



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
COPEAG - COORD. DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENG. AGRÍCOLA**



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

PROPRIEDADES DE FLUXO DO FEIJÃO MACASSAR

(*Vigna unguiculata(L.)Walp.*) PARA O DIMENSIONAMENTO DE SILOS

IBIRENALDO MARQUES FREIRE

**CAMPINA GRANDE
PARAÍBA**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA AGRÍCOLA**

DISSERTAÇÃO

**PROPRIEDADES DE FLUXO DO FEIJÃO MACASSAR
(*Vigna unguiculata (L.) Walp.*) PARA O DIMENSIONAMENTO DE
SILOS**

IBIRENALDO MARQUES FREIRE

**Campina Grande
Novembro 2004**

IBIRENALDO MARQUES FREIRE

**Propriedades de fluxo do feijão macassar (*Vigna unguiculata* (L.)
Walp.) para o dimensionamento de silos**



**CAMPINA GRANDE
2004**

IBIRENALDO MARQUES FREIRE

**Propriedades de fluxo do feijão macassar (*Vigna unguiculata* (L.)
Walp.) para o dimensionamento de silos**

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola, curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, na Área de Construções Rurais e Ambiente, Universidade Federal de Campina Grande.

Orientador: Prof. Dr. José Wallace B. do Nascimento

CAMPINA GRANDE
2004



PARECER FINAL DO JULGAMENTO DA DISSERTAÇÃO DO MESTRANDO

IBIRENALDO MARQUES FREIRE

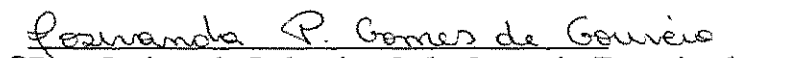
**PROPRIEDADES DE FLUXO DO FEIJÃO MACASSAR PARA
DIMENSIONAMENTO DE SILOS**

BANCA EXAMINADORA

PARECER


Dr. José Wallace B. do Nascimento-Orientador

APROVADO


Dra. Josivanda Palmeira G. de Gouveia-Examinadora

APROVADO


Dra. Riselane de Lucena A. Bruno-Examinadora

Aprovado

NOVEMBRO - 2004

DEDICATÓRIA

A minha mãe, Antônia Lúcia
Marques Pinto, com muito amor
OFEREÇO. À meu irmão e
namorada, **DEDICO**.

AGRADECIMENTOS

A Deus, razão maior de tudo;

Ao Prof. Dr. José Wallace B. do Nascimento, pela orientação, sugestões, amizade e apoio na realização deste trabalho;

À Comissão Examinadora;

Aos Profs. do Departamento de Engenharia Agrícola pela amizade;

Aos amigos Marineide, Felipe, Danilo, Valneide, Rejane, Neto, Marcilene, Ianglio, Rivanilda, pelo apoio e incentivo;

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela Bolsa de Estudos concedida;

E a todos que, de uma forma ou de outra, contribuíram para a realização desse trabalho.

E ainda que tivesse o dom da profecia, e conhecesse todos os mistérios e toda a ciência, e ainda que tivesse toda fé, de maneira tal que transportasse os montes, e não tivesse amor, nada seria.

(I Coríntos 13:2)

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABELAS.....	iv
LISTA DE SÍMBOLOS.....	v
RESUMO.....	vii
ABSTRACT.....	viii
1 INTRODUÇÃO.....	01
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	03
2.1 Importância econômica.....	05
2.1.1 Mercado e comercialização.....	06
2.1.2. Armazéns convencionais e silos.....	06
2.2 Aparelho de cisalhamento de Jenike.....	07
2.2.1 Princípio do ensaio de cisalhamento instantâneo.....	07
2.2.2 Princípio do ensaio de cisalhamento instantâneo com a parede.....	13
2.3 Determinação das propriedades físicas e de fluxo dos produtos armazenados.....	13
2.3.1 Teor de umidade.....	13
2.3.2 granulometria.....	13
2.3.3 Propriedades de fluxo dos produtos.....	14
2.3.4 Densidade do produto em função da consolidação.....	15
2.3.5 Ângulo de atrito interno (ϕ_I).....	15
2.3.6 Efetivo ângulo de atrito interno (ϕ_e).....	16
2.3.7 Ângulo de atrito do produto com a parede (ϕ_w).....	16
2.3.7.1 Determinação do Ângulo de Atrito Interno (ϕ_I) e do Efetivo Ângulo de Atrito Interno (ϕ_e).....	17
2.3.8 Função fluxo (FF).....	18
2.3.9 Fator fluxo (ff).....	19
2.3.9.1 Fluxo em silos.....	20
2.3.9.2 Tipo de fluxo durante o descarregamento.....	20
2.3.9.3 Pressões em silos.....	21
2.3.9.4 Características do produto armazenado.....	22
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	23

3.1 Produtos utilizados nos ensaios.....	23
3.2 Material da parede.....	23
3.3 Máquina de ensaio (TRANSLATION SHEAR TESTER TSG 70-140).....	24
3.4 Determinação das propriedades físicas.....	25
3.4.1 Teor de umidade.....	25
3.4.2 Granulometria.....	25
3.4.3 Propriedades de fluxo.....	25
3.4.3.1 Densidade em função da consolidação.....	25
3.4.3.2 Metodologia de ensaio para determinação do cisalhamento.....	26
3.4.3.3 Seleção dos níveis de cargas normais.....	26
3.4.3.4 Preparação da amostra.....	26
3.4.3.5 Enchimento da célula.....	26
3.4.3.6 Consolidação da amostra.....	27
3.4.3.7 Otimização.....	29
3.4.3.8 Número de rotações.....	29
3.4.4 Teste de cisalhamento.....	29
3.4.4.1 Pré-cisalhamento.....	29
3.4.4.2 Cisalhamento (Shear).....	29
3.4.5 Metodologia de ensaio para determinação do ângulo de atrito com a parede instantâneo.....	30
3.5 Função fluxo.....	31
3.5.1 Fator fluxo.....	32
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	34
4.1 Propriedades físicas.....	34
4.1.1 Teor de umidade e granulometria.....	34
4.2 Propriedades de fluxo.....	35
4.2.1 Densidade consolidada.....	35
4.2.2 Ângulo de atrito do feijão com amostras de parede de silo.....	36
4.2.3 Ângulo de atrito interno, efetivo ângulo de atrito interno e ângulo de atrito do produto com a parede.....	38
4.2.4 Função fluxo	44
4.2.5 Fator fluxo.....	45
4.2.6 Orifício de descarga.....	46

5 CONCLUSÕES.....	47
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	48
APÊNDICE.....	53

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 01 - Aparelho de cisalhamento de Jenike	08
Figura 02 - Curvas de força-tensão de amostras sobreconsolidadas (1); consolidada criticamente (2) e subconsolidadas (3)	09
Figura 03 - Célula de Jenike na posição inicial off-set.....	10
Figura 04 - Célula de Jenike na posição final off-set	10
Figura 05 - Célula de cisalhamento com anel molde e tampa de consolidação	11
Figura 06 - Curvas Tensão, Pré-Shear e Shear	12
Figura 07a - Reta que define o lugar geométrico de deslizamento do produto com a parede.....	16
Figura 07b - Lugar geométrico (YL e EYL) e ângulos de atrito interno (ϕ_i e ϕ_e)	17
Figura 08 - Funções fluxo típicas dos grãos.....	18
Figura 08 (a) e (b) - Determinação do fator fluxo.....	19
Figura 09 - Tipos de fluxo durante o descarregamento: fluxo de funil (a), fluxo de massa (b) e fluxo expandido (c).....	21
Figura 10 - Material de parede utilizados nos ensaios.....	23
Figura 11 - Aparelho de cisalhamento.....	24
Figura 12 - Aparelho registrador das forças de cisalhamento.....	24
Figura 13 - Bancada de consolidação.....	24
Figura 14 - Raspagem do excesso do produto.....	27
Figura 15 - Detalhe da consolidação da amostra.....	27
Figura 16 - Operação de rotação (twist).....	28
Figura 17 - Detalhe da preparação para o ensaio com a parede (aço liso).....	30
Figura 18 - Remoção dos pesos.....	31

Figura 19 - Círculo de mohr de tensões.....	32
Figura 20 - Curva granulométrica.....	35
Figura 21 - Densidade em função do teor de umidade.....	36
Figura 22 - Ângulo de atrito (ϕ_w) médio do feijão macassar com a parede de acrílico..	41
Figura 23 - Ângulo de atrito (ϕ_w) médio do feijão macassar com a parede de alumínio.	41
Figura 24 - Ângulo de atrito (ϕ_w) médio do feijão macassar com a parede de aço liso.	42
Figura 25 - Ângulo de atrito (ϕ_w) médio do feijão macassar com a parede de aço rugoso	42
Figura 26 - Ângulo de atrito (ϕ_w) médio do feijão macassar com a parede de madeira	43
Figura 27 - Ângulo de atrito (ϕ_w) médio do feijão macassar com a parede de concreto	44
Figura 28 - Círculo de mohr de tensões – Tu = 13% – 10kg – instantâneo.....	53
Figura 29 - Círculo de mohr de tensões – Tu = 13% – 7kg – instantâneo.....	53
Figura 30 - Círculo de mohr de tensões – Tu = 13% – 5kg – instantâneo.....	54
Figura 31 - Círculo de mohr de tensões – Tu = 15% – 10kg – instantâneo.....	54
Figura 32 - Círculo de mohr de tensões – Tu = 15% – 7kg – instantâneo.....	55
Figura 33 - Círculo de mohr de tensões – Tu = 15% – 5kg – instantâneo.....	55
Figura 34 - Círculo de mohr de tensões – Tu = 17% – 10kg – instantâneo.....	56
Figura 35 - Círculo de mohr de tensões – Tu = 17% – 7kg – instantâneo.....	56
Figura 36 - Círculo de mohr de tensões – Tu = 17% – 5kg – instantâneo.....	57
Figura 37 - função fluxo para parede de acrílico (Tu = 13%).....	58
Figura 38- função fluxo para parede de alumínio (Tu = 13%).....	58
Figura 39 - função fluxo para parede de aço liso (Tu = 13%).....	59
Figura 40 - função fluxo para parede de aço rugoso (Tu = 13%).....	59
Figura 41 - função fluxo para parede de madeira (Tu = 13%).....	60

Figura 42 - função fluxo para parede de concreto ($T_u = 13\%$).....	60
Figura 43 - função fluxo para parede de acrílico ($T_u = 15\%$).....	61
Figura 44 - função fluxo para parede de alumínio ($T_u = 15\%$).....	61
Figura 45 - função fluxo para parede de aço liso ($T_u = 15\%$).....	62
Figura 46 - função fluxo para parede de aço rugoso ($T_u = 15\%$).....	62
Figura 47 - função fluxo para parede de madeira ($T_u = 15\%$).....	63
Figura 48 - função fluxo para parede de concreto ($T_u = 15\%$).....	63
Figura 49 - função fluxo para parede de acrílico ($T_u = 17\%$).....	64
Figura 50 - função fluxo para parede de alumínio ($T_u = 17\%$).....	64
Figura 51 - função fluxo para parede de aço liso ($T_u = 17\%$).....	65
Figura 52 - função fluxo para parede de aço rugoso ($T_u = 17\%$).....	65
Figura 53 - função fluxo para parede de madeira ($T_u = 17\%$).....	66
Figura 54 - função fluxo para parede de concreto ($T_u = 17\%$).....	66

LISTA DE TABELAS

	pág.
Tabela 01 - Níveis de cargas utilizados nos ensaios de cisalhamento instantâneo em grãos de feijão macassar.....	26
Tabela 02 - Resultados da análise granulométrica realizada em grãos de feijão macassar com três teores de umidade.....	34
Tabela 03 - Ângulo de atrito do feijão macassar com a parede (ϕ_w).....	37
Tabela 04 - Propriedade de fluxo do feijão macassar.....	39
Tabela 05 - Índice de fluxo dos grãos de feijão macassar com três teores de umidade.....	44
Tabela 06 - Fator fluxo dos grãos de feijão macassar com três teores de umidade.....	45
Tabela 07 - Abertura do orifício de descarga para grãos de feijão macassar com três teores de umidade.....	46

LISTA DE SÍMBOLOS

- B – boca de descarga
- D - diâmetro das partículas (mm);
- ff - fator fluxo
- FF - função fluxo
- F_v - força vertical;
- g = aceleração da gravidade (m/s^2)
- H - peso do pendural de cargas (daN);
- $H(\alpha)$ = largura mínima da boca de descarga para uma tremonha retangular (m)
- Ps – peso seco
- Pu – peso umido
- W_c - peso do pendural de pesos (daN);
- W_L - peso da tampa (daN);
- W_m - peso da amostra de material da parede (daN);
- W_p - carga sobre o pendural de pesos no pré-shear (daN);
- W_r - peso do anel de cisalhamento (daN);
- W_s - carga sobre o pendural de pesos no shear (daN);
- W_t - peso total da célula de cisalhamento com o produto (daN);
- α - ângulo da tremonha ($^\circ$);
- ϕ_e - efetivo ângulo de atrito interno ($^\circ$);
- ϕ_{el} - efetivo ângulo de atrito interno instantâneo inferior ($^\circ$);
- ϕ_{eu} - efetivo ângulo de atrito interno instantâneo superior ($^\circ$);
- ϕ_i - ângulo de atrito interno ($^\circ$);
- ϕ_{il} - ângulo de atrito interno instantâneo inferior ($^\circ$);
- ϕ_{iu} - ângulo de atrito interno instantâneo superior ($^\circ$);
- ϕ_w - ângulo de atrito com a parede: tangente do coeficiente de atrito com a parede ($^\circ$);
- ϕ_{wl} - ângulo de atrito com a parede inferior ($^\circ$);
- ϕ_{wu} - ângulo de atrito com a parede superior ($^\circ$);
- γ - densidade solta (kN/m^3);
- γ_a - densidade aerada (kN/m^3);

γ'_u - densidade compacta (kN/m^3);

μ - coeficiente de atrito do produto com a parede;

σ - tensão normal (kPa) ;

σ_c = tensão crítica (Pa) = N/m^2

σ_c - resistência ao deslizamento inconfinado (resistência inconfined) (kPa);

σ_m - tensão máxima de consolidação (kPa);

σ_p - tensão normal de pré-cisalhamento (tensão normal de pré-shear) (kPa);

σ_s - tensão normal de cisalhamento (tensão normal de shear) (kPa);

σ_w - tensão normal da parede (kPa);

σ_1 - tensão principal máxima (kPa);

τ - tensão de cisalhamento (kPa);

τ_p - tensão de pré-cisalhamento (pré-shear) (kPa);

τ_s - tensão de cisalhamento (shear) (kPa);

τ_w - tensão de cisalhamento da parede (kPa);

RESUMO

FREIRE, Ibirealdo Marques. **Propriedades de fluxo do feijão macassar (*Vigna unguiculata (L.) Walp.*) para o dimensionamento de silos.** 2004. 66f. Dissertação (Mestrado em Construções Rurais e Ambiente) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2004.

O feijão macassar é uma leguminosa comestível, dotada de alto conteúdo protéico, amplamente distribuída no mundo, presente especialmente nas regiões tropicais e subtropicais. No Brasil, é cultivado nas regiões Norte e Nordeste por pequenos produtores, principalmente em cultivo de subsistência. No Brasil o número de pesquisas nesta área ainda é muito limitado e como constatação deste fato, é que o país não possui uma norma específica de “Ações e Fluxo em Silos”, que possa orientar projetos e profissionais ligados a essa área mesmo sendo um dos principais produtores de grãos do mundo, gerando assim inúmeros problemas com o projeto de silos nas fábricas de processamento de produtos agrícolas. O presente trabalho tem como objetivo determinar as propriedades físicas e de fluxos do feijão macassar (*Vigna unguiculata (L.) Walp.*) para serem empregados no dimensionamento de silos. Os ensaios foram realizados utilizando-se a máquina TSG 70-140 conhecida como “Jenike Shear Cell” a qual é recomendada pelas principais normas internacionais; sendo determinadas as seguintes propriedades: teor de umidade, granulometria, densidade consolidada, ângulo de atrito interno instantâneo, efetivo ângulo de atrito interno instantâneo, ângulo de atrito com a parede, função fluxo e fator fluxo. De acordo com os resultados obtidos, os orifícios de descargas calculados para as condições de teor de umidade e níveis de cargas utilizados, garantirão fluxo de funil sem a possibilidade de ocorrer “efeito tubo”, como as propriedades físicas e de fluxos foram determinadas seguindo a metodologia das principais normas internacionais, estas poderão ser inseridas na futura norma brasileira de ações e fluxo em silos.

Palavras-chave: Projeto de silo, pressão, escoamento, *Vigna unguiculata (L.) Walp.*

ABSTRACT

FREIRE, Ibirealdo Marques. **Macassar bean flow properties (*Vigna unguiculata (L.) Walp.*) for silos configuration projects.** 2004. 66f. Dissertação (Mestrado em Construções rurais e Ambiente) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2004.

The macassar bean (*Vigna unguiculata (L.) Walp.*) is a comestible leguminous containing a high protein value. It is widely distributed around the world, mainly in tropical and subtropical regions. In Brazil, it is cultivated in North and Northeast regions by small producers mainly for subsistence. Unfortunately, there is a very low amount of research in this area, as can be seen by the fact that there is no specific norm for “actions and stream on silos”, which could be used for orientation of projects and professionals related to this area, even being Brazil one of the largest grain producers of the world. As consequence of this fact, there is a generation of innumerable problems with silos projects in agricultural products processing plants. This work has the main objective of determining the physical and stream properties of macassar bean (*Vigna unguiculata (L.) Walp.*) for application on silos configuration projects. Tests were executed with a TSG 70-40 machine, known as “Jenike Shear Cell”, recommended by the main international norms. The following properties were established: humidity level, particle size, consolidated density, angle of internal friction instantaneous, effective angle of internal friction instantaneous, friction angle of silo wall, flow function and flow factor. According to results, the unload holes calculated for the used humidity and load levels will grant a funnel flow, avoiding the “tube effect”. As the physical and flow properties were determined according to international norms, they can be used for the future Brazilian norm for action and flow on silos.

Keyword: Design of silo, pressure, fluability, *Vigna unguiculata (L.) Walp.*

1. INTRODUÇÃO

O feijão macassar é uma leguminosa comestível, dotada de alto conteúdo protéico, amplamente distribuída no mundo, presente especialmente nas regiões tropicais e subtropicais. No Brasil, é cultivado nas regiões Norte e Nordeste por pequenos produtores, principalmente em cultivo de subsistência.

O Brasil apresenta muitos problemas relacionados com o armazenamento de produtos agrícolas, principalmente pela carência de tecnologia de armazenagem, ocorrendo perdas irreparáveis, assim como muitos outros países do mundo, ainda têm problemas com o armazenamento de produtos agrícolas e outros, tendo grandes perdas devido à ineficiência da capacidade de armazenagem ou a utilização de técnica inadequada de armazenamento.

A necessidade de aumentar a capacidade de armazenamento e de atender às solicitações das empresas de processamento demonstra a importância do estudo da problemática de silos, para o desenvolvimento de novas tecnologias e soluções dos problemas existentes.

Os silos são estruturas difíceis de projetar com relação a fluxos contínuos e como estruturas econômicas e seguras, devido aos produtos particulares a serem armazenados terem propriedades diferentes daqueles dos líquidos e dos sólidos. Estes são também uma das estruturas que têm alto índice de ruínas. Para uma estrutura ser segura e econômica, é importante que as cargas não sejam subestimadas, nem especificadas como maiores que as estritamente necessárias (ROBERTS, 1995).

O conhecimento insuficiente sobre as pressões e o fluxo de produtos explica o grande número de silos com problemas de fluxo e com deformações nas paredes. Portanto, é necessário que o projetista esteja familiarizado com as pressões que ocorrem nas paredes do silo e do comportamento do fluxo do produto no seu interior (BENINK, 1989).

Problemas que comumente ocorrem na operação de silos de armazenamento reduzem a sua capacidade abaixo dos valores especificados. Na maioria dos casos, os problemas que ocorrem na prática, são devidos a concepção de projetos inadequados associados com a falta

de conhecimento das relevantes propriedades de fluxo dos produtos armazenados e do tipo de fluxo (CALIL JUNIOR, 1990) comenta que existe uma grande discrepância dos critérios adotados entre as normas internacionais, e que as maiores ocorrem com relação às propriedades de fluxo dos produtos.

A máquina e a metodologia utilizada no trabalho é recomendada pelas principais normas internacionais para o estudo das propriedades de fluxo para elaboração de projetos de pressões e fluxo em silos.

No Brasil o número de pesquisas nesta área é muito limitado e como constatação deste fato, é que o país não possui uma norma específica de “Ações e Fluxo em Silos”, que possa orientar os profissionais na elaboração de projetos ligados a essa área, mesmo sendo um dos principais produtores de grãos do mundo, gerando assim inúmeros problemas com o projeto de silos nas fábricas de processamento de produtos agrícolas.

Diante das considerações anteriores este trabalho tem como objetivo principal, a caracterização do feijão macassar (*Vigna unguiculata (L.) Walp.*) para determinação dos parâmetros necessários ao projeto de silos.

Objetivo geral: determinar as propriedades físicas e de fluxo.

Objetivos específicos: determinar teor de umidade, granulometria, densidade consolidada, ângulo de atrito interno instantâneo, efetivo ângulo de atrito interno instantâneo, ângulo de atrito do feijão com a parede, fator fluxo e função fluxo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Vigna unguiculata (L) Walp, é o nome científico do feijão macassar que, dependendo da região, pode ser reconhecido como feijão-de-corda, feijão-de-moita, feijão-de-vara, feijão macassa, feijão fradinho, entre outros. É uma leguminosa comestível dotada de alto conteúdo protéico e de boa capacidade de fixar nitrogênio (FREIRE *et al.* 1981 e 1988). É o feijão mais cultivado na Região Nordeste, encontrando-se do litoral até o sertão (BRAGA, 1976).

O macassar popularmente conhecido como feijão de corda é uma cultura amplamente distribuída no mundo. Provavelmente, tem sua origem no continente africano. Entrou, no Brasil, pelo Estado da Bahia, através de colonizadores portugueses e espanhóis, disseminando-se por todas as regiões do País, acompanhando sua colonização. É uma cultura extremamente rústica, pouco exigente em fertilidade de solos, tolerante a altas temperaturas e à seca. Encontrou, no Brasil, boas condições para adaptação e expansão de áreas exploradas. Temperaturas, na faixa de 18 a 34°C, são consideradas ideais para seu desenvolvimento. É a principal cultura de subsistência do semi-árido e fonte de proteínas de baixo custo, notadamente, para as populações carentes. Quase toda sua produção vem do plantio em regime de sequeiro, onde tem expressiva área cultivada. Nos cultivos irrigados, mais perto dos grandes centros, boa parte de sua produção destina-se ao consumo na forma de feijão verde ou de hortaliça. Em anos de escassez do produto, devido à sua rusticidade, rapidez e baixo custo de produção, o caupi é, estrategicamente, cultivado em lugar de outras culturas, para a produção de grãos secos, assegurando altos retornos econômicos na sua exploração.

O feijão macassar é cultivado em todos os estados da região nordeste, apresentando participação efetiva na dieta da população paraibana. Apesar da importância sócio-econômica que representa, as cultivares utilizadas são de baixa produtividade, ciclo longo e desuniformes quanto ao comprimento da vagem, tamanho, formato e cor da semente (PEREIRA *et al.* 1992).

Sem distinção de gênero ou variedade, o feijão faz parte dos produtos de pequenos agricultores, uma vez que ele não exige processamento agroindustrial intensivo para o consumo. É colocado no mercado por um grande número de empresas e não tem marca

consolidada na preferência dos consumidores. As tecnologias para deixar o feijão pronto para o consumo são simples e facilmente disponíveis.

De acordo com Germano (1997), a cultura do feijão macassar ocupa lugar de destaque no cenário mundial, nacional e regional, principalmente para os pequenos produtores que praticam a agricultura de subsistência.

Parte significativa da população rural dos países em desenvolvimento depende da agricultura de pequena escala, orientada para a subsistência e baseada no trabalho da família. São pequenos proprietários de terra que empregam mão-de-obra familiar e mantêm um sistema produtivo diversificado com culturas e criações voltadas para o auto consumo e para o mercado interno (SENADO FEDERAL, 1997; SILVA, 1997). Devido o alto nível de pobreza esses agricultores são obrigados a vender suas produções logo após as colheitas, portanto na época de preços baixos. Contudo, o nível de tecnologia empregado e as perdas de grãos que se intensificam não só em condições de campo, na época da colheita, mas principalmente durante as fases de secagem, beneficiamento e armazenamento do produto, têm determinado o baixo rendimento da cultura. Na fase de armazenamento, o ataque de insetos assume capital importância pelas perdas significativas dos produtos destinados à alimentação humana e animal (BRACCINI & PICANÇO, 1995). O caupi é considerado alimento rico em proteína, apresenta elevado conteúdo energético, teores altos de cálcio, ferro e vitaminas. O seu valor nutricional pode ser considerado superior ao do feijão-comum (*Phaseolus vulgaris L.*), porque possui maior conteúdo de metionina, cistina e triptofano, além de possuir uma proteína de melhor digestibilidade e apresentar menores quantidades de substâncias responsáveis pela flatulência.

De acordo com Araújo *et al.* (1984), o feijão macassar no Brasil é cultivado para a produção de grãos secos ou verdes, visando o consumo humano “in natura”, na forma de conserva ou desidratado. Além disso, o caupi também é utilizado como forragem verde, feno, ensilagem, farinha para alimentação animal e, ainda, como adubação verde e proteção do solo, e (TEXEIRA *et al.* 1988) afirmou que, nos Estados de Alagoas, Pernambuco e Paraíba o consumo, nas capitais, é maior sob a forma de grãos verdes. No Rio Grande do Norte, diversas cultivares de macassar foram indicadas para plantio, devido às preferências regionais com relação ao porte, tipo de maturação, ciclo da planta, cor, forma e tamanho dos grãos, as cultivares disponíveis no mercado, apesar do alto potencial produtivo e resistência a viroses, não atendem, satisfatoriamente, a produtores e consumidores. A maior dificuldade enfrentada reside na marcante diferença entre o tamanho e a cor das sementes preferidas pelos consumidores e os padrões de tamanho e da cor das sementes das cultivares e linhagens de

gens desejáveis utilizadas nos programas de melhoramento. No estado da Paraíba, o feijão-macassar é cultivado em quase todas as micro-regiões, onde detém 75% das áreas de cultivo com feijão. Assim, exerce efetiva participação na dieta alimentar da população, por constituir-se em excelente fonte de proteínas e carboidratos de baixo custo (SILVA & OLIVEIRA, 1993; IBGE, 1996).

2.1. Importância econômica

O feijão-caupi, feijão-de-corda ou feijão-macassar é uma excelente fonte de proteínas (23-25% em média) e apresenta todos os aminoácidos essenciais, carboidratos (62%, em média), vitaminas e minerais além de possuir grande quantidade de fibras dietéticas, baixa quantidade de gordura (teor de óleo de 2%, em média) e não conter colesterol. Representa alimento básico para as populações de baixa renda do Nordeste brasileiro. Apresenta ciclo curto, baixa exigência hídrica e rusticidade para se desenvolver em solos de baixa fertilidade e, por meio da simbiose com bactérias do gênero *Rhizobium*, tem a habilidade para fixar nitrogênio do ar.

A área ocupada com feijão-macassar, no mundo, está em torno de 12,5 milhões de ha, com 8 milhões (64% da área mundial) na parte oeste e central da África. A outra parte está localizada na América do Sul, América Central e Ásia, com pequenas áreas espalhadas pelo sudoeste da Europa, sudoeste dos Estados Unidos e da Oceania. Entre todos os países, os principais produtores mundiais são Nigéria, Niger e Brasil (QUIN, 1997).

No Brasil, o feijão-macassar é cultivado predominantemente no sertão semi-árido da região Nordeste e em pequenas áreas na Amazônia. Representa 95 a 100% do total das áreas plantadas com feijão-macassar nos Estados do Amazonas, Maranhão, Ceará, Piauí e Rio Grande do Norte (MAIA, 1996). No Brasil a quantidade produzida é de 3.064.228 t, no Nordeste é de 865.952 t, na Paraíba é de 51.639t e em Campina Grande é de 1.200t (IBGE, 2002). Segundo dados do IBGE (2003), a produção total em toneladas foi de 3.309.900t e a estimativa para 2004 é de 3.132.947t. Os maiores produtores são os Estados do Ceará (159.471 t), Piauí (58.786 t), Bahia (50.249 t) e Maranhão (35.213 t), os quais também apresentam as maiores áreas plantadas (LEVANTAMENTO SISTEMÁTICO DA PRODUÇÃO AGRÍCOLA, 1993-2001).

Com relação aos aspectos socioeconômicos, a cultura do feijão-macassar é responsável pela geração de 1.451.578 empregos/ano no Brasil, com o valor de produção estimado em US\$ 249.142.582,00/ano (CAUPI MOVIMENTA, 2001).

2.1.1. Mercado e comercialização

O mercado do feijão-macassar ainda se restringe a grãos secos, grãos verdes (hidratados) e sementes, havendo já algumas iniciativas para o processamento industrial de feijão-macassar para produção de farinha e produtos pré-cozidos e congelados. O mercado do feijão-macassar ainda tem contornos regionais, concentrando-se, principalmente, nas regiões Nordeste e Norte. Entretanto, há indícios de uma certa expansão da cultura na região Sudeste, principalmente no norte de Minas Gerais e Rio de Janeiro, predominando nesses Estados o grão da Subclasse Fradinho.

2.1.2. Armazéns convencionais e silos

Apesar da prática da armazenagem ser tão antiga como a própria civilização, ela não tem, ainda, a conotação de uma operação agrícola tradicional. No entanto, o armazenamento na propriedade, constitui uma prática de suma importância, tanto como um complemento da estrutura armazenadora, como um imperativo para minimizar as perdas quanti-qualitativas a que estão sujeitos os produtos na fase pós-colheita. Embora não haja dados concretos, acredita-se que estas perdas ocorrem em torno de 40% ou mais, ocasionadas, principalmente, pelo ataque de pragas, insetos e roedores, devido, principalmente, à inadequação das instalações e à falta de conhecimento técnico adequado à prática da armazenagem (CORREIA, 1983). Em feijão-macassar, as sementes são armazenadas de diferentes formas. Nas pequenas propriedades o feijão-macassar é armazenado em garrafas de vidro, recipientes com camadas de areia fina, latas de flandres e tambores de zinco; nas médias e grandes propriedades, as sementes são armazenadas em tambores de zinco e silos metálicos.

O acondicionamento para comercialização é feito, principalmente, em sacos de fibra de polietileno e em sacos de papel multifoliado, geralmente com peso de 60 kg.

Sem o armazenamento adequado a produção é vendida logo após a colheita, por preço desfavorável para o produtor, sem benefício de preço baixo para o consumidor, mas, com lucro excepcional para o intermediário, trazendo prejuízos para toda coletividade devido aos altos preços de comercialização nos grandes centros consumidores e principalmente pelo desestímulo ao produtor.

O armazenamento em sacarias é prática dominante no Brasil. É uma forma de armazenagem dispendiosa e quando estocados em sacos, o produto fica sujeito a variações ambientais. Em regiões úmidas, a qualidade do produto é muito prejudicada pela ação de fungos; pois, o grão é um material higroscópico que absorve umidade e favorece a

proliferação de microrganismos. Em condições de armazéns, os cereais e legumes têm perdas estimadas em 10% ao ano (HARA *et al.* 1997).

Os autores destacam que quando uma produção é armazenada a granel (silos), têm-se as seguintes vantagens:

- A diminuição das perdas, que em alguns casos, pode atingir 5%.
- A conservação do produto por diversos anos sem alterar substancialmente o mesmo, evitando flutuações no abastecimento.
- Redução, em pelo menos 10% de sacarias.
- Impedimento da racionalização do produto, quando especificação por amostragem;
 - Obtenção de um produto mais uniforme, limpo, livre do ataque de insetos, de roedores e de microrganismos.

Estruturas como silos, células, armazéns a granel e tremonha, que chamaremos de silos por facilidade, são largamente usados na indústria, mineração e agricultura. Eles são, entretanto, difíceis de projetar com relação aos fluxos contínuos e como estruturas econômicas e seguras, devido aos produtos particulares a serem armazenados terem propriedades diferentes daqueles dos líquidos e dos sólidos. Estes são também uma das estruturas que têm alto índice de ruínas (ROBERTS, 1995).

Quando os silos são corretamente dimensionados e construídos, certamente diminui sensivelmente parte desta perda, que ocorre durante o armazenamento. Para produtores que ainda armazenam sua produção em sacos, que na maioria dos casos são pequenos produtores, a construção de silos de alvenaria, de baixo custo, trará a possibilidade de eliminar as perdas por ataques de ratos e insetos e, proporcionará melhor oportunidade de comercialização.

2.2 APARELHO DE CISALHAMENTO DE JENIKE

Segundo Roberts; Ooms (1987), devido ao grande desenvolvimento da mecânica dos sólidos, Jenike em 1952, iniciou seus estudos investigando a aplicabilidade dos equipamentos de testes disponíveis da mecânica dos solos (aparelho triaxial, aparelhos de cisalhamento diretos, aparelho de cisalhamento anelar) para medir as propriedades dos produtos armazenados. Visto que, todos estes equipamentos foram insatisfatórios, Jenike desenvolveu um método e um aparelho de cisalhamento direto para produtos armazenáveis, o qual chamou de "Jenike Shear Cell", mostrado na Figura 01.

O aparelho de cisalhamento de Jenike (Figura 01) é equipado com: uma célula de cisalhamento de forma circular, a qual é colocada sobre a base da máquina; um pendural com

pesos, para aplicação de uma carga vertical por gravidade na célula; um suporte de carga acionado eletro-mecanicamente, o qual promove a ação de cisalhamento, movendo-se horizontalmente numa velocidade entre 01 e 03 mm/minuto; uma célula de carga para medir a força de cisalhamento e um registrador para indicação desta força.

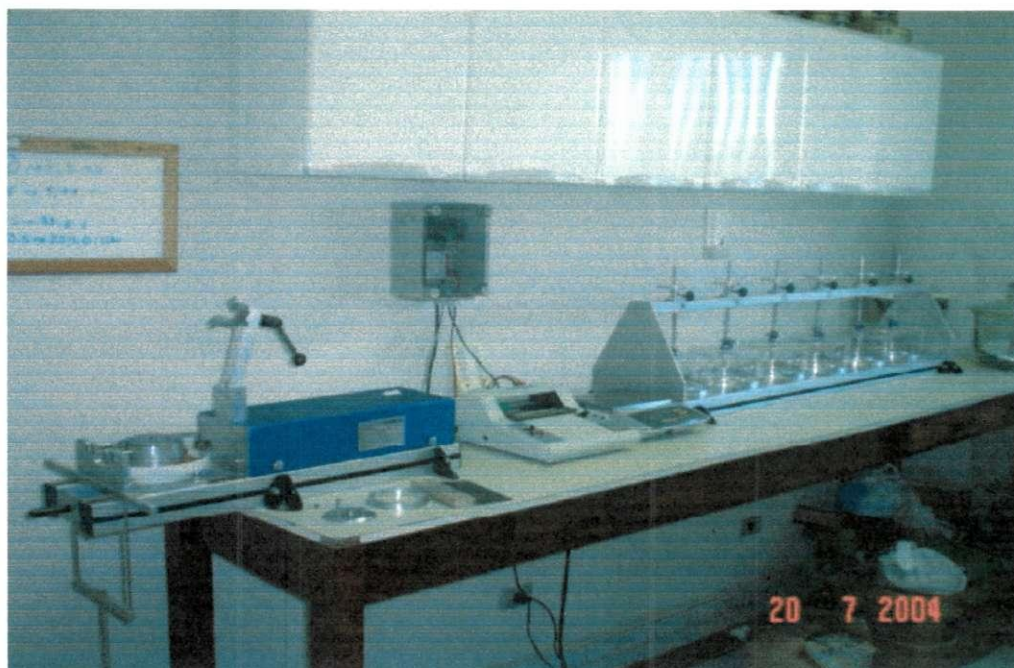


Figura 01 - Aparelho de cisalhamento de Jenike

2.2.1 Princípio do ensaio de cisalhamento instantâneo

A célula de cisalhamento de Jenike consiste de: base (1); anel de cisalhamento (2); tampa de cisalhamento (3); suporte (4) e pino de força (5). Antes do cisalhamento, o anel é colocado na posição off-set e uma força vertical (F_v) é aplicada na tampa, e conseqüentemente nas partículas do produto dentro da célula, por meio do pendural de pesos (8).

Um procedimento especial é necessário para preparar a amostra no teste de cisalhamento. Inicialmente, o anel de cisalhamento é colocado em cima da base na posição off-set, mostrado na Figura 03, através de uma pressão suave do anel com os dedos contra o parafuso fixo (9), mostrado na Figura 05. O anel molde (10) é colocado sobre o anel de cisalhamento, a célula teste é cheia com o produto e o excesso é raspado e nivelado com o topo do anel molde. A tampa de operação de rotações (11) é colocada sobre a superfície do produto e uma força vertical (F_v) é aplicada por meio de um pendural de pesos com peso total W_c , desta maneira, compactando o produto. Depois são removidos, o pendural com as cargas, a tampa de operação de rotações e o anel molde e o produto é novamente raspado e nivelado com o topo do anel de cisalhamento. A força horizontal é aplicada ao suporte, por uma haste

constante de 01 a 03 mm/minuto. A haste é fixada a um sistema de forças e, através de um transdutor, mede a força do cisalhamento F_s . Durante a operação de cisalhamento, o anel de cisalhamento move-se da posição off-set original, Figura 03, para a posição off-set final Figura 04. Nesta direção, o anel de cisalhamento pode percorrer até o fim, uma distância máxima correspondente à soma da espessura das paredes da base e do anel de cisalhamento (MILANI, 1993).

A força e respectiva tensão de cisalhamento registrada é inspecionada e, dependendo do grau de consolidação produzido no produto pela aplicação de cargas de peso W_p , podem ser obtidos três tipos de curvas de tensão de cisalhamento como mostra a Figura 02.

Se o produto sob o teste, o grau de consolidação é insuficiente (Figura 02 - curva 3). Portanto, a amostra é dita subconsolidada e a densidade na zona de cisalhamento aumenta durante o teste. Se o grau de consolidação é excessivo, a força de cisalhamento aumenta inicialmente, passando diretamente a um máximo e depois diminui (Figura 02 - curva 1). Portanto, a amostra será sobreconsolidada e a densidade do produto na zona de cisalhamento diminui um pouco depois de passar completamente pelo máximo.

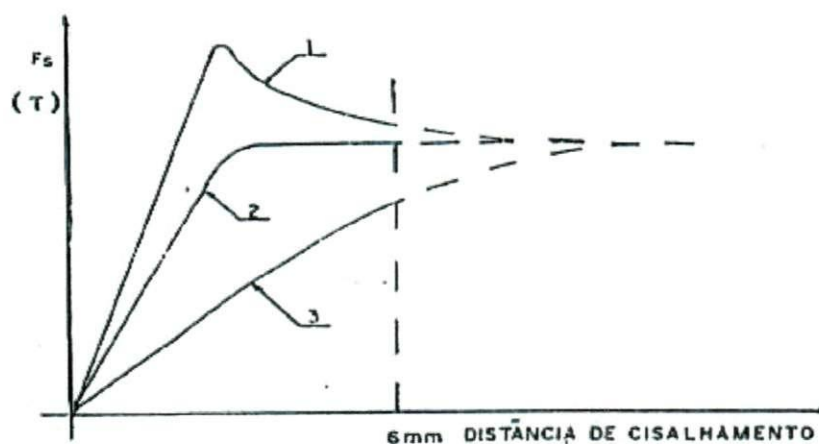


Figura 02 - Curvas Tensão de feijão sobreconsolidada (1); consolidada criticamente (2) e subconsolidada (3).

Durante o cisalhamento, dentro da célula, na amostra de um particular produto, desenvolve-se uma zona de cisalhamento. Visto que, a haste avança em velocidade constante, o registrador da força de cisalhamento versus tempo transforma essa força em tensão de cisalhamento. Portanto, é especialmente importante que a força de cisalhamento da haste de

medida atue sobre o suporte no plano de cisalhamento (plano entre a base e o anel), nem acima ou abaixo deste plano.

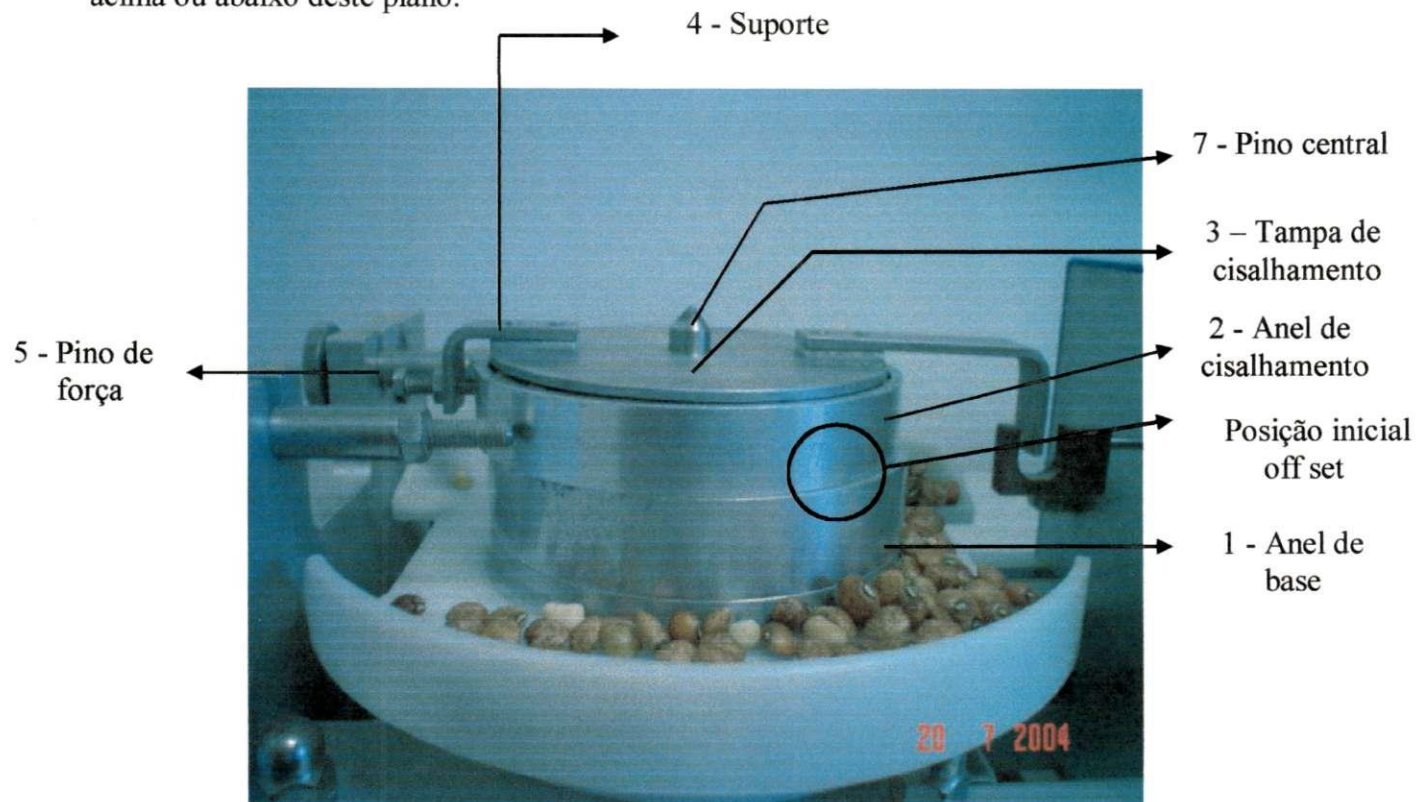


Figura 03 - Célula de Jenike na posição inicial off-set

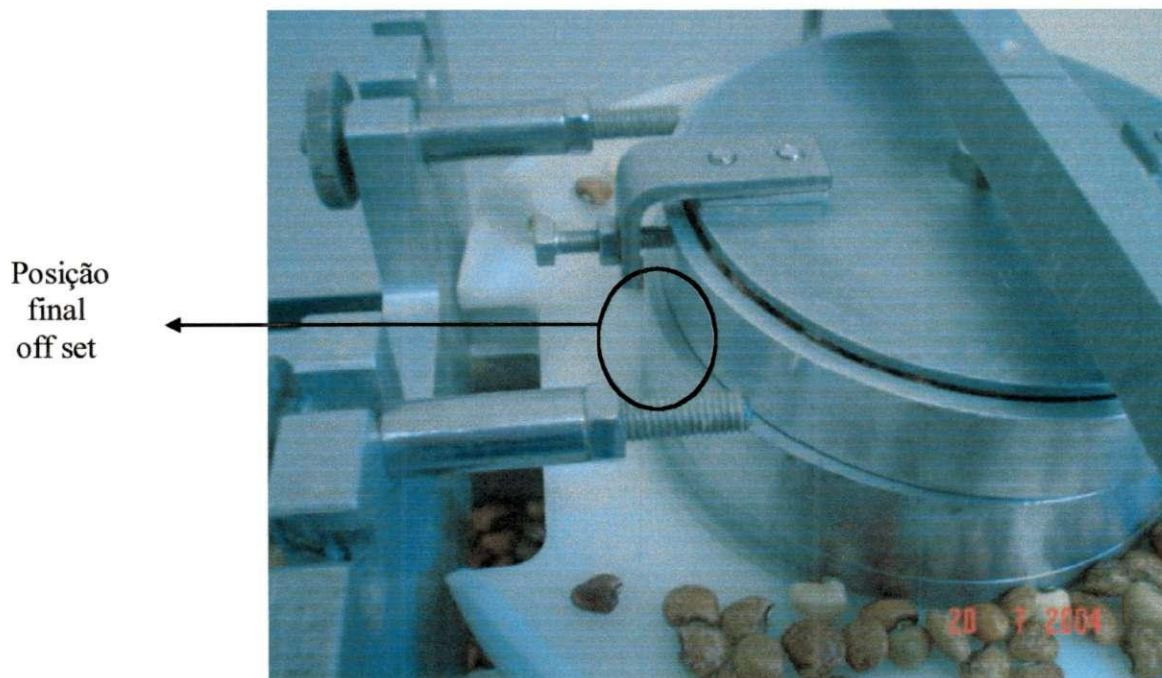


Figura 04 - Célula de Jenike na posição final off-set

Desta maneira, pode ser visto que para um dado valor de W_p , o valor da força de cisalhamento versus força resistente, depende da densidade original do produto na célula, que

depende do grau de consolidação do produto durante a preparação da amostra para o teste de cisalhamento.

Contudo, o teste de cisalhamento constitui-se de duas partes. A primeira é a preparação da amostra para obtenção da consolidação crítica e, obtendo um fluxo de estado estável na célula de cisalhamento com uma densidade do produto definida em zona de cisalhamento. Esta densidade é definida pelos valores das tensões normais e de cisalhamento e pelo fluxo de estado estável. Na segunda parte do teste, a medição real das tensões de cisalhamento é realizada com valores de cargas normais W_s , determinando às forças de cisalhamento necessárias para deslizamento do produto.

A célula de cisalhamento de Jenike é limitada a uma distância de cisalhamento de aproximadamente 6mm. Portanto, o fluxo de estado estável deverá ser alcançado dentro de uma distância de cisalhamento em torno de 4 -5 mm, deixando sobrar uma distância para o teste real de cisalhamento. A técnica para obter um fluxo de estado estável em curta distância de cisalhamento desenvolvida por Jenike, chamado de consolidação, consiste de operações de rotações e de Pré-cisalhamento.

Quando a amostra se encontrar subconsolidada, uma carga maior (W_c) ou um número maior de rotações devem ser aplicados na tampa. Se a amostra é sobreconsolidada, a carga (W_c) ou o número de rotações deverá ser reduzido. Deste modo, é possível por tentativas encontrar uma combinação entre a carga (W_c) e o número de rotações, tal que a seleção de pesos W_t e a força de cisalhamento (tensão de cisalhamento) registrada indiquem a presença da consolidação crítica da amostra. Esta operação é chamada de otimização.



Figura 05 - Célula de cisalhamento com anel molde e tampa de consolidação

Tendo alcançado esta estabilidade, a haste de medida de força é retraída e, portanto a força de cisalhamento cai a zero. Na segunda parte, a carga W_p é trocada por uma carga menor W_s , o motor é acionado novamente e a força é medida na haste na direção já desenvolvida. Quando a haste toca no suporte, a força de cisalhamento aumenta rapidamente, indo direto a um valor máximo, representando a força de cisalhamento de deslizamento e depois ela começa a diminuir. Esta parte do teste é chamada de cisalhamento.

A haste de medida de força mede a força de cisalhamento no plano de cisalhamento entre a base e o anel e conseqüentemente, a correspondente força normal neste plano será determinada. Na célula de cisalhamento de Jenike esta força normal (F_v) é uma força vertical produzida pela combinação dos pesos: carga W_s ; pendural de pesos H ; tampa de cisalhamento W_L ; anel W_r e material dentro do anel de cisalhamento sobre o plano de cisalhamento (W_m).

Tensões de pré-cisalhamento são designadas por σ_p e τ_p (ponto de pré-cisalhamento, P) e as tensões de deslizamento por σ_s e τ_s (ponto de cisalhamento, S).

Quando se planeja o teste de cisalhamento, é necessário seleccionar os níveis de cargas de pré-cisalhamento e de cargas normais de cisalhamento, aos quais os testes serão realizados. Estes são referidos como níveis de tensões, normais de pré-cisalhamento e normais de cisalhamento. (Figura 06).

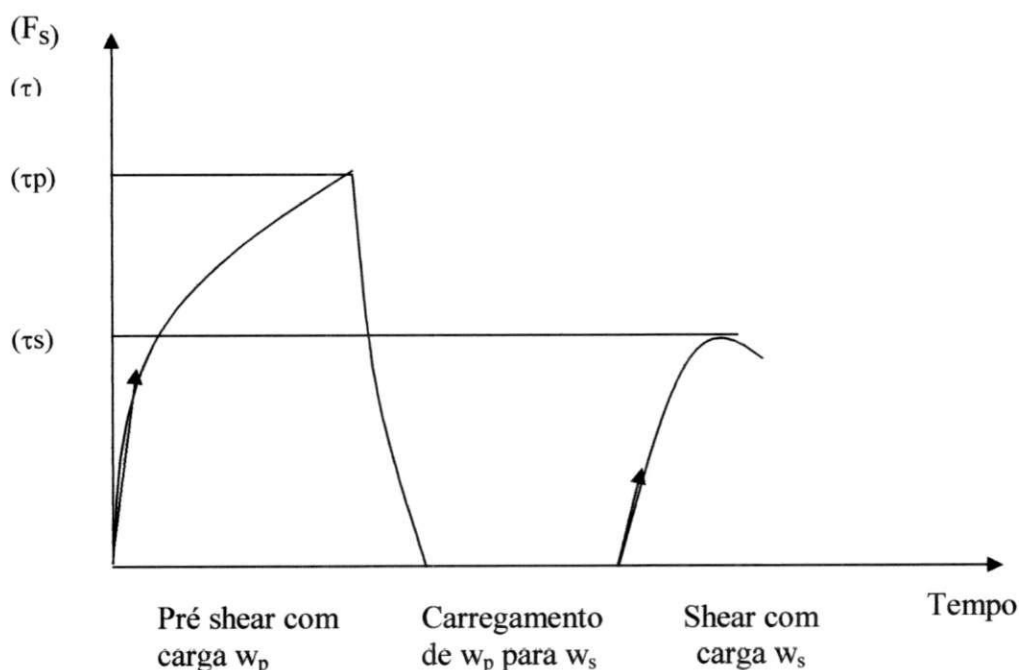


Figura 06 – Curvas Tensão, Pré-Shear e Shear

2.2.2 Princípio do ensaio de cisalhamento instantâneo com a parede

Quando se mede o atrito, entre um produto e uma amostra de material da parede do silo, no teste a base da célula de cisalhamento é substituída por uma amostra de material. A amostra contida na parte superior da célula de cisalhamento (o anel e tampa de cisalhamento) é cisalhada sobre a amostra de material da parede, sob diferentes tensões normais de parede σ_w e os valores das tensões de cisalhamento τ_w são medidos. O ângulo de atrito da parede, ϕ_w é obtido da relação τ_w/σ_w , por exemplo $\phi_w = \arctan(\tau_w/\sigma_w)$.

2.3 Determinação das propriedades físicas e de fluxo dos produtos armazenados

2.3.1 Teor de umidade

O fluxo de um sólido decresce com o aumento do teor de umidade, alcançando um valor máximo de aproximadamente 80 a 90% de saturação. Acima deste teor de umidade, o sólido adquire propriedades viscosas, e testes de cisalhamento podem ser inaplicáveis (CALIL JUNIOR, 1990).

Para testes de fluxo, a amostra deve, entretanto, ser a mais úmida que possa ser encontrada em uso e, durante os testes, a amostra e a célula de cisalhamento devem ser manipuladas rapidamente para minimizar erros devidos à evaporação. Esta inconveniência na manipulação pode ser minimizada mantendo a sala dos testes em uma alta umidade relativa. O atrito na parede para o cálculo das pressões deve ser determinado utilizando o produto o mais seco e o mais úmido que possa ser usado (CALIL JUNIOR, 1990).

2.3.2 Granulometria

A análise da granulometria de um produto é muito importante, pois o estudo dos resultados nos mostra a relação de fluabilidade e a capacidade das partículas finas de formar arcos, em comparação com o fluxo livre das partículas granulares (CALIL JUNIOR, 1984).

Como regra geral, os produtos que não contêm partículas menores que 0,25mm são produtos de fluxo livre. Evidentemente, existem exceções à regra, como por exemplo, os grãos que fermentam sob diversos teores de umidade e condições atmosféricas adquirem resistência e deixam de ser de fluxo livre (NASCIMENTO, 1996).

Calil Junior (1984), diz que a classificação dos produtos armazenados pode ser feita em função das dimensões do diâmetro (D) de suas partículas.

Segundo Ravenet (1983), é necessário efetuar uma classificação das partículas de acordo com o tamanho. O pesquisador classifica as partículas nos seguintes tipos:

- partículas grossas com dimensão superior a 100mm;
- partículas granulares com dimensão compreendida entre 30 e 5mm;
- partículas finas com dimensão compreendida entre 5mm e 100microns;

Dentro desse grupo pode existir a coesão.

- partículas extrafinas com dimensão inferior a 10microns.

Calil Júnior (1984) *apud* Barrêto (1997), Classifica os produtos armazenados em função das dimensões do diâmetro (D_p) das partículas:

- $D_p > 1\text{mm}$ - granulares;
- $0,297 \leq D_p < 1\text{mm}$ - pulverulentos e/ou pulverulentos coesivos;
- $0,079 \leq D_p < 0,297\text{mm}$ - pulverulentos coesivos finos;
- $D_p < 0,079\text{mm}$ - pulverulentos coesivos extrafinos.

2.3.3 Propriedades de fluxo dos produtos

Entre os fatores que influenciam o comportamento de fluxo dos produtos armazenados, além da pressão de consolidação, estão as dimensões das partículas, a temperatura, o teor de umidade do produto e o tempo de armazenamento (CALIL JUNIOR, 1984). A determinação das propriedades de fluxo é de fundamental importância para o cálculo de fluxo e de pressões em silos, por isto o estudo de produtos cujas propriedades ainda não foram determinadas deve ser realizado visando o aumento de dados disponíveis aos engenheiros projetistas.

As propriedades de fluxo que precisam ser analisadas no projeto de silos para armazenamento são as seguintes (JENIKE, 1964; RAVENET, 1983; ROBERT, 1987):

- Densidade do produto em função da consolidação γ
- Ângulo de Atrito Interno ϕ_i
- Efetivo Ângulo de Atrito Interno ϕ_e
- Ângulo de Atrito do Produto com a Parede ϕ_w (depende do tipo de material escolhido para a confecção do silo)
- Função Fluxo FF (instantânea ou com o tempo)
- Fator Fluxo ff

2.3.4 Densidade do produto em função da consolidação

Segundo Calil Junior (1984), a densidade do produto não pode ser usada como um fator de fluxo. Não há uma relação linear direta entre fluxo e densidade, entretanto, a densidade de um produto precisa ser calculada, pois é um parâmetro importante para determinação do fluxo e das pressões em silos.

Jenike (1964), mostra que a influência da compressibilidade de um produto (mudança de densidade com a pressão de consolidação) no processo de fluxo é desprezível.

Produtos pulverulentos de baixa densidade têm a vantagem de fluir com menor resistência à compactação na tremonha, mas tem a desvantagem da inércia em repouso e uma alta resistência ao ar. Um produto pulverulento de alta densidade pode compactar para uma maior resistência na tremonha, mas terá uma baixa inércia em repouso. O produto granular não é tão compressível e então não ganha muita resistência em sua boca de descarga do silo (CALIL JUNIOR, 1984).

São definidos basicamente três diferentes valores de densidade, chamadas, “solta”, “compacta” e “aerada”, para os quais são usados os seguintes símbolos γ , γ_u e γ_a , respectivamente. O valor determinado na célula de cisalhamento corresponde à densidade compacta, (γ_u). Quando só um valor (γ) é disponível, então γ_a deverá ser tomado como $0,75\gamma$ e γ_u como $1,25\gamma$. O valor inferior, isto é, γ ou γ_a , deve ser na estimativa da capacidade de armazenamento do silo (CALIL JUNIOR, 1990).

2.3.5 Ângulo de atrito interno (ϕ_i)

Para certos produtos, dada uma certa tensão de consolidação, ocorre uma força interna entre suas partículas. Esta inclinação é definida como ângulo de atrito interno. A determinação do ângulo de atrito interno está relacionada com o conhecimento do IYL (lugar geométrico de deslizamento). Este ângulo corresponde à inclinação que o IYL forma com o eixo horizontal do Círculo de Mohr de Tensões, que será detalhado no próximo capítulo.

Bandeira (1997), ressalta a importância da determinação das propriedades de atrito dos produtos agrícolas no projeto de equipamentos para descarga de sólidos e de estruturas para armazenagem destes produtos.

2.3.6 Efetivo ângulo de atrito interno (ϕ_e)

O efetivo ângulo de atrito interno relaciona-se da mesma forma que o ângulo de atrito interno, com o conhecimento IYL. É determinado através de uma reta que sai da origem e toca o Semicírculo de Mohr de Tensões.

Segundo Nascimento (1996), desde que as tangentes às curvas do IYL ao Círculo de Mohr, tendam a ser incertas, o efetivo ângulo de atrito interno é na prática sempre construído com uma linha entre a origem e o ponto final do efetivo lugar de deslizamento (EYL).

Este ângulo, se medido experimentalmente, varia entre 30° e 70° para diversos materiais. Produtos finos e secos apresentam valores baixos e produtos grossos e úmidos apresentam valores altos (RAVENET, 1983). O mesmo autor diz que este ângulo indica que, durante o fluxo, o Círculo de Mohr tem uma linha reta que passa pela origem.

2.3.7 Ângulo de atrito do produto com a parede

O atrito entre o produto e a parede do silo ocorre quando este desliza ao longo da parede. A relação entre a tensão de cisalhamento e a tensão normal à parede formará uma reta que definirá o lugar geométrico de deslizamento com a parede (WYL) (Figura 07a). A sua inclinação será o ângulo de atrito do produto com o material da parede do silo (BENINK, 1989).

De acordo com Calil Junior (1990), a determinação deste ângulo é importante tanto para o fluxo como para o cálculo das pressões e deve ser determinado para todas as condições desfavoráveis (umidade, corrosão, abrasão, revestimento da superfície). Em algumas situações, dependendo do carregamento aplicado ao produto, o ângulo de atrito do produto com a parede aumenta. Daí se faz necessário à determinação do mesmo em função do tempo, para se ter valores confiáveis.

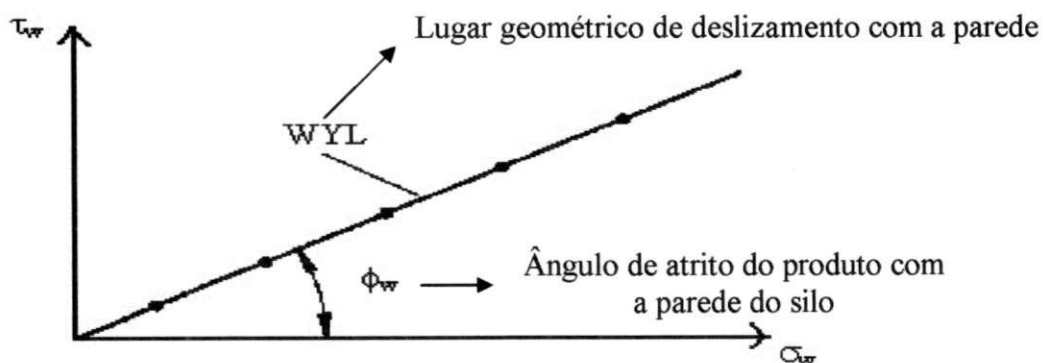


Figura 07a: Reta que define o lugar geométrico de deslizamento do produto com a parede.

2.3.7.1 Determinação do Ângulo de Atrito Interno (ϕ_i) e do Efetivo Ângulo de Atrito Interno (ϕ_e).

De acordo com Milani (1993), através do lugar geométrico instantâneo, definido pela linha reta, são desenhados dois círculos de Mohr:

a) o primeiro é desenhado passando pela origem e tangente (no ponto A - Figura 07b) ao lugar geométrico instantâneo. O ponto máximo de intersecção do círculo de Mohr com o eixo σ determina a resistência inconfineda σ_c do produto;

b) o segundo círculo é desenhado passando através do ponto P (pré-shear) e tangente ao lugar geométrico instantâneo (no ponto B - Figura 07b), sendo considerado válido só o círculo de Mohr com o ponto P situado a direita e coincidindo com o ponto de tangência (B). A tensão principal máxima σ_1 é definida pelo ponto maior de intersecção do círculo de Mohr com o eixo σ .

O Coeficiente angular do lugar geométrico é o ângulo de atrito interno ϕ_i . A linha reta passando através da origem e do ponto de tangência (B) do círculo de Mohr da tensão principal máxima σ_1 , define o efetivo lugar geométrico (EYL). O Coeficiente angular do efetivo lugar geométrico é o efetivo ângulo de atrito interno ϕ_e , como mostra a Figura 07b, (MILANI, 1993).

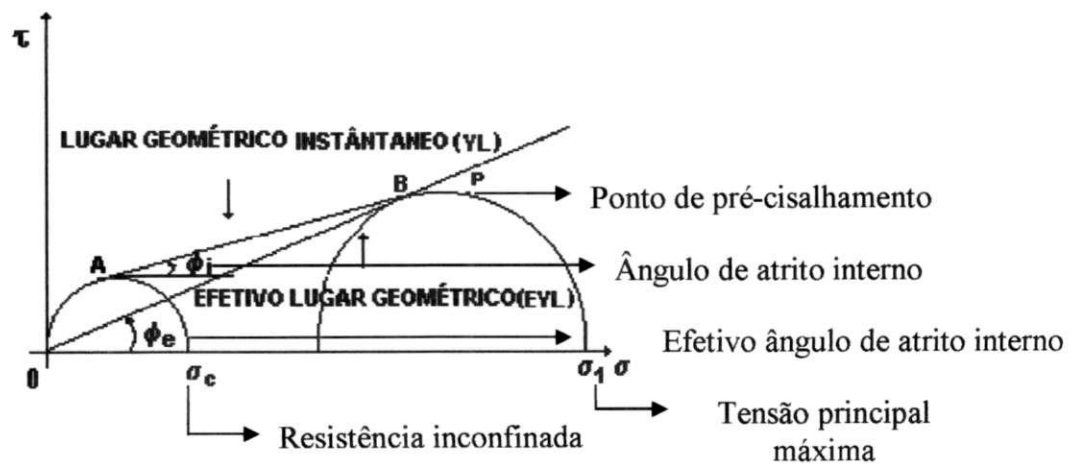


Figura 07b - Lugar geométrico (YL e EYL) e ângulos de atrito interno (ϕ_i e ϕ_e)

2.3.8 Função Fluxo (FF)

A relação entre a resistência e pressões de consolidação é chamada de função fluxo e é denotada por FF (CALIL JÚNIOR, 1989).

O grau de consolidação ou sua resistência é dependente da umidade, tempo de armazenamento e a temperatura do produto.

Schwedes (1996), afirma que o fluxo é melhor descrito pelo uso da função fluxo, como sendo a relação entre a força produzida não confinada e a tensão no estado de fluxo regular.

Segundo Barreto (1997), a determinação da função fluxo é feita através do gráfico com os pontos de tensão máxima de consolidação, versus resistência não confinada de deslizamento, tensões determinadas através dos lugares geométricos de deslizamento.

A função fluxo é uma medida da escoabilidade do produto e pode ser utilizada para obtenção da abertura mínima de descarga em um silo para prevenir o arqueamento (BENINK, 1989).

Jenike (1964), classifica os produtos de acordo com sua função limite de fluxo (FF), como segue:

- FF < 2 - muito coesivo e não flui
- 2 < FF < 4 - coesivo
- 4 < FF < 10 - fácil fluidez
- 10 < FF - fluxo livre

As funções de fluxo típicas estão ilustradas na Figura 08 (a) (WALTERS, 1973), (JENIKE *et al.* 1973).

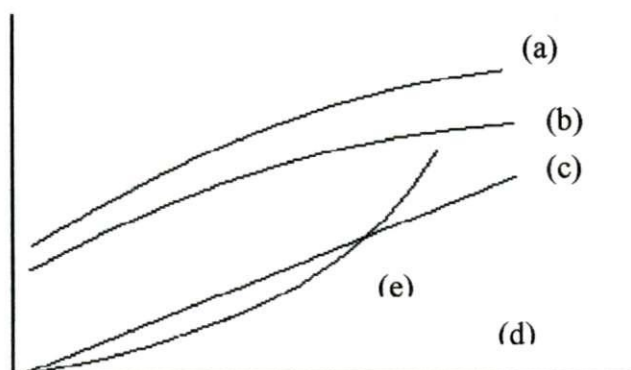


Figura 08 - Funções fluxo típicas dos grãos.

Para a maioria dos casos, as funções fluxo para grãos coesivos serão convexas na forma das curvas superiores (a) e (b) ou linhas retas através da origem como na curva (c). Grãos representando a última característica são referidos tal qual “grãos simples”. Grãos que fluem livremente não tem coesão e conseqüentemente não tem resistência (isto é, $\sigma_c = 0$), sua função fluxo coincide com o eixo horizontal como no caso da curva (d). A resistência dos mesmos produtos aumenta mais rapidamente quando a tensão de consolidação aumenta e neste caso, a função fluxo representa uma forma côncava como na curva superior (e).

2.3.9 Fator Fluxo da Tremonha (ff)

De acordo com Barreto (1997), o fator fluxo é usado para indicar a fluabilidade do produto. Quanto maior a tensão máxima de consolidação σ_m em um canal, menor a tensão máxima principal σ_1 atuando na obstrução e menor será a fluabilidade do produto.

Existe uma relação muito importante entre a função fluxo e o fator fluxo. A intersecção da reta que define o ff, com a FF definirá a tensão crítica mínima na tremonha (σ_c). Esta tensão nos garantirá que o orifício de descarga terá um valor mínimo que não permitirá a formação de arco, Figura 08 (b).

De acordo com BMHB (1985) essa dimensão mínima do orifício de descarga depende de alguns parâmetros como: densidade consolidada(ρ), aceleração da gravidade(g), tensão crítica (σ_1) e largura mínima da boca de descarga $H(\alpha)$ e é dada pela equação 01

$$B = \frac{H(\alpha)\sigma_c}{\gamma g} \quad \text{Eq.01}$$

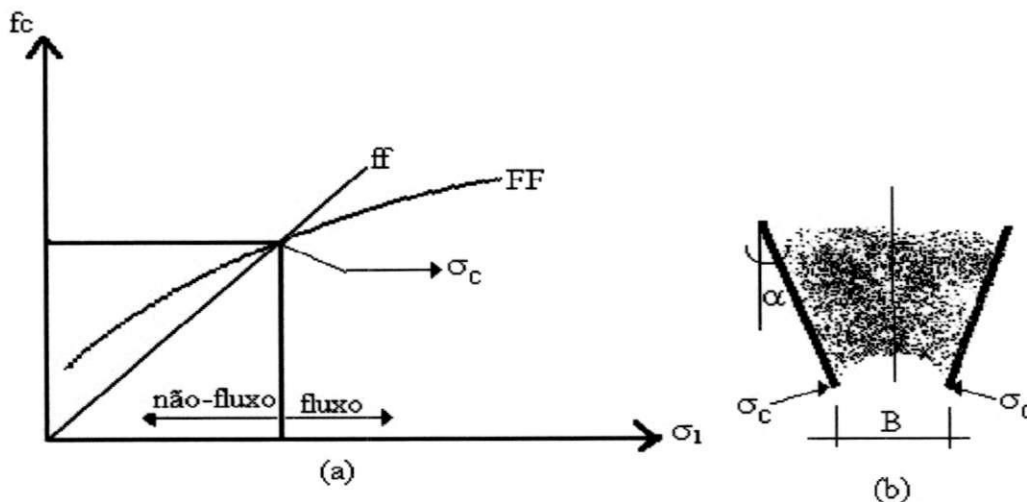


Figura 08 (a) e (b): Determinação do fator fluxo

2.3.9.1 Fluxo em silos

2.3.9.2 Tipo de fluxo durante o descarregamento

Quando o produto está dentro do silo e não ocorre o processo de descarga, se diz que não existe fluxo. À medida que o orifício de descarga é aberto e o produto passa a se movimentar, o fluxo passará a ocorrer. Com essa movimentação é necessário se conhecer os tipos de fluxos que existirão, uma vez que de acordo com Calil Júnior (1990), esta análise implicará na determinação das características da descarga do produto, no tipo de segregação, na formação de arcos coesivos e tubos e também se o silo poderá ser esvaziado completamente ou não.

Freitas (2001), cita que o modo como o produto fluirá por gravidade em um silo é governado, por um lado, pelas propriedades de fluxo do produto e, por outro lado, pela geometria e estrutura da superfície da tremonha (atrito com a parede).

Jenike (1964), definiu três tipos de fluxo: fluxo de funil, fluxo de massa e fluxo expandido (Figura 09).

O fluxo de funil (Figura 09a) ocorre quando, durante o descarregamento, o produto tende a formar um canal até a boca de descarga, ficando parte do produto retido nas laterais do silo. Este canal formado assume sua forma na vertical longitudinal ao silo e tem seu diâmetro aproximadamente igual ao diâmetro do orifício de descarga. (CALIL JÚNIOR, 1990), observou que a utilização do fluxo de funil é mais recomendável para produtos com partículas grandes, o que permite fluxo livre.

O outro tipo de fluxo é o fluxo de massa (Figura 09 b) que é aquele em que todo o sólido fluirá no silo e não existirão zonas mortas ou inativas e que tem uma relação direta com a inclinação da tremonha. O fluxo de massa possui algumas características, tais como: ausência de canais; fluxo uniforme e constante; a densidade do produto permanece quase que inalterada o que é bom quando quer se medir a taxa de fluxo; as pressões no produto e nas paredes são relativamente baixas e uniformes, como resultado do tempo de consolidação pequeno e do baixo desgaste do atrito do produto com a parede; a primeira camada de produto que entra é a primeira que sai evitando o processo de segregação;

Na literatura Jenike (1964), definiu outro tipo de fluxo: o fluxo expandido (Figura 09c). É um termo usado para descrever um fluxo de funil em silos, no qual a parte inferior (tremonha) funciona como fluxo de massa. Este tipo de fluxo é eficiente para armazenar grandes quantidades de produtos não degradáveis, semelhantes a minérios.

A ocorrência ou não destes tipos de fluxos dependerá basicamente de três fatores: do tipo de produto, da geometria e do material de que é fabricado o silo (BENINK, 1989).

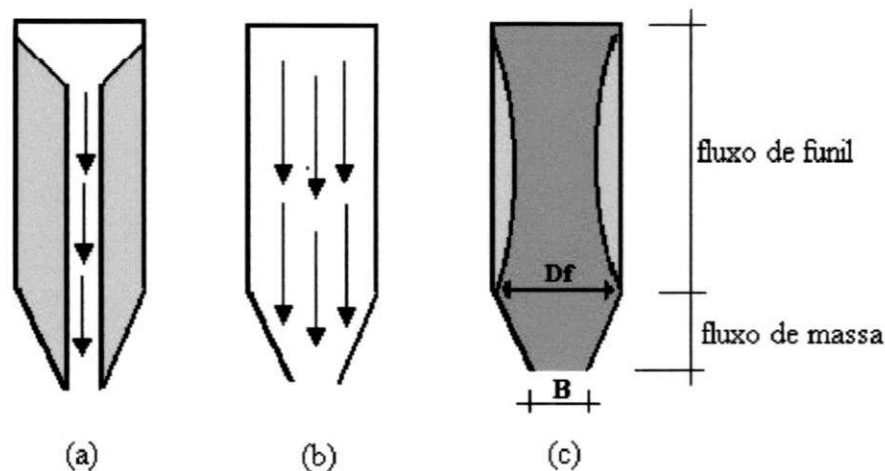


Figura 09: Tipos de fluxo durante o descarregamento: fluxo de funil (a), fluxo de massa (b), e fluxo expandido (c)

Enquanto há um número infinito de possíveis obstruções ao fluxo, a experiência mostra que o produto fluirá, se um arco não se desenvolver no canal de fluxo. Em canais de fluxo de massa, isto é suficiente. Em canais de fluxo de funil é, também, importante garantir que o produto seja incapaz de sustentar um tubo vertical vazio de altura excessiva (formação do efeito tubo).

2.3.9.3 Pressões em silos

No projeto de silos é importante conhecer as ações que agem em toda estrutura. De acordo com Calil Júnior (2001) *apud* Freitas (2001), existem três tipos de ações que ocorrem nos silos: as ações permanentes que são decorrentes do peso próprio do silo e dos equipamentos que estão instalados em sua estrutura; as ações variáveis (carregamento, descarregamento, efeito de correias transportadoras, temperaturas, expansão do produto, ação de vibradores, recalque na fundação e força de fixação de elementos externos) e as ações excepcionais que são devidas ao impacto de veículos ou explosões.

Quando o produto é armazenado dentro do silo ocorrem dois tipos de pressões: as pressões estáticas e as pressões dinâmicas. As pressões estáticas são aquelas que atuam com o produto parado dentro do silo. Nesse caso as pressões verticais são máximas e considera-se um estado de tensão ativa. Quando o orifício de descarga é aberto e o fluxo começa a atuar,

ocorre uma diminuição das pressões verticais e passa a existir o estado de tensão ativa com as pressões dinâmicas (FREITAS, 2001).

Alguns cuidados muitas vezes são negligenciados pelos projetistas, porque falhas acontecem nessas estruturas em todo mundo, causando perdas econômicas e principalmente perdas humanas (GUAITA *et al.* 2003). É necessário ter como base na determinação das pressões em silos, normas que delimitem parâmetros e valores. As normas internacionais existentes são basicamente apoiadas em duas teorias: a teoria de Janssen para a estimativa das cargas estáticas ou iniciais e a teoria de Jenike para a estimativa das cargas dinâmicas durante o fluxo de massa ou fluxo de funil (CALIL JÚNIOR, 1990).

Segundo Calil Júnior (1989), há evidência incontestável de que as pressões atuantes nas paredes são fortemente influenciadas pelo tipo de fluxo.

De acordo com Ayuga (1995), a teoria de Janssen de 1895 para o cálculo das pressões serviu de base para as primeiras normas e as investigações posteriormente realizadas. Esta publicação mudou em poucos anos o conceito de cálculo de silos que eram realizados até então a semelhança de líquidos. Alguns anos depois, esta teoria foi reavaliada diante das inúmeras falhas apresentadas em muitos silos, porém na década de cinquenta se investigaram profundamente as situações de descarga, mantendo-se a teoria de Janssen com algumas adaptações e abandonando-se, progressivamente, as demais.

Para o cálculo das pressões em silos altos, sugere-se a adoção da norma (DIN 1055, 1987) constituindo-se em um dos itens de maior responsabilidade, a qual foi completamente reformulada de sua antiga versão datada de 1964, tendo em vista experiências práticas em sua utilização, baseadas em acidentes com silos reais (NASCIMENTO, 1996).

2.3.9.4 Características do produto armazenado

As pressões exercidas nas paredes laterais e no fundo do silo são as principais cargas a serem consideradas para o dimensionamento dos silos. Tais pressões recebem a denominação de empuxo, e assemelha-se às pressões exercidas pelas águas nas barragens. Os materiais granulosos apresentam propriedades que influenciam as pressões, logo, são importantes no dimensionamento dos silos. As propriedades imprescindíveis nos projetos e execução de silos são a densidade: o peso específico do produto, o atrito interno do produto, o ângulo de atrito do produto com o material que o silo é construído.

3 MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi realizado no Laboratório de Construções Rurais e Ambiente (LaCRA), do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Campina Grande - PB.

3.1 Produtos Utilizados nos Ensaio

Foram determinadas as propriedades de fluxo do feijão macassar em função do teor de umidade e do tempo de consolidação com produtos de mesma qualidade e procedência.

3.2 Material da Parede

Os materiais de parede utilizados nos testes com o feijão macassar foram: concreto, alumínio, Acrílico, madeira, aço rugoso e aço liso (Figura 10).



Figura 10 – material utilizado nos ensaios de parede

As amostras dos materiais das paredes escolhidas foram planas para que sua superfície representasse as condições reais, sobre a qual o produto armazenado deslizará.

3.3 Máquina de ensaio (TRANSLATION SHEAR TESTER TSG 70-140)

A máquina de ensaio (TSG 70-140) foi construída pela AVT Anlagen-und Verfahrenstechnik GmbH com base no aparelho de cisalhamento de Jenike (Jenike Shear Cell), tanto no procedimento de teste como no princípio de cisalhamento, diferenciando-se apenas pela unidade de entrada (dispositivo de empurar) que foi trocada por uma outra (dispositivo puxar). Esta alteração de mecanismo não tem nenhuma influência sobre o processo de cisalhamento, a não ser de assegurar um perfeito alinhamento do pino de cisalhamento, célula de cisalhamento, gancho de tração, transdutor de força e unidade de entrada. É composta por três partes principais:



Figura 11 - Aparelho de cisalhamento

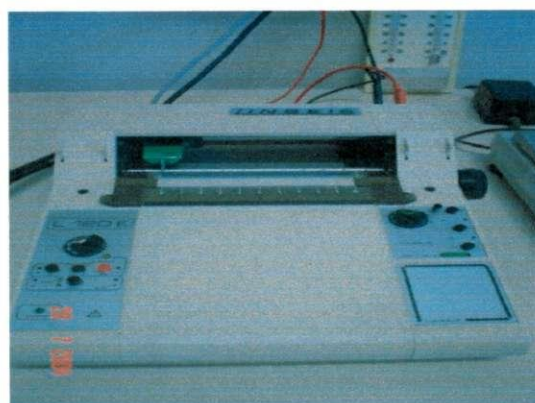


Figura 12 - Aparelho registrador das forças de cisalhamento



Figura 13 - Bancada de consolidação

3.4 Determinação das Propriedades Físicas

3.4.1 Teor de Umidade

Foram analisados três teores de umidades diferentes 13, 15 e 17% b.u. para o feijão macassar.

O grau de umidade dos produtos estudados foi determinado antes e durante os ensaios, onde foram coletadas amostras com o objetivo de avaliar a influência da variação deste nas propriedades de fluxo dos produtos.

Os testes foram efetuados com três repetições, utilizando-se aproximadamente 10 g de produto para cada repetição. As amostras foram colocadas em recipientes de alumínio, pesados em balança digital com precisão de 0,001 g para se obter o peso úmido (P_u) do produto e levados à estufa, a temperatura de 105°C, com uma tolerância de $\pm 3^\circ\text{C}$, durante 24 horas, e em seguida foram resfriados em dessecador e novamente pesados, obtendo-se, assim o peso seco (P_s). Os teores de umidade foram calculados com uso da seguinte expressão:

$$TU(\%) = \frac{P_u - P_s}{P_u} * 100$$

Para impedir grandes variações nos teores de umidade dos produtos armazenados, que pode interferir nos resultados, os ensaios foram conduzidos numa área climatizada.

3.4.2 Granulometria

A determinação da granulometria foi realizada, utilizando-se o método de peneiramento com amostra previamente pesada e passada num jogo de peneiras (8,0; 4,76; 4,0; 2,8) durante 10 minutos com 15 vibrações. No final, pesou-se a quantidade de produto retido em cada peneira para determinar a granulometria.

3.4.3 Propriedades de fluxo

3.4.3.1 Densidade em Função da Consolidação

O método utilizado para medir a densidade foi o de pesar a célula (célula + produto) após o ensaio de cisalhamento, subtrair o próprio peso da célula e dividir por seu volume conforme proposta de (NASCIMENTO, 1996).

3.4.3.2 Metodologia de Ensaio para Determinação do Cisalhamento

A metodologia de ensaio utilizada foi à proposta por Milani (1993), através do aparelho de cisalhamento direto de movimento de translação.

A partir dos resultados obtidos através dos ensaios de cisalhamento direto pela máquina de ensaio TSG 70-140, utilizou-se o Auto CAD, para traçar os gráficos de tensão normal versus tensão de cisalhamento e conseqüentemente os ângulos de atrito interno, efetivos ângulos de atrito interno, tensões máximas de consolidação e tensões confinadas. A célula de cisalhamento utilizada nos ensaios foi de alumínio com área da seção transversal de 67,9 cm².

3.4.3.3 Seleção dos Níveis de Cargas Normais

Os níveis de cargas normais utilizados nos testes de cisalhamento são indicados na Tabela 01, e foram baseados em resultados obtidos por (MILANI, 1993).

Tabela 01 - Níveis de cargas utilizados nos ensaios de cisalhamento instantâneo em grãos de feijão macassar

Cargas	
Pré - Cisalhamento (N)	Cisalhamento (N)
100	70; 50; 35
70	50; 35; 20
50	35; 20; 10

3.4.3.4 Preparação da Amostra

3.4.3.5 Enchimento da Célula

Após a célula montada e ajustada na posição correta com o anel molde sobre a base da célula, a mesma foi preenchida uniformemente em pequenas camadas, sem a aplicação de força vertical à superfície do produto, até formar certa quantidade de produto acima do topo do anel molde. O preenchimento foi conduzido de tal maneira para que não ocorressem vazios na região onde o anel e a base se sobrepõe. A retirada do excesso de produto em pequenas quantidades foi feita através de raspagem com uma espátula inclinada 45° em suaves movimentos de ziguezague para não modificar a posição do anel sobre a base (Figura 14).

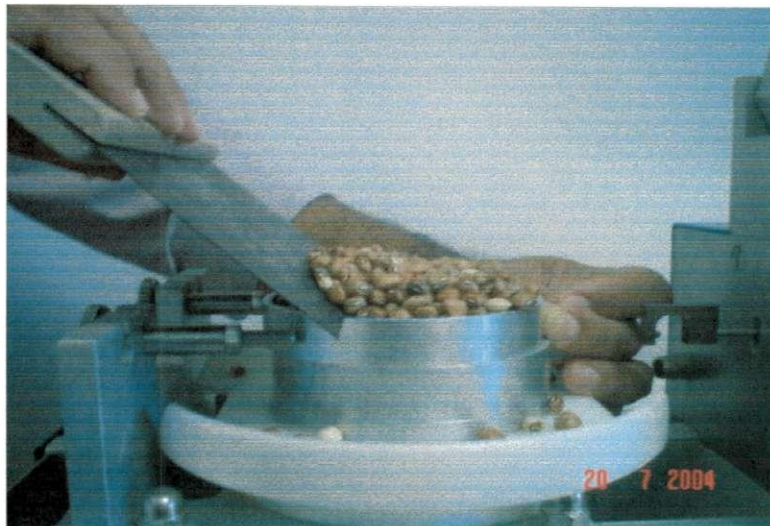


Figura 14 - Raspagem do excesso do produto

3.4.3.6 Consolidação da Amostra

Para a consolidação da amostra (Figura 15) o procedimento foi o seguinte:

- a) colocou-se cuidadosamente a tampa de operação de rotações sobre a superfície nivelada do produto no anel molde, com os seus pinos alinhados com o eixo longitudinal do aparelho;

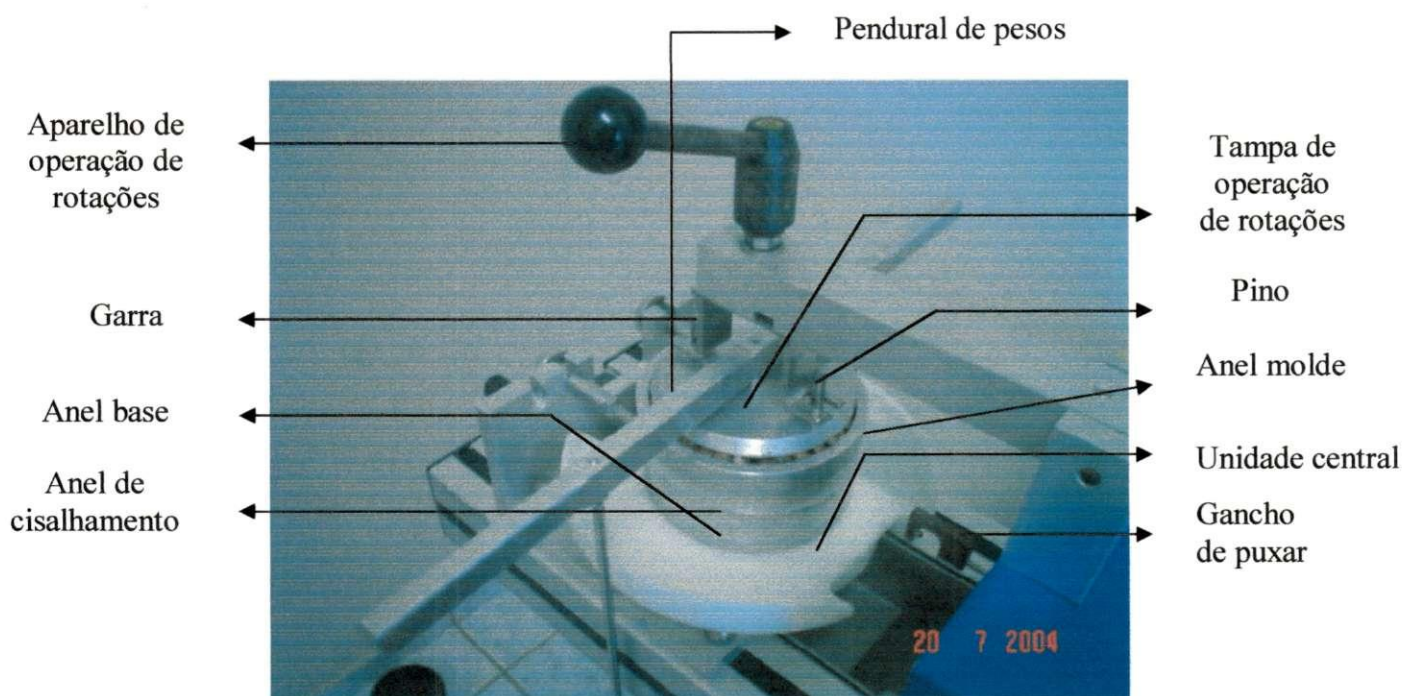


Figura 15 - Detalhe da consolidação da amostra

b) colocou-se o pendural de pesos com as cargas normais de consolidação (usualmente as mesmas cargas normais usadas no pré-shear) sobre o pino central da tampa de operação de rotações;

c) quando a amostra do produto dentro do anel molde estava compactada, verifico-se o adensamento de aproximadamente 2 mm ou mais, em seguida retirou-se o pendural de pesos e a tampa, preenchendo o espaço vazio formado no anel molde, com o mesmo produto, conforme o procedimento de enchimento, descrito anteriormente.

d) a operação de rotações foi realizada com a alavanca do respectivo dispositivo de modo a não transmitir nenhuma força vertical formando um ângulo de 90° , em intervalos iguais de aproximadamente 1 segundo, de forma suave e contínua. Durante esta operação, o anel de cisalhamento foi pressionado contra os parafusos fixos para prevenir o seu deslizamento da posição original (Figura 16);

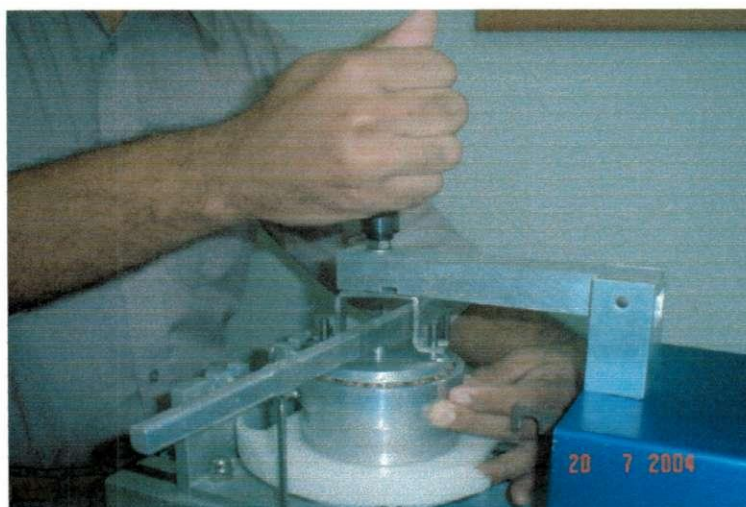


Figura 16 – Operação de rotação

e) em seguida o aparelho de operação de rotações foi deslocado da posição superior;

f) depois o pendural de pesos da tampa de twists foi cuidadosamente retirado;

g) da mesma forma retirou-se o anel molde, segurando levemente a tampa de operação de rotações para não afetar a posição original do anel de cisalhamento;

h) removeu-se a tampa de operação de rotações, deslizando-a na direção da haste de medida da força, conservando a posição do anel de cisalhamento junto aos parafusos fixos;

i) retirou-se o excesso de produto em pequenas quantidades com a espátula, nivelando-se com o topo do anel de cisalhamento, seguindo o mesmo procedimento adotado anteriormente.

3.4.3.7 Otimização

Após a definição da amostra, da célula de cisalhamento, dos níveis de cargas normais (pré-shear e shear) e da preparação da amostra, antes dos testes de cisalhamento definitivos, procedeu-se a otimização, através de testes preliminares, com a intenção de verificar o nível de consolidação da amostra e para que ela obtivesse a "consolidação crítica".

3.4.3.8 Número de Rotações

Para o feijão macassar foram usado 25 rotações (twist), com base em testes preliminares a partir de ensaios realizados na fase de otimização, em função da "consolidação crítica" do produto.

3.4.4 Teste de cisalhamento

Depois dos testes de otimização obteve-se a carga normal para a operação de rotações e o número de rotações requerido para obtenção da "consolidação crítica" da amostra. Os testes de cisalhamento foram realizados, em duas etapas: pré-shear (pré-cisalhamento) e shear (cisalhamento), utilizando-se os níveis de cargas da Tabela 01 (item 3.4.4.2).

3.4.4.1 Pré-cisalhamento

Esta fase conduz a amostra a uma deformação plástica, desenvolvida dentro dela uma zona de cisalhamento até ocorrer fluxo de estado estável, com um valor da tensão de cisalhamento σ_p . Esta tensão de pré-cisalhamento é mantida na célula, embora a distância de cisalhamento seja relativamente curta (varia em função do produto).

A estabilidade dos valores da tensão de cisalhamento σ_p , obtidas em estado estável do pré-cisalhamento, é uma indicação da reprodutibilidade de consolidação.

3.4.4.2 Cisalhamento (Shear)

Após a operação de pré-cisalhamento, as cargas normais correspondentes a esta fase foram reduzidas conforme a Tabela 01, iniciando-se a operação de cisalhamento pela partida do motor propulsor da haste de medida de força. A tensão de cisalhamento aumenta, passando por um máximo e reduzindo em seguida. O cisalhamento foi contínuo, até que toda distância sobreposta da célula tenha sido percorrida, na condição de desenvolver um plano de cisalhamento preciso.

3.4.5 Metodologia de ensaio para determinação do ângulo de atrito com a parede instantâneo

As cargas normais foram colocadas sobre o pendural de pesos, selecionadas de maneira que possam ser removidas, atendendo às reduções pré-estabelecidas do nível de carga inicial do teste de cisalhamento. Inicialmente foi colocado o pendural de pesos sobre a tampa de cisalhamento, posicionada sobre a superfície nivelada do anel de cisalhamento. O próximo passo correspondeu à operação de cisalhamento e antes de ligar o motor que aciona a haste de força, o anel de cisalhamento foi levemente erguido (manualmente) da amostra de material da parede, para evitar que o mesmo arrastasse com a amostra. Com o início do cisalhamento, as tensões de cisalhamento começam a aumentar, alcançando um estado estável diretamente ou passando por um máximo antes da estabilização. A tensão máxima de cisalhamento corresponde a um atrito de parede estático, enquanto os valores de estado estável correspondem ao atrito de parede cinemático.

Realizou-se o teste de cisalhamento com vários níveis de cargas normais, tendo como carga inicial o valor máximo e obtendo-se uma tensão máxima de cisalhamento. Quando a tensão máxima atingir um valor constante, a carga inicial foi reduzida a um outro nível pré-estabelecido, com a haste de força em movimento, obtendo-se uma outra tensão de menor valor e que, ao atingir um valor constante, este foi registrado e novamente a carga será reduzida. Este procedimento continuará do começo ao fim dos níveis de cargas selecionadas.

A célula utilizada na determinação do ângulo de atrito com a parede, obedeceu aos mesmos critérios adotados na escolha dos testes de cisalhamento instantâneo, e foi diferenciada destes testes através da substituição do anel de base por uma amostra de material da parede, indicado na Figura 17.

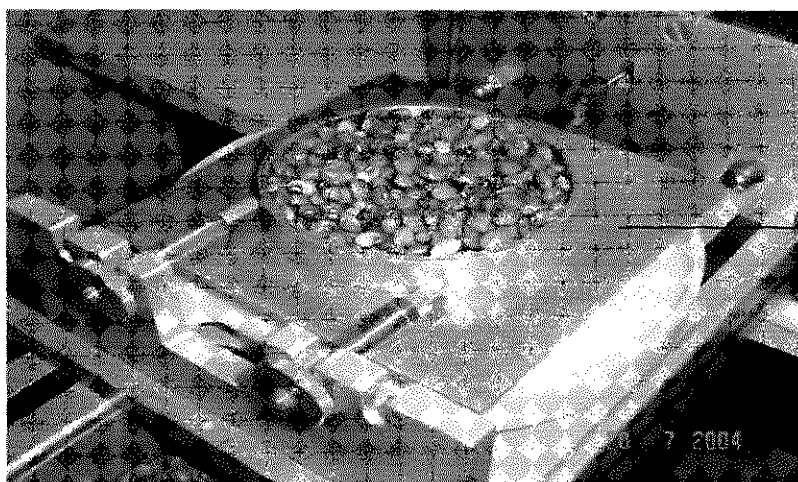


Figura 17 - Detalhe da preparação para o ensaio com a parede de aço liso

A superfície da amostra do material da parede ficou paralela ao plano horizontal da haste de medida de força. O anel de cisalhamento foi colocado sobre a amostra da parede e ajustado de acordo com a posição do parafuso fixo, de tal forma que permitisse uma passagem máxima do anel sobre a amostra durante o teste.

Conforme o manual da máquina de Jenike foi adotado o nível máximo de carga normal igual a 5kg e, a partir desse valor, os outros níveis foram obtidos através da remoção sucessiva de 1kg (Figura 18), até que o pendural de pesos ficasse sem cargas (só com o peso próprio do pendural).

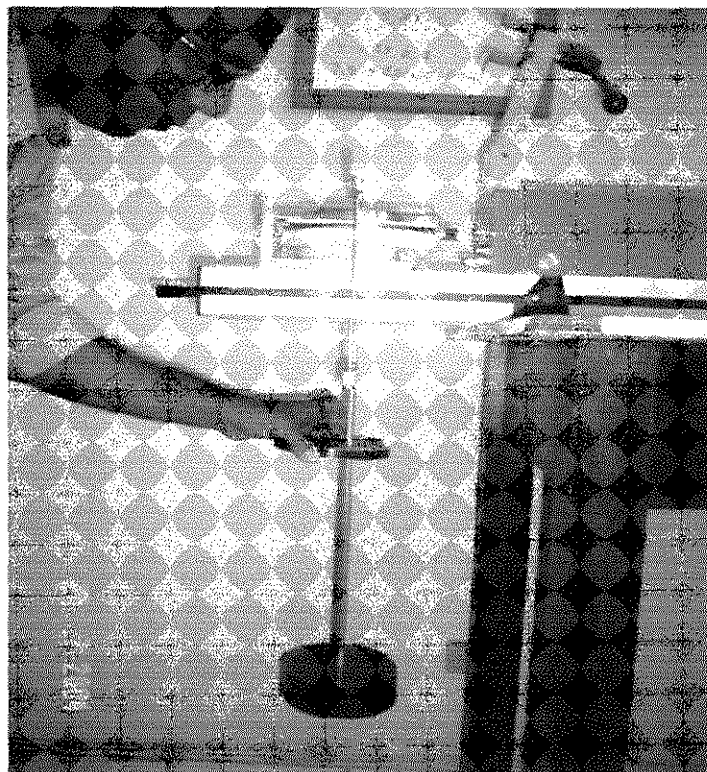


Figura 18 - Remoção dos pesos

3.5 Função Fluxo

Através dos valores determinados para a tensão máxima de consolidação σ_1 e a tensão não confinada f_c obtidas com o círculo de Mohr de tensões (Figura 19), traçou-se uma curva de $\sigma_1 \times f_c$, que define a função fluxo do produto.

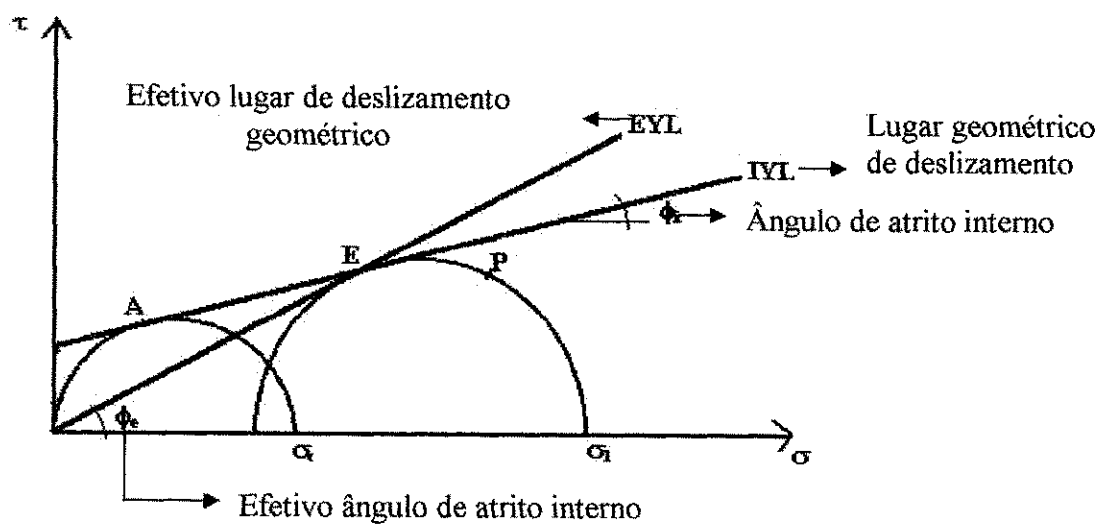


Figura 19 - Círculo de Mohr de tensões

3.5.1 Fator Fluxo

O fator fluxo da tremonha (ff) é uma função da forma da tremonha e das propriedades do produto armazenado e, foi determinado com boa aproximação pela equação BMHB.

Ângulo da tremonha cônica para fluxo de massa (θ_m):

$$\theta_m = 0,5 \cos^{-1} \left[\frac{1 - \text{sen } \phi_{iu}}{2 \text{sen } \phi_{iu}} \right] + \beta$$

$$2\beta = \phi_{wu} + \text{sen}^{-1} \left(\frac{\text{sen } \phi_{wu}}{\text{sen } \phi_{iu}} \right)$$

Em que:

θ_m = menor ângulo da tremonha formado com a horizontal (°);

ϕ_{iu} = maior valor do efetivo ângulo de atrito interno (°) e;

ϕ_{wu} = maior valor do ângulo de atrito interno com a parede (°).

Fator Fluxo da tremonha (ff):

$$ff = \frac{Y(1 + \text{sen } \theta)}{2(X-1)F(\theta)\cos(\theta)}$$

Em que:

$$Y = \left[\frac{(2 - 2 \cos \alpha)^m (\alpha^{1-m} \cos \theta) + (\sin \beta) (\sin \alpha)^{1+m}}{(1 - \sin \theta) (\sin \alpha)^{2+m}} \right]$$

$$X = \left[\frac{2^m \sin \theta}{1 - \sin \theta} \right] \left[\frac{\sin(\alpha + \beta) + \cos \theta}{\cos \theta} \right]$$

$$\alpha = \beta + 90 - \theta$$

$$F(\theta) = \left(\frac{65}{220 - \theta} \right)^m \left(\frac{200}{290 - \theta} \right)^{1-m}$$

$$m = 1 \text{ (eixo simétrico)}$$

$$m = 0 \text{ (retangular } L \geq 30)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Propriedades físicas

4.1.1 Teor de umidade e Granulometria

Os resultados obtidos com os ensaios granulométricos para o feijão macassar encontram-se na Tabela 02 e Figura 20. Percebe-se que, com o incremento do teor de umidade ocorreu um aumento do percentual de produto retido na malha 4,76 mm. Segundo critério de classificação de produtos armazenáveis propostos por Calil Júnior (1984), os grãos do feijão macassar são considerados como produtos granulares, pois sua granulometria resultou em $D > 1$ mm. Tais valores estão de acordo com Nascimento *et al.* (2001), que pesquisando o feijão macassar com teores de 12, 14 e 18% b.u; observou que os maiores percentuais do produto ficaram retidos na peneira de malha 4,76 mm correspondendo a 86% do total e seguindo a mesma metodologia proposta por Calil Júnior (1984), classificou o produto como granular.

Tabela 02: Resultados da análise granulométrica realizada em grãos de feijão macassar com três teores de umidade

Teor de umidade (%)	Peneira		Percentual Retido (%)	Retido acumulado (%)
	Nº ABNT	Malha (mm)		
13	5/16"	8,00	1,95	1,95
	4	4,76	94,9	96,85
	5	4,00	2,87	99,72
	7	2,80	0,28	100
15	5/16"	8,00	2,8	2,8
	4	4,76	95,2	98,0
	5	4,00	1,82	99,82
	7	2,80	0,18	100
17	5/16"	8,00	3,3	3,3
	4	4,76	96,3	99,6
	5	4,00	0,4	100
	7	2,80	-	-

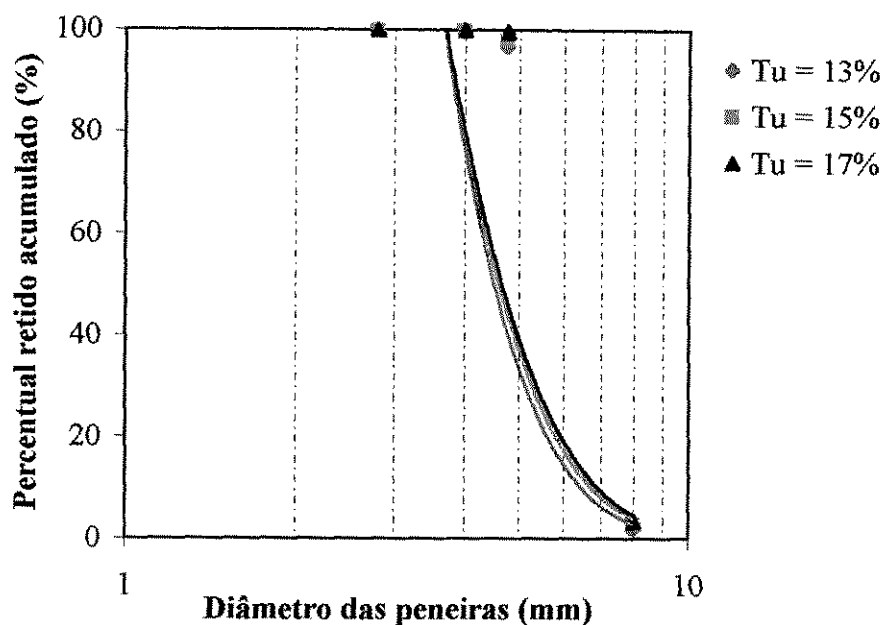


Figura 20 – Curva granulométrica

4.2 Propriedades de fluxo

4.2.1 Densidade Consolidada

Os resultados de densidade obtidos a partir dos ensaios de cisalhamento instantâneo são apresentados na Tabela 03 e Figura 21, os grãos do feijão macassar apresentaram densidade (γ_1) de 7,8; 7,7 e 7,6 kN/m³ para os teores de umidade de 13, 15 e 17% b.u. respectivamente. Observa-se que com o acréscimo do teor de umidade houve uma tendência de diminuição da densidade. Como foi observado nos testes de granulometria que, com o aumento do teor de umidade, um maior percentual de grãos ficaram retidos na peneira 4 (ABNT), significando que houve um aumento nas dimensões dos grãos do feijão macassar, esta mesma tendência verificou-se na densidade consolidada, ou seja, mesmo sob uma carga normal a tendência de decréscimo permaneceu. Além do mais, com o aumento do teor de umidade, a massa tende a ficar mais porosa e conseqüentemente a aumentar de volume, diminuindo assim a densidade.

Nascimento *et al.* (2001), encontraram em ensaios realizados com o feijão macassar, valores de densidades consolidadas instantâneas de 75; 74 e 72 kN/m³ para os teores de umidade de 12, 14 e 18% b.u. respectivamente. O autor relata que com o incremento do teor de umidade ocorre uma diminuição da densidade, fato também verificado neste trabalho.

A densidade consolidada representa a situação em que os grãos estão submetidos dentro de um silo, ou seja, uma determinada amostra de grãos localizada na base do silo, sofrerá uma carga maior em relação aquela que se encontra localizado na altura intermediária e, esta por sua vez receberá uma carga maior que aquela do topo. Como para o cálculo das pressões atuante nas paredes e no fundo de silos, esta propriedade é de grande importância, uma vez que sua determinação se faz necessário para dimensionamento estrutural de silos verticais.

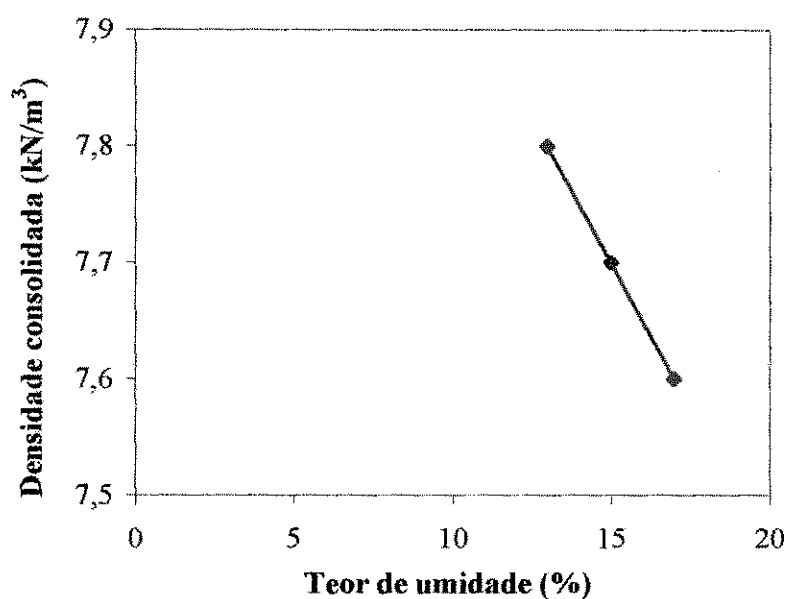


Figura 21 – Densidade em função do teor de umidade

4.2.2 Ângulo de atrito do feijão com amostras de parede de silo

Na Tabela 03 encontram-se os ângulos de atrito com a parede para o feijão macassar em função do teor de umidade de 13, 15 e 17% bu, e dos seguintes materiais de parede: acrílico, alumínio, aço liso, aço rugoso, madeira e concreto.

Os materiais de parede estudados foram aqueles que frequentemente são ou poderão ser utilizados nas construções de silos verticais cilíndrico ou prismáticos, tanto em níveis de fazenda como de indústria, para que se possa oferecer aos projetistas dados para os cálculos de pressões atuantes no corpo e na tremonha dos silos, como também na predição de tipos de fluxo.

Tabela 03 - Ângulo de atrito do feijão macassar com a parede (ϕ_w)

Material de parede	Feijão macassar (%)					
	13		15		17	
	ϕ_{wu}	ϕ_{wl}	ϕ_{wu}	ϕ_{wl}	ϕ_{wu}	ϕ_{wl}
Acrílico	14,2	13,3	10,5	10,4	10,4	9,6
Alumínio	10,5	10,4	9,5	8,9	9,2	8,3
Aço liso	9,5	8,9	8,9	8,7	8,6	8,5
Aço rugoso	15,6	14,9	15,7	15,2	15,9	15,8
Madeira	15,4	15,1	16,0	15,3	16,5	15,3
Concreto	21,2	20,9	21,3	21,0	23,1	22,2

ϕ_{wu} = ângulo de atrito com a parede superior

ϕ_{wl} = ângulo de atrito com a parede inferior

Analisando os resultados dos ângulos de atrito do produto com a parede, percebe-se que para os materiais: acrílico, alumínio e aço liso o ângulo de atrito diminui com o incremento do teor de umidade, isto se dá em virtude da natureza do material de parede utilizado, permitindo assim, que o produto deslize com mais facilidade quando o mesmo aumenta de volume. Já para os materiais de parede: aço rugoso, madeira e concreto, o ângulo de atrito do feijão macassar com a parede apresentou uma tendência de aumento com o incremento do teor de umidade, em virtude destes materiais serem mais ásperos, quando comparados aos demais, com isso ocorrerá maior força de compressão vertical nas paredes dos silos, principalmente para materiais mais ásperos; observando-se desta forma, que os ângulos de atrito da parede com o feijão macassar variam de acordo com o material de parede e o teor de umidade.

A diferença entre o limite inferior e superior, quando ocorreu, foi no máximo 1°, que em termos práticos, esta diferença pode ser considerada desprezível, haja vista que se utilize o coeficiente de atrito do produto com a parede que é igual a $\arctg\phi_w$. Estes resultados poderão ser utilizados para o dimensionamento de equipamentos de transporte, como também para o cálculo das ações nas paredes e fundo dos silos, por que consta dos principais tipos de materiais possíveis para serem empregados na construção de silos e equipamentos. Todas as

propriedades de fluxo foram apresentadas com limite superior e inferior, para que os projetistas possam utilizar o método dos estados limites para calcular as pressões atuantes no corpo e na tremonha do silo. Recomenda-se, para melhor esclarecimento do uso dos limites destas propriedades, a norma australiana AS3774 (1990) e Calil Júnior *et al.* (1997).

Nascimento *et al.* (2001), determinaram ensaios com os mesmos materiais de parede e produto e encontraram ângulos próximos aos encontrados neste trabalho. A determinação das propriedades de fluxo realizada neste trabalho e também por Nascimento *et al.* (2001) foram feitas através do equipamento da Jenike Shear Test, utilizando os mesmos níveis de carga; porém a diferença encontrada entre os dois trabalhos, foi mínima.

4.2.3 Ângulo de atrito interno, efetivo ângulo de atrito interno e ângulo de atrito do produto com a parede.

Como nas principais normas internacionais: DIN 1055, AS 3774-90 e ACI 313-77, não existiam dados de feijão para comparar com os dados encontrados neste trabalho, utilizou-se dados de um produto similar disponível, a soja, com a finalidade de fazer um paralelo destes com os dados encontrados nesta pesquisa. Os resultados obtidos nos ensaios de cisalhamento com o feijão macassar, e os dispostos nas principais normas internacionais para a soja são apresentados na Tabela 04. Fazendo-se um paralelo entre os dados encontrados neste trabalho com os dispostos nas normas DIN 1055, AS 3774-90 e ACI 313-77, percebe-se que a densidade encontrada neste trabalho varia de 7,6 a 7,8 kN/m³ e os dispostos nas normas internacionais apresentam-se num intervalo de 7,4 a 9,9 kN/m³ observa-se que a densidade do feijão encontra-se dentro da faixa de produtos granulares. Os ângulos de atrito interno e efetivos ângulos de atrito interno encontrados neste trabalho apresentaram-se num intervalo de 21,6 a 33,6° e 26,2 a 34,5° respectivamente, enquanto que os encontrados nas normas variam de 23 a 37° para o ângulo de atrito interno e de 25 a 32° para o efetivo ângulo de atrito interno. Observa-se ainda que, de acordo com os dados de ângulos de atrito do feijão macassar com as paredes aço e concreto encontrados neste trabalho, variam de 14,9 a 15,9° e 20,9 a 23,1° respectivamente, enquanto que para a soja estes ângulos apresentam-se num intervalo de 10 a 22,8° para a parede de aço e de 14 a 25° para a parede de concreto, observa-se grande aproximação entre os dados, apresentando pouca diferenciação e as diferenças encontradas são justificadas pelo tipo de produto utilizado nos ensaios por terem propriedades diferentes. Como o Brasil não possui uma norma que regulamenta o projeto de silos e de

fluxo, esses dados poderão ser usados para o dimensionamento de silos e a predição do fluxo e, até mesmo no dimensionamento de elevadores de caneca e correias transportadoras.

Estas propriedades devem, sempre que possível, ser determinadas, principalmente quando se deseja projetar silos para armazenamento de produtos agrícolas, devido a sua enorme variedade.

Tabela 04 - Propriedades de fluxo do feijão macassar

Teor de umidade (%)	Densidade kN/m ³	Ângulo de Atrito interno (°)		Efetivo Ângulo de Atrito interno (°)		Ângulo de atrito do produto com a parede			
		ϕ_{iu}	ϕ_{il}	ϕ_{iu}	ϕ_{il}	Aço (°)		Concreto (°)	
						ϕ_{wu}	ϕ_{wl}	ϕ_{wu}	ϕ_{wl}
13	7,8	21,6 - 27,5		26,2 - 29,0		14,9 - 15,6		20,9 - 21,2	
15	7,7	25,7 - 27,5		27,1 - 29,5		15,2 - 15,7		21,0 - 21,3	
17	7,6	26,7 - 33,6		30,4 - 34,5		15,8 - 15,9		22,2 - 23,1	
DIN 1055	8	25,0 - 30,0		-		14,0		-	
AS 3774-90	8	23		25,0 - 32,0		10,0 - 15,0		14,0 - 20,0	
ACI 313-77	7,4 - 9,9	23,0 - 37,0		-		14,0 - 22,8		16,0 - 25,0	

ϕ_{iu} = ângulo de atrito superior

ϕ_{il} = ângulo de atrito inferior

ϕ_{wu} = ângulo de atrito com a parede superior

ϕ_{wl} = ângulo de atrito com a parede inferior

Na tabela 04 percebe-se que, o ângulo de atrito interno e o efetivo ângulo de atrito interno apresentaram-se num intervalo de 21,6 a 33,6° e 26,2 a 34,5° respectivamente. Observa-se que com o aumento do teor de umidade, tanto o ângulo de atrito interno quanto o efetivo ângulo de atrito interno aumentaram progressivamente. Com o aumento de 4% no teor de umidade do feijão, o efetivo ângulo de atrito interno apresentou uma diferença de 5,46° para o ângulo de atrito superior e 4,22° para o inferior, porém essa variação segundo Calil Junior (1990), não é representativa, pois devido às incertezas e variações nas propriedades dos produtos a serem armazenados, o mesmo autor, recomenda que em projetos de silos o efetivo ângulo de atrito interno poderá ser aumentado ou diminuído em 10°.

Percebe-se que os limites inferior e superior do efetivo ângulo de atrito interno são incrementados com o aumento do teor de umidade, mesmo que não ocorra grande diferença entre os limites para um determinado teor de umidade. Esta propriedade é utilizada para

dimensionamento do orifício de descarga do silo, para não ocorrer à formação do efeito tubo, já que silos para produtos granulares devem ser projetados para ocorrer fluxo de funil.

Segundo Nascimento (1996), como regra geral, deve-se utilizar os dois limites das propriedades determinadas para o dimensionamento de silos, sendo o superior para o projeto de fluxo e o inferior para o projeto das ações. Há uma tendência mundial na elaboração de projetos estruturais, adotando o critério de dimensionamento nos estados limites com objetivo da realização de projetos estruturais mais seguros e econômicos. Desta forma os limites superiores e inferiores das propriedades de fluxo do feijão macassar serão de grande utilidade para os projetistas que trabalham com estados limites.

O ângulo de atrito interno inferior (ϕ_{ii}) é utilizado para cálculo da pressão horizontal máxima na parede do silo e para força máxima por atrito na parede e com o ângulo de atrito interno superior (ϕ_{iu}) calcula-se a carga vertical máxima na tremonha Nascimento (1996), desta forma os ângulos obtidos serão de grande utilidade para o dimensionamento e predição de fluxo em silos.

Nascimento *et al.* (2001) utilizaram a mesma metodologia de ensaio empregada neste trabalho para realizar testes com o feijão macassar com três teores de umidade 12, 14 e 18% b.u e encontraram ângulos de atrito interno variando entre 21 a 25° e os efetivos ângulos de atrito interno entre 27 e 30,5°. Verifica-se coerência entre os resultados encontrados por Nascimento *et al.* (2001), e os dados deste trabalho por se tratar do mesmo produto e mesma metodologia de ensaio, desta forma variando apenas a variedade.

Nas Figuras 22, 23, 24, 25, 26, 27 são apresentados os resultados obtidos dos ângulos médios de atrito do feijão macassar com os diferentes materiais paredes: acrílico, alumínio, aço liso, aço rugoso, madeira e concreto.

As propriedades físicas do produto granular atuaram de forma direta sobre a parede do silo e deram origem a ângulos de atrito que variaram entre valores máximos e mínimos. Outro fator que influenciou esse ângulo de atrito foi à rugosidade da parede do silo.

Com base nos dados da Figura 22 percebe-se que para o feijão macassar, os ângulos determinados apresentaram pouca diferenciação, com uma variação máxima de 3,78°. Com o aumento do teor de umidade houve diminuição do ângulo de atrito com a parede.

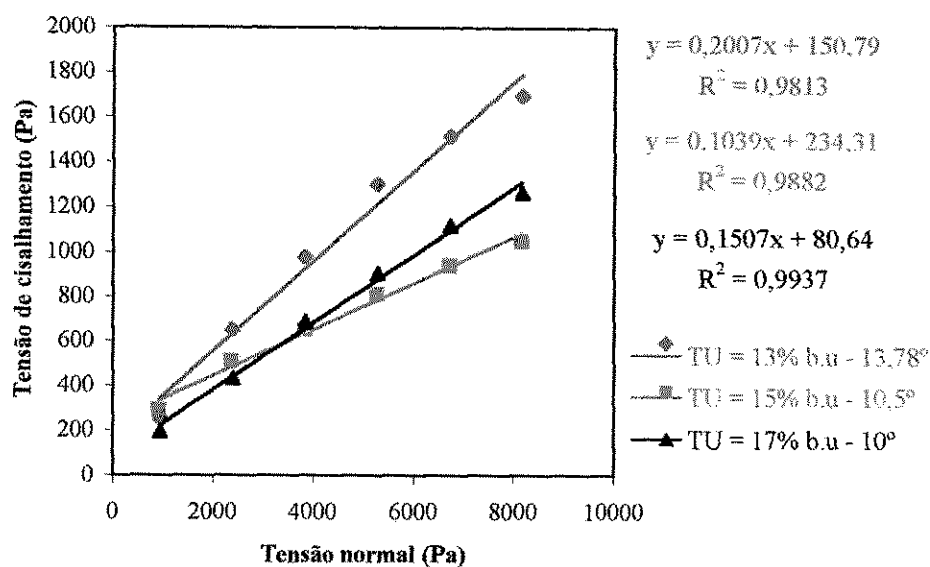


Figura 22 - Ângulo de atrito (ϕ_w) médio do feijão macassar com a parede de acrílico

Verifica-se na Figura 23 que houve uma diminuição de $1,6^\circ$ no ângulo de atrito com a parede (ϕ_{wu}), quando aumentou 4% no teor de umidade. Devido às incertezas e variações nas propriedades dos produtos a serem armazenados, como também o desgaste da superfície da parede ao longo da vida útil do silo, de acordo com Calil Junior (1990), o ângulo de atrito interno do produto com a parede pode ser aumentado ou diminuído em 5° quando for usado em projetos de silos.

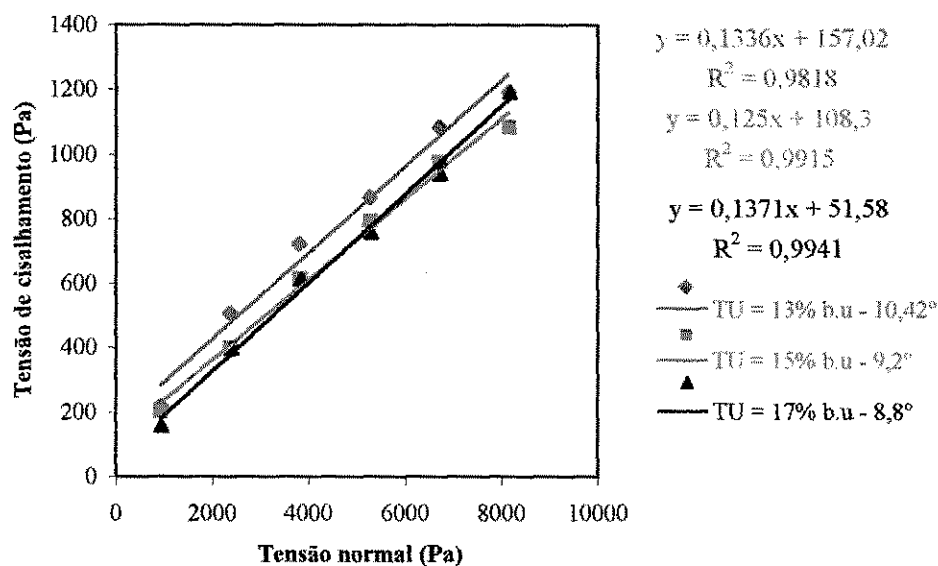


Figura 23 - Ângulo de atrito (ϕ_w) médio do feijão macassar com a parede de alumínio

Na Figura 24 estão apresentados os ângulos médios de atrito com a parede para o feijão macassar em função dos teores de umidade (13, 15 e 17% b.u), com material da parede de aço liso, observa-se redução dos ângulos com o aumento de 4% nos teores de umidade apresentando o mesmo comportamento das paredes acrílico e alumínio.

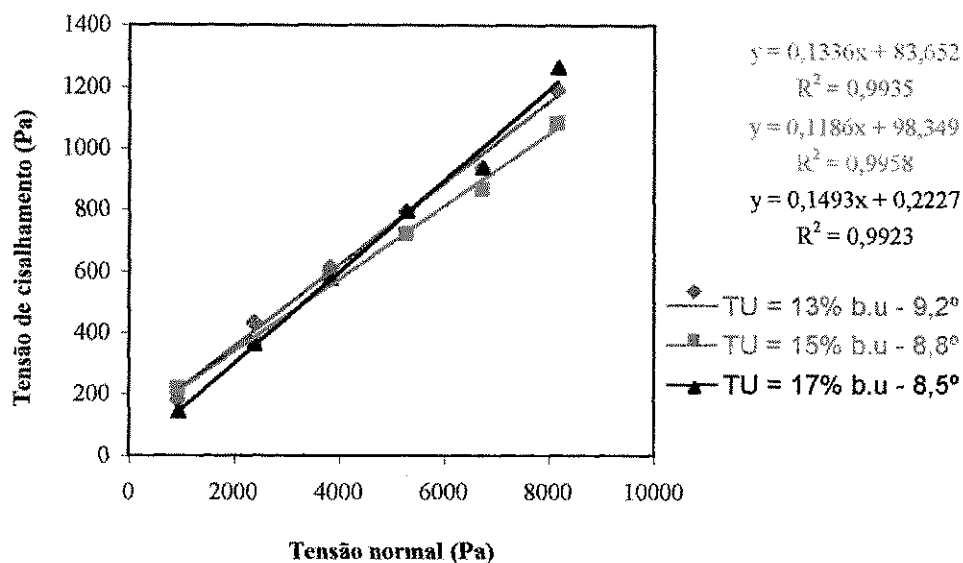


Figura 24 - Ângulo de atrito (ϕ_w) médio do feijão macassar com a parede de aço liso

Analisando-se os dados da Figura 25 pode-se observar que com o incremento do teor de umidade, o ângulo de atrito do produto com a parede aumentou, em virtude da rugosidade da parede, apresentando uma diferença de 0,67°.

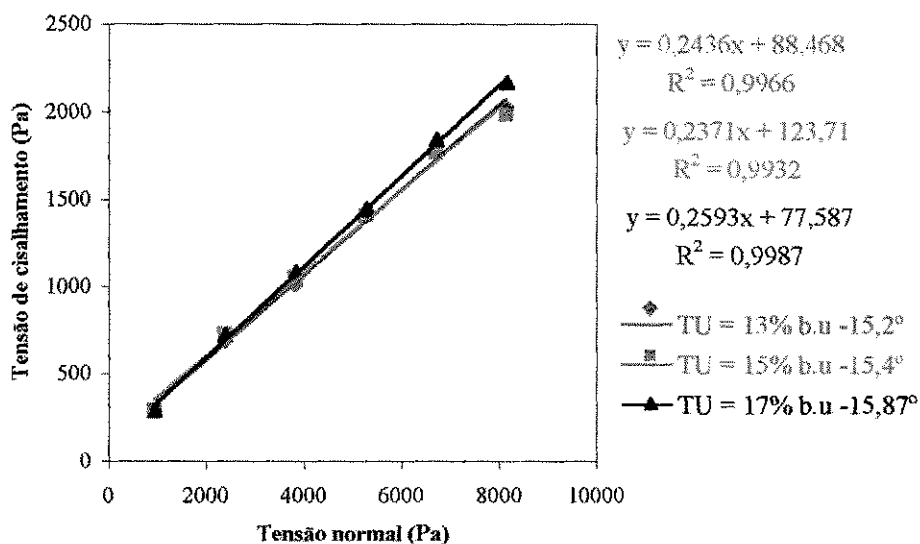


Figura 25 - Ângulo de atrito (ϕ_w) médio do feijão macassar com a parede de aço rugoso

Na Figura 26 percebe-se o mesmo comportamento da Figura 25, com o incremento de 4% no teor de umidade houve incremento no ângulo de atrito do feijão com a parede, apresentando uma diferença de $0,6^\circ$, esse aumento é devido à rugosidade do material de parede estudado. Verifica-se nas Figuras 22, 23 e 24 para os materiais de parede acrílico, alumínio e aço liso um comportamento diferente deste, ou seja, com o aumento do teor de umidade houve uma diminuição do ângulo de atrito do feijão com a parede.

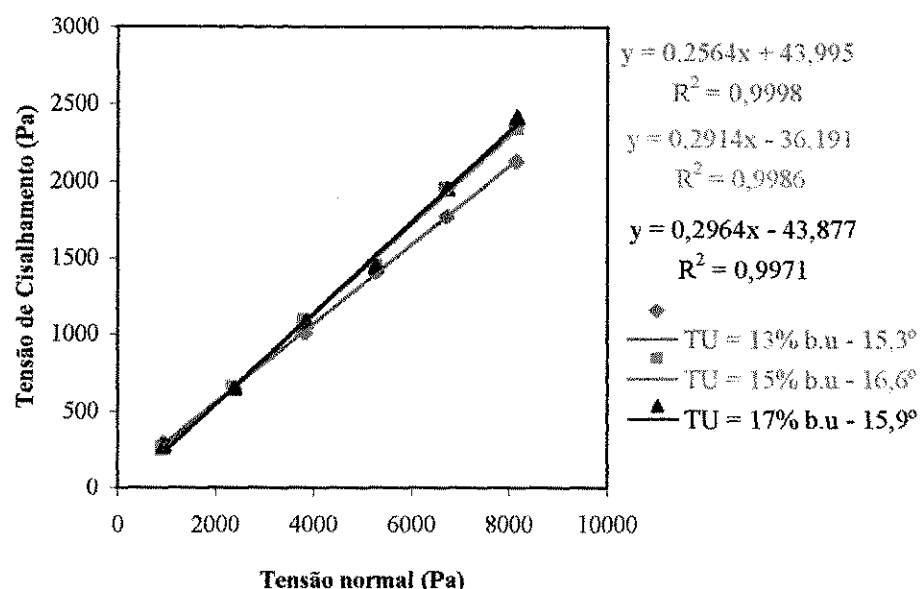


Figura 26 - Ângulo de atrito (ϕ_w) médio do feijão macassar com a parede de madeira

Observa-se na Figura 27 que com o aumento do teor de umidade houve incremento no ângulo de atrito do produto com a parede e com a variação do teor de umidade os grãos do feijão macassar apresentaram para o ângulo de atrito com a parede (ϕ_w) uma diferença de $1,6^\circ$ e, este comportamento é observado para os materiais de paredes: aço rugoso, madeira e concreto. Possivelmente, com o aumento do teor de umidade dos grãos do feijão macassar, a superfície do mesmo tenha alguma propriedade de adesão, que ao entrar em contato com a superfície da amostra da parede do silo, que é rugosa, apresenta esta tendência de incremento no ângulo de atrito do produto com a parede, comportamento diferente daqueles materiais menos ásperos como: acrílico, alumínio e aço liso.

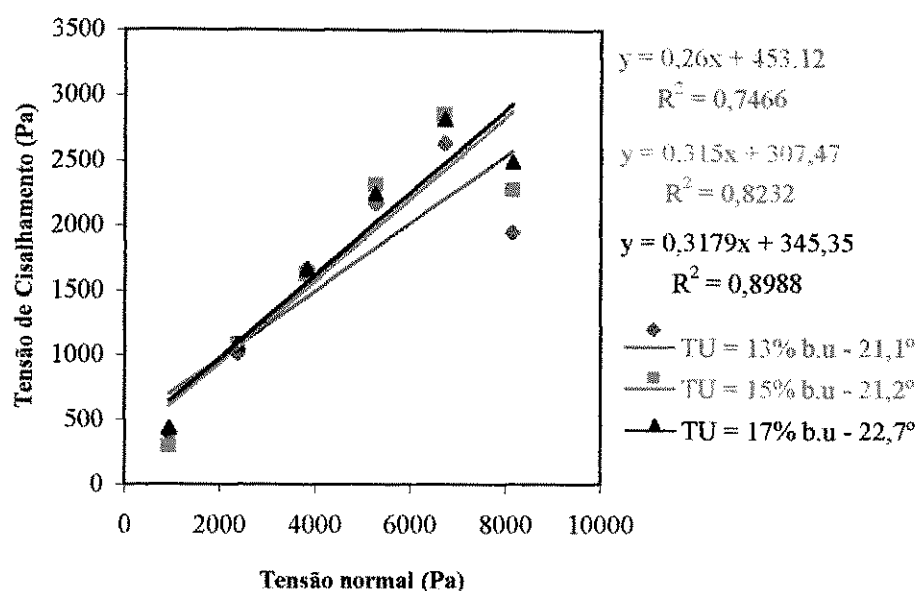


Figura 27 - Ângulo de atrito (ϕ_w) médio do feijão macassar com a parede de concreto

4.2.4 Função fluxo

A capacidade de um produto fluir depende da resistência desenvolvida pelo produto devido à consolidação e se, como resultado desta resistência, o produto é capaz de formar arco estável ou tubo refere-se a isto, como função fluxo instantâneo do produto ou simplesmente função fluxo.

Com os resultados das tensões máximas de consolidação (σ_1) e das tensões inconfinas (f_c), determinou-se às funções fluxos.

Vários fatores influenciam a resistência e conseqüentemente a função fluxo dos produtos. Dentre eles incluem-se o teor de umidade, a temperatura, o tempo de estocagem, a distribuição do tamanho das partículas e fatores externos como as vibrações mecânicas (ROBERTS, 1980 e ROBERTS, 1984).

Tabela 05 – Índice de fluxo dos grãos de feijão macassar com três teores de umidade

TU (%)	Função fluxo $FF = \sigma_1/\sigma_c$
13	7,3 - 6,12
15	7,39 - 6,3
17	7,65 - 6,4

σ_1 = Tensão máxima de consolidação

σ_c = Tensão inconfinada

A partir dos dados da Tabela 05, e de acordo com a classificação de Jenike (1964), o feijão macassar é classificado como sendo um produto de fácil fluidez. Estando livre da formação espontânea de um arco sobre o orifício de descarga do silo, que resulta na retenção do fluxo, e do efeito tubo, processo no qual se forma um tubo ao longo de todo corpo do silo originando zonas estáticas próximas às paredes do silo, portanto o feijão macassar não possui resistência suficiente para suportar seu próprio peso fazendo que o produto flua livremente.

Dois parâmetros são importantes para a análise do fluxo e do dimensionamento do orifício de descarga: primeiro, a função fluxo, FF representando a resistência do produto e segundo, o fator fluxo, ff que descreve a condição da tensão na tremonha durante o fluxo.

4.2.5 Fator fluxo

O fator fluxo depende do ângulo de atrito do produto com a parede ϕ_w , da inclinação da parede da tremonha α , e do ângulo efetivo de atrito interno. A determinação do fator fluxo foi feita utilizando a equação descrita no item 3.5.1 recomendada pela BMHB.

Na tabela 06 estão apresentados os resultados dos fatores fluxos. De acordo com os dados percebe-se que o fator fluxo varia conforme o material de parede, e diminui com o aumento do teor de umidade. O $\arctan ff^{-1}$ é a inclinação da reta que parte da origem do gráfico de FF e define o ff. Com os valores do fator fluxo da tremonha e da função fluxo do feijão macassar, é possível dimensionar orifício de descarga que permita escoamento do produto de forma contínua e sem apresentar possibilidade de formação do “efeito tubo”. Ainda com relação a esses dados, é possível projetar tremonhas e ou silos utilizando-se a metodologia de (JENIKE, 1964).

Tabela 06 - Fator fluxo dos grãos de feijão macassar com três teores de umidade

TU (%)	Fator Fluxo ff					
	Acrílico	Alumínio	Aço Liso	Aço Rugoso	Madeira	Concreto
13	1,81	1,76	1,74	1,82	1,82	1,87
15	1,71	1,69	1,69	1,77	1,78	1,82
17	1,68	1,67	1,66	1,73	1,73	1,74

4.2.6 Orifício de descarga

Existe uma relação muito importante entre a função fluxo e o fator fluxo. A intersecção da reta que define o ff, com a FF definirá a tensão crítica mínima na tremonha (σ_c). Esta tensão nos garantirá que o orifício de descarga terá um valor mínimo que não permitirá a formação de arco coesivo, podendo assim, dimensionar o orifício de descarga para não ocorrer o “efeito tubo”.

Analisando-se os dados da Tabela 07 percebe-se que o orifício de descarga varia de acordo com o material de parede e com o teor de umidade; observa-se ainda que o orifício de descarga aumenta com o incremento do teor de umidade para todos os materiais de parede.

Tabela 07 – Abertura do orifício de descarga para grãos de feijão macassar com três teores de umidade

TU(%)	Orifício de Descarga					
	Acrílico	Alumínio	Aço Liso	Aço Rugoso	Madeira	Concreto
13	0,68	0,70	0,70	0,66	0,67	0,62
15	0,75	0,77	0,78	0,74	0,73	0,71
17	0,82	0,84	0,83	0,78	0,77	0,72

5 CONCLUSÕES

De acordo com as condições em que foi realizado o trabalho conclui-se que:

- ✓ Na inexistência de uma norma brasileira para cálculos de pressões e fluxos em silos, e ainda das propriedades de fluxo para o feijão macassar nas principais normas internacionais vigentes, os ângulos de atrito interno, efetivo ângulo de atrito interno e ângulo de atrito do produto com a parede determinados, poderão ser utilizados na predição das pressões horizontal, vertical e no fundo dos silos;
- ✓ As propriedades físicas e de fluxo determinadas para o feijão macassar, poderão ser empregadas para o dimensionamento do orifício de descarga;
- ✓ Os orifícios de descarga calculados para as condições de teor de umidade e níveis de cargas utilizados, garantirão fluxo de funil sem a possibilidade de ocorrer “efeito tubo”;
- ✓ Como as propriedades físicas e de fluxo foram determinadas seguindo a metodologia das principais normas internacionais, estas poderão ser inseridas na futura norma brasileira de ações e fluxo em silos.

Para futuros trabalhos, sugere-se:

Quando possível, determinar as propriedades dos produtos que se desejam trabalhar, pois, assim, se poderá prever as reais condições que ocorrerão nos silos ou em equipamentos projetados.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACI-313 (1977) - AMERICAN CONCRETO INSTITUTE **Commentary on Recommended practice for design and construction of concrete bins, silos and bukers for storing granular materials.**

ARAÚJO, J. P. P. de; WATT, E. E. **O caupi no Brasil.** Brasília, EMBRAE, 1984.

ARAÚJO, J.P.P. de et al. Cultura do caupi, *Vigna unguiculada (L.) Walp.*: **Descrição recomendações técnicas, De cultivo.** Goiânia: EMBRAPA – CNPAF, 1984. 82p. (EMBRAPA – CNPAF. Circular técnica, 18).

AS3774 (1990) - AUSTRALIAN STANDARD **Loads on bulks solids containers.**

AVT. **Operating Instructions for the Translational Shear Testes TSG-70-140.** AVT Anlagen und Verfahrenstechnik GmbH, Weigarten - Alemanha, s.d., 65p. (Manual técnico).

AYUGA, F. Los empujes del material almacenado en silos. **Informes de la construcción.** Madrid, v.46, n.436, p. 27-33, março/abril. 1995.

BANDEIRA, I.S.A. **Análise de fluxo de ração e farelo de trigo em silos prismáticos industriais.** 1997. 71p. Dissertação (Mestrado em Construções Rurais e Ambiente), UFPB, Campina Grande, 1997.

BARRÊTO, R.L. **Determinação das propriedades físicas do colorau e dos grãos de urucum (*Bixa orellana L.*) para elaboração de projetos de pressões e fluxo em silos.** 1997. 84p. Dissertação (Mestrado em Construções Rurais e Ambiente), UFPB, Campina Grande, 1997.

BENINK, E.J. **Flow and stress analysis of cohesionless bulk materials in silos related to codes**. 1989. 162p. Tese Doutorado - Enschede, the Netherlands, Universiteit Twente, 1989.

BMHB. **British materials handling board. Draft Code of Practice for the Design of Silos, Bins, Bunkers and Hoppers**. Inglaterra, 1985. 101p.

BRACCINI, A.L.; PICANÇO, M. Manejo integrado de pragas do feijoeiro no armazenamento. **Revista Brasileira de Armazenamento**. Viçosa, v. 20, n.1/2, p.37-43, 1995.

BRAGA, R. **Plantas do Nordeste Especialmente do Ceará**. 4 ed. UFRN. Natal, 1976.

CALIL JUNIOR, C. **Recomendações de fluxo e de cargas para o projeto de silos verticais**. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 1990. 200p. (Apostila).

CALIL JÚNIOR, C. **Sobresiones en las paredes de los silos para almacenamiento de productos pulverulentos cohesivos**. 1984. 184p. Tese Doutorado. Universidad Politécnica de Barcelona, Barcelona, 1984.

CALIL JÚNIOR, C. **Recomendação de fluxo e de carga para o projeto de silos verticais**. 1989. 100p. Tese de Livre Docência. EESC - USP. 1989.

CALIL JUNIOR, C.; NASCIMENTO, J.W.B.; ARAÚJO, E.C. **Silos metálicos multicelulares**. São Carlos: Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, 1997. 178p.

Caupi movimentada mais de US\$ 249 milhões no Brasil. **Embrapa Meio-Norte**, Teresina, v. 3, n. 3, p. 4-5, jul. 2001.

CORRÊA, P.C. Necessidade de uma estrutura de armazenagem em nível de fazenda. **Inf. Agropec.**, Belo Horizonte, v.9. março-1983.

DIN 1055. **Lastannahmen für Bauten, Blatt 6, Lasten in Silozellen**. Alemanha, 1987, 12p.

FREIRE FILHO, F.R.; CARDOSO, M.J.; ARAÚJO, A.G. Feijão Macassar (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) Nomenclatura Científica e Nomes Vulgares. In: Seminário de Pesquisa Agropecuária do Piauí. Teresina, 1981.

FREIRE, M.S.; FONSECA, J.R.; XIMMERMANN, F.J.P.; WATT, E.E. Coleções de Germoplasma de Caupi: Conservação e Avaliação no Brasil. In: **O Caupi no Brasil**, Brasília, EMBRAPA/CPAF, 1988.

FREITAS, E.G.A. **Estudo teórico e experimental das pressões em silos cilíndricos de baixa relação altura/diâmetro e fundo plano**. 2001. 175p. Tese Doutorado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

GERMANO, M.L.L.R. **Emprego de produtos naturais no tratamento de sementes de feijão macassar (*Vigna unguiculata* L. Walp.) acondicionadas em três embalagens e em microrregiões do Estado da Paraíba**. 1997. 77p. Dissertação de Mestrado. UFPB, Areia, 1997.

GUAITA, M.; COUTO, A.; AYUGA, F. Numerical simulation of wall pressure during discharge of granular material from cylindrical silos with eccentric hoppers. **Biosystems Engineering**, Santiago de Compostela, v.85, n.3, p.101-109, 2003.

HARA, T; CORRÊA, P.C. Armazenagem de milho a granel na fazenda. **Informe Agropecuário**. Belo Horizonte. 1983.

HARA, F.; ALMEIDA, F.A.C.; CAVALCANTI MATA, M.E.R.M. **Estrutura de Armazenagem a nível de produtor**. In: XXVI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA. Cap. I., Campina Grande- PB, 1997. p. 2-48.

IBGE. **Levantamento sistemático da produção agrícola da Paraíba (LSPA-PB)**. Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística -FIBGE- GCEA/PB, J. Pessoa-PB, 1996.

JENIKE, A.W. **Storage and flow of solids**. Boletim 123. Utah Engineering Experiment Station. University of Utah. Salt Lake City. Utah. Estados Unidos, 1964, 197p.

JENIKE, A.W., JOHANSON, J.R. and CARSON, J.W. "Bin Loads – Part 2: Concepts", **Journal of Engng.** For Industry, Trans. ASME, Series B, 95(1) 1973.

MAIA, F.M.M. **Composição e caracterização nutricional de três cultivares de *Vigna unguiculata* (L.) Walp: EPACE-10, Olho de ovelha e IPA-206.** 1996. 87p. Dissertação Mestrado, UFC, Fortaleza, 1996.

MILANI, A.P. **Determinação das propriedades de produtos armazenados para projeto de pressões e fluxo em silos.** 1993. 272p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estrutura) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1993.

NASCIMENTO, J.W.B. **Estudos dos silos metálicos prismáticos para fábrica de ração.** 1996. 152p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estrutura) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1996.

NASCIMENTO, J.W.B.; FREIRE, I.M.; SILVA, V.R.; MACIEL, K.R, (2001). Propriedades de fluxo do feijão macassar (*Vigna unguiculata*) para predição do Fluxo e projeto de silos. In. **XXX Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola.** Foz do Iguaçu-PA. p.1-4. (CONBEA 439).

PEREIRA, J.A.; BELARMINO FILHO, J.; SANTOS, J.F.; ARANHA, S. Caracteres agronômicos e suas correlações em linhagens do feijão macassar. **Boletim de Pesquisa, 08.** EMEPA, – PB, João Pessoa, PB, 1992.

QUIN, F.M. Introduction. In: SING, B.B.; MOHAN RAJ, D.R.; DASHIEL, K.E.; JACKAI, L.E.N. (Ed.) **Advances in cowpea research.** Ibadan: IITA-JIRCAS, 1997. p.ix-xv.

RAVENET, J. **Silos, flujo e vaciado sólidos, formacion de bovedas, efectos.** Barcelona, Espanha: Técnicos Asociados, S.A., 1983. 335p.

ROBERTS, A.W. 100 years of Janssen. **Bulk Solids Handling.** v.15, n.3, july/septembar, 1995.

ROBERTS, A.W., OOMS, M. **Flow properties of bulk solids**. Paper 4. **Storage, flow and handling of bulk solids**. Ed. A.W. Roberts. University of Newcastle, 1987.

ROBERTS, A.W.; The effects of vibration on the strength and flow properties of bulk solids in storage bin operation, Proc. International Conference on Design of Silos for Strength and Flow, University of Lancaster, England, September, 1980.

ROBERTS, A.W.; OOMS, M.; MANJUNATH, K.S. **Feeder load and power requirements in the controlled gravity flow of bulk solids from mass-flow bins**, Mech. Trans. IEAust., ME9 v.1, p.49-61, 1984.

SCHWEDES, J. Measurement of flow properties of bulk solids. **Powder Technology**. New York, v.88, p.285-290, 1996.

SENADO FEDERAL. **Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento**. Agenda 21. Brasília, 1997. 598p.

SILVA, P.S.L.; OLIVEIRA, C.N. Rendimentos de feijão verde e maduro de cultivares de caupi. **Horticultura Brasileira, Brasília**, v.11, n.2, p.133-135, 1993.

SSTT. **Standard shear testing technique for particulate solids using the Jenike Shear Cell**. The Institution of Chemical Engineers, George E. Davis Building. Inglaterra, 1989. 40 p. (Manual Técnico).

TEIXEIRA, S.M; MAY, P.H.; SANTANA, A.C. de. Produção e importância econômica do caupi no Brasil. In: ARAÚJO, J.P.P. de WATT, E.E. (Org.) **O caupi no Brasil**. Brasília: EMBRAPA – CNPAF, Cap.4, p.99 –136, 1988.

WALTERS, J.K., “**A theoretical analysis of stresses in axially-symmetric hoppers and bunkers**”, Chem. Engng. Sci., 28, 779, 1973.

APÊNDICE

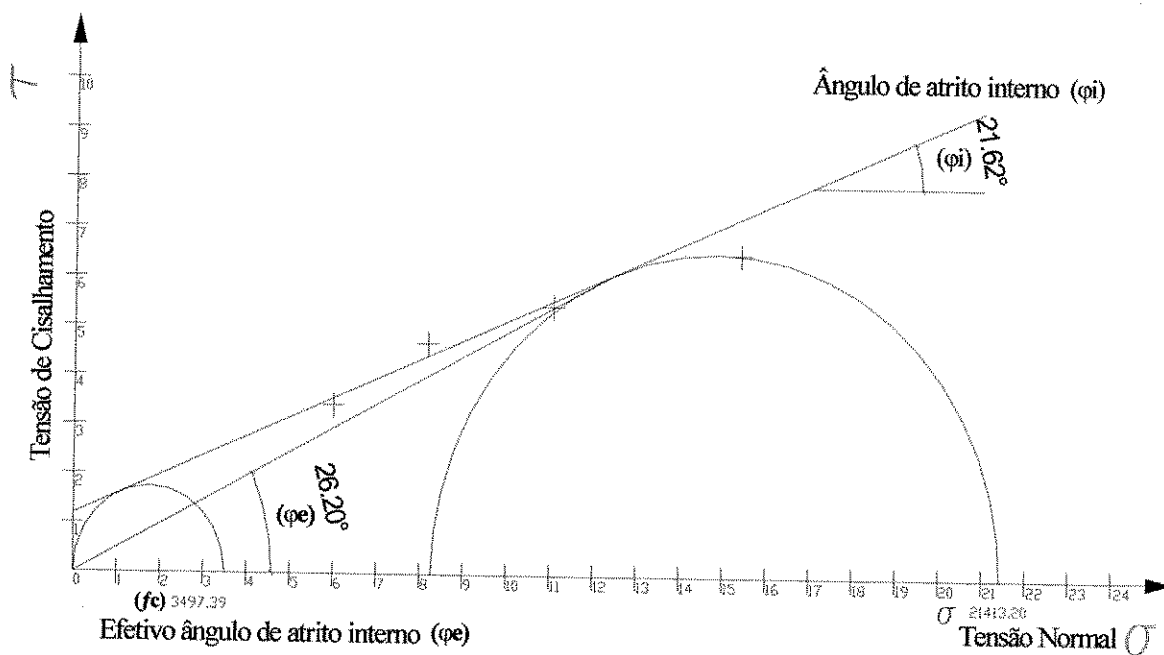


Figura 28 - Círculo de Mohr de Tensões – Tu = 13% – 10kg – Instantâneo

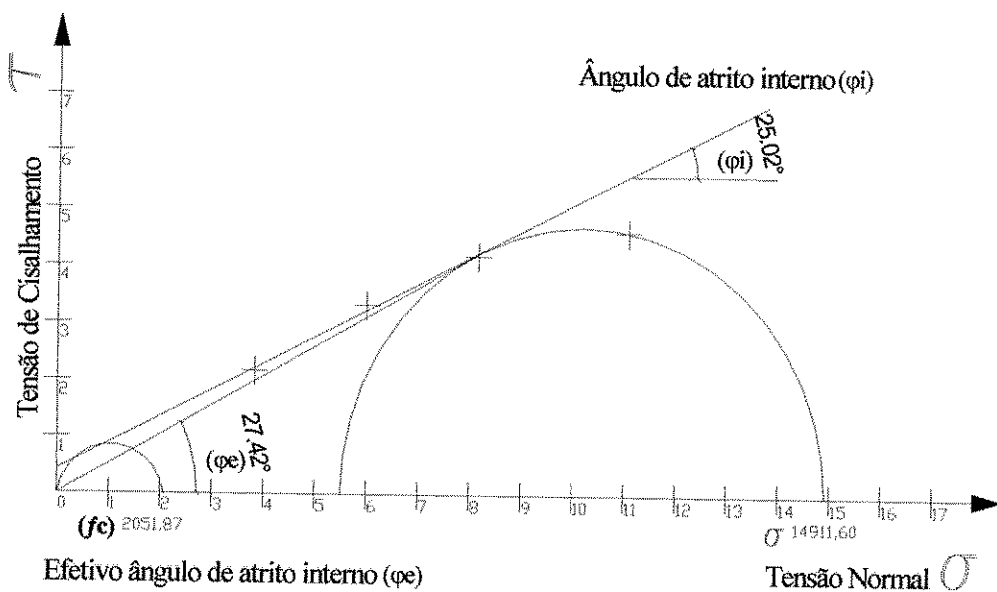


Figura 29 - Círculo de Mohr de Tensões – Tu = 13% – 7kg – Instantâneo

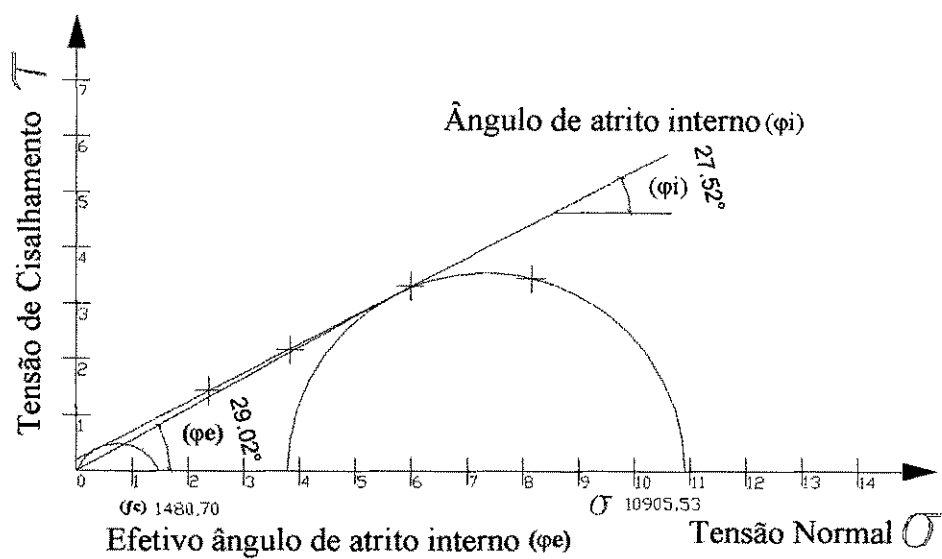


Figura 30 - Círculo de Mohr de Tensões – $T_u = 13\%$ – 5kg – Instantâneo

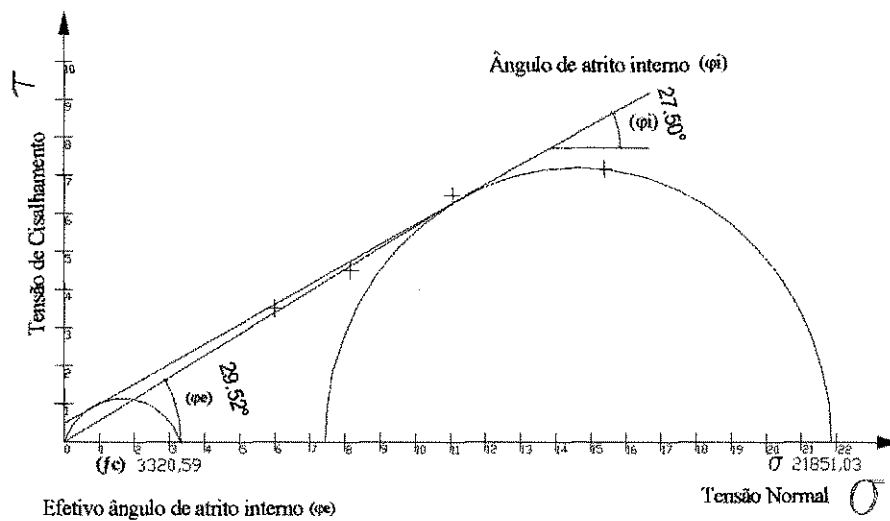


Figura 31 - Círculo de Mohr de Tensões – $T_u = 15\%$ – 10kg – Instantâneo

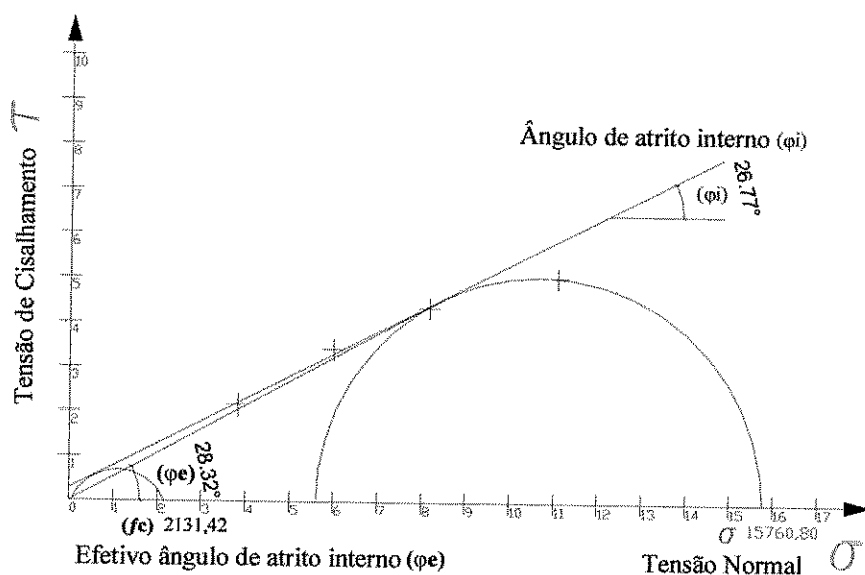


Figura 32 - Círculo de Mohr de Tensões – $T_u = 15\%$ – 7kg – Instantâneo

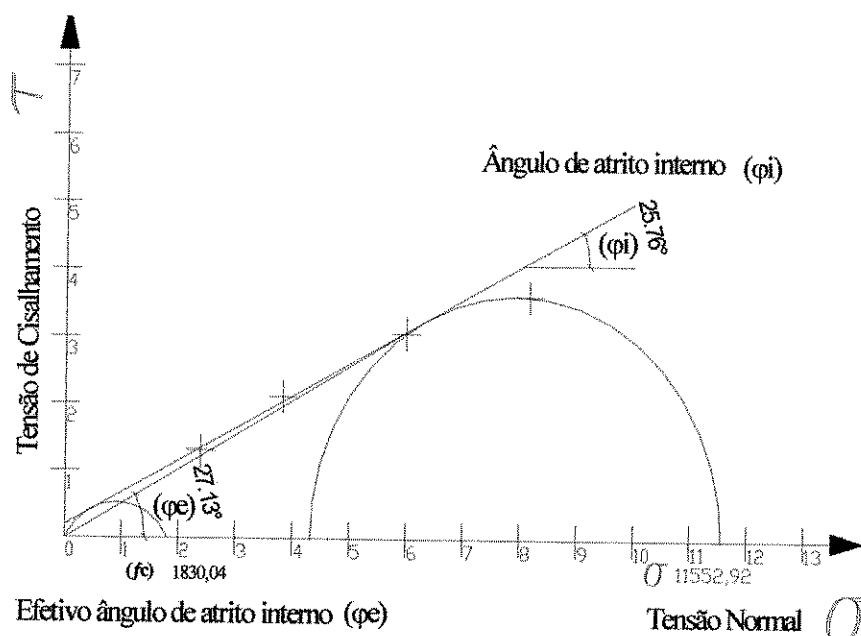


Figura 33 - Círculo de Mohr de Tensões – $T_u = 15\%$ – 5kg – Instantâneo

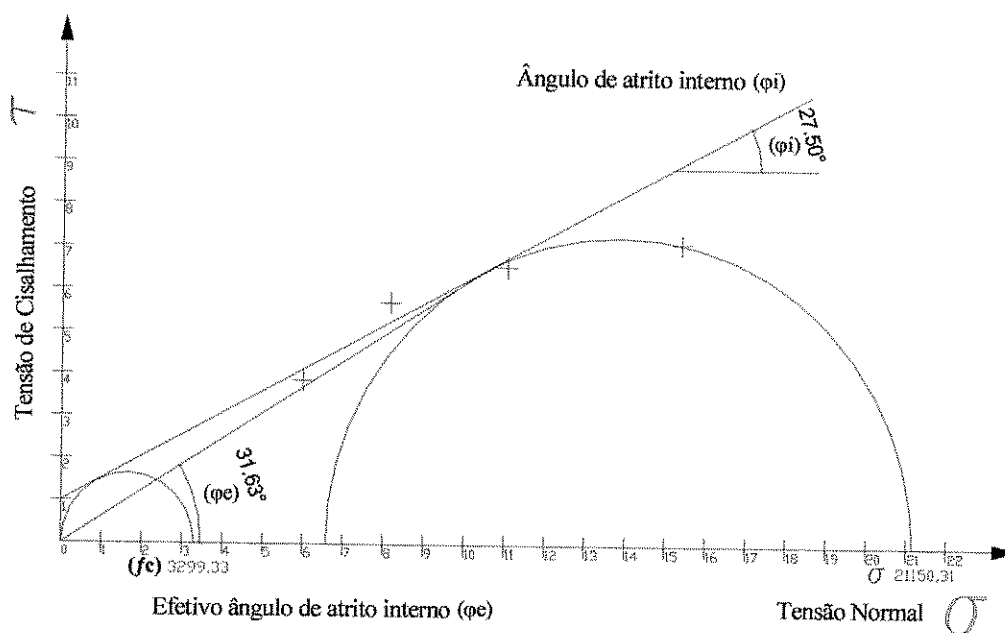


Figura 34 - Círculo de Mohr de Tensões – $T_u = 17\%$ – 10kg – Instantâneo

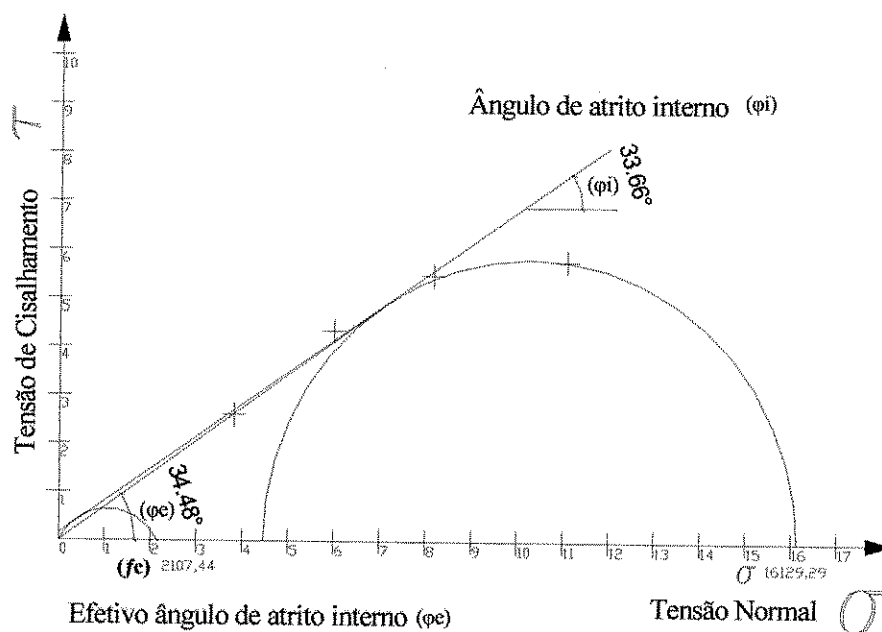


Figura 35 - Círculo de Mohr de Tensões – $T_u = 17\%$ – 7kg – Instantâneo

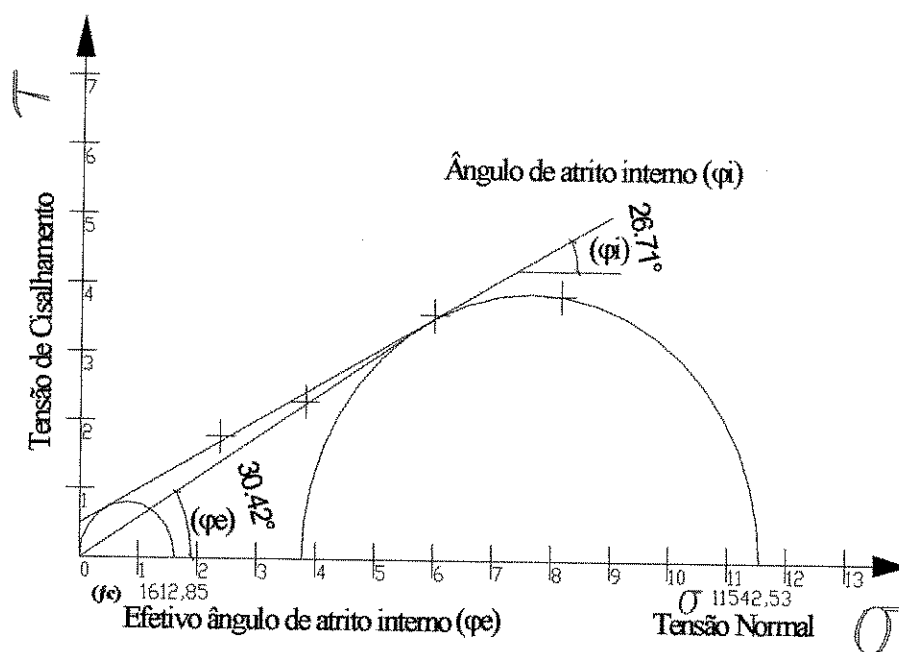


Figura 36 - Círculo de Mohr de Tensões – $T_u = 17\%$ – 5kg – Instantâneo

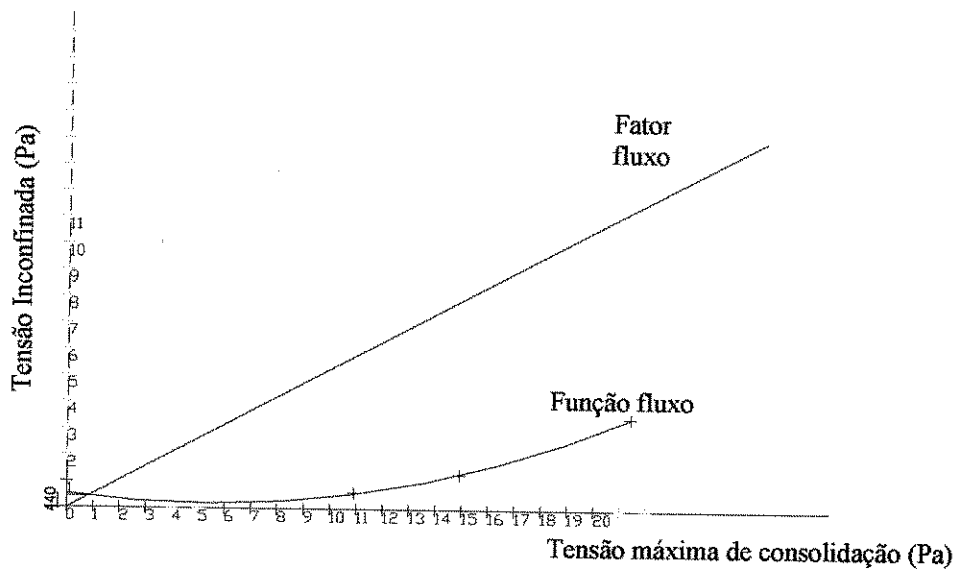


Figura 37 - função fluxo para parede de acrílico ($T_u = 13\%$)

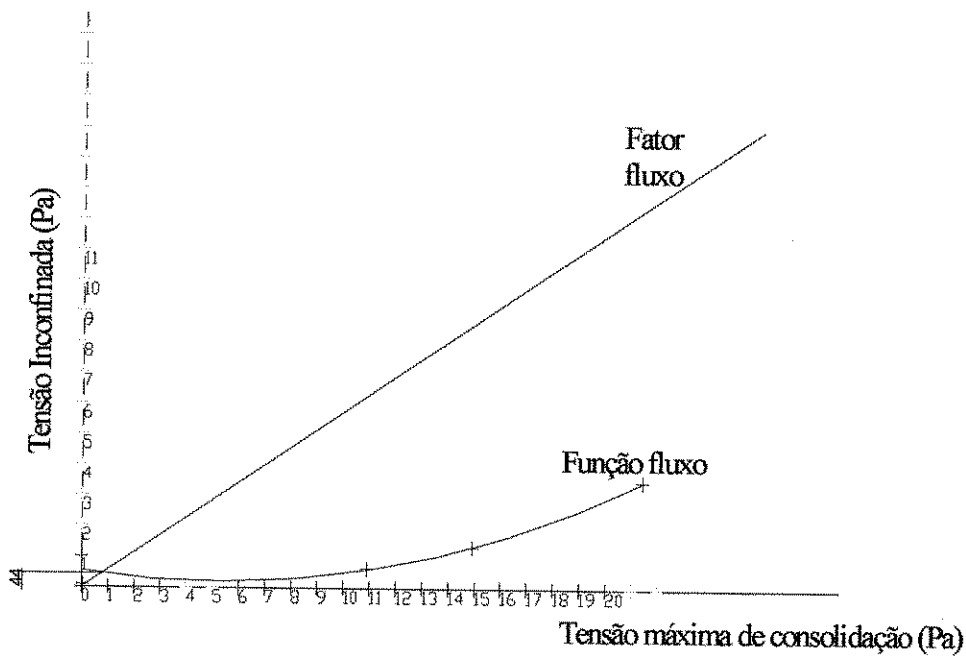


Figura 38- função fluxo para parede de alumínio ($T_u = 13\%$)

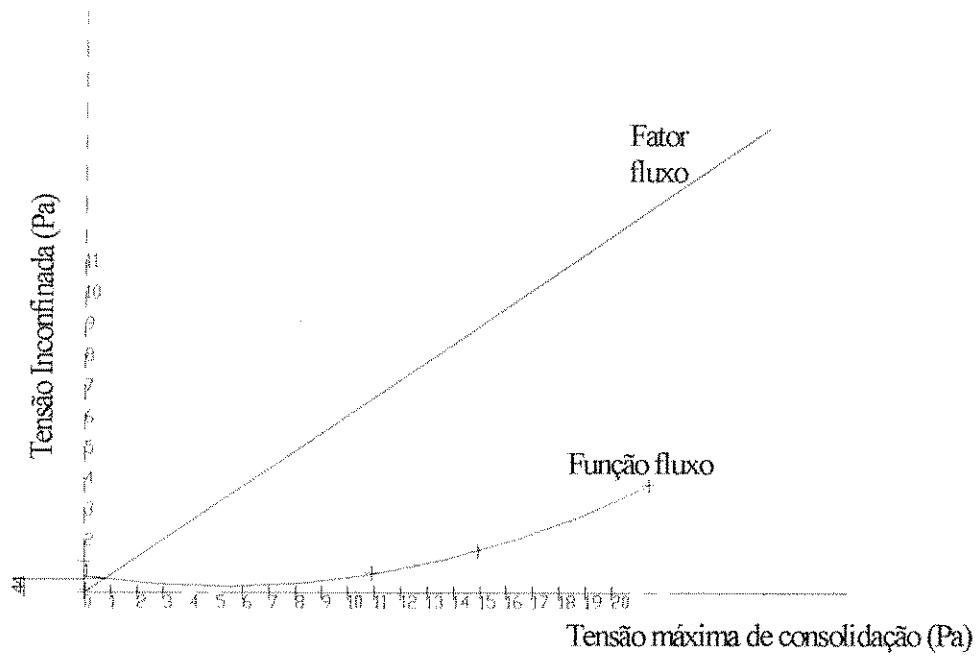


Figura 39 - função fluxo para parede de aço liso ($T_u = 13\%$)

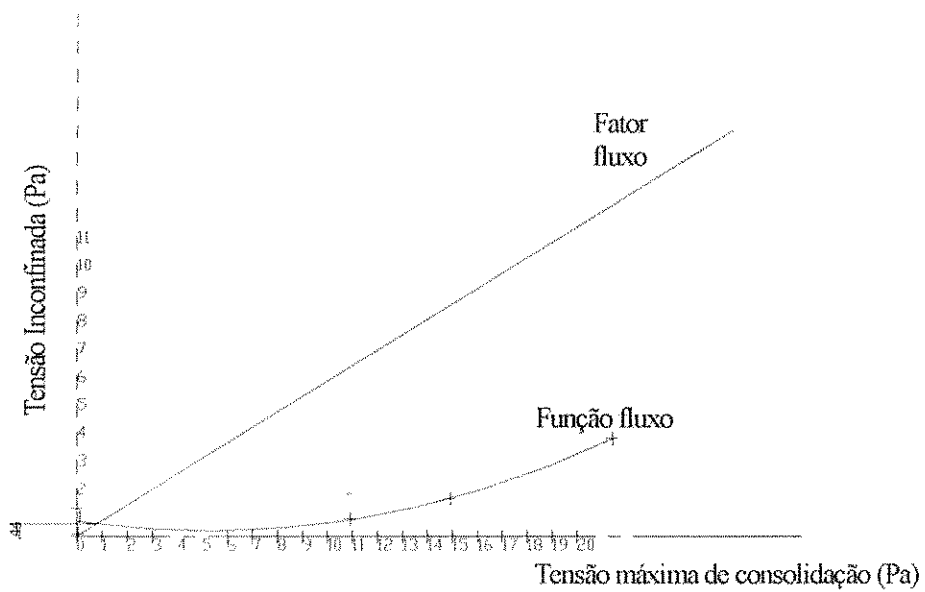


Figura 40 - função fluxo para parede de aço rugoso ($T_u = 13\%$)

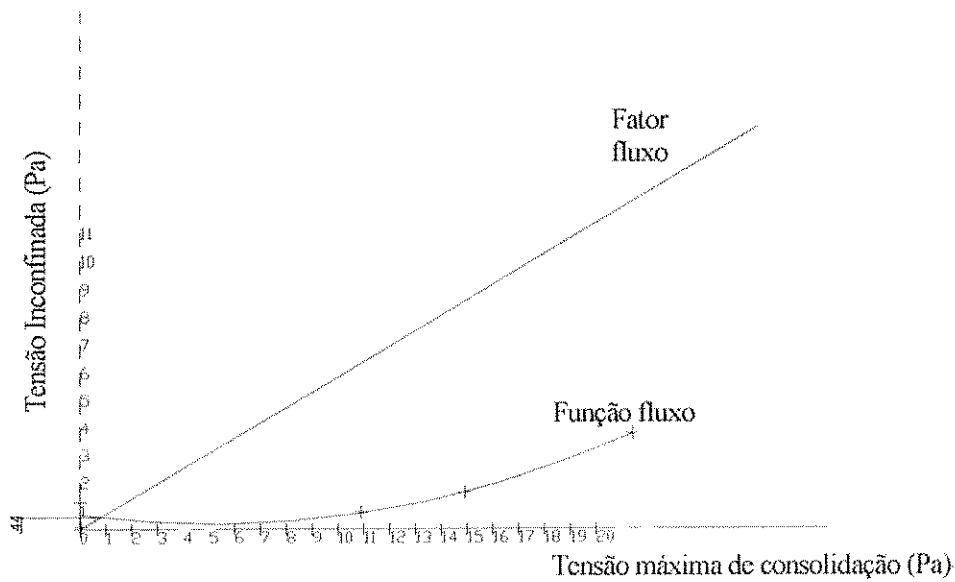


Figura 41 - função fluxo para parede de madeira (Tu = 13%)

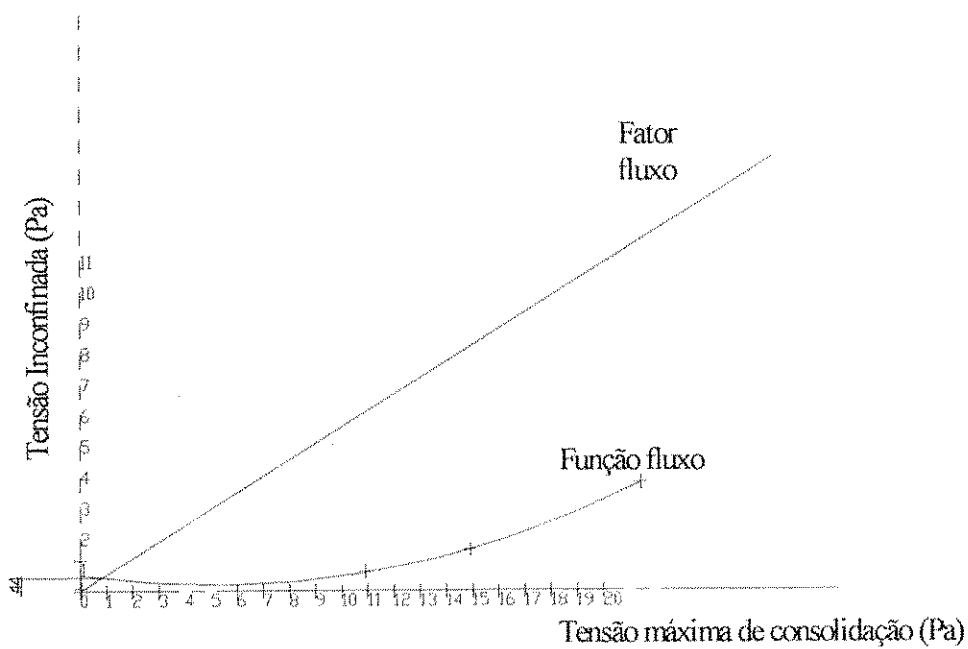


Figura 42 - função fluxo para parede de concreto (Tu = 13%)

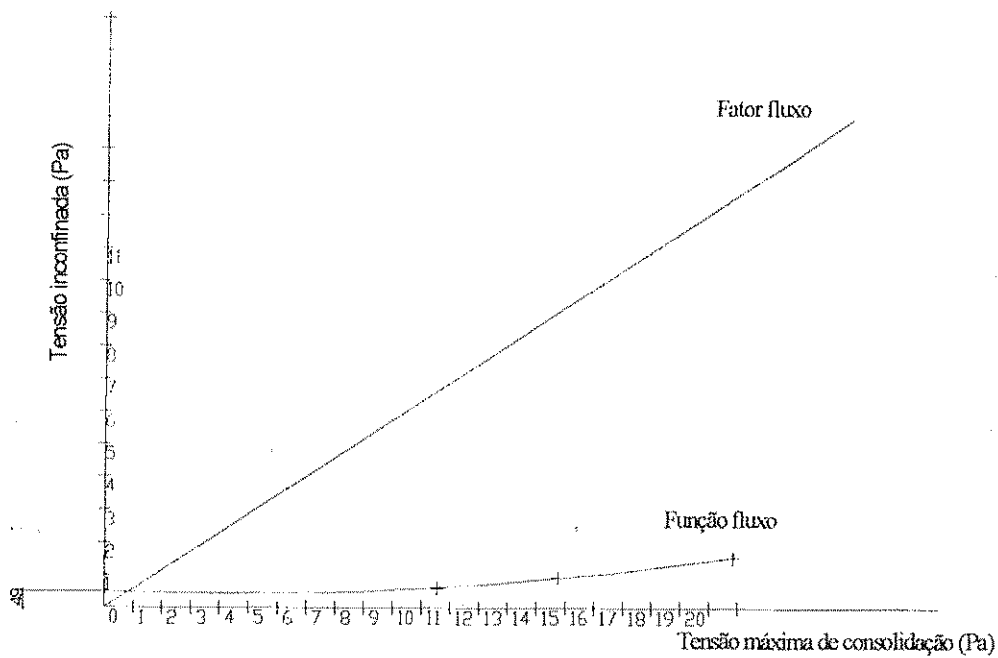


Figura 43 - função fluxo para parede de acrílico ($T_u = 15\%$)

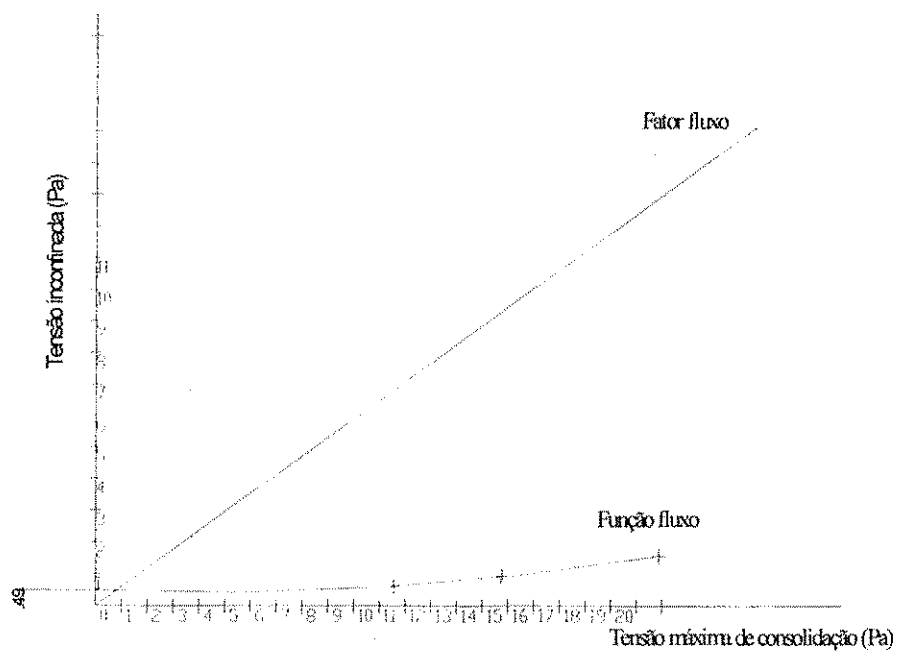


Figura 44 - função fluxo para parede de alumínio ($T_u = 15\%$)

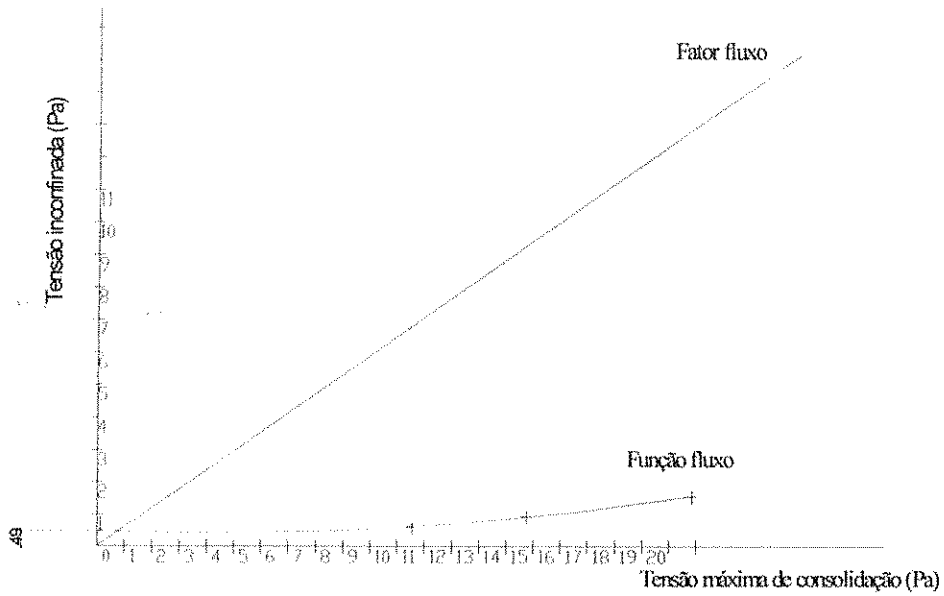


Figura 45 - função fluxo para parede de aço liso ($T_u = 15\%$)

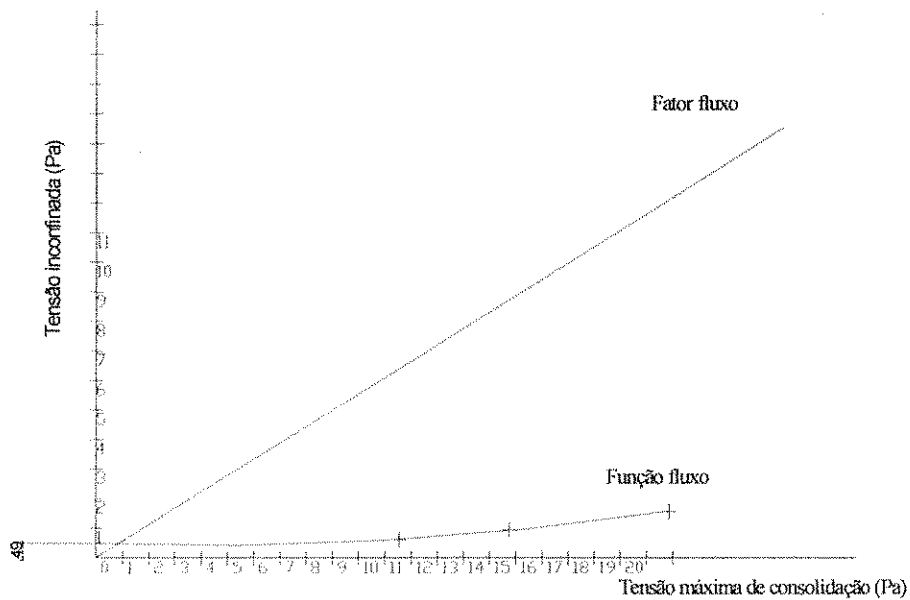


Figura 46 - função fluxo para parede de aço rugoso ($T_u = 15\%$)

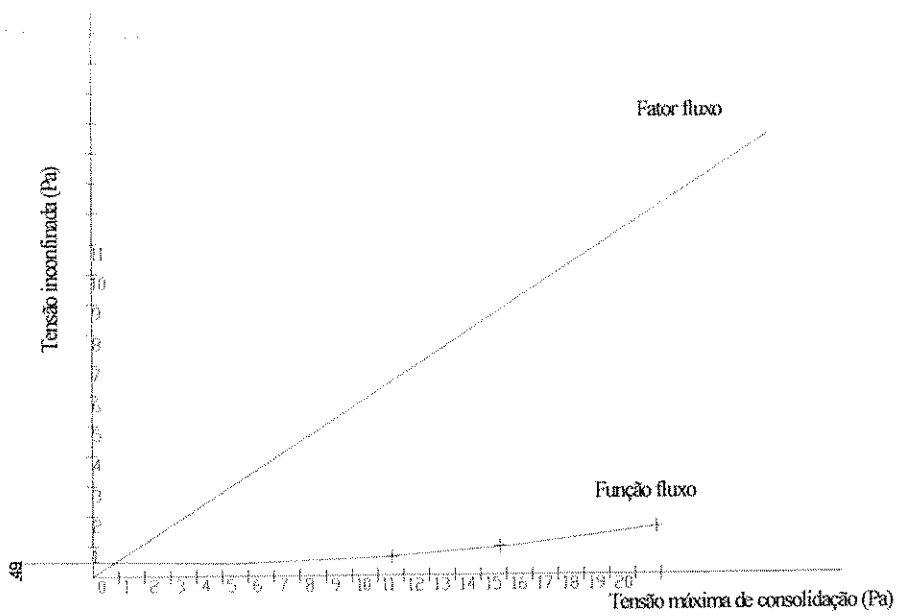


Figura 47 - função fluxo para parede de madeira ($T_u = 15\%$)

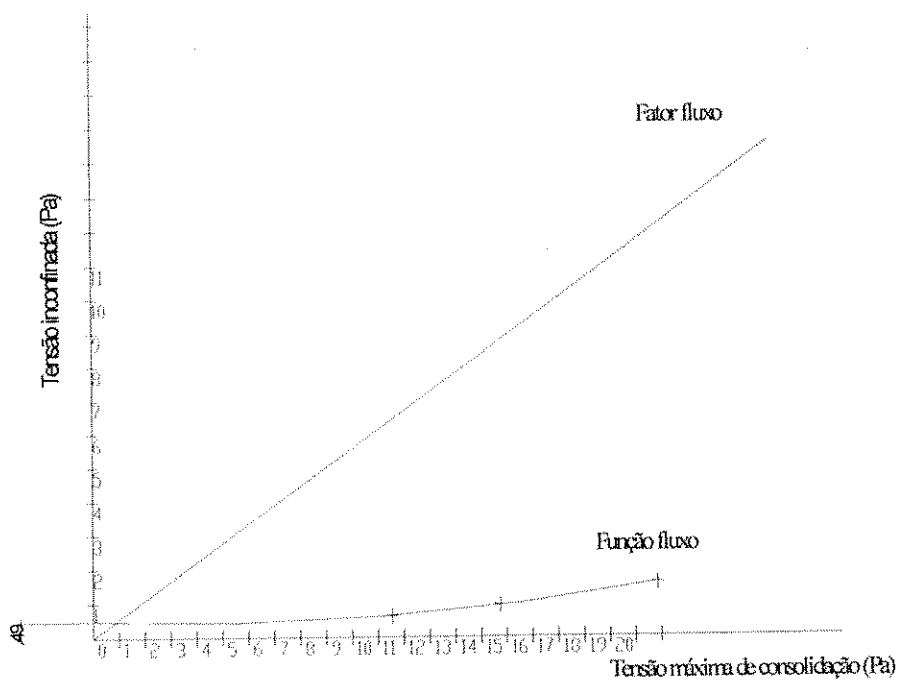


Figura 48 - função fluxo para parede de concreto ($T_u = 15\%$)

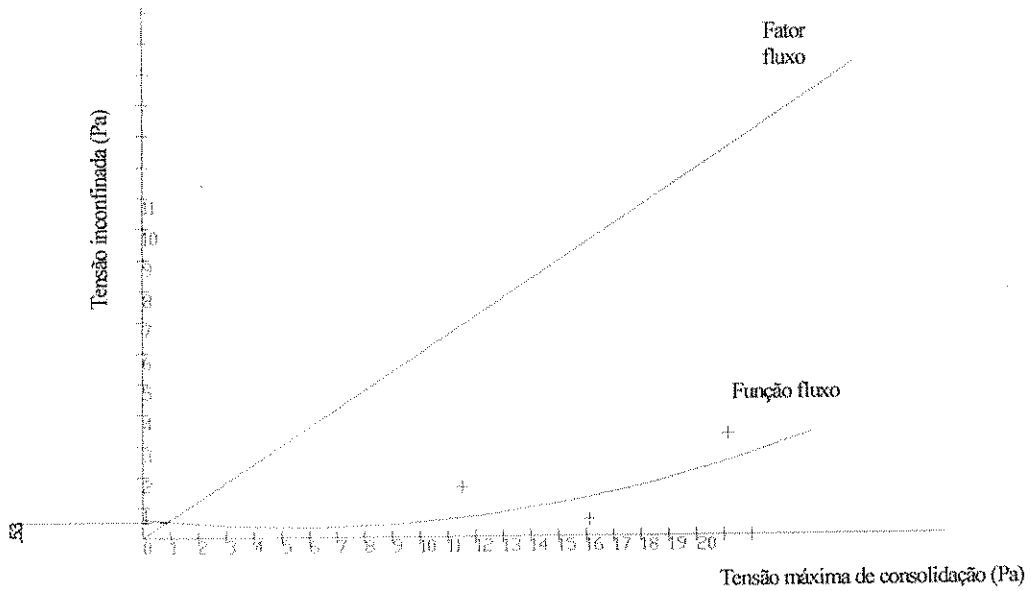


Figura 49 - função fluxo para parede de acrílico ($T_u = 17\%$)

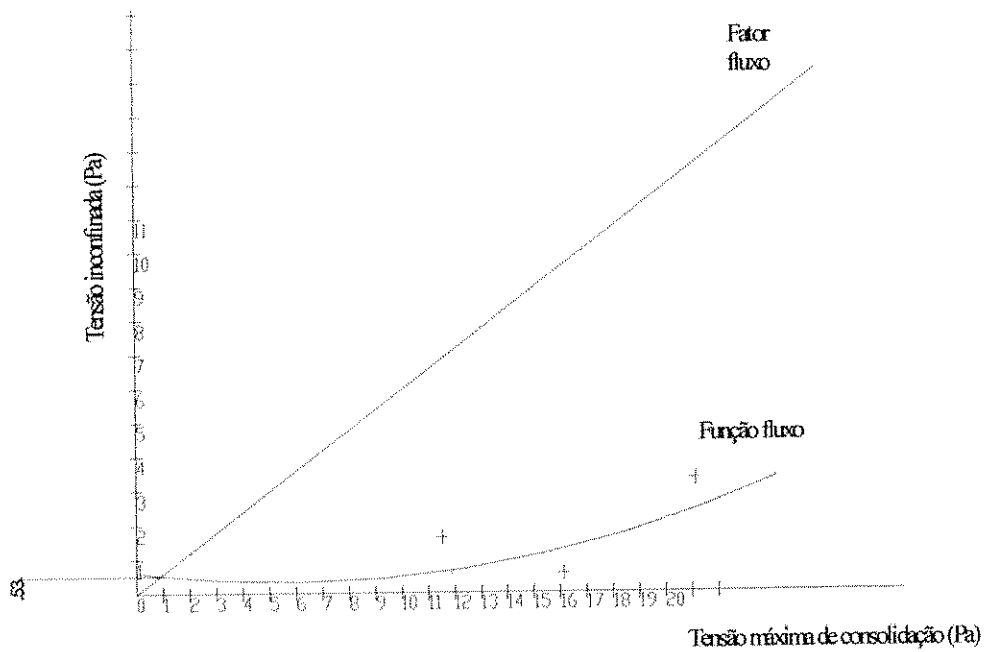


Figura 50 - função fluxo para parede de alumínio ($T_u = 17\%$)

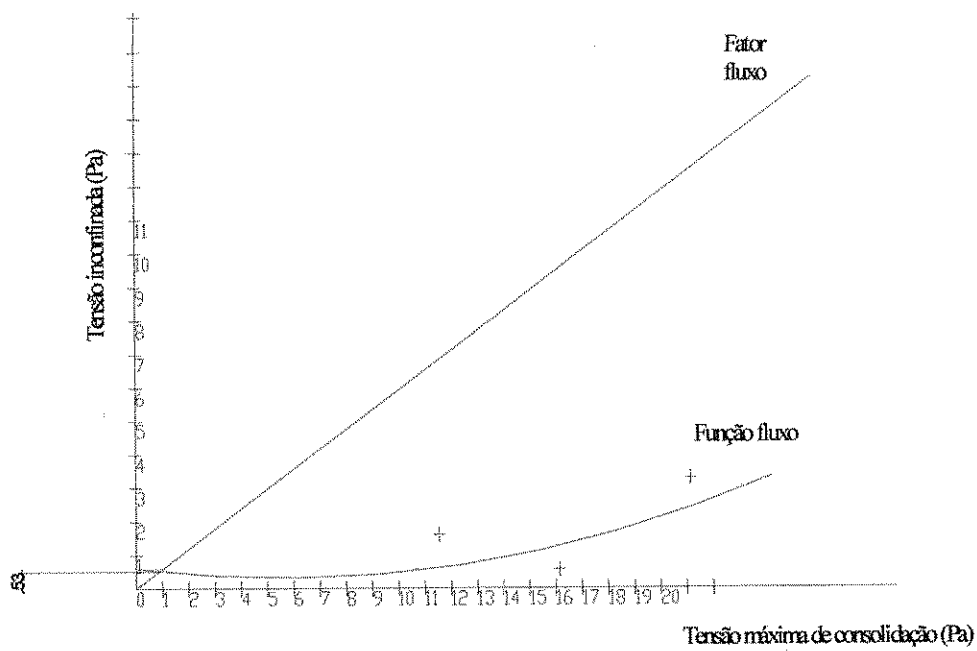


Figura 51 - função fluxo para parede de aço liso ($T_u = 17\%$)

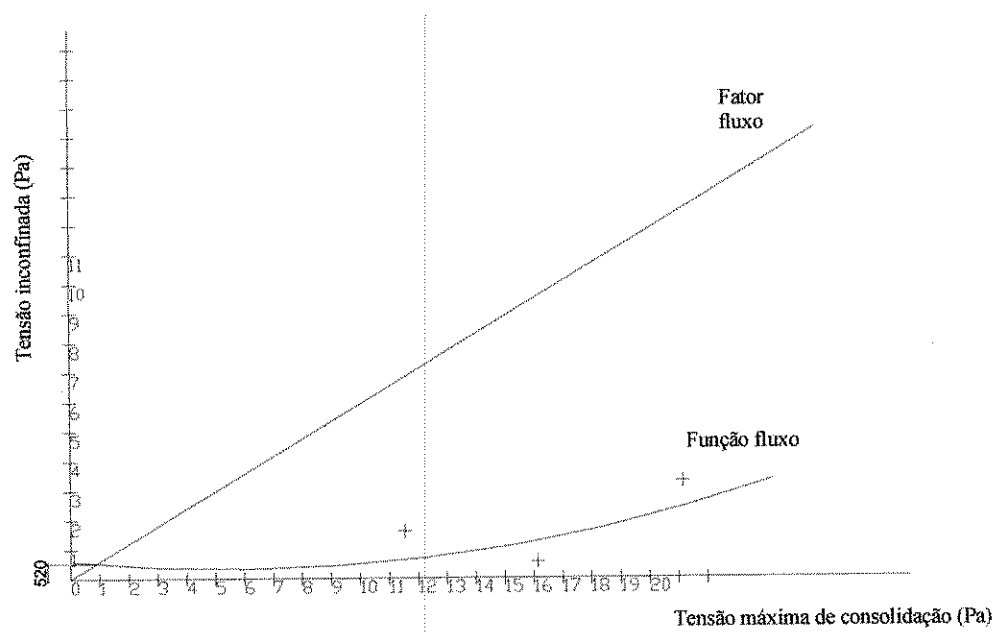


Figura 52 - função fluxo para parede de aço rugoso ($T_u = 17\%$)

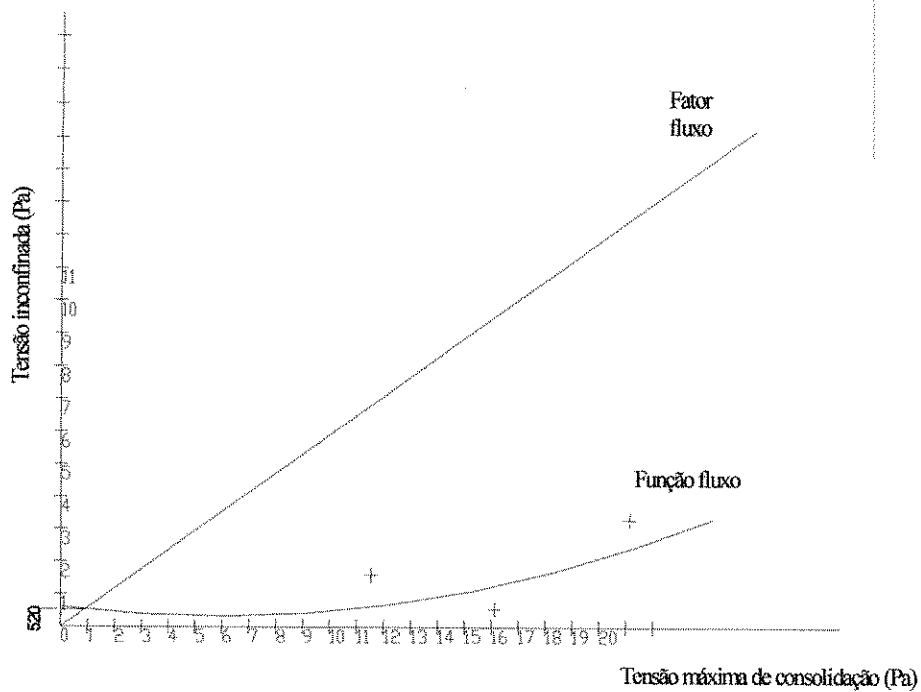


Figura 53 - função fluxo para parede de madeira ($T_u = 17\%$)

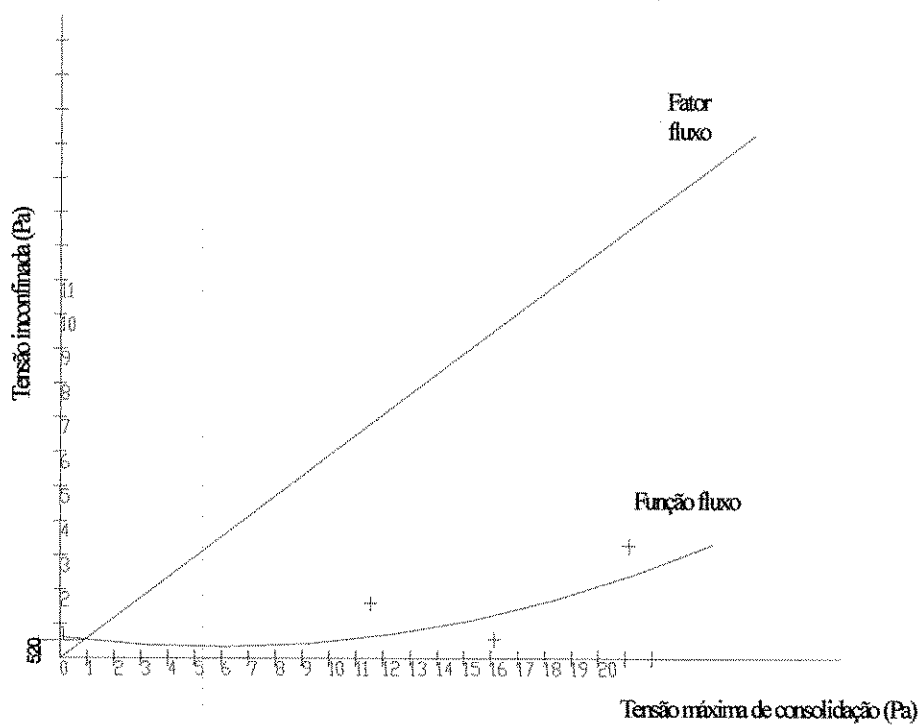


Figura 54 - função fluxo para parede de concreto ($T_u = 17\%$)