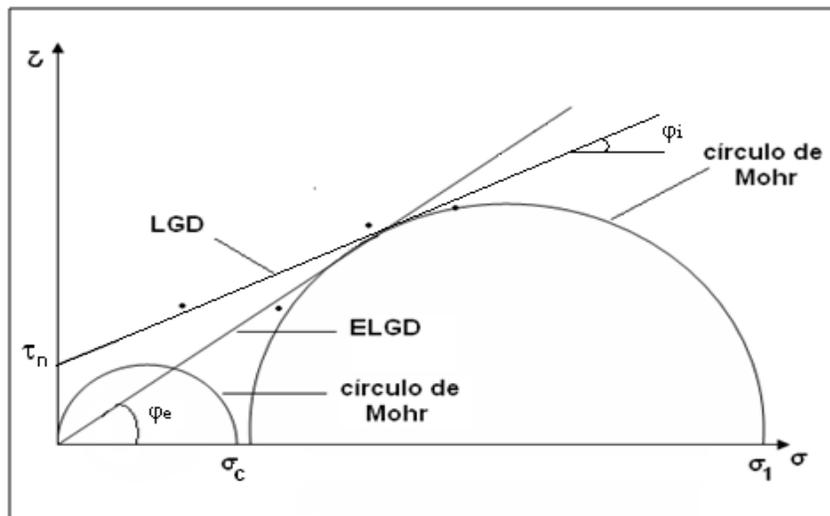


Figura 11 - Curva característica do lugar geométrico de deslizamento (LGD) e efetivo lugar geométrico de deslizamento (ELGD).

(Fonte: CALIL JR, 1990)

### 2.12.4 - Mecanismos de deformação

Em meio granular, as deformações ocorrem devido à distorção (ou quebra) de partículas ou devido ao deslocamento relativo entre partículas como resultado do deslizamento

ou rolamento. Estes dois mecanismos sempre ocorrem simultaneamente. Entretanto, a magnitude das deformações causadas pelo deslocamento relativo entre as partículas é muito superior à originada da distorção da partícula.

Conforme Calil Jr. (1990) um produto armazenado em um recipiente é solicitado por pressões que causam consolidação e resistência. As pressões mais importantes ocorrem durante o escoamento, isto é, durante a deformação contínua acima do seu limite elástico.

Resistência ao cisalhamento advém da resistência entre partículas que pode ser devido ao atrito ou à coesão. Esta resistência depende da tensão normal e do coeficiente de atrito entre as partículas, do tipo de produto cisalhado e de seu estado de consolidação. Segundo Milani (1993) a consolidação de um produto causado pelo período em que este ficou armazenado dentro do silo agrava sua condição de escoamento quando se faz necessário a sua retirada.

A forma com que se procedeu a armazenagem, as características do produto tais como granulometria, tamanho, teor de umidade e coesividade impactam diretamente nas condições de escoamento, conforme observado por Stepanoff (1969). Fitzpatrick et al (2004), em seus trabalhos sobre particulados finos relatam que a redução no tamanho das partículas do produto armazenado, em geral, contribui para dificultar o escoamento, uma vez que há um incremento na área superficial do produto que ocasiona um acréscimo nas forças de coesão entre as partículas.

Da mesma forma, Benedetti (1987) demonstrou em seu estudo que o aumento da umidade em diversos grãos de produtos agrícolas pode trazer prejuízos ao escoamento quando armazenados em silos. Holdich (2002) em seu trabalho considera que a umidade, em certas condições, pode contribuir como um facilitador do escoamento de determinados produtos pulverulentos armazenados em silos uma vez que pode atuar como um lubrificante ou impedir a formação de forças de atração eletrostática entre as partículas reduzindo a coesividade e o atrito interno e, portanto, evitando a interrupção do próprio escoamento.

Stepanoff (1969) relata que o estudo da distribuição de pressões nos produtos dentro dos silos data de mais de cem anos com Janssen e Rankine, ilustrado na figura 12. Ambos apresentaram resultados de estudo de forma simples e largamente divulgados na Europa para solucionar o problema da interrupção do escoamento devido ao arco ou ponte formado.

A equação de Janssen relaciona as pressões verticais e horizontais que atuam sobre o produto, densidade, área, coeficiente de atrito interno e coeficiente de atrito dos grãos com a parede dentro de um silo.

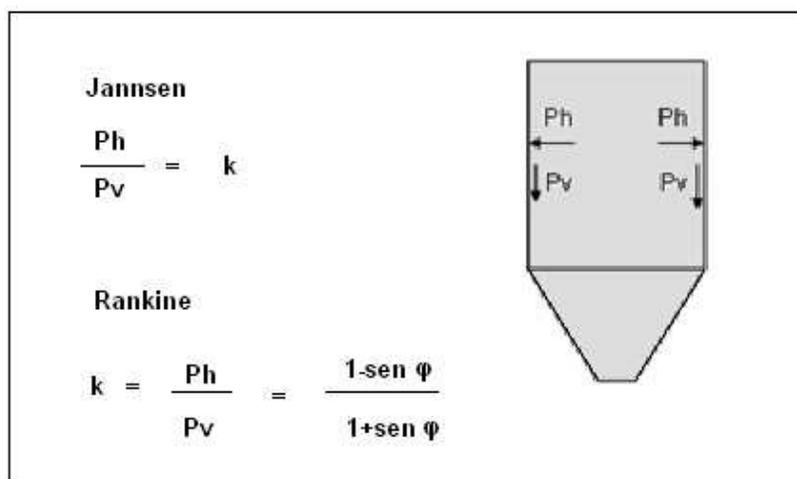


Figura 12 – Tensões observadas em um silo de acordo com Janssen e Rankine. (Fonte: Adaptado de TEIXEIRA, 2006)

O trabalho de Janssen foi muito importante porque mostrou que as tensões não são transmitidas de forma uniforme como num sistema hidráulico e que o atrito do produto armazenado com as paredes do silo influem significativamente nas tensões internas deste mesmo produto. Em sua análise de distribuição de pressão para produtos granulares apresentou a relação:

$$P_h / P_v = k \quad \text{(equação 2)}$$

Sendo,  $P_h$  = pressão horizontal e  $P_v$  = pressão vertical.

Os valores de  $k$  variam de 0 a 1, sendo igual a 0 para partículas sólidas achatadas com forma de moedas e igual a 1 para substâncias líquidas. Portanto, os sólidos particulados em geral terão o valor no intervalo de  $0 < k < 1$ .

Com esta premissa e mesclando a expressão desenvolvida por Rankine, obteve-se uma nova expressão, simples, mas com soluções precisas.

$$k = \frac{P_h}{P_v} = \frac{1 - \text{sen } \varphi}{1 + \text{sen } \varphi} \quad \text{(equação 3)}$$

Assim conclui-se que  $k$  é uma propriedade do material e para sólidos de escoamento livre é diretamente dependente do valor de  $\varphi$ , o ângulo de atrito interno.

Jenike (1964) também apresenta em seu trabalho a relação das tensões principais  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$  com a expressão de Rankine:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \frac{1 + \text{sen } \varphi}{1 - \text{sen } \varphi} \quad (\text{equação 4})$$

Onde  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$  são tensões normais aplicadas a um produto posicionados no eixo das abscissas do diagrama de Mohr e  $\varphi$  é o efetivo ângulo de atrito interno.

O método proposto por Mohr, através dos círculos envolvendo as tensões mínimas e máximas, formando um conjunto de semicírculos no eixo das abscissas, pode ser aplicado para qualquer corpo sólido, pó ou granulado provido de tensões num ponto considerado em estado de equilíbrio relata Stepanoff (1969). O estado de tensões em todos os planos passando por um ponto pode ser representado graficamente em um sistema de coordenadas em que as abscissas são as tensões normais ( $\sigma$ ) e as ordenadas são as tensões de cisalhamento ( $\tau$ ).

As forças atuantes no sentido vertical correspondem às forças de carga e as forças necessárias para promover a movimentação translacional correspondem às forças de cisalhamento. Estas duas forças são denominadas tensões principais e a partir delas são construídos os círculos de Mohr que permitirão traçar a curva característica das condições de deslizamento. Ao conjunto de círculos formados dá-se a denominação de envoltória de Mohr ou envelopes de Mohr. Desta forma, ele pode ser construído quando se conhecem estas duas tensões principais, ou as tensões normais e de cisalhamento em dois planos quaisquer.

Em termos gerais, o escoamento de um produto é o movimento relativo de um volume de partículas com outras partículas que os rodeiam ou com a superfície das paredes do recipiente que os contém. As forças que os envolvem são as forças gravitacional, de atrito, coesão, devido à atração entre as partículas e adesão, caracterizada pela atração entre as partículas e as paredes deste recipiente. Assim, o comportamento das tensões de cisalhamento para romper estes efeitos tem sido objeto de estudo de pesquisadores e engenheiros envolvidos em projetos e construção de silos para armazenagem dos vários produtos em diferentes condições de operação.

Embora a força gravitacional seja a força natural que auxilia o escoamento de qualquer produto, ela é também, dependendo das condições de armazenagem, responsável pela

compactação deste mesmo produto pelo fato de criar oportunidade para que se desenvolvam forças que acentuarão a coesão entre as partículas. Diferentes estados de consolidação podem ocorrer quando um produto é armazenado em ambiente confinado como pode ser observado na figura 13.

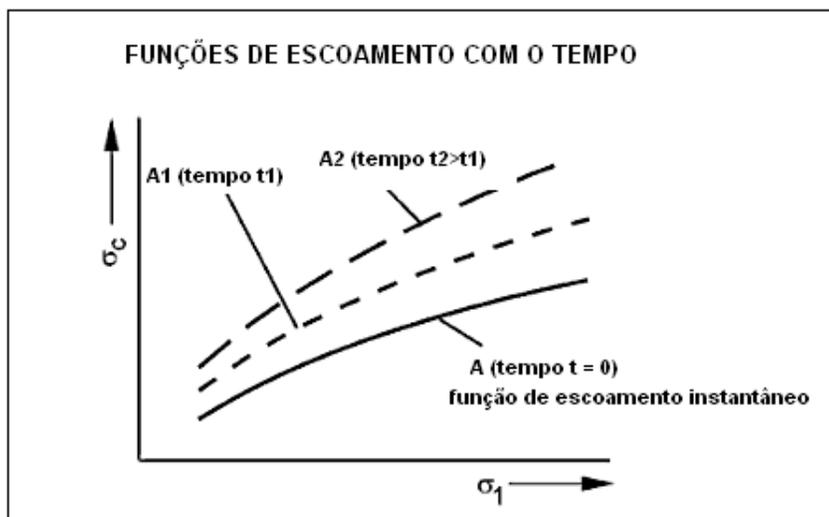


Figura 13 – Diagrama das curvas de escoamento em função do tempo de consolidação. (Fonte: SCHULZE, 2007)

A partir da característica de cada produto pode-se considerá-lo como não-coesivo ou escoamento livre quando as forças entre as partículas são desprezíveis e produto coesivo quando as forças entre as partículas são intensas a ponto de formar “pontes” estáveis que impedem o escoamento de forma natural. A coesão pode formar desde fracas aglomerações até uma total solidificação do produto, em especial para os pulverulentos com grande capacidade de absorção de umidade do ar. A condição básica para um produto escoar é que:  $\tau > \mu \times \sigma$ , onde  $\tau$  é a tensão de cisalhamento,  $\mu = \tan \phi$ , sendo  $\phi$  o ângulo de atrito interno e  $\sigma$  a força normal.

A finalidade de um projeto de silo, para prevenir a formação de obstruções, é determinar a dimensão da boca de descarga e a inclinação ideal da tremonha do silo, considerando-se como observado anteriormente, o espaço disponível para construção do silo, o custo e as características do produto a ser armazenado.

De acordo com Calil Jr. (1990) um produto sólido ao ser consolidado por uma pressão de consolidação  $\sigma_1$  desenvolve resistência representada por  $\sigma_c$ , denominada tensão crítica. A curva formada é chamada função fluxo ou escoamento (FF), e a linha descontínua é

chamada fator fluxo de tremonha (ff) e representa a condição de tensão no possível arco formado.

Na região onde a linha ff varia abaixo da linha FF, as tensões no arco são insuficientes para causar deslizamento e escoamento. Por outro lado, onde a linha ff varia acima da curva FF as tensões do arco excedem a resistência do produto e o escoamento ocorrerá. A figura 14 mostra as condições descritas.

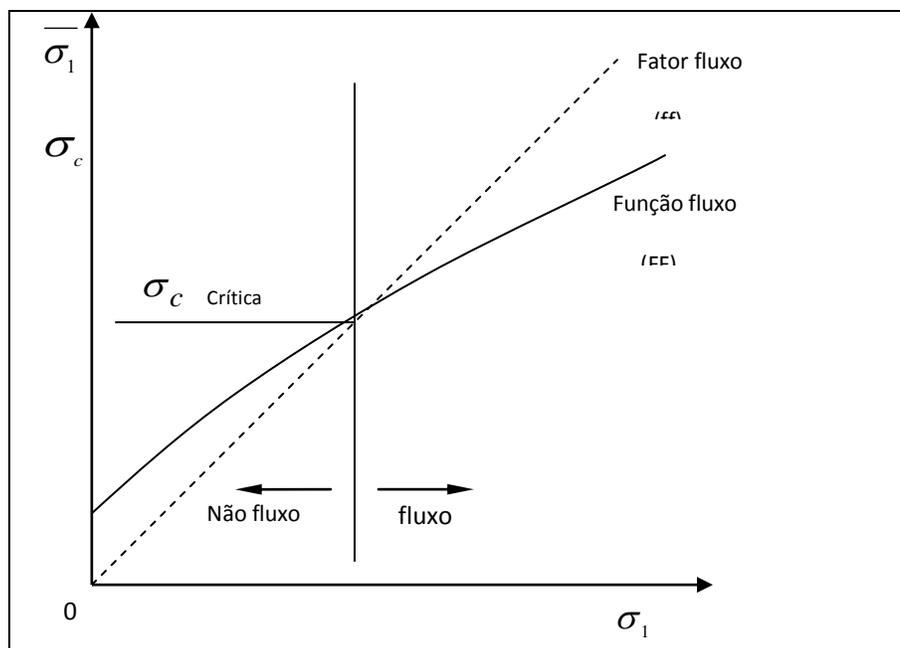


Figura 14 – Gráfico da função fluxo ou escoamento (FF) x fator fluxo de tremonha (ff). (Fonte: CALIL JR., 1990)

Para os experimentos que visam determinar as propriedades físicas de produtos a granel com a finalidade de se estabelecer o lugar geométrico das condições de deslizamento, utilizam-se aparelhos de cisalhamento (MILANI, 1993).

São dispositivos apropriados para medir as propriedades de escoamento nos quais o produto é conduzido ao cisalhamento nele mesmo ou ao longo de uma parede sob condições específicas e que permitem medir as tensões principais atuantes e a partir daí traçar os diversos círculos de Mohr que darão origem ao lugar geométrico esperado.

Milani (1993) em seu trabalho apresenta resultados de ensaios de cisalhamento em vários produtos com diferentes tamanhos. Destes, foram extraídos, a título de comparação e

apresentados na tabela 4, os valores obtidos entre o translacional de Jenike e o modelo anelar (ou anular).

Tabela 4 – Valores de ângulo de atrito interno obtidos nos ensaios com diferentes tipos de aparelhos de cisalhamento.

<b>Produtos</b>	<b>Tamanho médio das partículas (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Aparelho de Jenike (ângulo em graus)</b>	<b>Aparelho Anelar (ângulo em graus)</b>
Farinha	2.700	39	32
Milho	6.500	42	34
Quartzo	2.300	44	37
Plástico	2.800	28	28
Açúcar	450	38	37
Cimento	25	40	39
Óxido de alumínio	70	36	37
Farinha de trigo	35	40	38

(Fonte: MILANI, 1993).

Estudo recente, publicado por Silva et al (2008), na Revista Brasileira de Armazenagem de Viçosa, com aplicação do conceito mencionado, mostrou que pesquisadores realizaram trabalho com grãos de café utilizando diversos materiais de construção de silos, comparando diferentes equipamentos e metodologias para determinar o coeficiente de atrito estático e dinâmico. Entretanto, para determinação das propriedades de escoamento o aparelho de cisalhamento desenvolvido por Jenike é o que apresentou resultados mais precisos, sendo que aparelhos de cisalhamento alternativos apresentaram resultados superestimados para valores de ângulo de atrito com a parede para os diversos materiais utilizados.

### **2.13 – Aparelhos de cisalhamento**

Dentre as propriedades importantes a serem determinadas, o ângulo de atrito interno, o ângulo de atrito com a parede e a função fluxo do produto podem ser obtidas através dos aparelhos de cisalhamento.

A tensão de cisalhamento é a força aplicada em sentidos opostos, porém em direções semelhantes sobre o produto analisado. Determina a força necessária para que um produto

inicie o deslizamento, quer seja entre camadas de produto ou entre o produto e a parede do recipiente no qual está acondicionado. Os primeiros estudos para determinação desta propriedade foram realizados em ensaios de propriedades mecânicas de solos e posteriormente aplicados nos mais variados produtos.

Estudos envolvendo propriedades físicas e de escoamento de diversos produtos possíveis de serem armazenados em silos foram realizados utilizando os aparelhos de cisalhamento com dimensões de células já existentes (FITZPATRICK, et al, 2004). Dentre estes, o modelo mais utilizado tem sido o de Jenike.

Dentre os aparelhos de cisalhamento existentes, os mais conhecidos e estudados são os de Jenike (Milani, 1993 e Calil Jr. 1990, Schulze (Schulze, 2007), Walker (Berryand e Bradley, 2007), Peschl (Schmitt e Feise, 2004) e McGee (McGee, 2006), sendo que os de Jenike e Walker são recomendados para estudos com partículas granulares.

Os três tipos estudados são o translacional, o anelar e o rotacional como apresentado na figura 15.

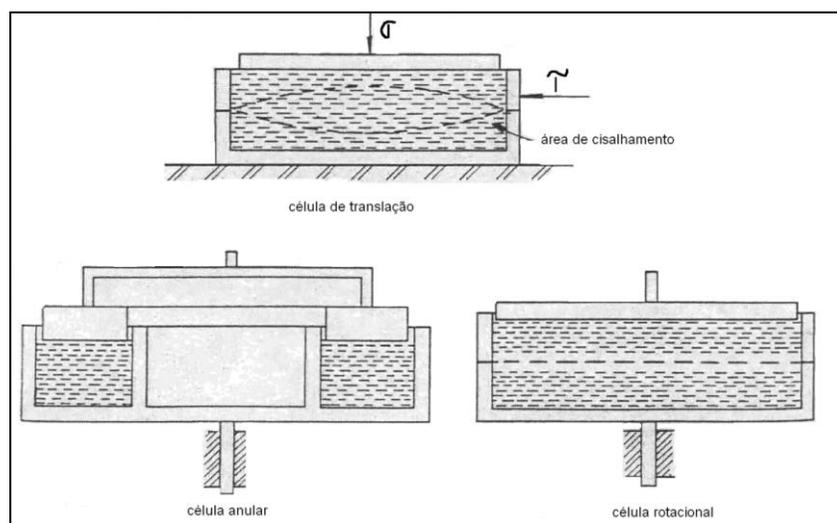


Figura 15 – Tipos de aparelhos de cisalhamento. (Fonte: CALIL JR, 1990)

### 2.13.1 – Aparelho de Cisalhamento de Jenike

O aparelho de cisalhamento de Jenike, apresentado na figura 16, tem sido utilizado por vários pesquisadores, principalmente para substâncias pulverulentas como sais, alimentos, minérios entre outros para a determinação das propriedades de escoamento. Entretanto, tanto o tamanho das células quanto a amplitude de seu deslocamento de cerca de 6 mm (ASTM

D6128, 2001) entre a posição inicial e a final tornam-no inadequado para determinações de produtos granulares com tamanho superior a 4 mm conforme relatado por Milani (1993) embora alguns autores, em seus trabalhos, utilizaram-no para produtos com dimensões de até 9 mm.

Dentre os mais utilizados, é o único que opera com sistema translacional horizontal. O aparelho é composto de um anel inferior e outro superior que irá se deslocar à velocidade constante quando submetido a uma força no sentido horizontal, gerando tensão no produto a ser estudado.

A primeira etapa da operação denominada de pré-cisalhamento visa homogeneizar o conteúdo do anel e na segunda etapa ocorre o cisalhamento propriamente dito. As tensões principais são medidas por sensores que monitoram o deslocamento do anel superior até que atinja a posição final de operação conforme descrito por MILANI (1993).

De acordo com o *Standard Test Method For Shear Testing Of Bulk Solids Using The Jenike Shear Cell* (ASTM D6128, 2001) em uma operação de cisalhamento, três situações distintas podem ocorrer: a consolidação crítica, sobreconsolidação e subconsolidação. Para que os resultados sejam confiáveis os testes devem ser efetuados na condição de consolidação crítica. Ou seja, é necessário que a amostra a ser cisalhada seja manipulada até que se obtenha esta condição aumentando ou diminuindo a compactação dentro da célula de cisalhamento.

O aparelho é composto de base, anel de cisalhamento, tampa, suporte e pendural de pesos e pino de carga, além dos equipamentos que registram o deslocamento e as tensões produzidas nos ensaios. Existem duas opções de anéis a serem utilizados com diâmetros que podem ser de 63,5 e 95,25 mm, e a velocidade de deslocamento do anel superior varia entre 1 e 3 mm/min..

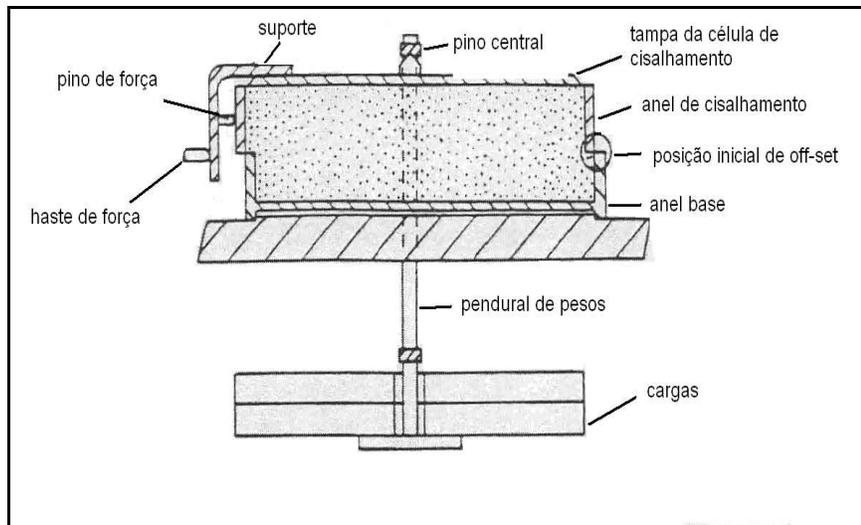


Figura 16 - Aparelho de cisalhamento de Jenike. (Fonte: MILANI, 1993)

### 2.13.2 – Aparelho de cisalhamento de Walker

O sistema de operação deste aparelho ilustrado na figura 17 é rotacional e anelar. Possui dimensões que permitem efetuar ensaios com quantidades de material até 2.100 ml de volume como apresentam Schmitt e Feise (2004). Tanto a tampa que se coloca no momento das medições quanto o fundo do compartimento são propositadamente providos de ranhuras que evitarão que o material nestas regiões deslize e interfira na medição dos ensaios. Por ser um aparelho robusto e de grande porte quando comparado aos demais, a velocidade de deslocamento é também elevada podendo operar com velocidade de deslocamento de 20,4 mm/min.



Figura 17 – Aparelho de cisalhamento de Walker.

(Fonte: BERRYAND e BRADLEY, 2007)

### 2.13.3 – Aparelho de cisalhamento de Schulze

Trata-se de um aparelho do tipo rotacional e anelar como pode ser visto na figura 18, é um aparelho complexo destinado a materiais compostos de pequenas partículas (pó). Da mesma forma que o aparelho de Walker, apresenta a vantagem de permitir que os experimentos ocorram a velocidades constantes sem limite na trajetória de deslocamento uma vez que este deslocamento se dá ao longo de um círculo.

A velocidade de operação é de 1,5 até 7,5 mm/min. de acordo com Schulze (2007) sendo que a operação consiste em aplicar uma força normal sobre a viga mestra, no eixo de rotação da célula de cisalhamento, que é transmitida para a tampa da célula cuja capacidade de acondicionamento de amostra varia entre 200 e 900 ml.

Para ocorrer o cisalhamento da amostra o anel inferior gira num sentido enquanto que a tampa e a viga mestra são impedidas de girar por estarem fixas aos tirantes. A tensão exercida sobre os tirantes pode, desta forma, ser mensurada determinando a força necessária para cisalhar o espécime.

Embora o procedimento de cisalhamento seja similar ao recomendado por Jenike, Schulze afirma que o ensaio no aparelho anelar é mais simples de ser realizado, ser mais rápido e também ser menos suscetível à habilidade do operador que realiza os ensaios o que resulta em dados com boa reprodutibilidade quando comparado aos demais.

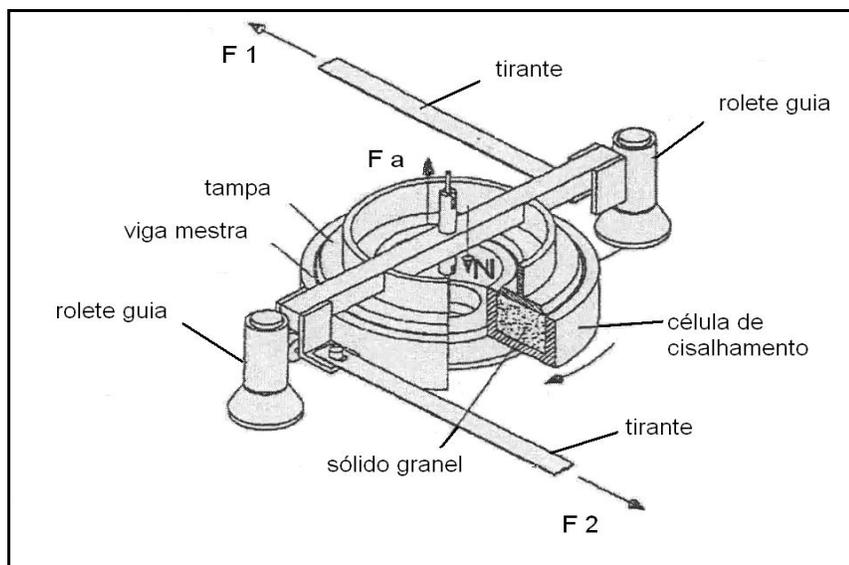


Figura 18 – Aparelho de cisalhamento de Schulze.

(Fonte: SCHULZE, 2007)

### 2.13.4 – Aparelho de cisalhamento de Peschl

Da mesma forma que o aparelho de Schulze, o aparelho de Peschl também opera com o sistema rotacional embora com o compartimento circular aberto. Complexo e totalmente automatizado como se observa na figura 19, o sistema de operação deste aparelho necessita que a amostra seja pré-consolidada por 10 minutos antes de ser submetida ao cisalhamento. O compartimento pequeno com cerca de 50 ml de capacidade é ideal para situações em que a quantidade de amostra disponível é pequena como observam Schmitt e Feise (2004). A resistência ao torque e, portanto o valor da tensão de cisalhamento é calculado a partir do torque medido na tampa do compartimento.

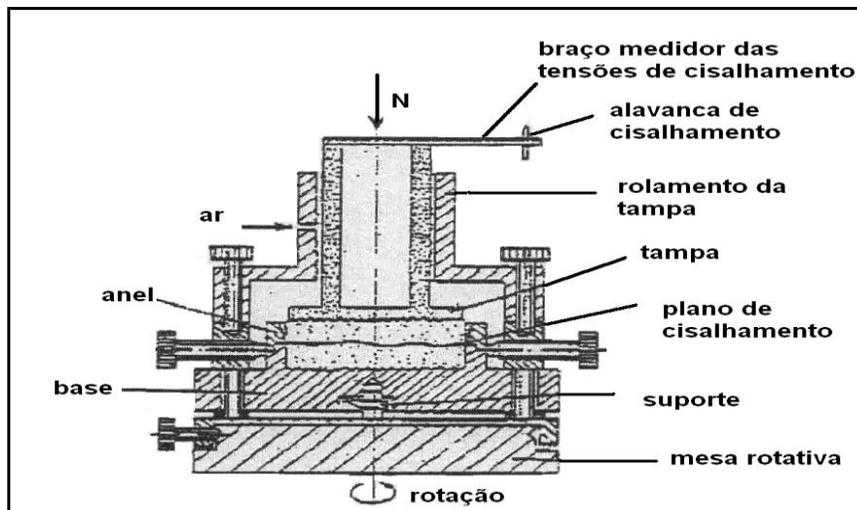


Figura 19 - Aparelho de cisalhamento de Peschl.

(Fonte: SCHMITT e FEISE, 2004).

### 2.13.5 – Aparelho de cisalhamento de McGee

Denominado VSC (*Vertical Shear Cell*) pela fabricante Ajax Co, opera em duas fases como ilustrado na figura 20, sendo que na primeira fase promove a consolidação uniaxial e na segunda o cisalhamento. Diferentemente de todos os outros modelos citados anteriormente, o cisalhamento ocorre no sentido vertical de cima para baixo como apresentado por Mc Gee e Mc Glinchey (2006).

O compartimento que envolve a amostra tem 142 mm de diâmetro e altura de 25 mm, sendo adequado para pequenas amostras e indicado para partículas de dimensões pequenas, ou seja, materiais pulverulentos.

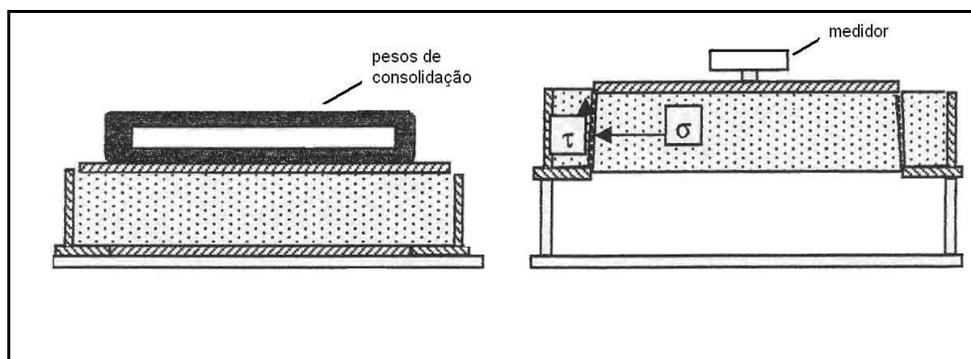


Figura 20 - Aparelho de cisalhamento de Mc Gee. (Fonte: MCGEE e MCGLINCHEY, 2006)

A tabela 5 apresenta as características específicas de cada aparelho de cisalhamento apresentado.

Tabela 5 – Comparativo das características dos aparelhos de cisalhamento.

Tipos de aparelhos	Sistema Operacional	Veloc. Desloc. (mm/min.)	Capacidade (ml)	Aplicação
Schulze	Rotacional	1,5 a 7,5	200 a 900	Pulverulentos
Walker	Rotacional	20,4	2100	Granulares
Peschl	Rotacional	2,3	50	Pulverulentos
McGee	Translacional Vertical	-	400	Pulverulentos
Jenike	Translacional Horizontal	1 a 3	200	Pulverulentos/granulares

(Fonte: SCHULZE, 2007).

### 2.13.6 – Princípio de funcionamento do aparelho de cisalhamento de Jenike

Fitzpatrick et al (2004) descreve que Jenike foi o pioneiro na aplicação das técnicas da célula de cisalhamento e em conjunto com outras propriedades da função escoamento, efetivo ângulo de atrito interno e ângulo de atrito com a parede, analisou a pressão sobre um produto em duas dimensões e a partir destas informações desenvolveu uma metodologia para determinação do ângulo mínimo e o correspondente tamanho da abertura de uma moega para escoamento tipo massa, quer seja ela no formato cônico ou em forma de cunha.

Como procedimento inicial, o anel superior é colocado na posição “*off-set*”, ou seja, a parte superior fica deslocada da inferior na dimensão correspondente à parede do compartimento que acomoda a amostra a ser testada como mostra a figura 21.

Uma força vertical é aplicada sobre a tampa que conseqüentemente a transfere para as partículas que se encontram logo abaixo, por meio de um pendural de pesos. A força horizontal é aplicada ao suporte por uma haste de medida acionada mecanicamente, a qual transmite a força a uma velocidade constante de 1 a 3 mm/min.

A haste é fixada a um sistema de forças e através de um transdutor mede a força de cisalhamento segundo relatado por Calil Jr. (1990). Durante a operação de cisalhamento, o compartimento superior se desloca da posição inicial “*off-set*” mencionada até a posição final também de “*off-set*” na extremidade oposta à inicial.

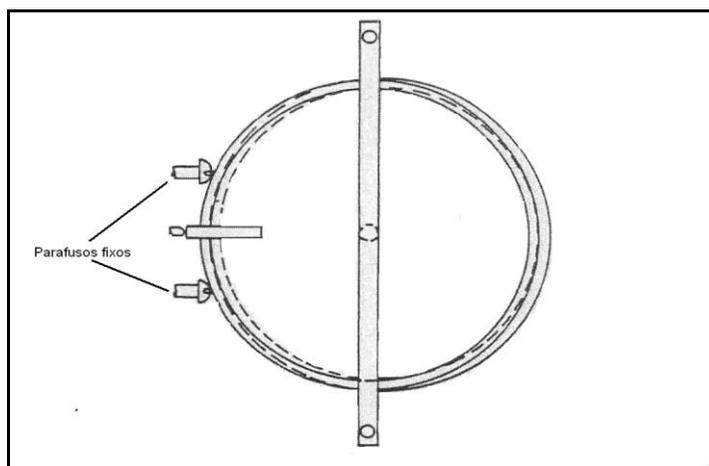


Figura 21 – Detalhes da célula de cisalhamento de Jenike mostrando a posição “*off-set*” (vista superior). (Fonte: MILANI, 1993)

A distância máxima percorrida será, portanto a soma da espessura das paredes dos compartimentos que contêm a amostra onde se desenvolverá uma zona de cisalhamento correspondente, devido à atuação das forças vertical e horizontal.

A Norma ASTM D6128-00 que abrange equipamento e procedimentos para determinar a tensão de coesão de sólidos a granel durante o fluxo ou após período de armazenagem, atrito interno, densidade relativa e atrito superficial detalha a aplicação nos ensaios de cisalhamento utilizando o aparelho de Jenike. Uma representação esquemática é mostrada na figura 22. Um anel molde é colocado sobre o anel de cisalhamento e preenchido

com o material a ser cisalhado. O excesso de material é removido até que se consiga o nivelamento com o topo do anel e a tampa. Sobre a tampa será aplicada uma força normal, através do pendural de pesos e sobre esta mesma tampa, a alavanca é ajustada para realizar a operação de rotação.

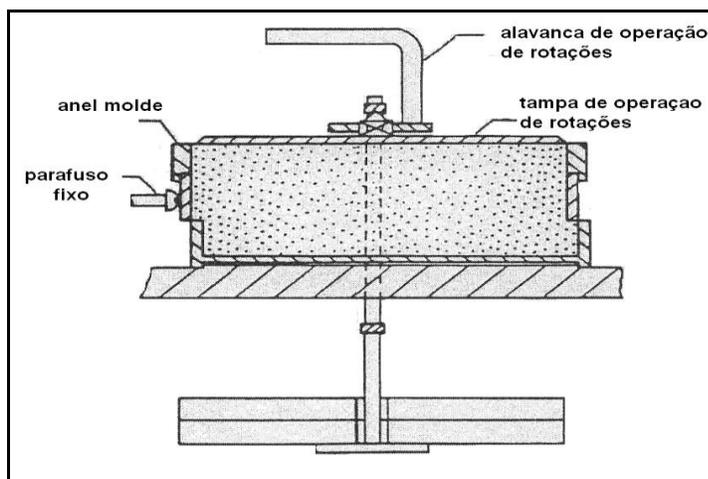


Figura 22 – Aparelho de cisalhamento de Jenike. (Fonte: MILANI, 1993)

A amostra é pré-cisalhada até atingir o valor estável da tensão de cisalhamento. O teste de cisalhamento é realizado exercendo-se uma força horizontal por toda a extensão das paredes da célula deslocando-se o anel da posição “*off-set*” inicial até a posição “*off-set*” final apresentado na figura 21, correspondendo a translação no valor de 2 vezes a espessura do anel. A tensão de cisalhamento vai crescendo gradativamente até atingir o máximo valor e então começa a decrescer até atingir a estabilidade, conforme figura 23.

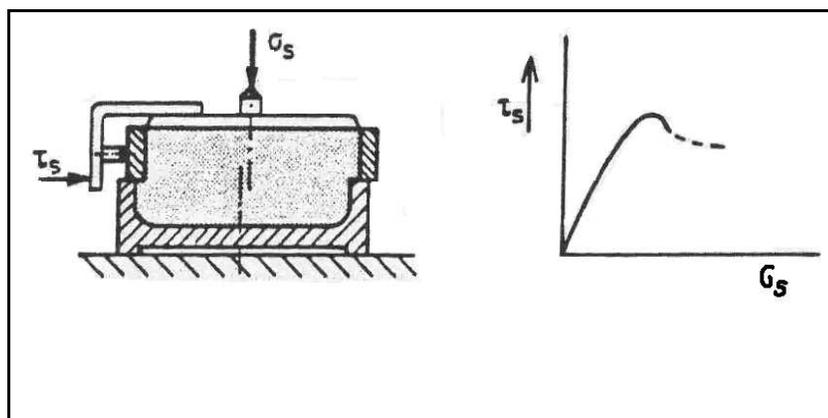


Figura 23 – Representação da célula de cisalhamento translacional e a curva característica obtida no ensaio de cisalhamento. (Fonte: SCHULZE, 2007)

Embora vários autores de trabalhos citados tenham utilizado o equipamento desenvolvido por Jenike, não foi encontrada a explicação da razão de se efetuar o pré-cisalhamento inicialmente com carga maior, seguido do cisalhamento propriamente dito com cargas de valores inferiores como prevê a metodologia. Supõe-se apenas que a fase do pré-cisalhamento é realizada com o intuito de verificar se a condição de consolidação crítica, mostrada na figura 24, foi alcançada, o que permite promover o cisalhamento de forma confiável quanto à obtenção de resultados.

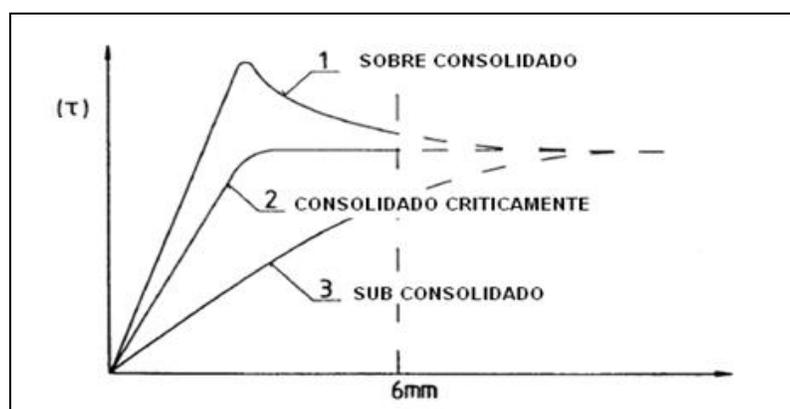


Figura 24 – Curvas dos estados de consolidação da etapa de pré-cisalhamento. (Fonte: adaptado ASTM D6128, 2001)

Outro ponto a ser considerado utilizando-se este aparelho de cisalhamento é a dimensão das partículas a serem submetidas aos ensaios, visto que, embora o autor da metodologia seja enfático em dizer que a dimensão da célula de cisalhamento deva ser ao menos 20 vezes o diâmetro da maior partícula a ser testada, autores de alguns trabalhos com diferentes produtos desconsideraram esta condição.

### **2.13.7 – Princípio de funcionamento do aparelho de cisalhamento anelar (ou anular)**

Inicialmente utilizado na mecânica de solos, Walker nos anos 1960 projetou um aparelho de cisalhamento anelar para efetuar ensaios que pudessem ser úteis em situações onde as tensões aplicadas fossem inferiores as encontradas nos estudos da mecânica dos solos. A partir daí, nas décadas seguintes, outros aparelhos anelares foram construídos e testados em várias universidades. Em 1992, Schulze projetou e construiu um aparelho capaz de determinar

praticamente as mesmas propriedades que eram então determinadas no aparelho de Jenike, de forma que os dados obtidos nos ensaios pudessem ser coletados em um computador.

Na aplicação de ensaios com a utilização da célula de cisalhamento de Schulze o procedimento básico de operação se assemelha ao de Jenike, porém segundo o autor, os ensaios com o aparelho de cisalhamento anelar apresentam as vantagens de serem mais simples de operar, mais rápidos e os resultados têm menos influência da habilidade do operador o que permite um alto grau de reprodutibilidade.

### **3 – MATERIAL E MÉTODOS**

Os trabalhos para determinação das propriedades físicas dos grãos de mamona foram realizados no Laboratório de Tecnologia Pós-colheita e as propriedades mecânicas e de escoamento no Laboratório de Propriedades Mecânicas de Materiais Biológicos, ambos da Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.

#### **3.1 – Material**

Para todos os ensaios foram utilizados grãos de mamona da variedade Guarani, provenientes do município de São Luiz Gonzaga/RS, safra 2008, classificados entre as peneiras granulométricas oblongas de aberturas 6,50 x 15,50 mm e 7,00 x 18,75 mm, sendo que produto foi homogeneizado antes de cada determinação.

##### **Equipamentos:**

Estufa elétrica, marca Fanem modelo 320-SE para determinação de umidade.

Balança analítica, marca Scientech, modelo SA 210, com precisão de 4 casas decimais.

Conjunto determinador de peso específico aparente (hectolitro) marca Gehaka, modelo PH 3000.

Máquina Universal de Ensaio – The Ottawa Texture Measuring System – Canners Machinery Limited.

Condicionador de sinais modelo Spider 8, marca HBM.

Máquina Universal de Ensaio – Texture Analyser TA 500 – Lloyd Instruments.

Balança digital marca Bio Precisa, modelo BB 3000 com precisão de 0,1 g.

Conjunto de máquina vibratória e jogos de peneiras para análise granulométrica marca Granutest.

##### **Aparelhos:**

Aparelho determinador de ângulo de talude construído em acrílico.

Aparelho de cisalhamento translacional construído em aço carbono provido de roldana e cabo inextensível, com células de cisalhamento de 100, 150, 200 e 250 mm construídos em aço carbono com faces de deslizamento polidas.

Mesa vibratória com motor marca Claridon de 0,400 kW de potência.

Relógio comparador analógico marca Mitutoyo.

Paquímetro digital marca Mitutoyo com resolução de 0,01mm.

**Outros:**

Conjunto de dessecadores, marca Vidrolabor.

Cadinhos de alumínio para determinação de umidade de equilíbrio.

Proveta de vidro graduada com capacidade de 250 ml.

Células de carga de 50 kgf e 250 kgf

Pesos padrões de 250 e 500 g, 1, 5 e 10 kg.

Hexano P.A.

Sais para determinação da umidade de equilíbrio.

**3.2 – Métodos**

**3.2.1 – Grau de umidade – determinação em estufa**

O grau de umidade é a medida da quantidade de água existente no produto e que pode ser medido por algum método. A água presente nos produtos pode, de forma simplificada, ser dividida em água de constituição (parte da estrutura do produto) e água livre (água de adsorção – aderida à superfície sólida e água de absorção – absorvida por forças capilares).

A umidade é o principal fator para a ocorrência de processos microbiológicos, como desenvolvimento de fungos, leveduras e bactérias. O conhecimento do teor de umidade é de fundamental importância na conservação e armazenamento; na manutenção da sua qualidade e no processo de comercialização.

A determinação da umidade em estufa, seguindo três métodos diferentes, a fim de se verificar possíveis variações. O primeiro método foi à temperatura de 105°C por 24 horas (BRASIL, 1992). O segundo com temperatura de 130°C por 2 horas (ISTA, 1993) e o terceiro a 103°C por 72 horas (ASAE, 1999). Para cada um dos métodos, as amostras de grãos de mamona foram colocadas em cadinhos, com 5 repetições para cada um e secas em estufa seguindo os tempos pré determinados nos métodos de análise apresentados.

**3.2.2 – Umidade de Equilíbrio**

A umidade relativa do ar é tida como o mais importante dos fatores que influem sobre o potencial de armazenamento de um produto agrícola, devendo manter-se em níveis os mais

baixos possíveis, com exceção para algumas sementes de citros, cana-de-açúcar, guaraná, etc. Quanto à temperatura, tanto mais baixa, melhor é a condição de armazenamento, com raras exceções.

Os produtos agrícolas estão em constante troca de umidade com o ar circundante, ora ganhando, ora perdendo umidade, sendo que a umidade relativa tem estreita relação com o teor de umidade do produto inicialmente armazenado, a qual governa a ocorrência dos diferentes processos metabólicos que ele pode vir a sofrer.

O teor de umidade de um determinado produto, a uma dada temperatura e em equilíbrio com a umidade relativa do ar é denominado umidade de equilíbrio ou equilíbrio higroscópico e é expresso como (% b.s). Neste ponto, a pressão de vapor d'água na superfície do produto iguala-se à pressão de vapor d'água no ar que o circunda, gerando um equilíbrio que determina o teor de umidade existente neste produto (BENEDETTI, 1987).

Variando-se a umidade relativa do ambiente altera-se a pressão de vapor da água no ar, alterando também a umidade de equilíbrio nestas condições. Portanto, para cada umidade relativa do ambiente a que um produto está submetido existe uma umidade de equilíbrio correspondente.

A determinação da umidade de equilíbrio é importante porque está diretamente ligada à armazenagem dos produtos agrícolas e é útil para determinar se estes ganharão ou perderão umidade segundo as condições de temperatura e umidade do ar.

Dentre os parâmetros que influenciam o valor da umidade de equilíbrio, os principais são: a umidade relativa e a temperatura do ambiente (BENEDETTI, 1987). A composição química de um produto também interfere na umidade de equilíbrio, sendo que os grãos com alto teor de lipídeos absorvem menos água que os grãos com alto teor de amido quando expostos às condições semelhantes de ambiente em que se encontram (BROOKER et al. 1992). Assim, os grãos com alta concentração de óleo absorvem menos água pelo fato dos óleos serem substâncias hidrófobas.

A determinação da umidade de equilíbrio é feita pela manutenção do produto em ambiente cujas características psicrométricas são conhecidas e pré-estabelecidas. Dois métodos podem ser utilizados: o estático, em que o ar e o produto não sofrem movimentação e o método dinâmico em que o ar é movimentado mecanicamente para acelerar a condição de equilíbrio.

Apesar de mais utilizado, o método estático demanda vários dias até que o produto entre em equilíbrio com o ambiente. Neste método, podem ser usadas soluções salinas saturadas ou soluções ácidas em diferentes concentrações.

O ensaio foi conduzido utilizando-se soluções de sais dentro de dessecadores, criando-se ambientes de umidade relativa controlada que promovessem a dessorção ou absorção de água por período de até 35 dias. Os dessecadores de vidro utilizados, com diâmetro de 250 mm, dispunham de uma placa cerâmica interna onde foram mantidos os cadinhos de alumínio devidamente preenchidos com os grãos de mamona. A umidade relativa interna nos dessecadores variou de 12,0% a 87,0% e os sais utilizados e suas concentrações de saturação são apresentados na tabela 6.

Tabela 6 – Relação dos sais utilizados no preparo de soluções saturadas para determinação da umidade de equilíbrio.

Sais	Fórmula química	Umidade relativa no interior do dessecador (%)
Cloreto de Lítio	LiCl	12,0
Acetato de Potássio	KC <sub>2</sub> H <sub>3</sub> O <sub>2</sub>	22,7
Cloreto de Cálcio	CaCl <sub>2</sub>	32,0
Carbonato de Potássio	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	43,8
Brometo de Sódio	NaBr	57,8
Nitrito de Sódio	Na NO <sub>2</sub>	64,3
Cloreto de Sódio	NaCl	75,2
Cromato de Potássio	K <sub>2</sub> CrO <sub>4</sub>	87,0

(Fonte: BENEDETTI – Matérias-primas agropecuárias I – Roteiro de aulas práticas – FEAGRI /Unicamp).

Os cadinhos contendo as amostras com pesos aproximados de 2,0 g cada, foram submetidos às umidades relativas internas de cada dessecador, contendo os sais dissolvidos. Durante 35 dias, com a finalidade de se verificar a evolução da sorção de umidade, foram realizadas pesagens de cada espécime semanalmente, em balança analítica, até que o equilíbrio fosse atingido. Os resultados obtidos foram tratados estatisticamente por análise de regressão linear.

### 3.2.3 - Peso específico

Define-se inicialmente: a) Volume Real ( $V_r$ ) como o volume ocupado pelo produto; b) Volume Aparente ( $V_{ap}$ ) como volume ocupado pelo produto mais o volume intersticial; c) Peso Específico Real ( $\rho_r$ ) como a relação existente entre a massa do produto e o seu volume real; d) Peso Específico Aparente ( $\rho_{ap}$ ) como a relação existente entre a massa do produto e o Volume Aparente ( $V_{ap}$ ) correspondente (BENEDETTI, 1987).

#### 3.2.3.1 – Peso específico real

Para a determinação do peso específico real foi utilizado hexano P.A em substituição à água usualmente utilizada neste ensaio. Isto se deveu ao fato das sementes de mamona permanecerem na superfície da água nos ensaios iniciais, não permitindo, portanto, a leitura do deslocamento da água na proveta utilizada. Já com a utilização do hexano, as sementes repousaram no fundo da proveta ocasionando o deslocamento do líquido, permitindo assim a leitura do volume deslocado. O ensaio foi realizado com 10 repetições utilizando 150 ml de hexano na proveta de capacidade de 250 ml, adicionando as sementes de mamona, fazendo-se as leituras na proveta e calculando o peso específico real aplicando a equação:

$$\rho_r = m / V_r \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad \text{(equação 5)}$$

#### 3.2.3.2 – Peso específico aparente

O peso específico aparente foi determinado utilizando-se o método do peso hectolitro através do aparelho marca Gehaka, modelo PH 3000, apresentado na figura 25. Esta característica representa a relação entre a massa do produto e seu volume aparente, ou seja, o volume real do produto acrescido do volume dos espaços vazios que existem quando um produto é colocado em um recipiente. Seu conhecimento é essencial para o cálculo da capacidade estática de um silo. A grandeza é representada em  $\text{kg/m}^3$  e matematicamente é expresso por:

$$\rho_{ap} = m / V_{ap} \text{ ou } m / (V_r + V_{int}) \quad \text{(kg/m}^3\text{)} \quad \text{(equação 6)}$$

Sendo ( $m$ ) = massa do produto, ( $V_{ap}$ ) = volume aparente; ( $V_r$ ) = volume real e ( $V_{int}$ ) = volume intersticial (volume vazio existente entre os grãos)

No ensaio, as sementes são introduzidas num recipiente de volume conhecido com o auxílio de um funil. Um dispositivo móvel instalado na haste que sustenta o funil é utilizado para remover o excedente contido no recipiente. O recipiente com as sementes é pesado descontando-se a tara. Os valores obtidos são apresentados diretamente no visor da balança já convertidos em kg/hectolitro. Foram realizadas 25 repetições e os valores tratados estatisticamente.



Figura 25 – Conjunto para determinação do peso específico aparente.

### 3.2.4 – Porosidade

A porosidade (P) é a relação entre o Volume Intersticial ( $V_{int}$ ) e o Volume Aparente ( $V_{ap}$ ), expresso em %. É determinada pela porcentagem de espaços vazios existentes num determinado recipiente ocupado pelo produto. Sua determinação é importante nos projetos de sistemas de secagem e aeração de produtos, pois oferece parâmetros para análise da resistência ao fluxo de ar do produto e também nos processos de transferência de calor e de massa. A expressão utilizada para determinação da porosidade é:

$$P = (1 - \rho_{ap} / \rho_r) \times 100 \quad (\%) \quad \text{(equação 7)}$$

### 3.2.5 – Ângulo de talude

O ângulo de talude ou ângulo de repouso natural ( $\alpha$ ) é aquele formado pelo produto com a horizontal ao escoar através de um fluxo constante. O ângulo de talude é expresso em

(graus) e é influenciado decisivamente pelo tamanho, forma, orientação das partículas e umidade do produto (BENEDETTI, 1987). É uma propriedade exclusiva dos produtos sólidos e muitas vezes sua determinação pode resultar em valores que apresentem inconsistências pelo fato dos produtos em estudo possuírem determinado grau de coesividade.

O conhecimento do ângulo de talude dos produtos agrícolas é de grande importância em projetos de sistemas de colheita, manuseio e estocagem, sendo utilizado no cálculo de dimensões de correias transportadoras, nas inclinações necessárias dos dutos que movimentam produtos por gravidade, no dimensionamento da cobertura e do sistema de descarga por gravidade em silos.

Stewart (1968) citado por Benedetti (1987), determinou o ângulo de talude e o ângulo de atrito interno para três variedades de sorgo e verificou a existência de uma diferença significativa entre as duas propriedades determinadas, não recomendando a substituição do ângulo de atrito interno pelo ângulo de talude em projetos de engenharia para não acarretar erros de cálculo.

A determinação do ângulo de talude dos grãos de mamona foi feita utilizando-se um aparelho construído em acrílico, com dimensões de 500 x 200 x 400 mm, que permite a visualização do efeito produzido quando se permite o escoamento do produto através de um funil. Após o escoamento do material determina-se o ângulo formado entre a borda do material escoado com o plano horizontal com auxílio de um dispositivo dotado de transferidor.

Foram preparadas 5 amostras com ensaios de 5 repetições cada, totalizando 25 ensaios sendo que os resultados obtidos são apresentados na tabela 10.

### **3.2.6 – Dimensões características e Diâmetro equivalente**

Com o auxílio de um paquímetro digital com precisão de 0,01 mm foram feitas as determinações das dimensões dos grãos de mamona. Para tanto, foram utilizadas 30 amostras e cada dimensão, comprimento (d1), largura (d2) e espessura (d3), medidos com 5 repetições cada. A partir destes dados pode-se determinar o diâmetro equivalente aplicando-se a equação proposta por MOHSENIN (1986).

$$Deq = (d1 \times d2 \times d3)^{1/3} \quad (\text{mm}) \quad (\text{equação 8})$$

### **3.2.7 – Esfericidade**

Com base nos mesmos dados obtidos na determinação do diâmetro equivalente pode-se obter a esfericidade do grão de mamona aplicando a equação proposta por MOHSENIN (1986). Trata-se de outro critério para caracterizar um produto agrícola onde se tenta aproximar formas geométricas indefinidas à forma esférica.

$$\varepsilon = D_{eq} / d_1 \quad (\text{equação 9})$$

A importância da determinação da esfericidade está diretamente relacionada com o cálculo da velocidade terminal dos produtos. A partir da esfericidade se determina o coeficiente de arraste cujo conhecimento é fundamental para o desenvolvimento de máquinas que utilizam fluxo de ar para separar as impurezas.

### **3.2.8 – Força máxima de compressão do grão inteiro**

Para a obtenção do valor da resistência dos grãos de mamona, foram realizados ensaios de compressão entre placas paralelas utilizando-se a máquina universal de ensaios TA 500 Texture Analyser LLOYD Instruments, apresentado na figura 26, do Laboratório de Propriedades Mecânicas utilizando-se 50 amostras tomadas aleatoriamente.

A finalidade deste ensaio foi a verificação do nível de resistência dos grãos de mamona quando sobre eles são aplicadas forças normais. Os valores obtidos oferecem subsídios para a determinação da quantidade de produto que pode ser armazenado em condição de confinamento considerando as camadas inferiores de um silo destinado a produtos agrícolas.

Os grãos posicionados na posição horizontal, em seu estado de repouso, foram submetidos à compressão utilizando-se uma célula de carga de 250 N aplicado sobre uma placa metálica a velocidade de 1 mm/s até a ocorrência da ruptura do tegumento. Os valores registrados diretamente no computador foram analisados posteriormente.



Figura 26 – Grão de mamona entre placas planas e paralelas para determinação da força máxima de compressão.

### 3.2.9 – Deformação específica na força máxima de compressão

Simultaneamente ao ensaio de ruptura, com os valores coletados no transdutor, foi possível determinar os valores do módulo de deformação dos grãos de mamona no estado de repouso. Esta propriedade, expressa em porcentagem, é a razão entre a deformação do tegumento do grão submetido à compressão, verificada no instante da ocorrência de sua ruptura, pela espessura total deste grão.

Esta propriedade permite identificar o limite que o grão de mamona pode suportar até que tenha o tegumento rompido. Foram, portanto, obtidos 50 valores e destes determinados a média e o desvio padrão. A expressão que determina a deformação específica pode ser escrita como

$$Desp = D/d_3 \times 100 \quad (\%) \quad \text{(equação 10)}$$

Onde, D é a deformação final registrada nos ensaios no instante da ruptura do tegumento e d<sub>3</sub> é a espessura do grão medida com paquímetro digital com precisão de 0,01mm.

### 3.2.10 – Ângulo de atrito interno e Efetivo ângulo de atrito interno

Estas propriedades relativas ao escoamento dos produtos são importantes nos projetos de silos para se evitar interrupções durante a descarga devido à formação de arcos mecânicos e coesivos.

A finalidade dos ensaios foi de determinar a célula que apresentasse menor variação na determinação dos valores de  $(\tau)$  e  $(\phi)$ , que determinam os pontos necessários à construção da curva do efetivo lugar geométrico de deslizamento. As ilustrações do aparato experimental para determinação das propriedades relativas ao cisalhamento são representadas nas figuras 27 e 28.

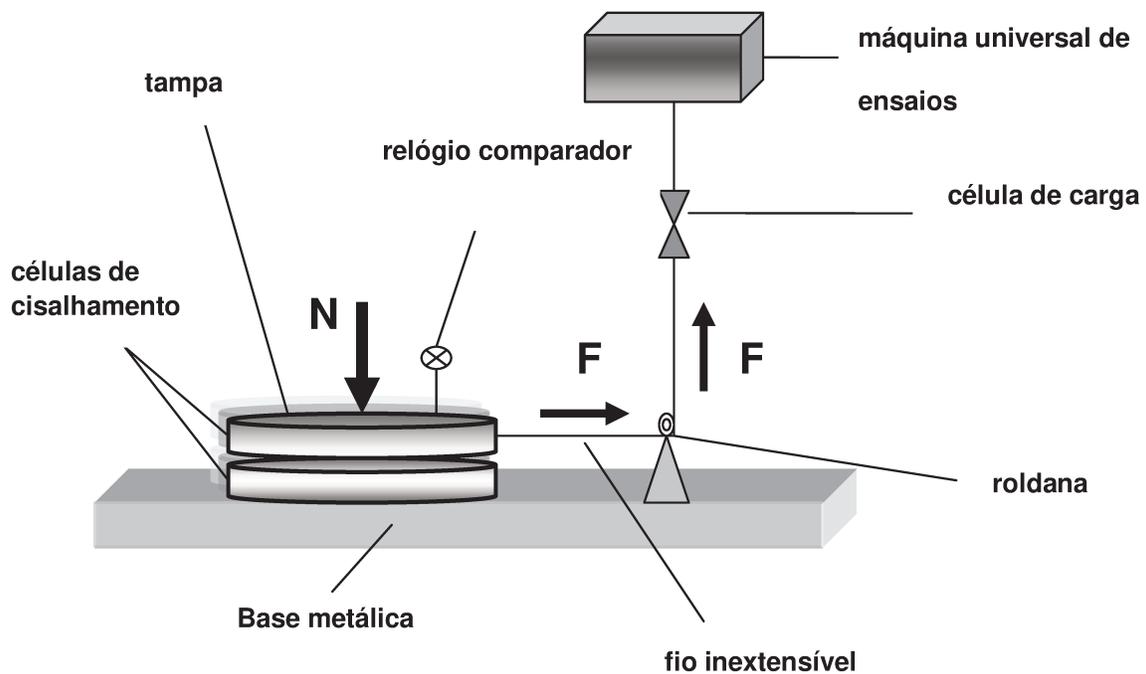


Figura 27 – Representação esquemática do arranjo experimental utilizado para cisalhamento de coluna de grãos de mamona.

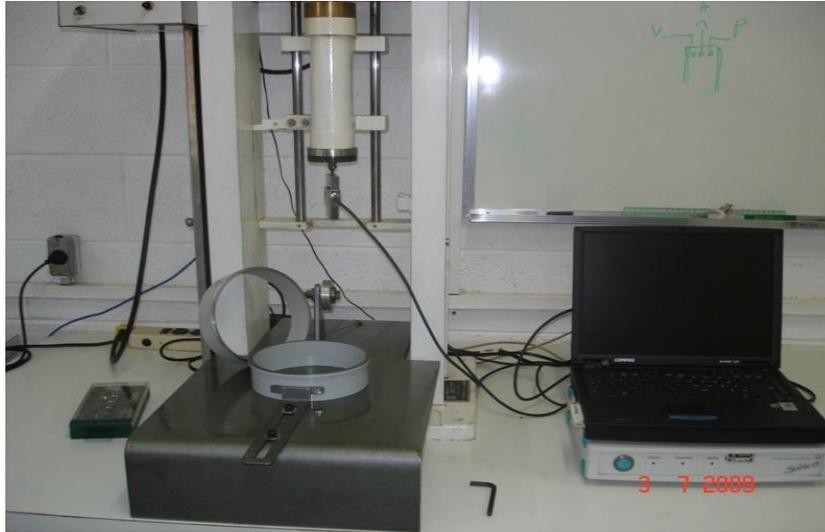


Figura 28 – Aparato de cisalhamento desenvolvido, utilizando máquina universal de ensaios, acoplado ao condicionador de sinais e registrador.

As células do aparelho de cisalhamento translacional foram confeccionadas em aço carbono com polimento nas partes deslizantes de forma a reduzir ao máximo o efeito do atrito entre as partes superior e inferior. Tampas metálicas com as mesmas dimensões das células foram colocadas no anel superior para suportar os pesos relativos à tensão normal durante os experimentos e a parte deslizante foi ligada à máquina universal de ensaios através de um fio inextensível passando por uma roldana. Para a construção do aparato experimental foram considerados:

**a) base:** placa metálica rígida de espessura de 6,25 milímetros (1/4 de polegada) que ficará apoiada sobre quatro pés fixos. Para ajustar as células com diferentes dimensões foram colocados um apoio móvel e um apoio fixo. Um suporte com ajuste de altura permitirá regular a roldana na melhor posição, adequando-a para cada tamanho de célula.

**b) anéis metálicos com diferentes dimensões:** anéis metálicos em aço carbono com diâmetros de 100, 150, 200 e 250 mm, apresentados na figura 29, com bordas em superfícies polidas de 6 mm de espessura.



Figura 29 – Células circulares de 100, 150, 200 e 250 mm, utilizadas nos ensaios de cisalhamento.

c) **tampa**: também em material metálico com dimensões adaptadas para os diferentes anéis. Na parte interna da tampa foram feitas ranhuras que visam nivelar a superfície dos grãos de mamona durante sua rotação conforme os desenhos esquemáticos das figuras 30 e 31.

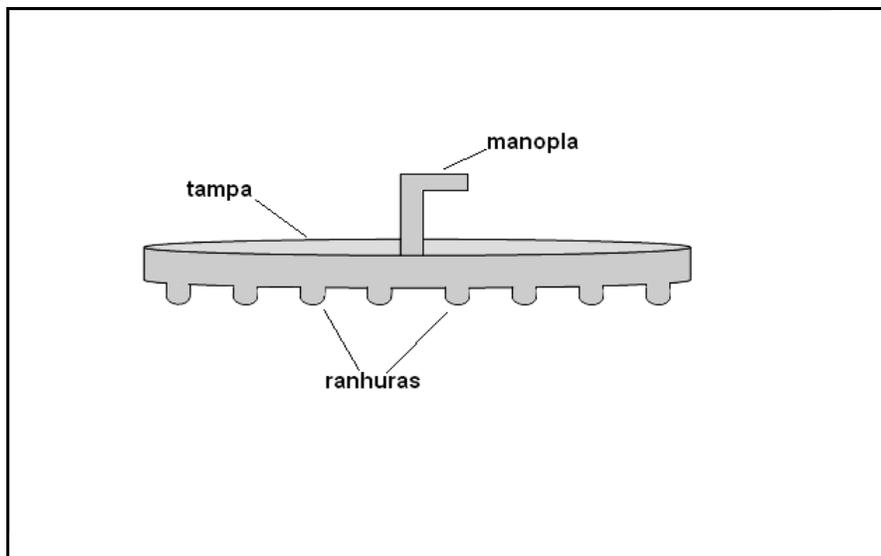


Figura 30 – Ilustração de detalhe construtivo da tampa da célula de cisalhamento.

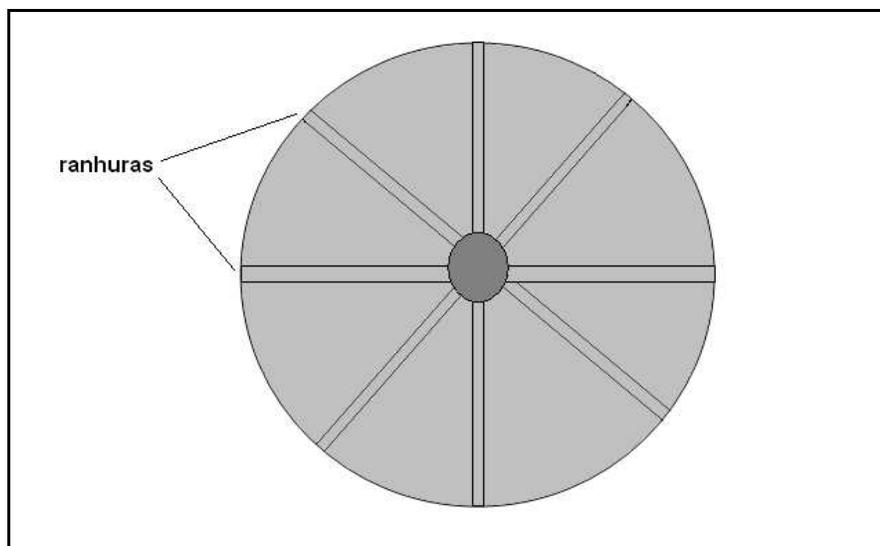


Figura 31 – Ilustração de detalhe construtivo da tampa da célula de cisalhamento (vista interna).

Para cada célula confeccionada, com diferentes diâmetros foram realizados ensaios variando-se a força normal aplicada e determinando a força horizontal necessária para deslocar o anel onde estava contida a amostra. As normais aplicadas foram proporcionais às áreas das células mantendo-se a equivalência em relação à célula de 100 mm de diâmetro considerada como referência por ser praticamente da mesma dimensão que a célula padrão de cisalhamento de Jenike (95,25 mm de diâmetro).

Previamente aos ensaios com grãos de mamona testou-se a resistência do fio a fim de se verificar uma possível deformação quando submetido à tração. Os resultados demonstraram que o fio pode ser considerado inextensível para os valores de tensão aplicados nos ensaios, não interferindo nos resultados.

Foram verificados também os níveis de resistência que as bordas das células ofereciam, sem carga, submetendo-as à tração e promovendo o deslizamento entre elas desde a posição “*off-set*” inicial até a “*off-set*” final.

A tabela 7 apresenta os valores das cargas normais aplicadas no pré-cisalhamento e nos cisalhamentos para cada célula estudada sendo que, para cada carga normal aplicada foi realizado um conjunto de 5 repetições para cada conjunto, totalizando, portanto, 20 ensaios para cada célula testada.

Tabela 7 – Normais aplicadas a diferentes tamanhos de células.

<b>Cargas Normais x Célula de cisalhamento</b>						
Diâm. célula (mm)	Pré-cisalhamento (N)	Cisalhamento (N)				
100	50	10	20	30	40	
150	112,5	24	45	67	90	
200	200	40	80	120	160	
250	312,5	62	125	187	250	

Nos ensaios foram utilizadas células com diâmetros de 100, 150, 200 e 250 mm com a finalidade de identificar aquela cujo diâmetro apresentasse o menor desvio padrão na determinação do ângulo de atrito interno e o efetivo ângulo de atrito interno correspondente. Embora as cargas variassem de acordo com o tamanho da célula, a relação força sobre área manteve-se a mesma para todos os ensaios.

Os ensaios consistem de duas etapas distintas: a) aplicar a tensão normal e promover o pré-cisalhamento através da tração da célula superior. Esta etapa corresponde ao deslizamento equivalente a espessura da parede da célula e feito isto, consegue-se o regime estável de tensões, também designado de estado criticamente consolidado; b) substituir a tensão normal aplicada na etapa anterior por outra de menor intensidade, tracionar a célula superior e assim promover o cisalhamento entre a camada de grãos. O cisalhamento se encerra quando a célula superior desliza até que as paredes das duas células fiquem deslocadas entre si pelo valor da espessura da parede da própria célula. A velocidade de deslocamento aplicada foi constante de 0,06 mm/s.

Tanto as tensões de pré-cisalhamento quanto às de cisalhamento são registradas pelo condicionador de sinais conectado à célula de carga instalada na máquina universal de ensaios. Os valores obtidos são transformados em tensões normais e tensões de cisalhamento e por meio da equação de regressão linear pode-se determinar a reta passando pelos pontos correspondentes às normais aplicadas.

A representação utilizando os círculos de Mohr tangentes à reta encontrada permite determinar, através de cálculos matemáticos, os valores das tensões principais que se encontram no eixo das abscissas, sendo elas a tensão máxima de consolidação ( $\sigma_1$ ) e a tensão

não confinada ( $\sigma_c$ ). Permite também determinar o lugar geométrico de deslizamento (LGD) e traçando-se a reta passando pela origem e tangenciando o círculo no seu ponto máximo definir o efetivo lugar geométrico de deslizamento (ELGD).

Ao ângulo formado pela reta que intercepta o eixo da tensão de cisalhamento com o eixo das tensões normais dá-se o nome de ângulo de atrito interno ( $\phi_i$ ) e ao ângulo formado pela reta que passa pela origem com o eixo das tensões normais dá-se o nome de efetivo ângulo de atrito interno ( $\phi_e$ ) que juntamente com o ângulo de atrito do produto com as paredes do silo permitem calcular a inclinação da tremonha a fim de evitar a formação de obstruções que impeçam o escoamento do produto quando armazenado.

A metodologia aplicada foi seguida conforme norma ASTM D6128 citada e os valores das propriedades tensão não confinada (TNC), tensão máxima de consolidação (TMC), ângulo de atrito interno (AAI) e efetivo ângulo de atrito interno (EAAI) obtidos foram submetidos à análise de variância e comparação de médias entre as diferentes células utilizadas utilizando-se o teste de Tukey com probabilidade menor que 5% com o auxílio do pacote estatístico SAS (*Statistical Analysis System*) versão 9.0.

Para produtos granulares de partículas grandes como a mamona deve-se considerar que o arranjo entre as partículas no interior da célula pode influenciar significativamente nos ensaios de cisalhamento. Assim sendo, nos ensaios com células maiores que as usualmente utilizadas no método Jenike poderia se verificar a possível interferência deste arranjo nos resultados finais.

Hipoteticamente, várias configurações dos grãos de mamona podem ser encontradas no interior das células de cisalhamento com conseqüente interferência nos resultados de cisalhamento como ilustrado abaixo na figura 32.

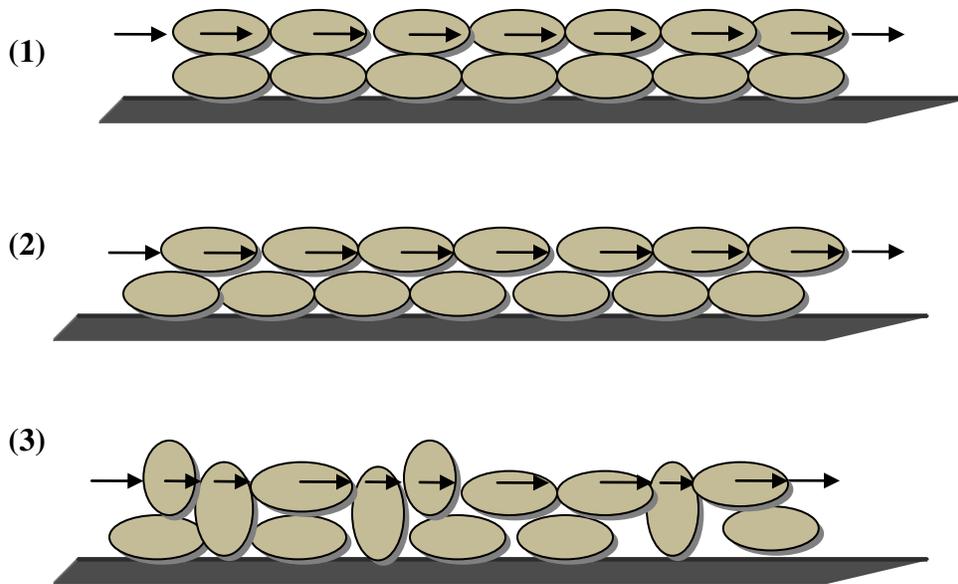


Figura 32 – Representação das diferentes configurações possíveis dos grãos de mamona dentro da célula de cisalhamento.

Para produtos pulverulentos a interferência tende a ser menor e a região onde ocorre efetivamente o cisalhamento, mais bem definida, quando comparada aos grãos grandes como os de mamona.

### 3.2.11 – Função Fluxo

A função fluxo de um produto é dada pela expressão:

$$FF = \sigma_1 / \sigma_c \quad (\text{equação 11})$$

Onde  $\sigma_1$  é a tensão máxima de consolidação e  $\sigma_c$  é a tensão não confinada de deslizamento. Esta função é um indicador da coesividade que um produto pode adquirir quando armazenado. Tem relação direta com as condições de armazenagem, granulometria, forma das partículas do produto, umidade e nível de compactação a que foi submetido.

### 3.2.12 – Propriedade viscoelástica

Foi realizado um ensaio de relaxação utilizando-se a máquina universal de ensaios para identificar possível comportamento visco elástico dos grãos de mamona. Aplicou-se uma carga normal com base em estimativas reais de pressão sobre os grãos armazenados em silo vertical com capacidade de 1.000 metros cúbicos e peso total do produto armazenado de 600

toneladas. Uma força equivalente de 300 N foi aplicada sobre os grãos contidos no compartimento de dimensões de 65 x 65 mm<sup>2</sup>, apresentado na figura 33.



Figura 33 – Aparato utilizado no ensaio de relaxação dos grãos de mamona.  
(Laboratório de propriedades mecânicas – FEAGRI/Unicamp).

## 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 – Grau de umidade

Os resultados da determinação de umidade dos grãos de mamona são apresentados na tabela 8. Observa-se que, mesmo utilizando metodologias diferentes para determinação da umidade dos grãos de mamona, os valores encontrados são bastante próximos. O valor médio da menor umidade encontrada foi de 6,86% em base úmida (BRASIL, 1992) e o maior de 7,08% em base úmida (ASAE, 1999), demonstrando que os grãos de mamona apresentam baixo teor de umidade quando comparados a outros produtos agrícolas como o trigo ou a soja que na condição de armazenagem apresentam, geralmente, valores de umidade de 13 a 15% (b.u) e confirmando a teoria de que os grãos com alta concentração em óleo tendem a apresentar valores de umidade mais baixos que os grãos concentrados em amido.

Tabela 8 – Resultados das determinações de umidade dos grãos de mamona utilizando diferentes métodos de análise.

<b>Ensaio</b>	<b>BRASIL</b>	<b>ISTA</b>	<b>ASAE</b>
Métodos aplicados	Estufa a 105°C (24 horas)	Estufa a 130°C (2 horas)	Estufa a 103°C (72 horas)
Umidade média (% , b.u)	6,86	7,06	7,08
Desvio padrão	0,15	0,07	0,10
Coef. de variação (%)	2,19	1,06	1,35

### 4.2 – Umidade de equilíbrio

A partir dos dados verificados das umidades de equilíbrio dos grãos de mamona submetidos a diferentes condições de umidade controlada, conforme apresentado na tabela 9, pode-se construir a isoterma de adsorção (figura 34). Mesmo em condições de elevada umidade relativa, a adsorção de umidade foi relativamente baixa confirmando a teoria de Brooker et al. (1992) que enfatizaram a condição de que os grãos com altos teores de óleo absorvem pouca água do meio ambiente a que estão expostos.

Tabela 9 – Valores de umidade de equilíbrio (% b.s) encontrados nos ensaios.

Umidade relativa									
interna dos	12,0	22,7	32,0	43,8	57,8	64,3	75,2	87,0	
dessecadores									
(%)									
Média dos valores de									
umidade dos grãos de	2,91	3,95	3,86	5,68	6,48	6,73	8,32	9,38	
mamona									
(%, b.s)									
Desvio padrão	0,19	0,11	0,08	0,12	0,07	0,19	0,46	0,23	
Coefficiente de									
variação	6,39	2,91	1,96	2,04	1,04	2,89	5,50	2,41	
(%)									

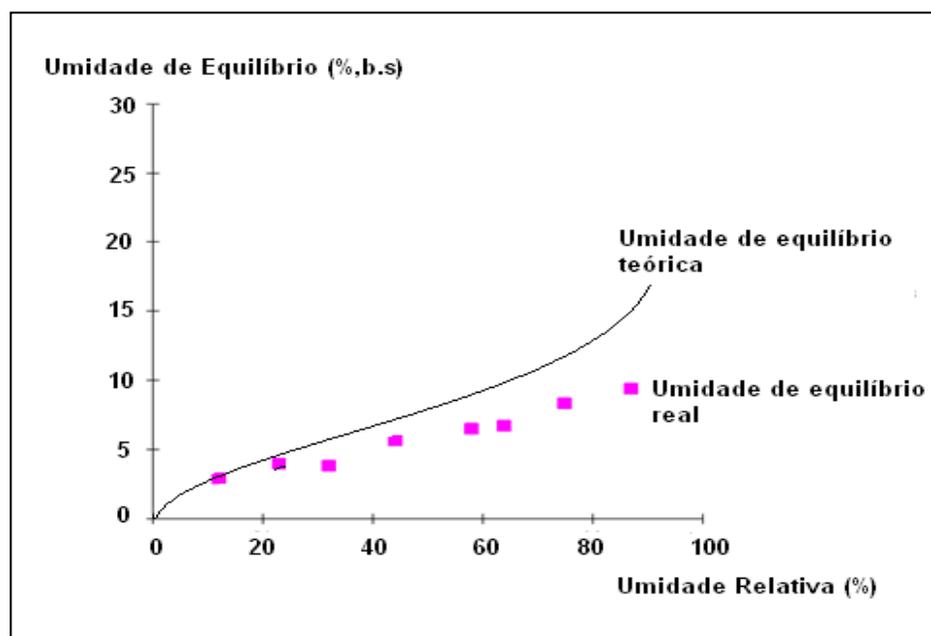


Figura 34 – Curva da isoterma obtida nos ensaios de umidade de equilíbrio dos grãos de mamona.

### **4.3 – Propriedades físicas**

As propriedades físicas dos grãos de mamona, determinadas no Laboratório de pós-colheita, são apresentadas na tabela 10.

#### **4.3.1 – Peso específico aparente**

Os valores determinados variaram entre 606 kg/m<sup>3</sup> e 636 kg/m<sup>3</sup>, com coeficiente de variação de 1,04%, e a média determinada foi de 628 kg/m<sup>3</sup>, relativamente baixa quando comparado com milho graúdo debulhado (900 kg/m<sup>3</sup>) ou soja (720 kg/m<sup>3</sup>) sendo indicativo da necessidade de grandes áreas de armazenagem e manuseio em larga escala tornando-se uma desvantagem tanto no aspecto de investimento em infra-estrutura como no emprego de mão de obra.

#### **4.3.2 – Peso específico real**

A média obtida foi de 846 kg/m<sup>3</sup>. O menor valor determinado foi de 828 kg/m<sup>3</sup> e o maior 867 kg/m<sup>3</sup> com coeficiente de variação de 1,22%.

Ao compararmos os valores médios do peso específico aparente e o peso específico real verificamos uma variação da ordem de 37% demonstrando que os interstícios dos grãos de mamona representam volume significativo quando acondicionados dentro de um reservatório.

#### **4.3.3 – Porosidade**

O valor médio da porosidade encontrado a partir da equação 8 foi de 27% sendo o coeficiente de variação igual a 4,11%.

#### **4.3.4 – Ângulo de talude**

Dentre os valores determinados o menor foi 33° e o maior 38°, sendo o valor médio encontrado de 35°, com o coeficiente de variação calculado em 4,08%.

#### **4.3.5 – Diâmetro equivalente**

A partir dos valores de comprimento, largura e espessura dos grãos de mamona determinados pôde-se determinar o diâmetro equivalente, sendo que o menor valor encontrado foi de 8,93 mm e o maior valor de 10,43 mm. O valor médio foi de 9,83 mm coeficiente de variação encontrado foi de 3,55%.

#### 4.3.6 – Esfericidade

Nesta propriedade, o valor médio encontrado foi de 0,65 sendo o menor e o maior valores encontrados, 0,57 e 0,68, respectivamente, com coeficiente de variação de 2,90%.

Tabela 10 – Valores dos resultados dos ensaios de propriedades físicas dos grãos de mamona variedade Guarani.

Propriedades	unidade	n	menor valor	maior valor	valor médio	desvio padrão	coef. variação (%)
peso específ. aparente	kg/m <sup>3</sup>	25	606	636	628	0,08	1,04
peso específ. real	kg/m <sup>3</sup>	25	828	867	846	0,10	1,22
porosidade	%	25	25	29	27	1,06	4,11
ângulo de talude	(graus)	25	33	38	35	0,69	4,08
comprimento	mm	30	13,48	15,89	15,03	0,59	2,00
largura	mm	30	8,89	10,09	9,55	0,45	1,98
espessura	mm	30	6,03	7,07	6,58	0,25	1,56
diâmetro equivalente	mm	30	8,93	10,43	9,83	0,35	3,55
esfericidade	...	30	0,57	0,68	0,65	0,12	2,90

n – número de repetições

#### 4.4 – Propriedades mecânicas

Na tabela 11 estão os valores encontrados nas determinações das propriedades mecânicas dos grãos de mamona. A força máxima de compressão do grão inteiro considerada corresponde à força de ruptura do grão no estado de repouso.

##### 4.4.1 – Força máxima de compressão do grão inteiro

A partir dos ensaios realizados verificou-se que o menor valor encontrado corresponde a 16,1 N e o maior 87,0 N para as forças exercidas para o rompimento do tegumento dos grãos de mamona. A média encontrada foi de 53,9 N e o coeficiente de

variação foi de 28,13%. A grande variação pode ser atribuída à heterogeneidade dos grãos cujo espaço existente entre o tegumento e o albúmen define sua resistência à compressão. Ou seja, à medida que o espaço interno aumenta, o tegumento torna-se facilmente friável e sua resistência à compressão diminui. Outras variedades, em virtude de suas formas geométricas próprias, poderão apresentar valores de tensões diferentes demonstrando que o formato dos grãos em estudo tem influência neste tipo de ensaio.

#### 4.4.2 – Deformação específica

Da mesma forma que para a tensão de ruptura, a explicação descrita acima também é aplicável para os valores de deformação específica. Os resultados encontrados apresentaram grandes variações com valores entre 4,12% e 22,9%, com média de 11,98% e coeficiente de variação de 29,64%.

Tabela 11 – Valores dos resultados dos ensaios de propriedades mecânicas dos grãos de mamona variedade Guarani.

Propriedades	unidade	n	menor valor	maior valor	valor médio	desvio padrão	coef. variação. (%)
força máxima de compressão do grão	N	50	16,1	87,0	53,9	1,60	28,13
deformação específica	%	50	4,12	22,9	11,98	2,25	29,64

n – número de repetições

#### 4.4.3 – Propriedade viscoelástica

O resultado do ensaio, mostrado na figura 35, evidencia relaxação dos grãos para um período de 40 minutos, suportando a hipótese do efeito temporal da carga sobre a deformação dos grãos como acontece na maioria dos produtos agrícolas.

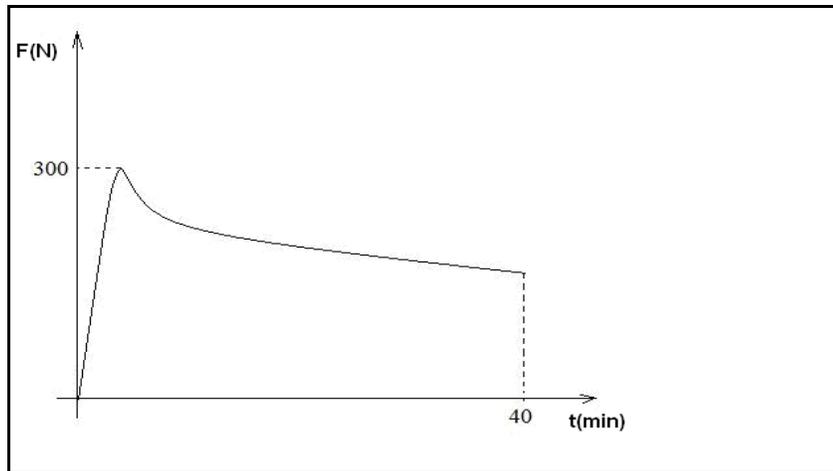


Figura 35 – Curva de relaxação para grãos de mamona.

#### 4.5 – Ensaio de cisalhamento

##### Comentários Gerais

Em todos os ensaios observou-se uma inclinação da tampa, saindo da sua posição horizontal inicial, decorrente do acúmulo de grãos na parte posterior do anel, oposta a parte tracionada da célula mostrada na figura 36. Com o auxílio de relógio comparador (Mitutoyo) foi possível mensurar a faixa de variação do deslocamento vertical em uma das extremidades sendo que os valores encontrados variaram de 6,11 mm até 8,98 mm. A figura 37 ilustra a posição final da tampa após o cisalhamento e a posição com o detalhe do deslocamento medido pelo relógio comparador.



Figura 36 – Movimentação dos grãos no interior da célula



Figura 37 – Ilustração da posição inclinada da tampa após ensaio de cisalhamento em grãos de mamona.

Outro aspecto analisado foi o possível adensamento dos grãos de mamona previamente aos ensaios de cisalhamento conforme prevê a metodologia proposta por Jenike que ressalta a importância de utilizar a tampa com os giros correspondentes para tanto. A fim de se verificar o nível de compactação a ser apresentado pelos grãos de mamona foi realizado um ensaio utilizando uma mesa vibratória acionada por um motor marca Claridon de 0,400 kW e comandada por um inversor de frequência marca Weg, modelo CFW 08 (figura 38). A frequência do motor foi aumentada gradativamente até 15 Hz e a acomodação dos grãos não foi significativa. Ao atingir 20 Hz de frequência, a vibração da mesa é tal que os grãos são gradativamente lançados para fora do recipiente. A 25 Hz o recipiente não tem estabilidade sobre a mesa e os grãos são arremessados para fora rapidamente.



Figura 38 – Mesa vibratória utilizada para promover compactação dos produtos.  
(Fonte: Laboratório de propriedades mecânicas – FEAGRI/Unicamp)

Substituindo-se a mesa vibratória por uma máquina vibratória marca Granutest, utilizada para análise granulométrica, verifica-se que os grãos de mamona acompanham a frequência da vibração deslocando-se no interior do recipiente em movimentos circulares.

Conclui-se que os grãos de mamona confinados a um recipiente, praticamente não podem ser comprimidos e que, portanto, o adensamento não foi relevante neste experimento. Para produtos pulverulentos como o fubá de milho moído, os ensaios utilizando os mesmos procedimentos para a mamona resultaram em variações da ordem de 28% em massa devido à retração do volume após a vibração como ilustrado na figura 39. A soja em grãos apresentou um acréscimo médio de 6% em massa após o adensamento.



Figura 39 – Ilustração da acomodação do fubá de milho moído antes e após a vibração.

### Análise dos resultados dos ensaios de cisalhamento

Os ensaios de cisalhamento foram utilizados para investigar o efeito do tamanho das células nos valores de tensão não confinada, tensão máxima de consolidação, ângulo de atrito interno e efetivo ângulo de atrito interno.

Primeiramente são apresentadas as curvas tensão-deformação obtidas, pois revelaram comportamento distinto em função do tamanho do anel (célula). Em seguida são apresentados os valores médios dos parâmetros de escoamento descritos acima.

As curvas resultantes dos ensaios iniciais de cisalhamento, para as tensões normais de pré-cisalhamento de 6,2 kPa e normais de 4,9, 3,7, 2,5 e 1,2 kPa, para todos os tamanhos de células considerados e mostradas na figura 40, não evidenciaram o patamar de regime estável e portanto não foram analisadas.

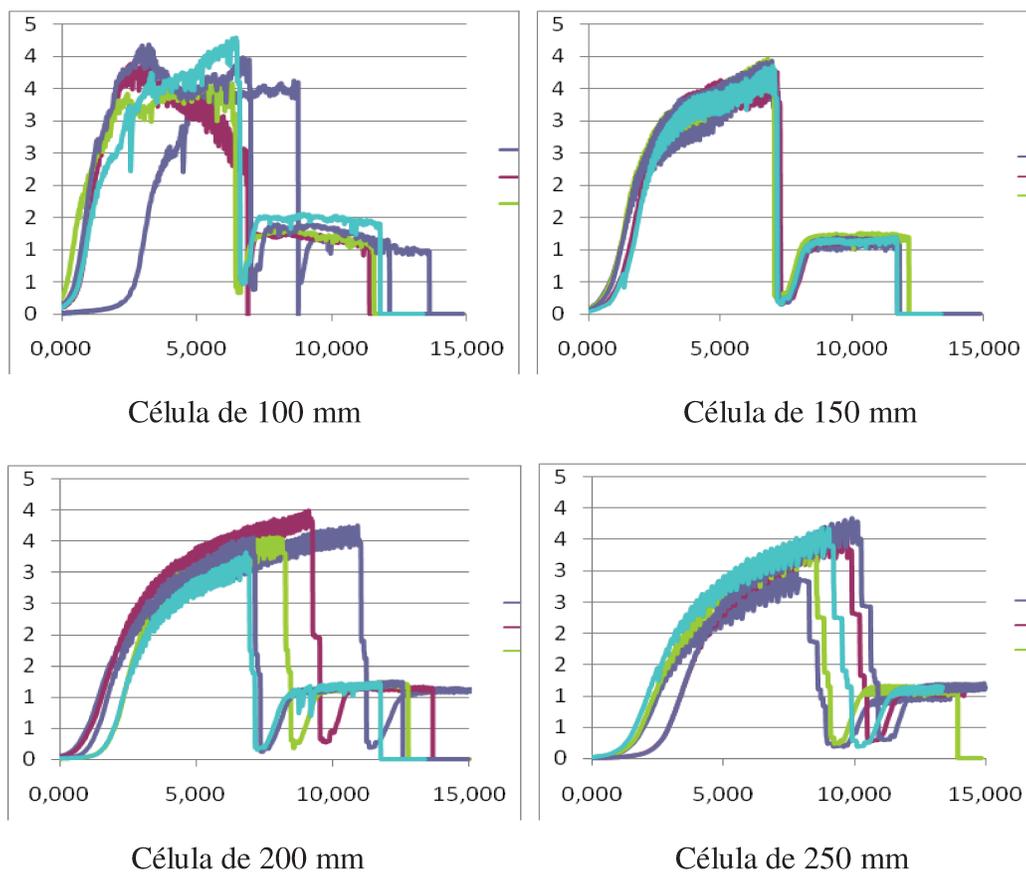


Figura 40 – Gráficos de tensão (kPa) x deslocamento (mm) resultantes dos ensaios de cisalhamento com células de diferentes tamanhos.

Em função desses resultados e das recomendações da norma ASTM considerada, inicialmente pensou-se que os corpos de prova estavam sub-consolidados. No entanto, não foi possível adensar o produto mesmo utilizando vibração intensa. Decidiu-se, portanto, investigar o comportamento das curvas submetendo os corpos de prova a tensões normais menores.

### Curvas tensão-deformação

Para facilitar a visualização das curvas obtidas e dos possíveis patamares de regime estável, ou seja, consolidados criticamente, no pré-cisalhamento, os sinais foram filtrados e a curva resultante é mostrada juntamente com a curva original em todos os gráficos.

#### a) Curvas para células de cisalhamento de 100 mm

As células desta dimensão são os comumente utilizados na célula de Jenike. As curvas obtidas são mostradas nas figuras 46 a 49, para carga normal de pré-cisalhamento de 30 N e cargas normais de cisalhamento de 3, 5, 10 e 20 N, respectivamente.

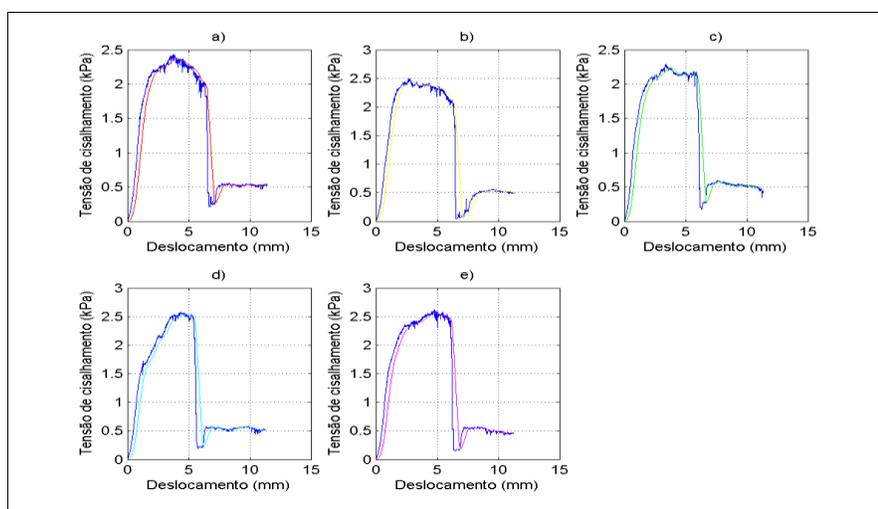


Figura 41 – Curvas obtidas com células de 100 mm com carga normal de 30 N no pré-cisalhamento e 3 N no cisalhamento.

O aspecto geral das curvas obtidas difere daqueles mostrado na norma ASTM utilizada que são curvas lisas e com patamares de regime estável bem estabelecidos.

Para a normal de 3 N da figura 41, gráficos a, b, c e e, o comportamento no pré-cisalhamento apresenta picos à semelhança de material sobre consolidado citadas no procedimento de otimização (ASTM D6128). Os patamares de regime estável são de difícil

identificação, pois não houve estabilização em torno de uma tensão de cisalhamento com ocorrência de picos.

A curva ascendente inicial da figura 41 gráfico d, mostra picos parciais antes de atingir o regime estável, evidenciando a influência do tamanho do grão e sua acomodação. Nesta mesma curva o patamar é mais facilmente identificável, mesmo assim, ocorrendo num intervalo de deslocamento relativamente pequeno.

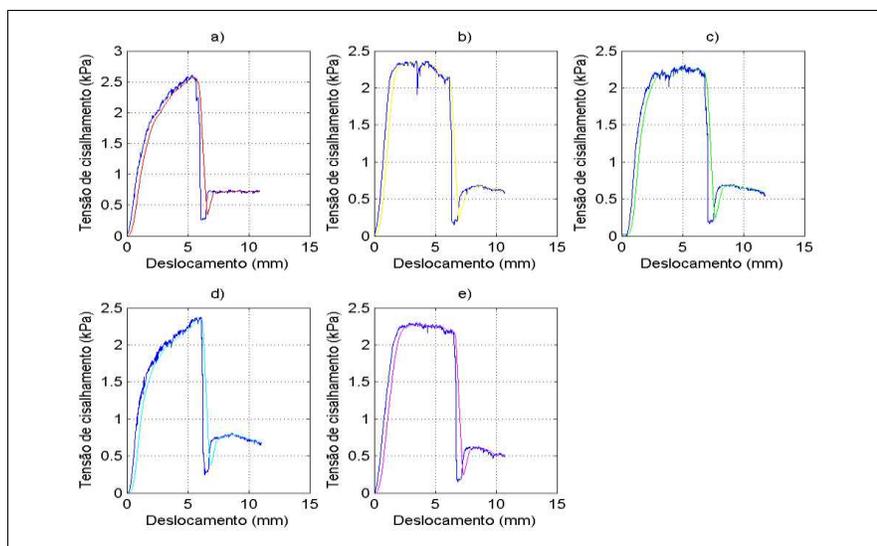


Figura 42 – Curvas obtidas com células de 100 mm com carga normal de 30 N no pré-cisalhamento e 5 N no cisalhamento.

Para a normal 5 N da figura 42 gráficos a, b, c, d e e, as curvas dos gráficos a e b não apresentaram patamar de regime estável no pré-cisalhamento, sendo que as demais apresentaram irregularidades semelhantes às identificadas com a normal 3 N. No entanto, a uniformidade dos patamares na etapa de cisalhamento foi prejudicada apresentando indícios de sobre consolidação.

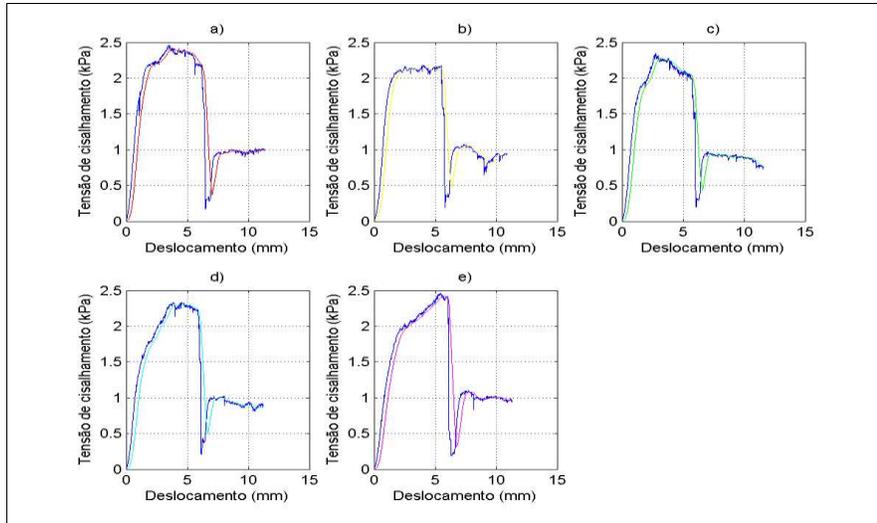


Figura 43 – Curvas obtidas com células de 100 mm com carga normal de 30 N no pré-cisalhamento e 10 N no cisalhamento.

Para a normal 10 N da figura 43 gráficos a, b, c, d e e, as curvas se assemelharam aquelas da normal 3 N. O patamar melhor definido corresponde a curva da figura 43 b enquanto que os das figuras 43 a, c e e apresentaram picos de tensão.

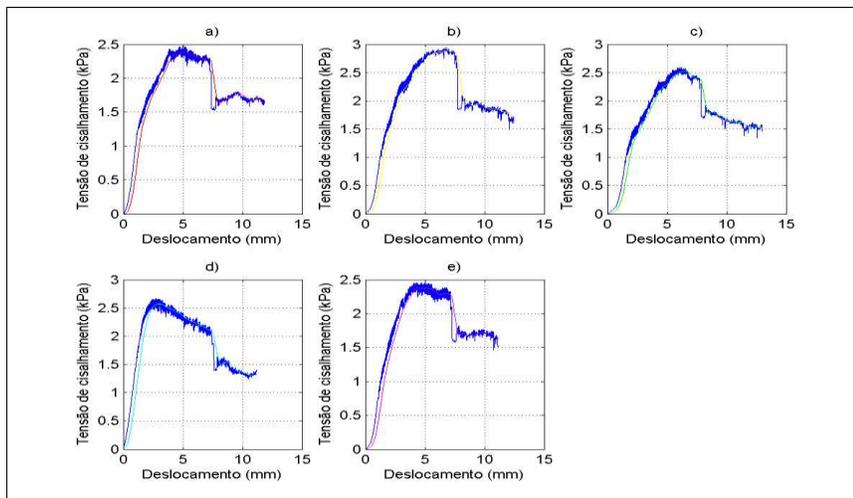


Figura 44 – Curvas obtidas com células de 100 mm com carga normal de 30 N no pré-cisalhamento e 20 N no cisalhamento.

Para a normal 20 N os patamares melhor definidos são mostrados na figura 44 gráficos b e e.

## b) Curvas para células de cisalhamento de 150 mm

Com um incremento de 2,5 vezes da seção cisalhante em relação à célula de 100 mm, mantendo-se a mesma pressão, os ensaios de cisalhamento obtidos com a presente célula resultaram em curvas mais suaves e consistentes tanto no pré como no cisalhamento, com patamares de regime estável mais definidos conforme figuras 45 a 48.

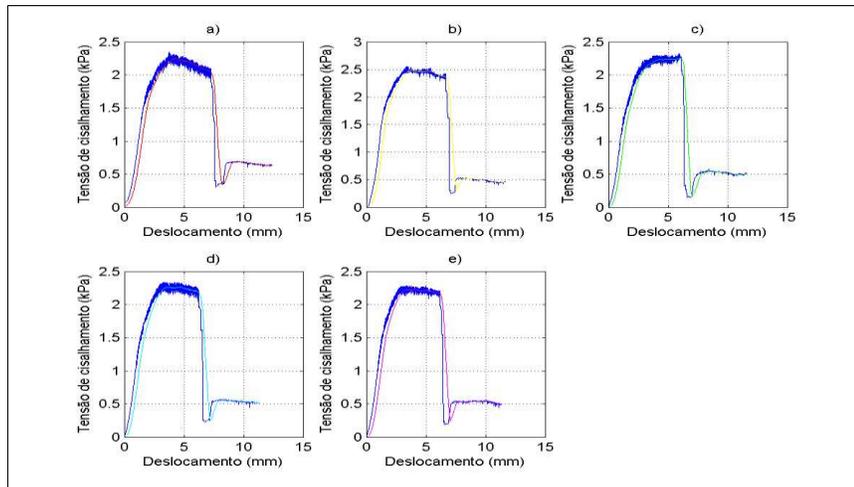


Figura 45 – Curvas obtidas com células de 150 mm com carga normal de 67,5 N no pré-cisalhamento e 6 N no cisalhamento.

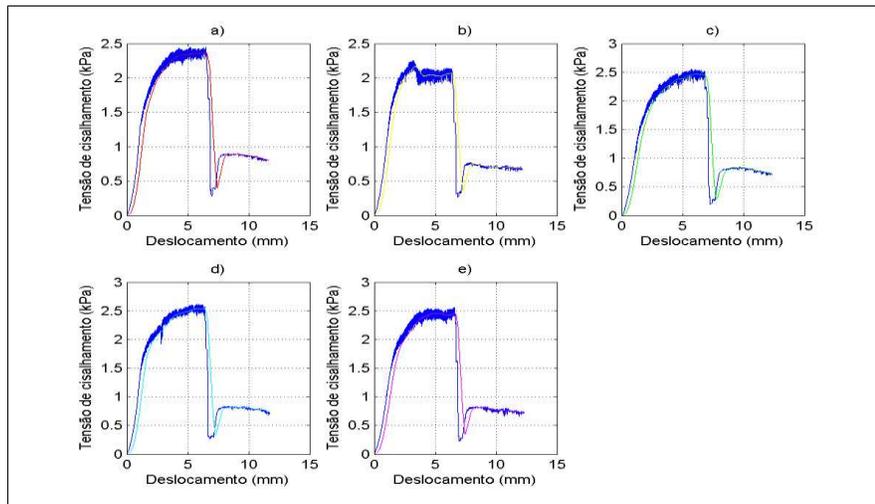


Figura 46 – Curvas obtidas com células de 150 mm com carga normal de 67,5 N no pré-cisalhamento e 11,25 N no cisalhamento.

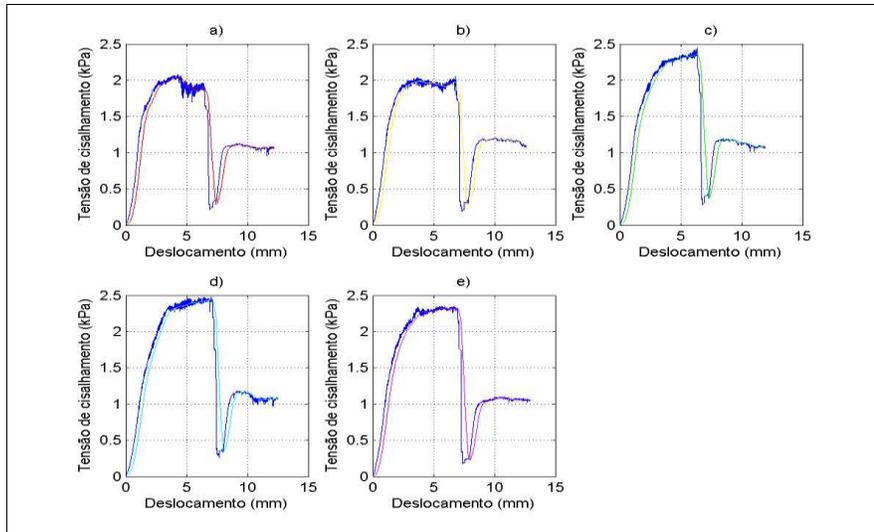


Figura 47 – Curvas obtidas com células de 150 mm com carga normal de 67,5 N no pré-cisalhamento e 22,5 N no cisalhamento.

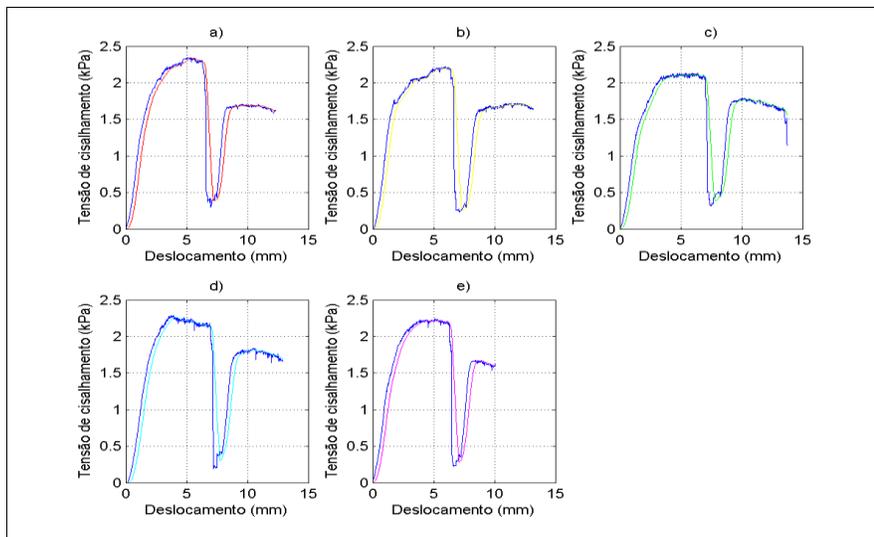


Figura 48 – Curvas obtidas com células de 150 mm com carga normal de 67,5 N no pré-cisalhamento e 45 N no cisalhamento.

**c) Curvas para anéis de cisalhamento de 200 mm**

As curvas resultantes destes ensaios de cisalhamento são mostradas nas figuras 49 a 52. Percebe-se que o aumento do tamanho da célula, integrando as interações no plano de cisalhamento, resultou em curvas muito mais suaves e de menor variabilidade que as dos ensaios anteriores. Porém, os patamares esperados de regime estável no pré-cisalhamento não

aconteceram em nenhum dos ensaios, evidenciando que a deformação de 6 mm não foi suficiente para tal. Isto pode ser resultado do movimento não controlado da massa de grãos durante esta etapa. No cisalhamento, uma vez que o plano cisalhante foi estabelecido, os patamares foram bem definidos.

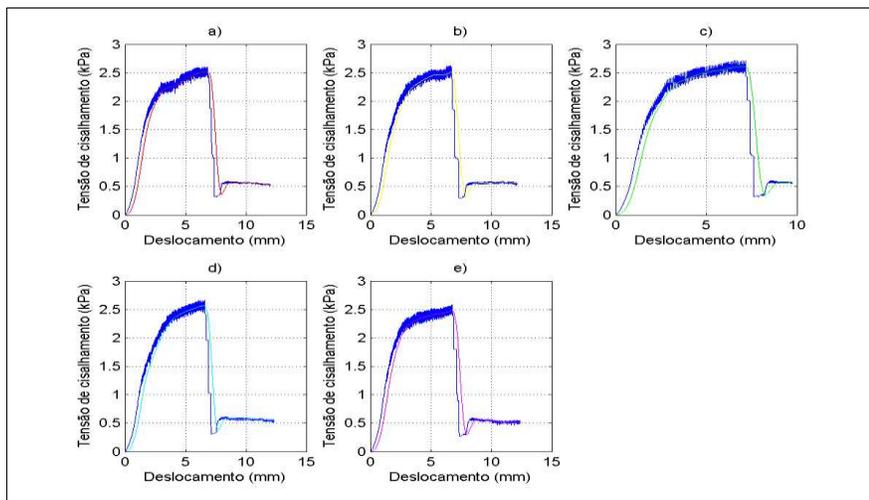


Figura 49 – Curvas obtidas com células de 200 mm com carga normal de 120 N no pré-cisalhamento e 12 N no cisalhamento.

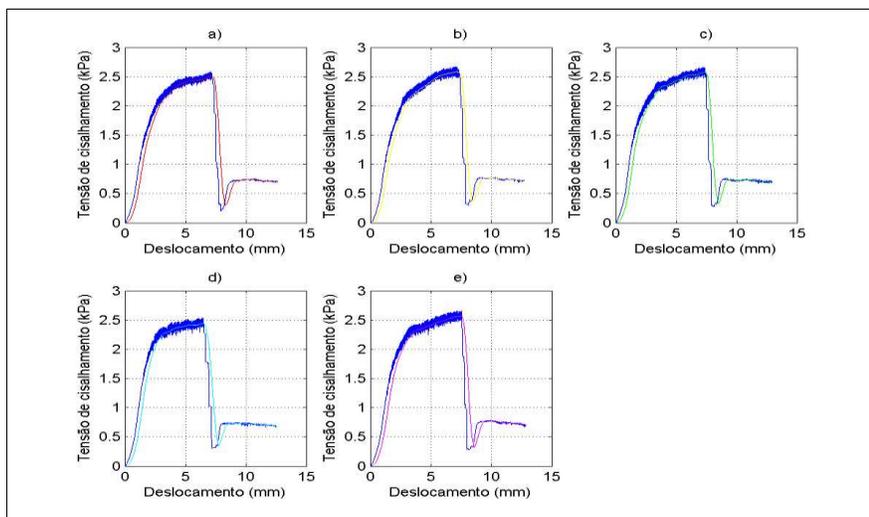


Figura 50 – Curvas obtidas com células de 200 mm com carga normal de 120 N no pré-cisalhamento e 20 N no cisalhamento.

Da mesma forma que a figura anterior, verifica-se que há tendência ascendente da curva na etapa de pré-cisalhamento com grande estabilidade na etapa de cisalhamento.

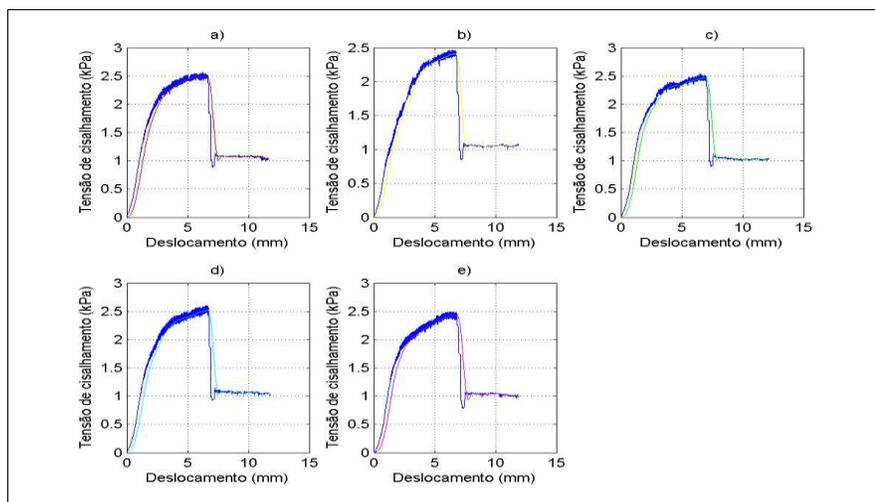


Figura 51 – Curvas obtidas com células de 200 mm com carga normal de 120 N no pré-cisalhamento e 40 N no cisalhamento.

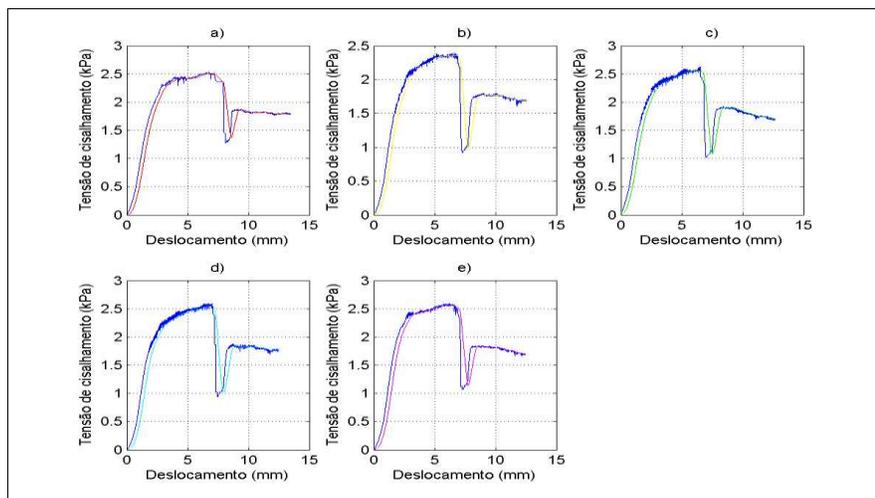


Figura 52 – Curvas obtidas com células de 200 mm com carga normal de 120 N no pré-cisalhamento e 80 N no cisalhamento.

Os mesmos comentários das figuras 51 e 52 são válidos.

#### d) Curvas para anéis de cisalhamento de 250 mm

As curvas resultantes destes ensaios de cisalhamento são mostradas nas figuras 53 a 56. Os mesmos comentários feitos para a célula de 200 mm se aplicam.

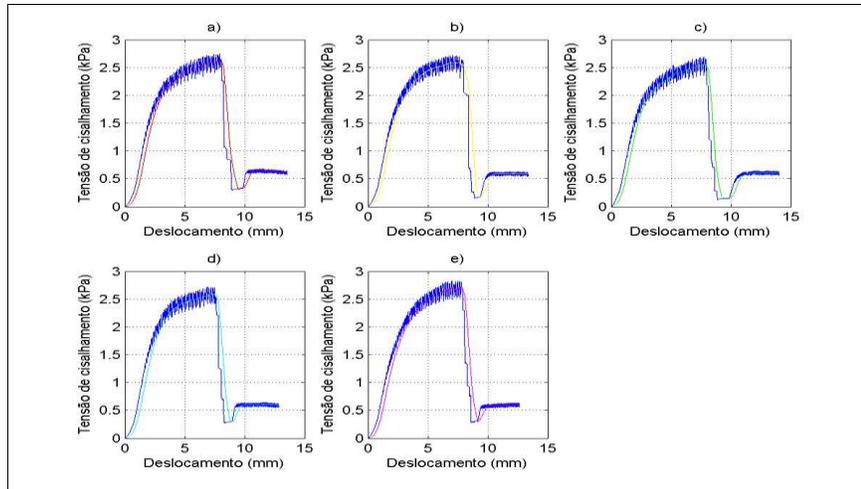


Figura 53 – Curvas obtidas com células de 250 mm com carga normal de 187,5 N no pré-cisalhamento e 18,5 N no cisalhamento.

Ainda que a normal aplicada apresentasse valores superiores aos aplicados nas células de 200 mm, a tendência ascendente da curva na etapa de pré-cisalhamento permaneceu, demonstrando que o regime estável não foi alcançado. Na etapa de cisalhamento verifica-se boa estabilidade nos valores coletados, não havendo praticamente oscilações significativas, o que irá se repetir para os demais ensaios realizados com este diâmetro de célula.

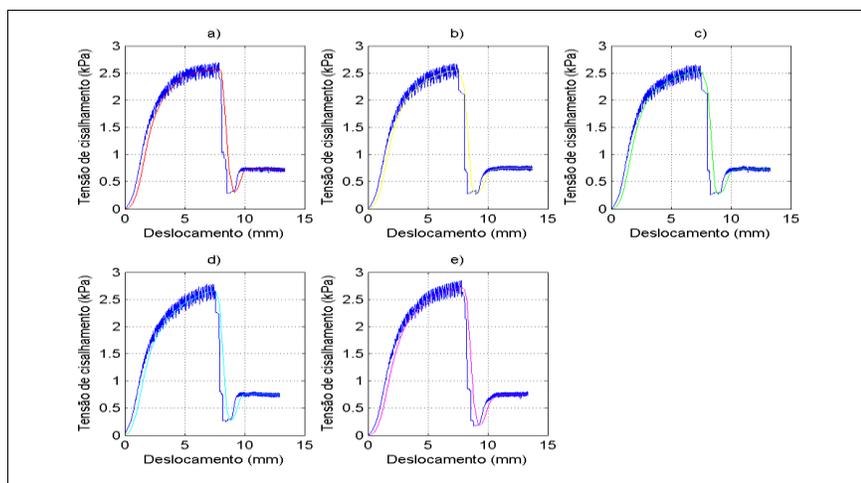


Figura 54 – Curvas obtidas com células de 250 mm com carga normal de 187,5 N no pré-cisalhamento e 31,25 N no cisalhamento.

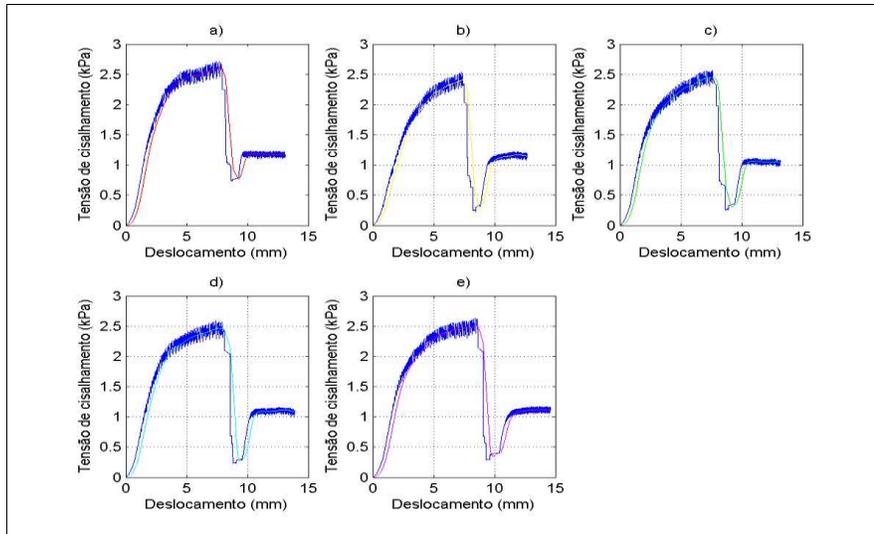


Figura 55 – Curvas obtidas com células de 250 mm com carga normal de 187,5 N no pré-cisalhamento e 62,5 N no cisalhamento.

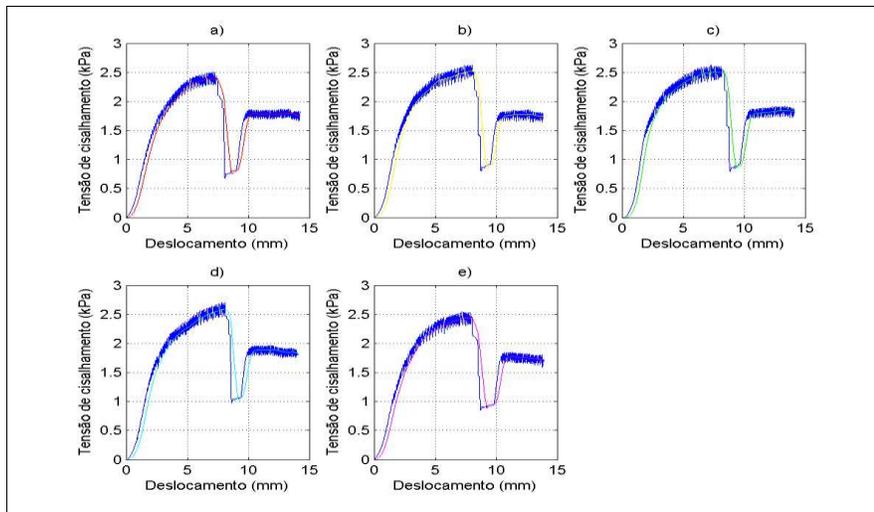


Figura 56 – Curvas obtidas com células de 250 mm com carga normal de 187,5 N no pré-cisalhamento e 125 N no cisalhamento.

### Parâmetros de escoamento

**Tensão não confinada, tensão máxima de consolidação, ângulo de atrito interno, efetivo ângulo de atrito interno**

Os valores médios dos parâmetros de escoamento são mostrados na tabela 12 para as células de 100 e 150 mm e são significativamente diferentes (Tukey,  $p < 0,05$ ). Comparando-se

os resultados das duas células, para todos os parâmetros, ficou evidenciado o efeito do tamanho das células no resultado final do ensaio.

Embora os coeficientes de variação sejam muito próximos, a análise dos resíduos mostrou melhor distribuição dos valores ao redor da média, na maioria dos casos, quando se utiliza a célula de 150 mm.

Tabela 12 – Valores médios obtidos nos ensaios finais de cisalhamento.

<b>Diâmetro da célula</b>	<b>Tensão não confinada</b>	<b>C.V (%)</b>	<b>Tensão máxima de consolidação</b>	<b>C.V (%)</b>	<b>Ângulo de atrito interno</b>	<b>C.V (%)</b>	<b>Efetivo ângulo de atrito interno</b>	<b>C.V (%)</b>
(mm)	(kPa)		(kPa)		(graus)		(graus)	
100	1,12 C	3,02	7,79 B	1,83	29,2 A	2,18	32,9 B	1,81
150	1,57 A	7,92	7,38 C	2,43	26,0 B	4,48	31,8 C	2,22
200	1,31 B	.....	8,07 A	.....	30,0 A	.....	34,2 A	.....
250	1,39 B	.....	8,14 A	.....	30,2 A	.....	34,6 A	.....

Os valores das médias seguidas pelas mesmas letras na coluna não diferem entre si (Tukey,  $p < 0,05$ ).

Para calcular os valores apresentados na tabela 12 para as células de 200 e 250 mm, cujas curvas não apresentaram patamar definido, optou-se pelo valor de tensão de cisalhamento ao final do deslocamento. No entanto, a ausência do deslizamento em regime permanente impede comparações.

### **Função fluxo**

A partir da definição do lugar geométrico de deslizamento (LGD) e da representação dos círculos de Mohr traçados, como na figura 57, foi possível calcular, aplicando equações matemáticas, os valores de  $\sigma_c$  e  $\sigma_1$  que são, respectivamente, a tensão não confinada de deslizamento e tensão máxima de consolidação, mostrados na tabela 12.

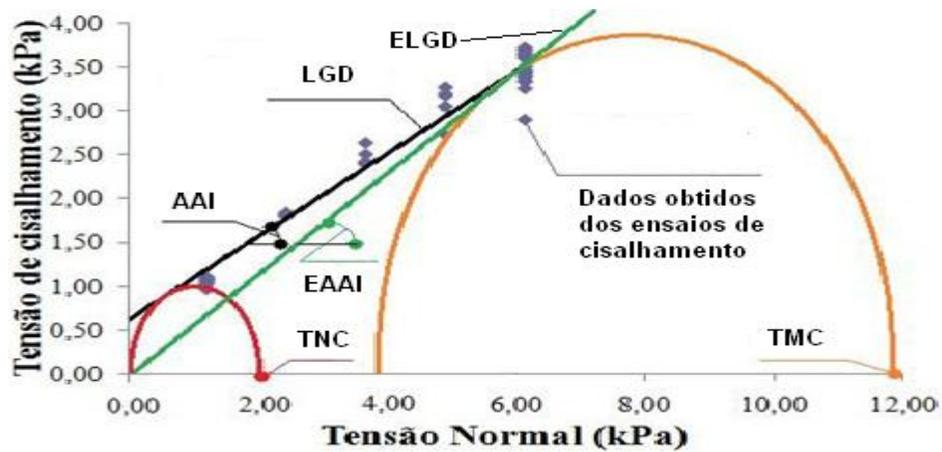


Figura 57 – Representação dos círculos de Mohr obtidos a partir dos ensaios de cisalhamento.

Para a determinação do valor médio da função fluxo foram considerados os valores médios obtidos nos ensaios com as células de diferentes diâmetros. Como esta função é definida como a razão entre os dois valores, obteve-se o valor médio de 6,12 caracterizando, portanto, a mamona como um produto que flui com facilidade segundo a classificação adotada por Calil Jr. (1990) e ilustrada na tabela 3, apresentada anteriormente.

## 5 – CONCLUSÃO

Dos ensaios realizados conclui-se que:

1. O tamanho da célula influencia na determinação dos parâmetros de escoamento dos grãos de mamona;
2. O nível de carga normal influencia nos resultados de cisalhamento e pode impedir a obtenção do patamar de tensão representativo do regime criticamente consolidado;
3. Nos ensaios de cisalhamento, a inclinação da tampa no sentido vertical, pode interferir na carga normal aplicada e conseqüentemente nos resultados. Deve-se, portanto, aprofundar nos estudos para melhor investigação;
4. O ensaio de umidade de equilíbrio demonstrou que grãos de mamona interagem pouco com a umidade do ambiente a que são submetidos e uma vez secos não devem causar problemas de conservação durante a armazenagem;
5. O peso específico dos grãos de mamona é relativamente baixo,  $600 \text{ kg/m}^3$ , quando comparado ao do milho,  $900 \text{ kg/m}^3$ , ou soja,  $720 \text{ kg/m}^3$ , sendo indicativo da necessidade de grandes áreas ou volumes para armazenagem;
6. O grão de mamona suporta cargas da ordem de  $70 \text{ N}$ , no estado de repouso, sem que haja ruptura do tegumento, o que permite estimar uma armazenagem em silos de grande porte (cerca de 500 toneladas) mantendo sua integridade;
7. Assim como a maioria dos produtos biológicos, os grãos de mamona possuem característica viscoelástica, verificada no ensaio de relaxação.

## **6 – PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS**

Em continuidade aos ensaios realizados a determinação do ângulo de atrito interno e efetivo ângulo de atrito interno considerando-se os diferentes períodos de consolidação dos grãos de mamona certamente trará uma contribuição importante para engenheiros, projetistas e também usuários dos sistemas de armazenagem a granel em silos uma vez que tal estudo poderia mostrar a necessidade ou não da instalação de dispositivos que proporcionassem um escoamento dos grãos de forma contínua após certo período de armazenagem.

Outra linha de pesquisa a ser desenvolvida seria o estudo da melhor forma de tremonha a ser construída em um silo de grande capacidade (acima de 500 toneladas), para armazenagem de grãos de mamona por períodos variáveis. Paralelamente, construir protótipos de silos com a tremonha intercambiável para diferentes inclinações visando obter resultados práticos da melhor inclinação a ser aplicada para os grãos de mamona.

## 7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, **Standard test method for shear testing of bulk solids using the Jenike shear cell**, ASTM Standards D6128-00. 2001. 19p.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS, **Moisture measurement- unground grain and seeds**, ASAE Standards, 46 ed., p.567, 1999.

AZEVEDO, D.M.P.; BELTRÃO, N.E. **O Agronegócio da mamona no Brasil**. 2 ed, Brasília, Embrapa informação tecnológica. 2007. 504p.

BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I.S.; BRUNS, R.E. **Como fazer experimentos**. 3 ed. Campinas. ed. UNICAMP, 2007. 480p.

BEER, F.P.; JOHNSTON JR, R.E. **Resistência dos materiais**. 3 ed. São Paulo, Pearson Makron Books, 1995. 1255 p.

BENEDETTI, B.C. **Influência do teor de umidade sobre propriedades físicas de vários grãos**. Dissertação (mestrado), Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1987. 125p.

BENEDETTI, B.C. **Matérias-primas agropecuárias I**. Universidade Estadual de Campinas: Faculdade de Engenharia Agrícola, 73p. (Roteiro de aulas).

BERRYAND, R.J.; BRADLEY M.S.A. Investigation on the effect of test procedure factors on the failure loci and derived failure functions obtained from annular shear cells. **Powder technology**, 174. 2007. p.60-63.

BOUMANS, G. **Grain handling and storage**, Elsevier Science Publishers, 1985. 436p.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. **Regras para análise de sementes**. Brasília, 1992. 365p.

BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.W. **Drying and storage of grains and oilseeds**, Van Nostrand Reinhold Publisher, 1992. chapter 4, p.68-79.

CALIL JR, C. **Recomendações de fluxo e de cargas para o projeto de silos verticais**. Tese (Livre Docência), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1990. 185p.

- CARVALHO, B.C.L. **Manual do cultivo da mamona**. Salvador EBDA, 2005. 65p.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, **Série histórica**, 2008. Disponível em: [www.conab.gov.br](http://www.conab.gov.br) acesso em Julho/2010.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - ALGODÃO – **Sistema de produção**, 4, 2 ed. – ISSN 1678-8710 versão eletrônica, Setembro 2006. Disponível em [www.embrapa.gov.br](http://www.embrapa.gov.br) acesso em Junho/2008.
- FITZPATRICK, J.J.; BARRINGER S.A.; IQBAL, T. Flow property measurement of food powders and sensitivity of Jenike's hopper design methodology o the measured values. **Journal of Food Engineering**. 61, p.399-405, 2004.
- FORTES FILHO, J. **Uma introdução ao estudo dos silos**, Dissertação (mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1985.
- GERSCOVICH, D.M.S.. **Resistência ao cisalhamento**, Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. p 4-36, 2004. Disponível em [www.eng.uerj.br](http://www.eng.uerj.br) acesso em Maio/2008.
- GONELLI, A. L. D. **Variação das propriedades físico-mecânicas e da qualidade da mamona (*Ricinus communis* L.) durante a secagem e o armazenamento**, Tese (doutorado), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008. 186p.
- HOLDICH, R. **Fundamentals of particle technology**, Midland Information Technology and Publishing, p.99-112, 2002.
- INTERNATIONAL SEED TESTING ASSOCIATION. International rules for seed testing. **Seed Science and Technology**, Zurich, Switzerland, v.21. p.43-46, 1993
- JENIKE, A.W. **Storage and flow of solids**. Utah Engineering Experiment Station. University of Utah., Bulletin .123, March 1964.198p.
- MARINELLI, J.; CARSON, J.W. Solve solids flow problems in bins, hoppers and feeders. **Chemical Engineering Progress**, June, 2001.
- MCGEE, E.; MCGLINCHEY, D. A novel approach to describing the flow related aspects of bulk solids. 5TH INTERNATIONAL CONFERENCE FOR CONVEYING AND HANDLING OF PARTICULATE SOLIDS. Sorrento, Italy, **Proceedings...**Sorrento, 2006.

- MILANI, A.P. **Determinação das propriedades de produtos armazenados para projeto de pressões e fluxo em silos.** Tese (doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, 1993. 272p.
- MOHSENIN, N.N **Physical properties of plant and animal material.** 2<sup>nd</sup> ed. Gordon and Breach Science Publishers, p 79-127, 1986.
- MOSHKIN , V.A. **Castor**, Moskow Kolos Publisher, 1986. 315p.
- OLAOYE, J.O. Some physical properties of castor nut relevant to the design of **processing** equipment, **Journal of Agricultural Engineering Research**, 2000, p.113-118,
- OLIVEIRA, R.N. **Cultivo e processamento de mamona.** Viçosa, MG. CPT, 2007. 154p.
- RITTNER, H. **Óleo de mamona e derivados.** São Paulo, SP. 1996. 559p.
- SCHMITT, R.; FEISE, H. Influence of tester geometry, speed and procedure on the **results** from a ring shear tester. **Particle&Particle. Syst.Characterization.** 21, p.403-410. 2004.
- SCHULZE, D. **Powders and bulk solids – behavior, characterization, storage and flow.** New York Springer Verlag , p.35-59, 2007.
- SECRETARIA DA INDÚSTRIA, COMÉRCIO E MINERAÇÃO. **Diagnóstico e oportunidades de investimentos: mamona.** Salvador: SEBRAE, 1995 v.5, 64p.
- SILVA, J.S. **Secagem e armazenagem de produtos agrícolas,** Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2000, 502p.
- SILVA, F.S **Propriedades físicas dos grãos de café como subsídio em projetos de equipamentos e de silos utilizando a metodologia de Jenike.** Tese (doutorado). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa/MG, 2003. 117p.
- SILVA, F.S.; CORRÊA, P.C.; CALIL JR, C.; GOMES, F.C.; **Revista Brasileira de Armazenagem.** Comparação de diferentes equipamentos e metodologias para determinação dos coeficientes de atrito estático e dinâmico de grãos de café com pergaminho.**Viçosa Especial Café**, MG, 10, 2008, p.58-65.
- STEPANOFF, A.J. **Gravity flow of bulk solids and transportation of solids in suspension.** . New York John Wiley & Sons Inc., 1969. 191p.

STEWART, B.R. Effect of moisture content and specific weight on internal friction properties of sorghum grain. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, MI, 11 (2): 260-2, 1968.

TEIXEIRA, G.L.R. **Determinação das propriedades físicas e de fluxo do café para projeto estrutural de silos e equipamentos**. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Lavras, Lavras/MG, 2006. 104p.