

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO
COLORAU E DOS GRÃOS DO URUCUM (*Bixa orellana L.*)
PARA ELABORAÇÃO DE PROJETO DE PRESSÕES E
FLUXO EM SILOS**

ROSANIA LIMA BARRÊTO

Campina Grande-PB

janeiro - 1997

ROSANIA LIMA BARRÊTO

**DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO
COLORAU E DOS GRÃOS DO URUCUM (*Bixa orellana L.*)
PARA ELABORAÇÃO DE PROJETO DE PRESSÕES E FLUXO
EM SILOS**

Dissertação apresentada ao Curso de
Pós-Graduação em Engenharia
Agrícola do Centro de Ciências e
Tecnologia da Universidade Federal
da Paraíba, em cumprimento às
exigências para obtenção do Grau de
Mestre.

**Área de Concentração: Processamento e Armazenamento de
Produtos Agrícolas**

**Orientador: Prof. Dr. JOSÉ WALLACE B. DO NASCIMENTO
Co-orientador: Prof. Dr. CARLITO CALIL JUNIOR**

Campina Grande - PB

janeiro - 1997

PARECER DE JULGAMENTO DA DISSERTAÇÃO DO MESTRANDO

ROSANIA LIMA BARRETO

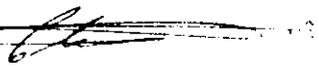
TÍTULO: "Determinação das propriedades físicas do Colorau e dos grãos do Urucum (*Bixa orellana* L.) para elaboração de projeto de pressões e fluxo em silos".

COMISSÃO EXAMINADORA

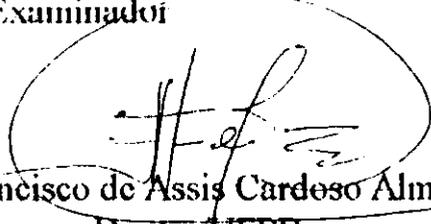
PARECER


Prof. José Wallace Barbosa do Nascimento
Doutor/UFPB
Orientador

APROVADO


Prof. Carlito Calil Júnior
Doutor/EESC/USP
Examinador

aprovado


Prof. Francisco de Assis Cardoso Almeida
Doutor/UFPB
Examinador

APROVADO

Campina Grande, 28 de janeiro de 1997

**DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO
COLORAU E DOS GRÃOS DO URUCUM (*Bixa orellana* L.)
PARA ELABORAÇÃO DE PROJETO DE PRESSÕES E FLUXO
EM SILOS**

B273d Barreto, Rosania Lima

Determinação das propriedades físicas do colorau e dos grãos do urucum (*Bixa orellana L.*) para elaboração de projetos de pressões e fluxo em silos / Rosania Lima Barrêto. Campina Grande: UFPB, 1997.

Dissertação (Mestrado) Departamento de Engenharia Agrícola - Universidade Federal da Paraíba.

Orientador: Prof. Dr. José Wallace B. Nascimento

1. propriedade físicas 2. urucum 3. colorau I. Título

CDU 633.86

DIGITALIZAÇÃO:

SISTEMOTECA - UFCG

Aos meus pais, Raimundo e
Valdelice Lima, com muito
amor **OFEREÇO**. À meus
irmãos, cunhados e sobrinhos,
DEDICO.

AGRADECIMENTOS

À Deus, razão maior de tudo;

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

Ao Prof. Dr. Carlito Calil Junior, pela orientação, sugestões e amizade;

À Comissão Examinadora;

Aos Profs. do Departamento de Engenharia Agrícola pela amizade;

Ao Sr. Silvio Antônio Ferro, pela realização dos ensaios de laboratório;

Aos funcionários do Laboratório de Madeiras (LaMEM), pela atenção e amizade;

Aos amigos Ed Naldo, Jacqueline, Nilza, Renata, Petúnia, Cristina, Kátia, Silvana, Gileaide pelo apoio e incentivo;

À Refinações Milho do Brasil (RMB), pela contribuição com os produtos para os ensaios;

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (CAPES), 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 Corintos 13:2)

SUMÁRIO

	pág.
LISTA DE FIGURAS	i
LISTAS DE TABELAS	iv
LISTA DE SÍMBOLOS	v
RESUMO	viii
ABSTRACT	ix
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Urucuzeiro (<i>Bixa orellana L.</i>)	4
2.1.1 Histórico sobre o Urucuzeiro	4
2.1.2 Corantes Naturais Versus Artificiais	6
2.1.3 Razões para o Uso de Corantes em Alimentos	7
2.1.4 Usos do Corante do Urucum	8
2.1.4.1 Urucum como Corante para Alimentos	9
2.1.4.2 Urucum na Indústria de Carnes	11
2.1.4.3 Urucum na Fabricação de Queijos	11
2.1.4.4 Urucum nas Massas Alimentícias	12

2.2	Aparelho de Cisalhamento de Jenike	13
2.2.1	Princípio do Ensaio de Cisalhamento Instantâneo	15
2.2.2	Princípio do Ensaio de Cisalhamento com Tempo de Consolidação	21
2.2.3	Princípio do Ensaio de Cisalhamento Instantâneo com a Parede	23
2.3	Propriedades Físicas dos Produtos	25
2.3.1	Granulometria	26
2.3.2	Teor de Umidade	26
2.3.3	Densidade	27
2.3.4	Ângulo de Repouso	28
2.3.5	Ângulo de Atrito Interno (ϕ_i)	29
2.3.6	Efetivo Ângulo de Atrito Interno (ϕ_e)	29
2.3.6.1	Determinação do Ângulo de Atrito Interno e do Efetivo Ângulo de Atrito Interno .	29
2.3.7	Função Fluxo (FF)	31
2.3.8	Fator Fluxo (ff)	32
2.3.9	Propriedade Escorrega-para (slip-stick)	34
2.4	Considerações para Projeto e Construções de Silos	35
2.4.1	Fluxo e Pressões em silos	35
2.4.1.1	Fluxo em Silos	35
2.4.1.2	Pressões em Silos	39
2.4.1.2.1	O Valor de K (relação entre as pressões horizontal e vertical)	40
2.4.1.2.2	Pressões de Carregamento	41
3	MATERIAL E MÉTODOS	43
3.1	Produtos Utilizados nos Ensaios	43
3.2	Material da Parede	43
3.3	Máquina de Ensaio (TRANSLATION SHEAR TESTER TSG 70-140)	44

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	59
4.1 Granulometria.....	59
4.2 Densidade em Função da Consolidação	60
4.3 Resultados dos Teste de Cisalhamento Instantâneo	61
4.3.1 Ângulo de Atrito Interno (ϕ_i) e Efetivo Ângulo de Atrito Interno (ϕ_e) dos Grãos do Urucum com a Variação do Teor de Umidade e do Colorau com 11%bu	61
4.4 Resultados dos Teste de Cisalhamento com Tempo de Consolidação	63
4.4.1 Ângulo de Atrito Interno e Efetivo Ângulo de Atrito dos Grãos do Urucum com Tempo de Consolidação	63
4.5 Ângulo de Atrito (ϕ_w) do Colorau e dos Grãos do Urucum com a Parede	66
4.6 Função Fluxo do Colorau e dos Grãos do Urucum para o Cisalhamento Instantâneo .	74
4.7 Função Fluxo dos Grãos do Urucum com Tempo de Consolidação	76
5 CONCLUSÕES	77
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79
7 ANEXOS	82
7.1 ANEXOS - Yield locus do colorau com 11% bu	83
7.2 ANEXOS - Yield locus dos grãos do urucum - 9, 10 e 11% bu	84
7.3 ANEXOS - Time yield locus dos grãos do urucum - 12, 48 e 72h	88
GLOSÁRIO	92

LISTA DE FIGURAS

	pág.
FIGURA 01 - A posição do colorífico com relação a outras especiarias	10
FIGURA 02 - Aparelho de cisalhamento de Jenike	14
FIGURA 03 - Curvas de força-tensão de amostras sobreconsolidadas (1); consolidada criticamente (2) e subconsolidadas (3)	16
FIGURA 04 - Célula de Jenike na posição inicial off-set	17
FIGURA 05 - Célula de Jenike na posição final off-set	17
FIGURA 06 - Célula de cisalhamento com anel molde e tampa de consolidação ..	19
FIGURA 07 - Curvas Tensão, Pré-Shear e Shear	20
FIGURA 08 - Lugares geométricos de tempo e instantâneo	23
FIGURA 09 - Possíveis formas dos lugares geométricos da parede	24
FIGURA 10 - Ângulo de repouso	28
FIGURA 11 - Lugar geométrico (YL e EYL) e ângulos de atrito interno (ϕ_i e ϕ_e) ...	30
FIGURA 12 - Função Fluxo (FF) e fator fluxo da tremonha (ff)	33

FIGURA 13 - Resultado gráfico obtido do aparelho registrador mostrando o comportamento “Slip-Stick” para o colorau	34
FIGURA 14 - Modelos de fluxos (DIN 1055, 1987)	38
FIGURA 15 - Determinação gráfica do tipo de fluxo (DIN 1055, 1987)	38
FIGURA 16 - Tipos de obstruções do fluxo	39
FIGURA 17 - Aparelho de cisalhamento	45
FIGURA 18 - Bancada de consolidação VFB-70	45
FIGURA 19 - Aparelho registrador das forças de cisalhamento	46
FIGURA 20 - Raspagem do excesso do produto	49
FIGURA 21 - Detalhe da consolidação da amostra (Milani, 1993, p. 88)	50
FIGURA 22 - Operação de rotação (twist)	51
FIGURA 23 - Detalhe da preparação para o ensaio com a parede (aço rugoso)	57
FIGURA 24 - Granulometria do colorau (a) e dos grãos de urucum (b)	59
FIGURA 25- Yield Locus dos grãos do urucum 9% (a), 10% (b) e 11% (c) e do sub- produto colorau 11% bu (d)	62
FIGURA 26 - Time Yield Locus dos grãos do urucum com tempo de consolidação de 12 (a) 48 (b) e 72 horas (c)	64
FIGURA 27 - Time Yield Locus dos grãos do urucum para o pré-shear 5 kN (a) 7 kN (b) e 10 kN (c) com tempo de consolidação de 0, 12, 48 e 72 horas	65
FIGURA 28 - Ângulo de atrito com a parede (ϕ_w) de Aço Liso, Aço Rugoso e Plástico: inferior (a) e superior (b) colorau	67
FIGURA 29 - Ângulo de atrito (ϕ_w) dos grãos do urucum com a parede de Aço Liso: inferior (a) e superior (b)	68
FIGURA 30 - Ângulo de atrito (ϕ_w) dos grãos do urucum com a parede de Aço Rugoso: inferior (a) e superior (b)	68

FIGURA 31 - Ângulo de atrito (ϕ_w) dos grãos do urucum com a parede de Alumínio: inferior (a) e superior (b)	69
FIGURA 32 - Ângulo de atrito (ϕ_w) dos grãos dourucum com a parede de Concreto: inferior (a) e superior (b)	70
FIGURA 33 - Ângulo de atrito (ϕ_w) dos grãos do urucum com a parede de Madeira: inferior (a) e superior (b)	71
FIGURA 34 - Ângulo de atrito (ϕ_w) dos grãos do urucum com a parede de Plástico: inferior (a) e superior (b)	72
FIGURA 35 - Função Fluxo do urucum com diferentes teores de umidade: 09% (a), 10% (b) e 11% bu (c)	74
FIGURA 36 - Função Fluxo do colorau com 11% bu (a)	75
FIGURA 37 - Função Fluxo para o urucum com diferentes tempos de consolidação: 12 (a), 48 (b) e 72 horas (c)	76

..

LISTA DE TABELAS

	pág.
TABELA 01 - Áreas de maior consumo de colorífico no País	10
TABELA 02 - Propriedades dos produtos armazenados segundo a DIN 1055 (1987)	25
TABELA 03 - Emprego dos limites de atrito interno (ϕ_i), atrito com a parede (ϕ_w) e a relação da pressão horizontal	40
TABELA 04 - Níveis de cargas utilizados nos ensaios de cisalhamento instantâneo e com tempo de consolidação	48
TABELA 05. Resultados dos ensaio de granulometria do colorau e dos grãos do urucum.	60
TABELA 06 - Densidade, ângulo de atrito interno (ϕ_i) e efetivo ângulo de atrito interno (ϕ_e) em função do teor de umidade dos grãos do urucum e do colorau para o teste de cisalhamento instantâneo	63
TABELA 07 - Densidade, ângulo de atrito interno (ϕ_{it}) e efetivo ângulo de atrito (ϕ_{et}) com tempo de consolidação dos grãos do urucum (11%bu)	66
TABELA 08 - Ângulo de atrito com a parede (ϕ_w) para os grãos do urucum e colorau	73

LISTA DE SÍMBOLOS

bs - percentual de base seca;

bu - percentual de base úmida;

c - coesão;

D - diâmetro das partículas (mm);

D_s - diâmetro do silo (m)

ff - fator fluxo

FF - função fluxo

F_v - força vertical;

H - peso do pendural de cargas (daN);

K - razão entre as pressões horizontal e vertical;

P_{hc} - pressão horizontal de carregamento;

P_{vc} - pressão vertical de carregamento;

P_{wc} - pressão de atrito por 1,0m de superfície de parede;

R - raio hidráulico (m);

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);

z - profundidade abaixo da superfície efetiva (m);

α - ângulo da tremonha ($^\circ$);

ϕ_e - efetivo ângulo de atrito interno ($^\circ$);

ϕ_{ei} - efetivo ângulo de atrito interno instantâneo inferior ($^\circ$);

ϕ_{eu} - efetivo ângulo de atrito interno instantâneo superior ($^\circ$);

ϕ_{et} - efetivo ângulo de atrito interno com tempo de consolidação ($^\circ$);

ϕ_{eti} - efetivo ângulo de atrito interno com tempo de consolidação inferior ($^\circ$);

ϕ_{etu} - efetivo ângulo de atrito interno com tempo de consolidação superior ($^\circ$);

ϕ_i - ângulo de atrito interno ($^\circ$);

ϕ_{ii} - ângulo de atrito interno instantâneo inferior ($^\circ$);

ϕ_{iu} - ângulo de atrito interno instantâneo superior ($^\circ$);

ϕ_{it} - ângulo de atrito interno com tempo de consolidação ($^\circ$);

ϕ_{iit} - ângulo de atrito interno com tempo de consolidação inferior ($^\circ$);

ϕ_{iit} - ângulo de atrito interno com tempo de consolidação superior ($^\circ$);

ϕ_w - ângulo de atrito com a parede: tangente do coeficiente de atrito com a parede ($^\circ$);

ϕ_{wi} - 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_l - densidade com cisalhamento instantâneo inferior (kN/m^3);

γ_u - densidade com cisalhamento instantâneo superior (kN/m^3);

γ_{ll} - densidade com tempo de consolidação inferior (kN/m^3);

γ_{lu} - densidade com tempo de consolidação superior (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 - resistência ao deslizamento inconfinado (resistência inconfineda) (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

BARRETO, Rosania Lima. Determinação das propriedades físicas do colorau e dos grãos do urucum (*Bixa orellana L.*) para elaboração de projetos de pressões e fluxo em silos. Campina Grande, 1997. (Dissertação) Mestrado em Engenharia Agrícola - Universidade Federal da Paraíba.

O urucuzeiro é um arbusto da família bixácea, que vegeta em ecossistemas florestais localizados na América tropical, sendo suas sementes são cobertas com uma camada vermelha contendo bixina em maior concentração. A bixina é um corante empregado nas indústrias de produtos alimentícios, cosméticos e farmacológicos, a qual vem largamente substituindo os sintéticos. O trabalho teve o objetivo de determinar as propriedades físicas das sementes do urucum e do sub-produto colorau para serem empregados na elaboração de projetos de pressões e fluxo em silos. Os ensaios foram realizados utilizando a máquina TSG 70-140 conhecida como "Jenike Shear Cell" e recomendada pelas principais normas internacionais. Determinou-se as propriedades de granulometria, densidade, ângulo de atrito interno instantâneo, ângulo de atrito interno com tempo de consolidação, efetivo ângulo de atrito interno instantâneo, efetivo ângulo de atrito interno com tempo de consolidação, ângulo de atrito com a parede e função fluxo. Os resultados mostram que o urucum tem um comportamento diferente dos outros produtos granulares: o aumento no teor de umidade resulta em diminuição nos ângulos estudados.

ABSTRACT

BARRETO, Rosania Lima. Determination of physical properties the pepper and annatto bins (*Bixa orellana L.*) for elaboration projects of pressures and flow of silos. Campina Grande, 1997. (Dissertação) Mestrado em Engenharia Agrícola - Universidade Federal da Paraíba.

The Annato (*Bixa orellana L.*) is an arbust of the bixacea family, that vegetates in forest ecosystems in the Tropical America. Their seeds are covered by a rouge layer that has a high concentration of bixine, which is a natural dye used in the food, cosmetic and pharmacological industries largely substituten of the sintetics. This research was developed aiming to determine the annato and pepper physical properties. It was done tests utilizing the TSG 70-140 machine, that is known over the world as Jenike Shear Cell and recommended by the main international policies. The following properties were determined: particle size, density, interface friction angle, interface friction angle with consolidation time, angle of effective friction, angle of effective friction with consolidation time, friction angle of silo wall and flow function. The results show that the annato has different comparing to others granulate products: the increment of moisture content results in a decreasing in the studied angles.

1 INTRODUÇÃO

O urucuzeiro (*Bixa orellana L.*) é um arbusto da família bixácea, que vegeta em ecossistemas florestais localizados na América tropical, suas sementes são cobertas com uma camada vermelha de bixina em maior concentração. A bixina é um corante empregado nas indústrias de produtos alimentícios, cosméticos e farmacológicos.

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. O Brasil, assim como muitos países do mundo, ainda tem problemas com armazenamento de produtos agrícolas e outros, tendo grandes perdas devido à ineficiência da capacidade de armazenagem ou a utilização de técnica inadequada de armazenamento.

Os silos são estruturas difíceis de projetar com relação a fluxos contínuos e como estruturas econômicas e seguras, devidos aos produtos a serem armazenados terem propriedades diferentes daquelas dos líquidos. Para uma estrutura ser segura e econômica, é importante que as cargas não sejam subestimadas nem especificadas como maiores que as estritamente necessárias.

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 juntos com a falta de conhecimento das relevantes propriedades físicas dos produtos armazenados e do fluxo.

Calil Jr. (1990) comenta que após estudos das principais normas internacionais, verificou que existe uma grande discrepância dos critérios adotados entre as normas, e que as maiores ocorrem com relação às propriedades físicas dos produtos armazenados.

No que diz respeito ao Brasil, não existe uma norma específica de silos que possa orientar projetos e profissionais ligados a essa área. Encontra-se em fase de estudos uma proposta (Calil Jr., 1990).

O urucum apesar de não apresentar uma produção que possa exigir grandes projetos de silos para armazenagem, possui uma grande aplicação industrial nas mais diversas áreas de processamento tais como: na produção de queijos, salsichas, extratos, sorvetes, iogurtes, massas, cosméticos e farmacológicos.

Não se tem conhecimento na literatura de trabalhos de pesquisa que tenha estudado a determinação de suas propriedades físicas, assim como do colorau seu principal produto industrializado para serem empregadas na elaboração de projetos de pressão e fluxo em silos. A máquina e a metodologia utilizada no trabalho é recomendada pelas principais normas internacionais para o estudo das propriedades físicas recomendadas para

elaboração de projetos de pressões e fluxo em silos, visando contribuir com a futura norma brasileira de ações e fluxo em silos.

Este trabalho tem o objetivo principal, conhecer as propriedades físicas dos grãos do urucum e do seu principal produto industrializado o colorau para dimensionamento de componentes e planejamento de sistema de processamento e armazenamento, através da determinação das seguintes propriedades físicas:

- granulometria;
- densidade;
- ângulo de atrito interno instantâneo;
- ângulo de atrito interno com tempo de consolidação;
- efetivo ângulo de atrito interno instantâneo;
- efetivo ângulo de atrito interno com tempo de consolidação;
- ângulo de atrito com a parede;
- função fluxo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Urucuzeiro (*Bixa orellana L.*)

2.1.1 Histórico sobre o Urucuzeiro

O urucuzeiro é um arbusto da família bixácea, que vegeta em ecossistemas florestais localizados na América tropical (Silva, 1991, p.4). Sendo seu nome científico *Bixa orellana L.*, devido a Francisco de Orellana que em 1541 subiu o Rio Amazonas (Oliveira, 1989, p.56).

A planta, de cultura Pré-colombiana é considerada perene, de rápido crescimento e pode atingir até quatro metros ou mais de altura, e com aproximadamente 40 anos de vida útil dependendo das condições edafo-climáticas e de manejo (Guimarães, 1989, p.37).

Tem folhas cordiformes, normalmente grandes, de coloração verde ou verde violeta (Silva, 1991, p.4), as flores são hermafroditas de coloração variando do branco ao vermelho pálido, dispostas em panículas terminais. Os frutos são do tipo cápsula, com coloração amarela, verde, vermelho ou roxo; recobertas por espinhos, podendo ser deiscentes ou indeiscentes, se abrindo em 2 e raras vezes em 3 valvas, contendo em média 20 a 60 sementes denominadas urucum, das quais se extraem o pigmento. A superfície da

semente é coberta por papilas vermelhas que contêm os pigmentos bixina e orelina (Oliveira, 1989, p.57).

Didriksen (1991, p.209) relata que os corantes derivados de urucum são alguns dos mais antigos corantes naturais conhecido no Mercado Europeu. No mercado mundial, o Peru encontra-se em 1º lugar em produção e exportação seguido pelo Quênia e pelo Brasil que produz 6883 t/ano (IBGE, 1993).

O urucuzeiro está sendo usado como uma importante alternativa agrícola no Brasil, tendo em vista um retorno econômico favorável, proporcionado pela exportação das sementes para países altamente industrializados, que a utilizam como matéria-prima para produção do corante natural bixina. Estes fatores, tem proporcionado uma expansão significativa da cultura em todo o território brasileiro (Guimarães, 1989, p.43). O Brasil pode vir a ocupar uma posição de destaque no comércio internacional de urucum, já que possui matéria-prima e tecnologia suficientes (Oliveira, 1989, p. 163).

Atualmente o Pará é o estado que detém a maior produção nacional, com 2420 t/ano de grãos, seguido de São Paulo 2325 t/ano e Paraíba 1196 t/ano (IBGE, 1993).

Segundo Mello; Lima (1989, p.64) no estado do Pará, a cultura do urucuzeiro, é desenvolvida essencialmente por pequenos produtores, que a utilizam como forma de obter financiamento para o cultivo de alimentos básicos. O grande potencial que o estado possui é devido, principalmente as condições edafo-climáticas da região e a adaptação da cultura, que favoreceu o aumento das áreas plantadas como também a colheita de sementes de ótima qualidade. Conforme Guimarães (1989, p. 43), o teor de bixina da

safra normal e da safrinha no estado do Pará está na faixa de 2,60 a 6,90% bs e 3,5 a 4,3% bs, respectivamente.

Na Paraíba o urucuzeiro é conhecido como açafão (denominação imprópria, pois o açafão é planta da família Iridacea). Segundo Mello; Lima (1989, p.63), o urucuzeiro foi introduzido no Brejo Paraibano no município de Bananeiras pelo agricultor Luiz Bezerra, por volta de 1946. Na década de 1970 e começo da década de 1980 o estado da Paraíba ocupava o primeiro lugar em produção de urucum, com cerca de 1142 t/ano de grãos (FIBGE (1980) Apud Batista, 1988, p.9). Hoje ocupa o terceiro lugar com uma produção de 1196 t/ano (IBGE, 1993), isto mostra que houve uma retração na produção em virtude de fraudes praticadas por comerciantes, que resultou na queda dos preços, e os produtores ficaram desestimulados.

O cultivo do urucuzeiro no estado de São Paulo ganhou importância no início da década de 1980; antes essa cultura apresentava caráter incipiente. O interesse se deve aos altos preços alcançados nesta década por suas sementes, somados à perspectiva de substituição dos corantes artificiais pelos corantes naturais nos países do primeiro mundo e fomentados pela imprensa como cultura remuneradora e de baixos riscos na sua condução (Bovi, 1991, p.95).

2.1.2 Corantes Naturais Versus Artificiais

Segundo Carvalho (1989, p.69), a substituição de corantes artificiais por corantes naturais provocou um aumento no interesse pela produção e industrialização de urucum. A discussão sobre corantes naturais versus artificiais ainda pode prolongar-se do ponto de vista de saúde pública e da legislação correspondente, pois a avaliação técnica dos

corantes não distingue entre corantes naturais e artificiais. Na verdade a preocupação é com o efeito toxicológico que o uso possa causar ao ser humano.

O mercado vem demonstrando, no entanto, uma visível e crescente preferência psicológica por produtos naturais, como está sendo observado nos Estados Unidos, Comunidade Europeia, Japão e outros países. Essa tendência poderá, vir, de algum modo, a influenciar as legislações desses países, com relação ao uso de corantes artificiais em alimentos.

Em 28 de janeiro de 1987, foi assinada a portaria Nº 02 do DINAL, e publicada no diário oficial, proibindo o uso de cinco corantes artificiais em alimentos para consumo humano, no Brasil, sendo os seguintes: amarelo ácido, azul de endantreno, vermelho sólido E, escarlata G.N. e laranja G.G.N.; esta proibição representa mais de 1/3 dos sintéticos até então permitidos. Corantes artificiais amarelo ácido, azul de alizarina e outros são proibidos na Europa e Estados Unidos para consumo humano por possuírem ação cancerígena (Lorena, 1989. p.20).

2.1.3 Razões para o Uso de Corantes em Alimentos

Os corantes extraídos do urucum vêm sendo usados tradicionalmente na produção de colorífico - colorau (usado como corante doméstico) e na coloração externa de embutidos. Esses setores respondem, certamente, 80% do consumo de sementes (Zimber, 1991, p.265).

As razões para o uso de corantes em alimentos podem ser resumidas nas seguintes:

- a) obter um produto de coloração uniforme;
- b) repor no alimento sua cor original, no caso desta ter-se esmaecido ou desaparecido durante o processamento;
- c) assegurar que o alimento tenha a cor esperada pelo consumidor, com aspecto natural, após o processamento.
- d) colorir produtos incolores.
- g) fornecer mais poder tintorial ao produto que vai ser dissolvido (massa de tomates, extratos e outros).

2.1.4 Usos do Corante Urucum

O urucum é a mais importante fonte de corante natural empregado na indústria de alimentos, correspondendo a aproximadamente 90% do total do consumo de corantes naturais no Brasil, e aproximadamente 70% dos corantes naturais mundialmente empregados em alimentos .

O urucum já era utilizado pelos indígenas para tingir seus artefatos de caça, pesca, vestimenta e o próprio corpo. Esta última utilização não só tinha a função de adorno, como meio eficaz de proteção contra o sol e o calor tropical. Existe ainda relatos sobre o uso do extrato da semente de urucum como inseticida repelente, condimento e corante doméstico, produto medicinal e como suprimento de ração de galinhas poedeiras com a finalidade de melhorar a cor da gema do ovo (Carvalho, 1989, p.75).

Dos produtos que utilizam corantes provenientes da semente do urucum, destacam-se: indústria de laticínios, para fabricação de queijos, cremes, manteigas e margarinas; em panificação, seu uso se dá em massa de macarrão, pães, biscoitos e bolos;

produção de bebidas em refrigerantes, vinhos, licores e cervejas; na indústria textil na coloração de produtos de algodão e seda; na indústria de cosméticos, como óleo para cabelos, shampoos e bronzeadores. Além de ser usada para produção de salsichas, ceras para assoalhos e graxas para sapatos. Serve também como ração para aves poedeiras, já que seus resíduos contém valores protéicos (Falezi 1987 Apud Silva, 1991, p.7).

2.1.4.1 Urucum como Corante para Alimentos

No Brasil, o maior uso das sementes de urucum (mais de 50% das sementes comercializadas) destina-se à fabricação de um condimento doméstico conhecido como “colorífico” ou “colorau” (Carvalho, 1989, p.73).

O uso do urucum em alimentos foi introduzido no Brasil em receitas culinárias pelos espanhóis e portugueses que utilizam o urucum em pratos típicos como cozidos e ” paellas” (Araújo, 1991, p.227).

Nas regiões Norte e Nordeste do Brasil, o colorau ou colorífico é utilizado em todos os pratos como carnes (brancas ou vermelhas), arroz, peixes, macarronadas, sopas, farofas etc. O nordestino tem preferência por pratos com uma cor acentuada, que agrade aos “olhos” e ao paladar. A Figura 01 mostra como o colorau ocupa uma posição de destaque quando comparado às outras especiarias.

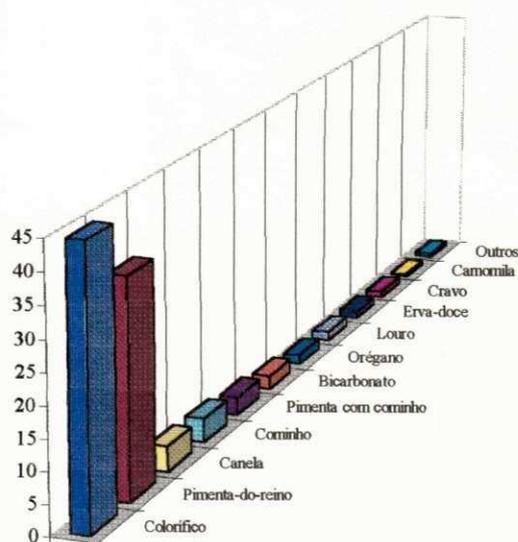


FIGURA 01 - A posição do colorífico com relação a outras especiarias

Fonte: Instituto de Pesquisa A.C. Nielsen Apud Araújo (1991, p. 232).

O consumo de colorífico é mais popular na região Nordeste do país ou em áreas onde a concentração da população nordestina é bastante acentuada, como mostra a Tabela 01.

TABELA 01 - Áreas de maior consumo de colorífico no País.

Área	Consumo kg	Participação do colorífico nas especiarias (%)
Ceará até Alagoas	538.000	87
Sergipe até Bahia	127.000	59
Grande Rio	35.700	43
Rio Grande do Sul	30.000	32
Minas Gerais	56.200	26
Grande São Paulo	48.800	26
Brasília, M.G.do Sul, Goiás	23.600	24
Paraná , Santa Catarina	77.000	23
Espírito Santo e interior do RJ.	23.500	18
Interior de São Paulo	49.300	17

Fonte: Araújo (1991, p.232).

2.1.4.2 Urucum na Indústria de Carnes

O sucesso de um produto depende, em grande parte, de sua coloração. A cor e o aroma “desencadeiam” no homem uma série de associações de idéias, que estimulam o apetite. A expressão “comer com os olhos” é válida, pois, inconscientemente, preferimos produtos de aspecto sadio e coloração uniforme (Cancelli, 1991, p.235).

O corante de urucum utilizado na indústria de carnes, obtém-se das sementes do urucuzeiro, principalmente sob a forma de extrato alcalino hidrossolúvel, por método tecnológico adequados. O urucum é aplicado em embutidos defumados (linguiças e paios) e cozidos (mortadelas, salsichas e salsichões). O maior consumo de urucum, na indústria de carnes, está relacionado com a coloração das salsichas (Cancelli, 1991, p. 237).

2.1.4.3 Urucum na Fabricação de Queijos

Conforme Lourenço Neto (1991, p. 251), quando se trata de queijos, a quantidade de caróteno presente na matéria-prima leite pode variar muito em função da alimentação, diferentes estações do ano e da raça do animal. Estas variações dificultam a obtenção de uma coloração-padrão entre as diversas fabricações, tornando necessário a adição de corantes na elaboração do produto.

A bixina ou corante de urucum é um carotenóide vegetal, cujo pigmento pode ser adicionado legalmente ao leite destinado à fabricação de queijos. O uso de corantes em queijos remota há mais de 100 anos. De modo geral, a sua adição na fabricação de queijos tem como finalidade tornar o produto mais atraente ao paladar do consumidor. Porém em casos específicos, o corante é imprescindível para a produção de determinados

tipos de queijos, a partir de leites que não contém caróteno, como de cabra, de ovelha e de búfala (Lourenço Neto, 1991, p.251).

A maior aplicação do urucum na Europa é em queijos tipo Cheddar, produzido com leite de cabra (Didriksen, 1991, p.209).

2.1.4.4 Urucum nas Massas Alimentícias

Segundo Cisneros (1991, p.245), nos países tradicionais de consumo de massas, a farinha de trigo utilizada na sua fabricação é a semolina do trigo *Amber durum*. Esta variedade é rica em carotenóides naturais, que dão uma coloração amarela ao trigo e, conseqüentemente, ao macarrão, dispensando o uso de corantes.

No Brasil, o trigo “durum” não é produzido, assim para que o produto final atinja a tonalidade do macarrão tradicional característico, é necessário a adição de algum tipo de corante. O uso de corantes em massas alimentícias, só é permitido nas massas que não contém ovo na sua composição. Os corantes de urucum têm correspondido plenamente às necessidades das indústrias de massa (Cisneros, 1991, p. 245).

2.2 Aparelho de Cisalhamento de Jenike

Segundo Roberts; Ooms (1987, p.2.1) 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 armazenados, o qual chamou de "Jenike Shear Cell", mostrado na Figura 02.

O aparelho de cisalhamento de Jenike (Figura 02) 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 03mm/minuto; uma célula de carga para medir a força de cisalhamento e um registrador para indicação desta força.

Para determinação do efeito do tempo na consolidação de produtos armazenados, é utilizada uma bancada de consolidação em conjunto com o aparelho de cisalhamento são transferidas para permanecerem no tempo pré-determinado, sob ação de uma força vertical estática, por meio do pendural de pesos com cargas. Durante a consolidação, as células são colocadas dentro de coberturas impermeáveis para preservar a umidade contida na amostra.

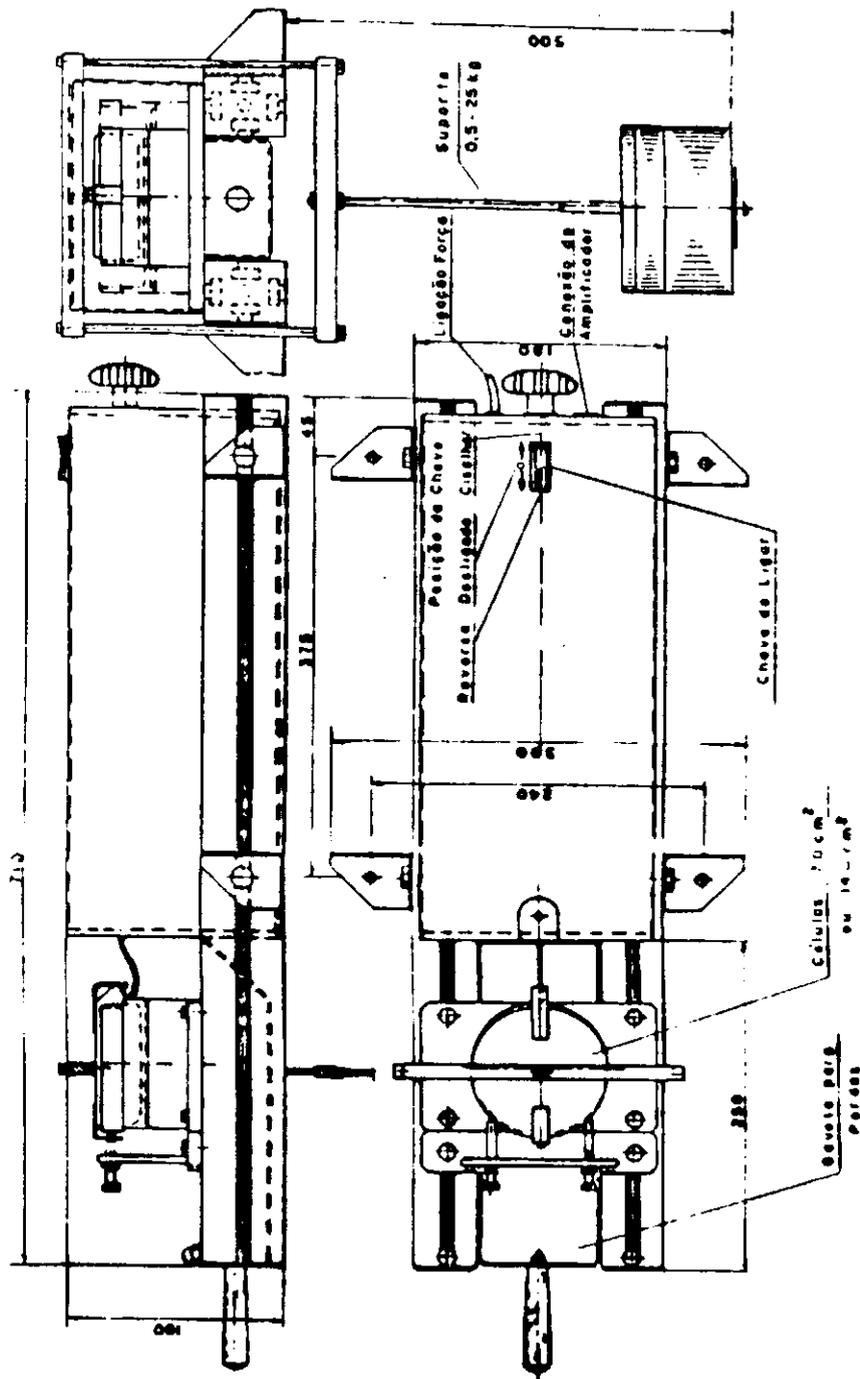


FIGURA 02 - Aparelho de cisalhamento de Jenike

2.2.1 Princípio do Ensaio de Cisalhamento Instantâneo

A célula de cisalhamento de Jenike, mostrada na Figura 02, consiste de: base (1); anel de cisalhamento (2); tampa de cisalhamento (3); suporte (4) e pino de carga (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 pendurla de pesos (6) com cargas (7).

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 04, através de uma pressão suave do anel com os dedos contra o parafuso fixo (10), mostrado na Figura 06. O anel molde (11) é colocado sobre o anel de cisalhamento, a célula teste é enchida com o produto e o excesso é raspado e nivelado com o topo do anel molde. A tampa de operação de rotações (12) é colocada sobre a superfície do produto e uma força vertical (F_v) é aplicada por meio de um pendural de pesos (6) de 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 de medida (8), acionada mecanicamente, a qual transmite a força em uma velocidade 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, mostrado na Figura 04, para a posição off-set final apresentada na Figura 05. 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, p. 59).

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 03.

Se o produto sob o teste, o grau de consolidação é insuficiente (Figura 03 - 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 (curva 1 Figura 03). Portanto, a amostra será sobreconsolidada e a densidade do produto na zona de cisalhamento diminui um pouco depois de passar completamente pelo máximo.

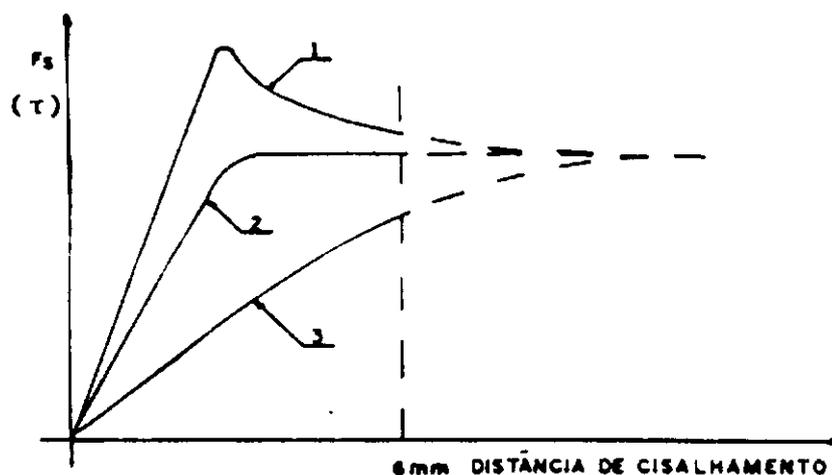


FIGURA 03 - Curvas de força-tensão de amostras sobreconsolidadas (1), consolidada criticamente (2) e subconsolidadas (3)

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.

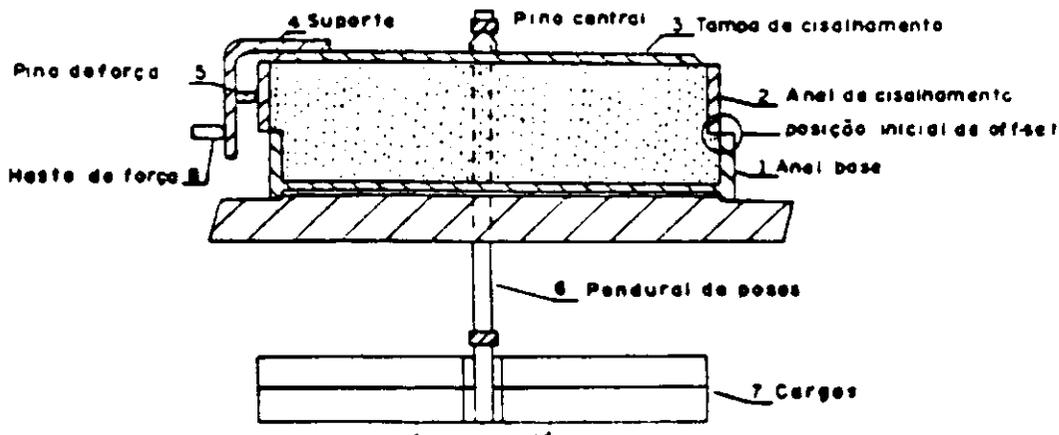


FIGURA 04 - Célula de Jenike na posição inicial off-set

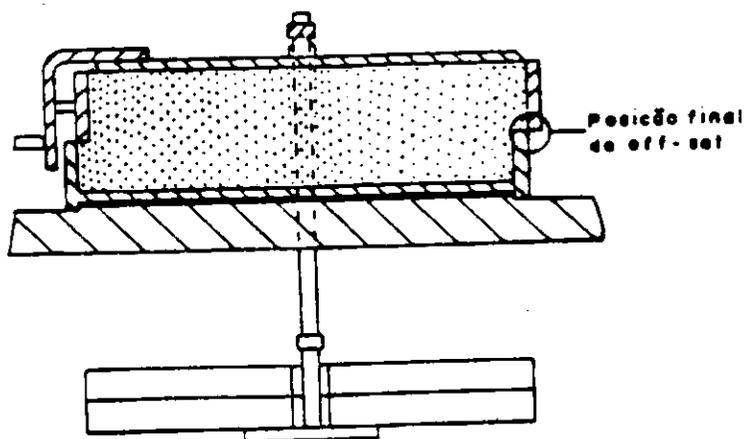


FIGURA 05 - Célula de Jenike na posição final off-set

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 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-Shear.

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 deverão ser reduzidos. 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_i e a força de cisalhamento (tensão de

cisalhamento) registrada indiquem a presença da consolidação crítica da amostra. Esta operação é chamada de otimização.

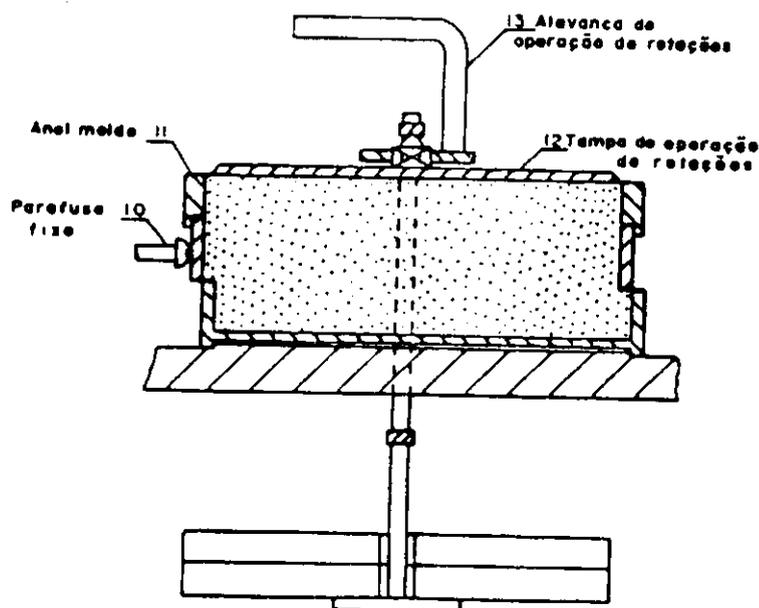


FIGURA 06 - Célula de cisalhamento com anel molde e tampa de consolidação

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 das 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-shear são designadas por σ_p e τ_p (ponto de pré-shear, P) e as tensões de deslizamento por σ_s e τ_s (ponto de cisalhamento, S). Os resultados dos testes de cisalhamento estão no diagrama σ versus τ , mostrado na Figura 08.

Quando planeja-se o teste de cisalhamento, é necessário selecionar os níveis de cargas de pré-shear e de cargas normal de cisalhamento, aos quais os testes são realizados. Estes são referidos como níveis de tensões, normais de pré-shear e normais de cisalhamento (Figura 07), como mostra a Tabela 04 (item 3.4.4.2).

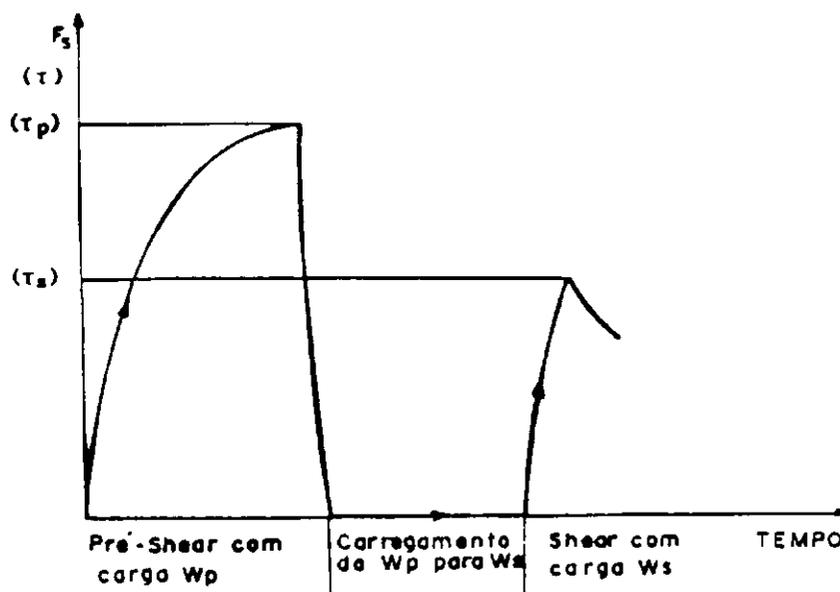


FIGURA 07 - Curvas Tensão, Pré-Shear e Shear

2.2.2 Princípio do Ensaio de Cisalhamento com Tempo de Consolidação

Quando um produto é solicitado a uma carga normal ou a um esforço de compressão por algum tempo, ele pode ganhar resistência. Este ganho na resistência pode ser medido na célula de cisalhamento de Jenike e é chamado de tempo de consolidação.

O conhecimento do tempo de consolidação é obtido através do estudo dos experimentos a seguir. Uma amostra consolidada criticamente é preparada e pré-cisalhada com uma carga W_p . Depois de atingir o fluxo de estado estável, o avanço da haste de medida de força é parado sem ela ser recolhida. A zona de cisalhamento formada desta maneira permanece sob as tensões normal e de cisalhamento correspondente a um fluxo de estado estável, é aproveitada por um tempo definido. Depois da haste ser retraída, a força de cisalhamento cairá a zero e o atual teste de cisalhamento poderá ser realizado normalmente. É constatado que produtos que ganham resistência com o tempo de consolidação, adquirem uma maior resistência de cisalhamento. No diagrama σ versus τ , o lugar geométrico do tempo ficará acima do lugar geométrico instantâneo (Milani, 1993, p. 69).

Se o teste de efeito do tempo de consolidação for realizado na célula de cisalhamento de Jenike como descrito acima, um teste poderá monopolizar a célula por um longo período de tempo. Também, um deslocamento da amostra poderá causar uma diminuição da força de cisalhamento, aplicada durante o período de repouso.

Testes com tempo de consolidação são feitos com a ajuda de uma bancada de consolidação, constituída de seis células, das quais podem ser independentemente

carregadas. Os testes são realizados em etapas. Usando o aparelho de cisalhamento, as amostras são preparadas e pré-cisalhadas com cargas W_p , no modo normal, e a haste de força é retraída depois do pré-shear. A seguir, as células de cisalhamento (anel e tampa de cisalhamento, base e produto) são transferidas para uma bancada de consolidação, como mostra a Figura 17. Na condição de prevenir a variação do teor de umidade com o tempo, uma cobertura impermeável é colocada sobre cada célula, que são em seguida carregadas com a colocação de uma carga W_t , diretamente sobre a tampa ou via pendural carregado. Depois de transcorrido o intervalo de tempo, a célula é transferida para o aparelho de cisalhamento; uma carga W_s é selecionada e o teste de cisalhamento é realizado normalmente.

A carga W_t deve ser selecionada de tal forma que o estado de tensões na amostra durante o tempo de consolidação seja o mesmo do pré-shear. Durante o pré-shear atuam as tensões normal e de cisalhamento nas amostras. Contudo, na bancada de consolidação, somente a tensão normal pode ser aplicada. O estado de tensões desenvolvido pela aplicação somente da tensão normal, pode ao seu término aproximar do desenvolvimento de um fluxo de estado estável. Durante o teste com tempo de consolidação, o cisalhamento, normalmente, é realizado dentro de 3 ou mais níveis de tensões normais, diferentes da tensão de pré-shear. Os pontos de deslizamentos para um dado nível de tensão de pré-shear, são ligados por uma linha reta chamada de lugar geométrico de tempo TYL, que fica acima do lugar geométrico instantâneo (Milani, 1993, p.72). Como mostra a Figura 08.

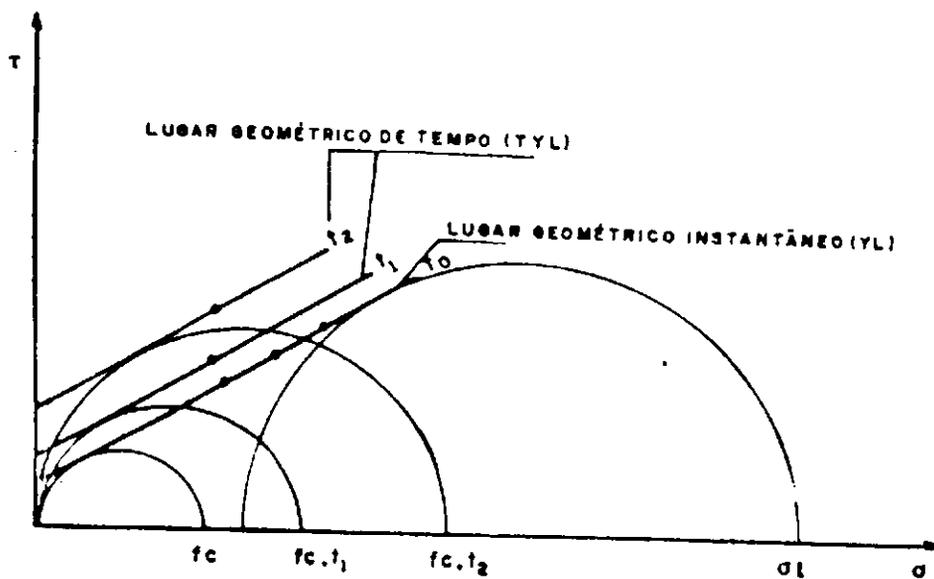


FIGURA 08 - Lugares geométricos de tempo e instantâneo

2.2.3 Princípio do Ensaio de Cisalhamento Instantâneo com a Parede

Quando mede-se 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 $\phi_w = \text{arc tan} (\tau_w/\sigma_w)$. O lugar geométrico da parede é uma linha reta ligando os pares dos valores medidos σ_w , τ_w . Como mostra a Figura 09.

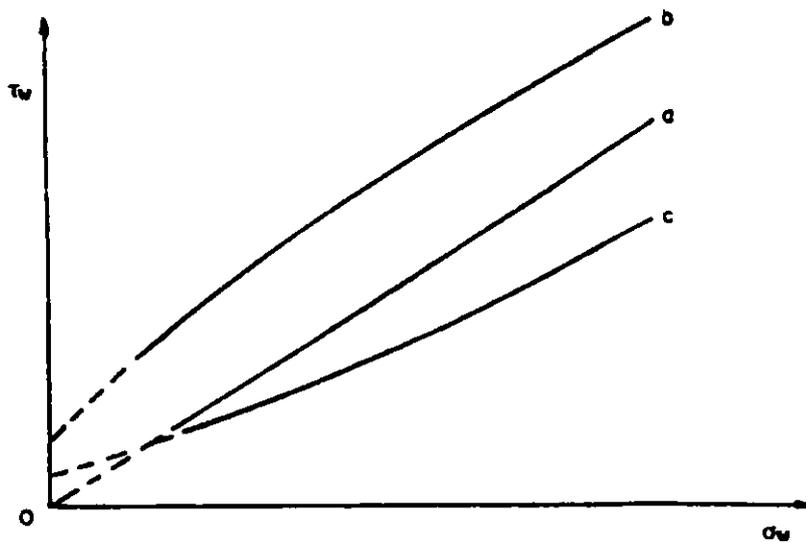


FIGURA 09 - Possíveis formas dos lugares geométricos da parede

2.3 Propriedades Físicas 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 Jr., 1984, p.102). A determinação das propriedades físicas 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 devem ser realizados visando o aumento de dados disponíveis aos engenheiros projetistas. A norma DIN 1055 (1987) fornece algumas propriedades de produtos armazenáveis, apresentado na Tabela 02.

TABELA 02- Propriedades dos produtos armazenados segundo a DIN 1055 (1987)

Produto	Densidade kN/m ³	Atrito interno (°)	Coeficiente de atrito com a parede		
			canaletas	rugosa	lisa
cimento	16	27	0,50	0,45	0,40
farinha	7	42	0,50	0,35	0,25
milho	8	30	0,60	0,40	0,25
trigo	9	30	0,60	0,40	0,25
cevada	8	27	0,50	0,35	0,25
açúcar	9	30	0,55	0,50	0,45
clinker	18	36	0,60	0,55	0,45
cal	6	25	0,50	0,40	0,35
areia	16	36	0,60	0,50	0,40
fosfato	22	27	0,55	0,50	0,40
carvão	10	30	0,60	0,50	0,45
soja	8	25	0,50	0,40	0,25
calcário	13	27	0,55	0,50	0,40
beterraba	7	30	0,55	0,45	0,35
batatas	8	30	0,50	0,40	0,35
carvão em pó	8	25	0,55	0,50	0,40

2.3.1 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 Jr., 1984, p.105).

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 adversos teores de umidade e condições atmosféricas adquirindo resistência e deixando de ser de fluxo livre (Nascimento, 1996, p.32).

Calil Jr. (1984, p.106) diz que a classificação dos produtos armazenados é feita em função das dimensões do diâmetro (D) de suas partículas e classifica como segue:

$D > 1$ mm granulares;

$0,297 \leq D < 1$ mm pulverulentos e/ou pulverulentos coesivos;

$0,079 \leq D < 0,297$ mm pulverulentos coesivos finos;

$D < 0,079$ mm pulverulentos coesivos extrafinos.

2.3.2 Teor de Umidade

O fluxo de um sólido decresce conforme seu teor de umidade cresce, 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 Jr., 1990, p. 2.14).

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 Jr., 1990, p.2.14).

2.3.3 Densidade em Função da Consolidação

Segundo Calil Jr. (1984, p.104) a densidade do produto não pode ser usada como um fator de fluxo. Não há relação direta linear 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, p.49) 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 tem a vantagem de fluir com menor resistência a 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 Jr., 1984, 104).

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 Jr., 1990, p.2.13).

2.3.4 Ângulo de Repouso

Quando um produto não é consolidado (não compactado) e é depositado sobre uma superfície horizontal, de modo a formar uma pilha, e a velocidade de carregamento é desprezada. As partículas do produto desliza sobre a pilha e forma uma inclinação com o plano horizontal, chamada ângulo de repouso. Os valores do ângulo de repouso variam de 30° a 40° e não é uma determinação da fluabilidade do produto. Este é usado somente para definir o contorno da pilha, é muito popular entre os engenheiros e pesquisadores devido a facilidade com o qual é determinado (Jenike, 1964, p.6). Como mostra a Figura 10.

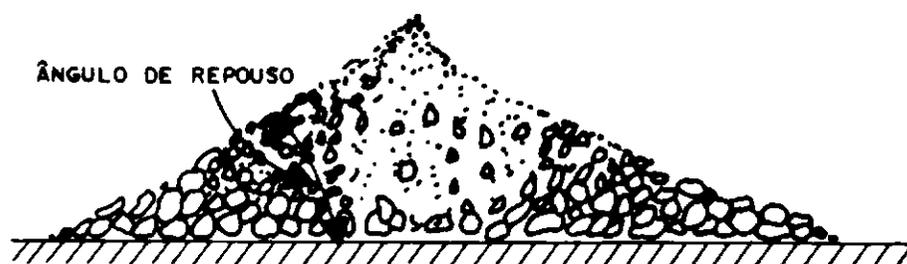


FIGURA 10 - Ângulo de repouso

2.3.5 Ângulo de Atrito Interno (ϕ_i)

Este é o ângulo em que o YL forma com a horizontal. Para um YL convexo para cima ele diminui com o aumento da tensão de compressão. Um método prático para determinar esse ângulo é encontrado na referência Jenike citado por Nascimento (1996, p.34).

2.3.6 Efetivo Ângulo de Atrito Interno (ϕ_e)

Este é o ângulo com a horizontal de uma linha entre a origem e a tangente ao YL no semicírculo de Mohr da maior tensão de consolidação. A variação desse parâmetro deve ser considerada, determinando-se o valor superior (ϕ_{eu}), o valor inferior (ϕ_{ei}) e, usando estes valores como indicados nas equações de fluxo e pressão. Desde que as tangentes às curvas do YL ao círculo de Mohr, tendem 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 YL (Nascimento, 1996, p.34). Quando somente um valor (médio) do efetivo ângulo de atrito interno é disponível, os valores do limite superior e inferior são determinados por adicionar e subtrair 5° , respectivamente (Calil Jr., 1984, p.2.12).

2.3.6.1 Determinação do Ângulo de Atrito Interno e do Efetivo Ângulo de Atrito

Interno

De acordo com Milani (1993, p.105) 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 11) ao lugar geométrico instantâneo. O ponto máximo de intersecção do círculo de Mohr com o eixo σ determina a resistência inconfined σ_c do produto;

b) o segundo é desenhado passando através do ponto P (pré-shear) e tangente ao lugar geométrico instantâneo (no ponto B - Figura 11), 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 11, (Milani, 1993, p.106).

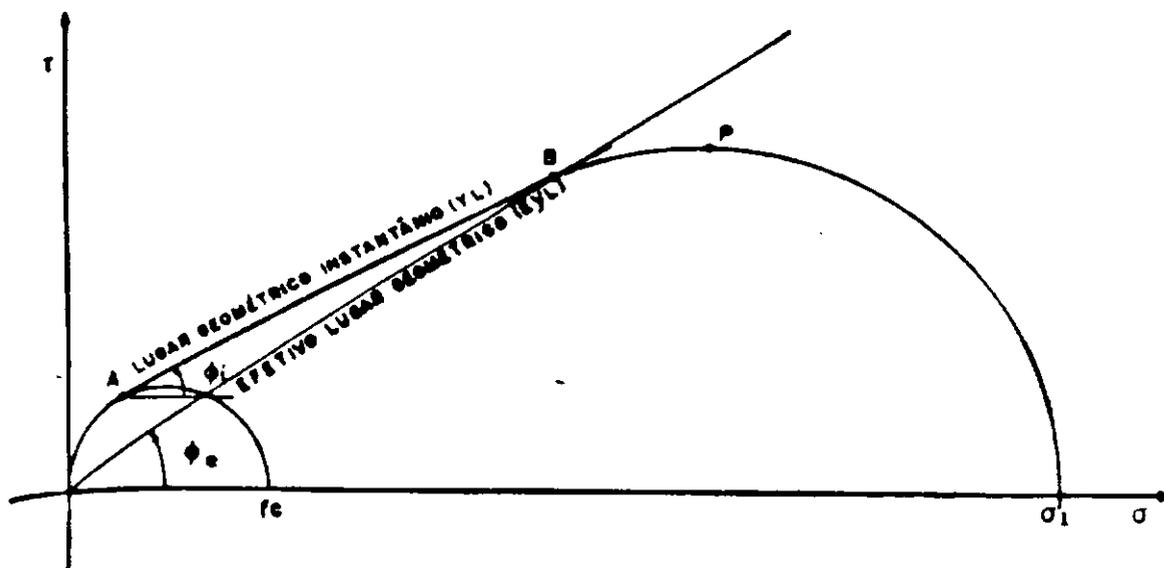


FIGURA 11 - Lugar geométrico (YL e EYL) e ângulos de atrito interno (ϕ_i e ϕ_e)

2.3.7 Função Fluxo (FF)

A capacidade de um produto fluir, depende da resistência desenvolvida pelo produto devido a consolidação e se, como resultado desta resistência, o produto é capaz de formar arco estável ou conduto (Arnold; McLean; Roberts, 1987, p.17).

Refere-se a isto, como função fluxo instantâneo do produto ou simplesmente função fluxo. Uma curva semelhante tem sido obtida em função do tempo yield loci. Observa-se claramente, o aumento de resistência do produto consolidado em função do tempo. É interessante observar que um produto fluindo perfeitamente livre, tal como areia seca, a pressão de não confinamento é zero; então, a função fluxo será uma reta horizontal, paralela ao eixo σ_1 (maior força de consolidação) e coincide com o referido eixo.

Em geral a função fluxo de um produto não depende somente da pressão de consolidação, mas também de alguns fatores como: tempo de armazenamento, teor de umidade e temperatura.

A determinação da função fluxo é feita plotando-se os pontos da tensão máxima de consolidação (σ_1), versus resistência inconfina (σ_c) de deslizamento, tensões determinadas através dos lugares geométricos instantâneo de deslizamento.

Classificação segundo Jenike para fluxo de produtos (Jenike, 1987, p.56):

FF < 2 : muito coesivo e não-fluxo

2 < FF < 4 : coesivo

4 < FF < 10 : fluxo fácil

10 < FF : fluxo livre

2.3.8 Fator Fluxo (ff)

O fator fluxo é usado para indicar a fluabilidade do canal. Quanto maior a tensão máxima de consolidação σ_m em um canal, menor a tensão máxima principal σ_1 atuando na obstrução; menor será a fluabilidade no canal, ou seja, quanto menor o valor do fator fluxo melhor é a fluabilidade do canal.

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).

O fator fluxo da tremonha (ff) é uma função da forma da tremonha e das propriedades do produto armazenado e, pode ser determinado com boa aproximação pela seguinte equação BMHB apud Nascimento (1996, p.36).

$$ff = \frac{Y(1 + \sin\phi_m)}{2(X-1)F(\alpha)\cos(\alpha)}$$

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

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

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

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

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

onde:

$m = 0$ para silo retangular com $L \geq 3d$

$m = 1$ para silo eixo simétrico

Para silo retangular com $L \leq 3d$, o valor de "m" será encontrado por interpolação entre 0 e 1.

Segundo Arnold; McLean; Roberts (1987, p.3.9) a Função Fluxo (FF) e fator fluxo da tremonha (ff), como é mostrado na Figura 12, apresenta o critério Fluxo - Não Fluxo.

Para ocorrer fluxo por gravidade: $\sigma_1/\sigma_c > ff$

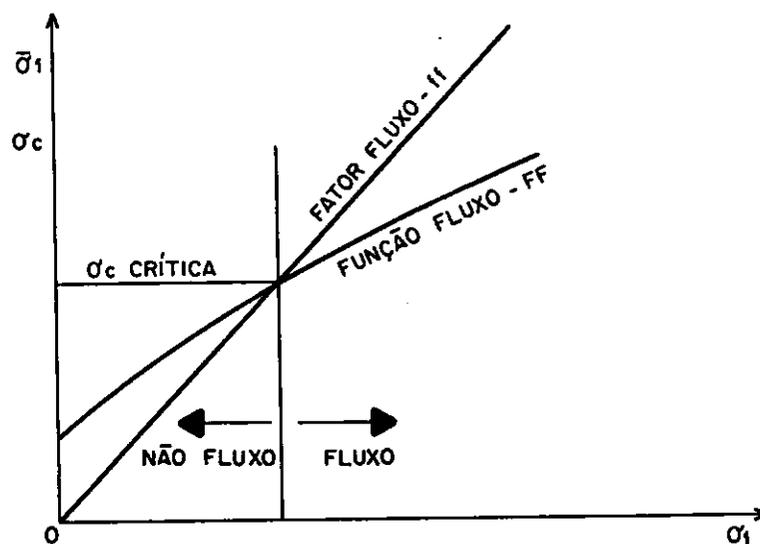


FIGURA 12 - Função Fluxo (FF) e fator fluxo da tremonha (ff)

2.3.9 Propriedade Escorrega-Para (slip-stick)

Segundo Calil Jr. (1990, p. 2.16), alguns pós finos apresentam propriedades de escorrega-para, isto é, brusco movimento para-inicia, que aparece durante consolidações ou em testes. O comportamento slip-stick aparece também em partículas de dimensões relativamente uniformes em espécies rugosas. Nestes casos, a força cisalhante não se estabiliza após ruptura, mas oscila, como mostra a Figura 13. Quando testando estes produtos, a força cisalhante deverá ser aplicada bem devagar pelo valor de pico e, então, a haste será retraída cuidadosamente de modo a não perturbar a célula.

O fator fluxo da tremonha deve então ser aumentado por um fator de 1,4 para a caracterização das propriedades. Se slip-stick é encontrado quando em testes de atrito com a parede, então o ângulo da tremonha para o fluxo de massa deverá ser aumentado de 5° (Calil Jr., 1990, p.2.16).

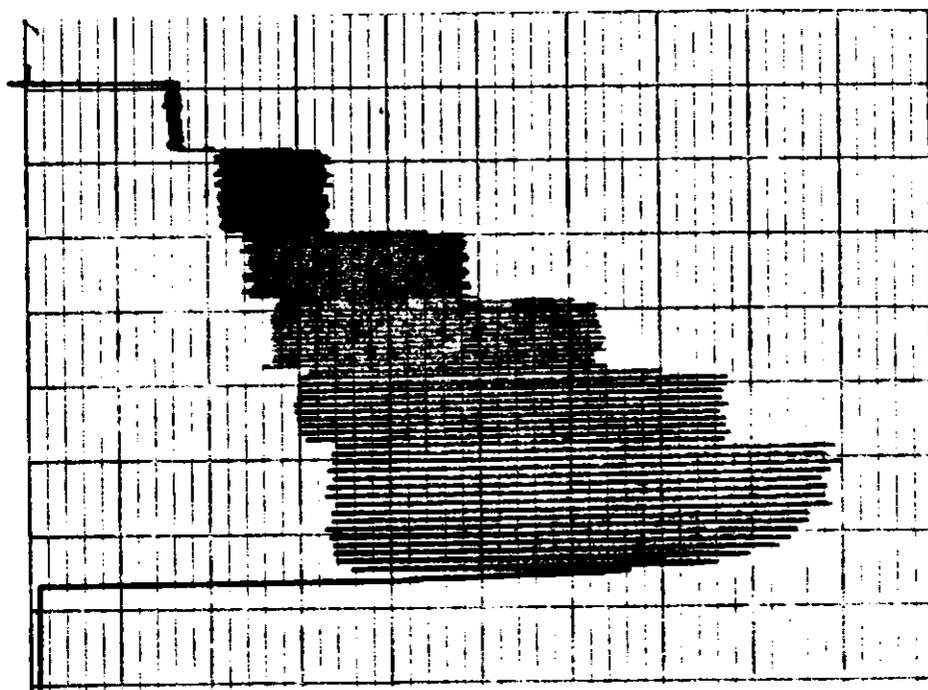


FIGURA 13 - Resultado gráfico obtido do aparelho registrador mostrando o "slip-stick"

2.4 Considerações para Projeto de Silos

2.4.1 Fluxo e Pressões em Silos

2.4.1.1. Fluxo em silos

No projeto de silos para fluxo por gravidade e equipamentos relacionados, uma enorme quantidade de métodos, códigos e fatores devem ser considerados. Em primeiro lugar, é essencial que as propriedades do fluxo de produtos armazenados possam ser determinadas seguramente e alcance as condições de operações esperadas (Milani, 1993, p.12).

A estimativa das pressões nas paredes dos silos tem sido objeto de pesquisa por muitos anos e estudos intensivos nessa área ainda continuam. Apesar de existir uma variedade muito grande de soluções aproximadas para o problema, uma coisa é certa: as pressões exercidas nas paredes dos silos sob condições de operações são diretamente relacionadas com o tipo de fluxo que aparece no silo.

Segundo Calil Jr. (1990, p.3.1), o tipo de fluxo determina as características de descarga do produto armazenado, o tipo de segregação, a formação ou não de produto sem movimento e se o silo pode ser descarregado completamente. Também, determina a distribuição de pressões nas paredes e fundação, e a integridade e custo da construção. A determinação do tipo de fluxo deve ser feita enquanto o silo está sendo projetado ou selecionado, ou quando são previstas mudanças em sua estrutura ou na manipulação dos produtos a serem armazenados.

Como pode ser visto na Figura 14, uma distinção é feita entre o fluxo de massa e o de funil. No fluxo de massa, todo produto armazenado começa a fluir após a abertura da boca de saída. O fluxo de funil, para os três tipos de células apresentadas, têm uma zona em repouso onde o produto armazenado não flui. Baseados nas propriedades de fluxo, podem ser determinados os parâmetros geométricos do silo para se obter o fluxo desejado. A escolha do modelo de fluxo, geometria do silo e as propriedades do fluxo apropriadas permitem o cálculo das taxas de fluxo e das ações sobre as paredes.

Como regra geral, o fluxo de massa deve ser o escolhido se:

- a vazão de descarga é controlada sem indevidas flutuações;
- a segregação das partículas deve ser minimizada;
- o tempo de armazenamento no silo não deve ser indevidamente prolongado (com possibilidades de deterioração do produto armazenado);
- o local disponível seja adequado para instalação de tremonha cujos lados são muito inclinados, ou, quando possível, usar-se equipamentos de descarga nas tremonhas de lados menos inclinados.

O fluxo de funil deve ser escolhido se:

- as vantagens citadas anteriormente para o fluxo de massa não forem de particular importância;
- algumas flutuações na vazão de descarga, alguma segregação e tempo de armazenamento prolongado para o produto armazenado não causarem desvantagens;
- os locais adequados, ou altura forem limitados, ou antieconômicos;

- o espaço for utilizado ao máximo;
- as saídas múltiplas forem necessárias;
- o produto é de fluxo livre, particularmente se também contiver partículas grandes, que possam compactar o produto em tremonhas com lados muito inclinados.

Conforme Nascimento (1996, p.44), o fluxo de massa requer sempre descarga através de uma tremonha. O ângulo de inclinação das paredes da tremonha deve ser determinado pelo gráfico da Figura 15 DIN 1055 (1987). Para fluxo de funil, não é preciso uma tremonha para produto de fluxo livre, embora seja necessária para completa descarga por gravidade. Silos de fundo plano podem ser descarregados por meio de elementos mecânicos de descarga como, por exemplo: roscas sem fim. Se o silo já está construído, ou encontra-se fora do projeto padrão, então ocorre que a inclinação da tremonha e sua superfície, fornecem um tipo de fluxo que não é de massa e nem de funil. Nestes casos para evitar comportamentos instáveis de fluxo, será necessário:

- fazer as paredes da tremonha mais rugosas; ou
- fazê-las mais lisas; ou usar vibração, ou outros métodos que possuam o efeito de reduzir o atrito na parede da tremonha.

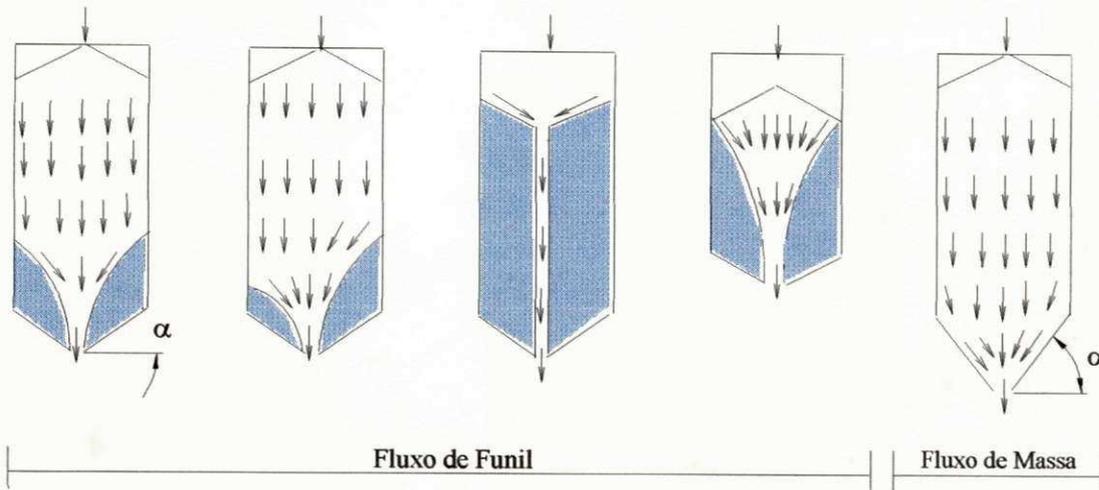


FIGURA 14. Modelos de fluxos (DIN 1055, 1987)

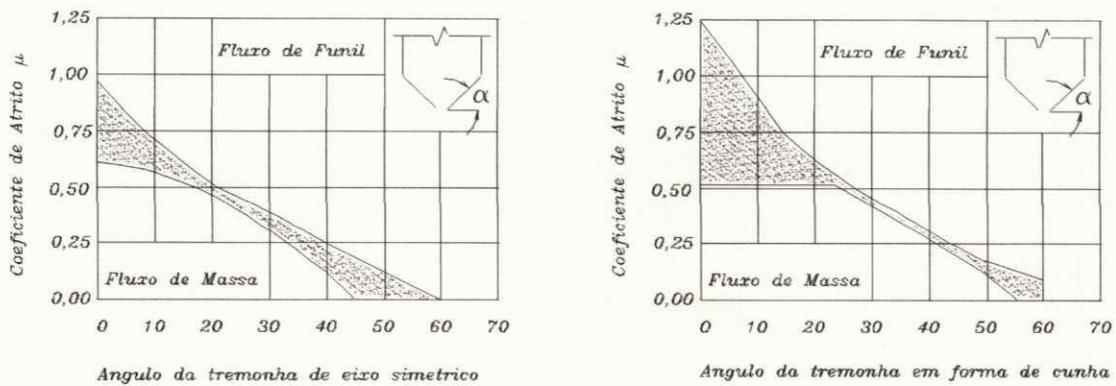


FIGURA 15 - Determinação gráfica do tipo de fluxo (DIN 1055, 1987)

Calil Jr. (1990, p.3.1) relata que o objetivo principal no projeto de silos para armazenamento com fluxo por gravidade, é garantir que o produto armazenado consiga fluir sem obstruções, destacando os dois principais tipos de obstruções de fluxo - arco coesivo e tubo, como mostra a Figura 16.

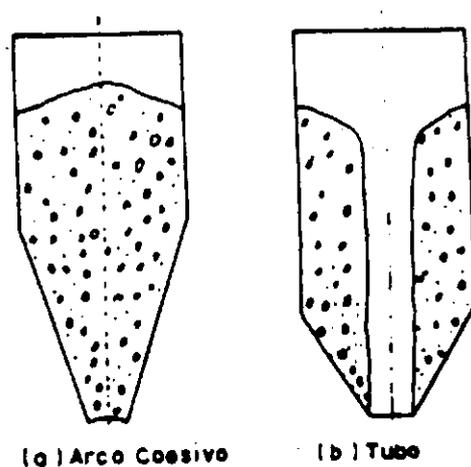


FIGURA 16 - Tipos de obstruções do fluxo

2.4.1.2. Pressões em Silos

Para o cálculo das pressões em silos altos, sugere-se a adoção da norma DIN 1055 (1987) pois é um dos itens de maior responsabilidade, e essa norma foi completamente reformulada de sua antiga versão datada de 1964, em vista de experiências práticas em sua utilização, baseadas em acidentes com silos reais (Nascimento, 1996, p.45).

Os cálculos devem ser feitos para condições de descarga na seção paralela (corpo do silo) e para a condição de carregamento na tremonha (para fluxo de massa, ou fluxo de funil, ou para ambos e, isto pode acontecer, mas se devem evitar os regimes de contorno) e escolher o valor máximo em cada caso.

Segundo Calil Jr. (1990, p.4.5) a norma DIN 1055 (1987) é válida para:

- qualquer material de construção do silo;
- silos verticais;

- dimensões do silo: $H/D > 0,80$ e $P_{ve}/\gamma < 25$ m;
- não é válida para produtos fortemente coesivos e produtos granulares

que incham.

2.4.1.2.1 O Valor de K (relação entre as pressões horizontal e vertical)

O valor de K é definido pela DIN 1055 (1987) pela expressão: $K = 1,2 (1 - \sin \phi_j)$; coeficiente de empuxo de solos multiplicado por 1,2. O fator 1,2 foi escolhido para garantir que em pequenas alturas do produto armazenado, ou seja, na parte superior do silo, resultem curvas de ações mais completas.

A Tabela 03 mostra o emprego dos ângulos e do fator K na determinação das pressões em silos NCSE (1987).

TABELA 03 - Emprego dos limites de atrito interno (ϕ_i), atrito com a parede (ϕ_w) e a relação da pressão horizontal

Aplicação das Propriedades	Ângulo de atrito com a parede (ϕ_w)	Ângulo de atrito interno (ϕ_i)	Relações das pressões horizontal e vertical (K)
pressão horizontal máxima na parede do silo	superior (ϕ_{wu})	inferior (ϕ_{iu})	superior
força máxima por atrito na parede do silo	inferior (ϕ_{wl})	inferior (ϕ_{il})	superior
carga vertical máxima na tremonha	superior (ϕ_{wu})	superior (ϕ_{iu})	inferior
pressão máxima na tremonha	valor superior para tremonha	-	inferior

Fonte: NCSE (1987)

2.4.1.2.2 Pressões de Carregamento

Recomenda-se a determinação dos valores superior e inferior dos ângulos de atrito interno (ϕ_i) e do ângulo de atrito do produto com a parede (ϕ_w) utilizando-se a metodologia adotada por Milani (1993).

Segundo Calil Jr. (1990, p.4.3) na avaliação das cargas nas paredes de qualquer estrutura de armazenamento, as seguintes informações precisam ser conhecidas.

a) Parâmetros do produto armazenado

- efetivo ângulo de atrito interno, ϕ_e ;
- valor nominal do ângulo de atrito com a parede ao longo de todas as seções das paredes do silo, ϕ_w ;

- um valor alto, conservativamente, para a densidade, γ .

Devido a incerteza e variações nas propriedades dos produtos armazenados, os seguintes casos de projetos devem ser examinados:

- (i) $\phi_{wM} = \phi_w \text{ nom} - 5^\circ$
- (ii) $\phi_{wu} = \phi_w \text{ nom} + 5^\circ$
- (iii) $\phi_{eu} = \phi_e \text{ nom} + 10^\circ$
- (iv) $\phi_{el} = \phi_e \text{ nom} - 10^\circ$

b) Parâmetros do silo

- geometria do silo
- altura total do sólido armazenado
- tipo de fluxo (fluxo de massa, fluxo de funil, fluxo expandido).

Após estudos comparativos das principais normas internacionais existentes constatou que, existem muitas diferenças entre elas, e que o único ponto comum é a utilização da equação de Janssen para o cálculo das pressões de carregamento. Para ilustração, é apresentado a seguir, as fórmulas de Janssen, para a fase de carregamento (Nascimento, 1996, p.46):

a) Pressão horizontal:

$$P_{hc} = \frac{\gamma R}{\mu} \left(1 - e^{-\frac{\mu K}{R} z} \right)$$

b) Pressão vertical:

$$P_{vc} = \frac{\gamma R}{\mu K} \left(1 - e^{-\frac{\mu K}{R} z} \right)$$

c) Pressão de atrito por 1,0 m de superfície de parede

$$P_{wc} = \gamma R \left(1 - e^{-\frac{\mu K}{R} z} \right)$$

Nota-se portanto a importância de se determinar as propriedades dos produtos armazenado.

3 MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi realizado no Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeiras (LaMEM), Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

3.1 Produtos Utilizados nos Ensaio

As propriedades físicas em função do teor de umidade e do tempo de consolidação foram determinadas em grãos de urucum e colorau, sendo que, durante o desenvolvimento de todos os ensaios utilizou-se produtos de mesma procedência e qualidade.

3.2 Materias da Parede

Os materiais de parede utilizados nos testes com os grãos do urucum foram aço liso, aço rugoso, plástico, madeira , concreto e alumínio e com a massa do colorau apenas os três primeiros (aço liso, aço rugoso e plástico)

As amostras dos materiais das paredes escolhidas são planas para que sua superfície represente 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 com base no aparelho de cisalhamento de Jenike (Jenike Shear Cell), tanto quanto 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, como é mostrada na Figura 02.

Esta máquina foi desenvolvida pela AVT Anlagen-und Verfahrenstechnik GmbH e adquirida pelo Prof. Dr. Carlito Calil Jr. do Departamento de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos-USP. Consta de três partes principais:

- aparelho de cisalhamento mostrado na Figura 17;
- bancada de consolidação VFB-70 mostrada na Figura 18;
- aparelho registrador das forças de cisalhamento, mostrado na Figura 19.

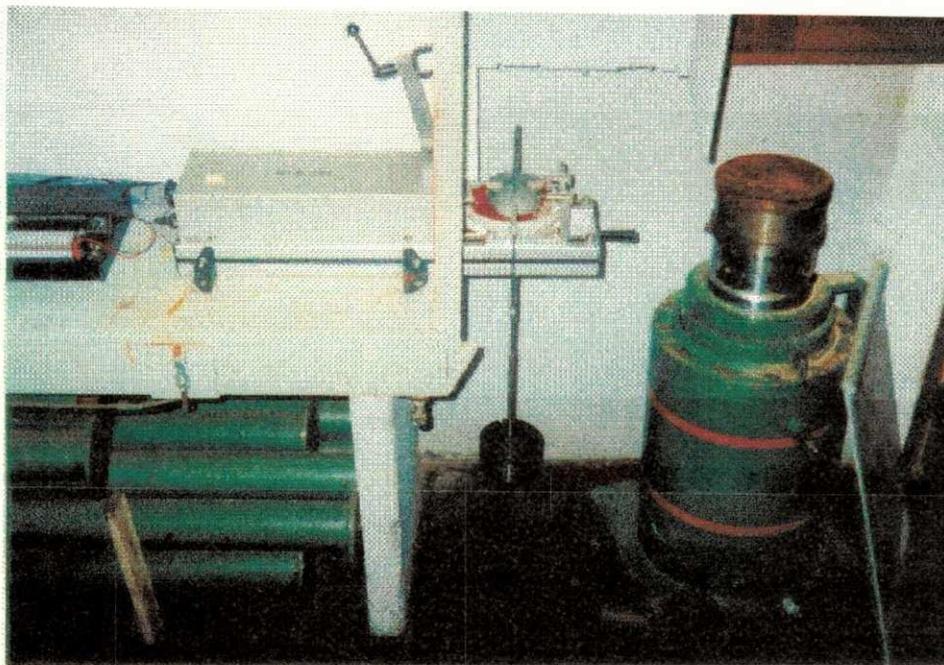


FIGURA 17 - Aparelho de cisalhamento



FIGURA 18- Bancada de consolidação VFB-70

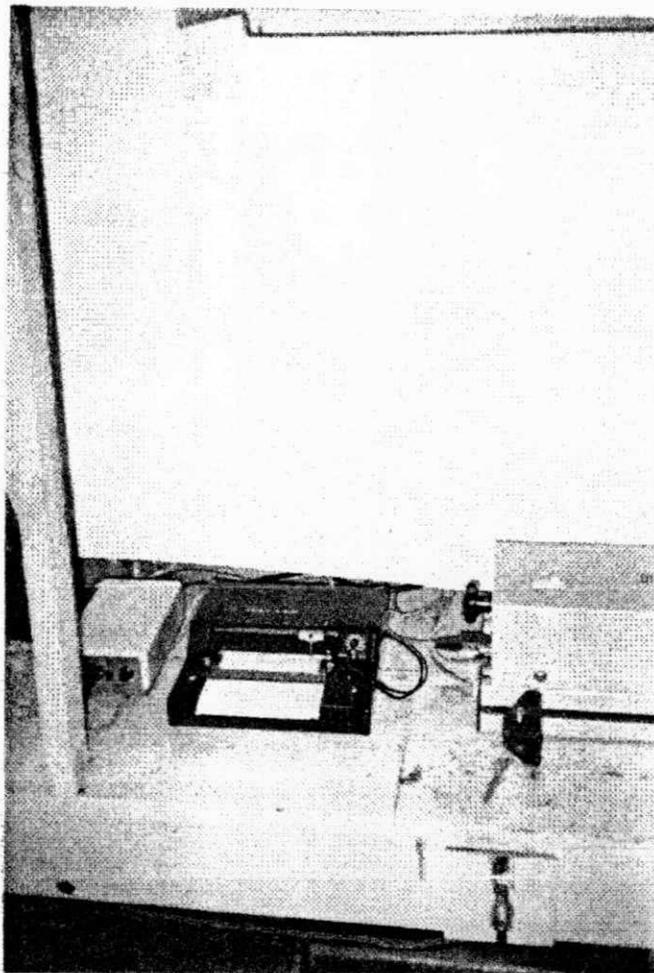


FIGURA 19 - Aparelho registrador das forças de cisalhamento

3.4 Determinação das Propriedades Físicas

3.4.1 Granulometria

A determinação da granulometria foi realizada, utilizando-se o método de peneiramento com amostra previamente pesada e passada num jogo de peneiras, (A.S.T.M - 3/16", 5, 6, 7, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 25, 35, 40, 45, 50) durante 10 minutos com velocidade de 50 cpm. No final, pesou-se a quantidade de produto retido em cada peneira e, determinou-se a granulometria.

3.4.2 Teor de Umidade

O grau de umidade dos produtos estudados foi determinado antes e durante os ensaios, foram coletadas amostras dos produtos ensaiados para determinação de seus teores de umidade. 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 20 gramas 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 (Pu) do produto e levados a estufa, à 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 (Ps). Os teores de umidades foram calculados com uso da seguinte expressão:

$$U = \frac{Pu - Ps}{Ps} \times 100$$

Os resultados médios revelaram 10,5% com variação de $\pm 1,0\%$ e 11% com variação de 0,3% para os grãos e o colorau do urucum, respectivamente.

Para impedir grandes variações nos teores de umidade dos produtos armazenados, o que interferiria nos resultados dos ensaios, realizou-se as determinações das propriedades físicas, evitando dias chuvosos com grande variação da umidade relativa do ar.

3.4.3 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, e subtrair o peso próprio da célula e dividir-lo por seu volume (Nascimento, 1996, p.32).

3.4.4 Metodologia de Ensaio para Determinação do Cisalhamento

A metodologia de ensaio utilizada foi a proposta por Milani (1993, p.76).
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 um software YLOCUS, desenvolvido pelo Prof. Carlito Calil Jr. e pelo Aluno Eduardo J. H. Caliman Sato do Departamento de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos - USP, para obtenção dos ângulos de atrito interno e efetivo ângulo de atrito interno, função fluxo e densidade do produto.

3.4.4.1 Seleção da Célula de Cisalhamento

A célula de cisalhamento utilizada foi a de tamanho I com 70cm² de área de seção transversal e em alumínio.

3.4.4.2 Seleção dos Níveis de Cargas Normais

Os níveis de cargas normais definidos para o teste de cisalhamento mostrados na Tabela 04, foram baseados em resultados obtidos por Milani (1993, p.143).

TABELA 04 - Níveis de cargas utilizados nos ensaios de cisalhamento instantâneo e com tempo de consolidação

IYL#1 pré-shear	IYL#1 shear	IYL#2 pré-shear	IYL#2 shear	IYL#3 pré-shear	IYL#3 shear
10,0	7,0	7,0	5,0	5,0	3,5
10,0	5,0	7,0	3,5	5,0	2,0
10,0	3,5	7,0	2,0	5,0	1,0

3.4.4.3 Preparação da Amostra

3.4.4.3.1 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, com uma espátula 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 ocorresse vazios na região onde o anel e base se sobrepõem. Retirou-se o excesso de produto em pequenas quantidades através da raspagem com uma espátula. A raspagem sobre o anel foi feita com a espátula em movimentos de ziguezague com cuidado para não modificar a posição do anel sobre a base. Esta raspagem é realizada com a espátula na posição inclinada conforme mostrado na Figura 20.

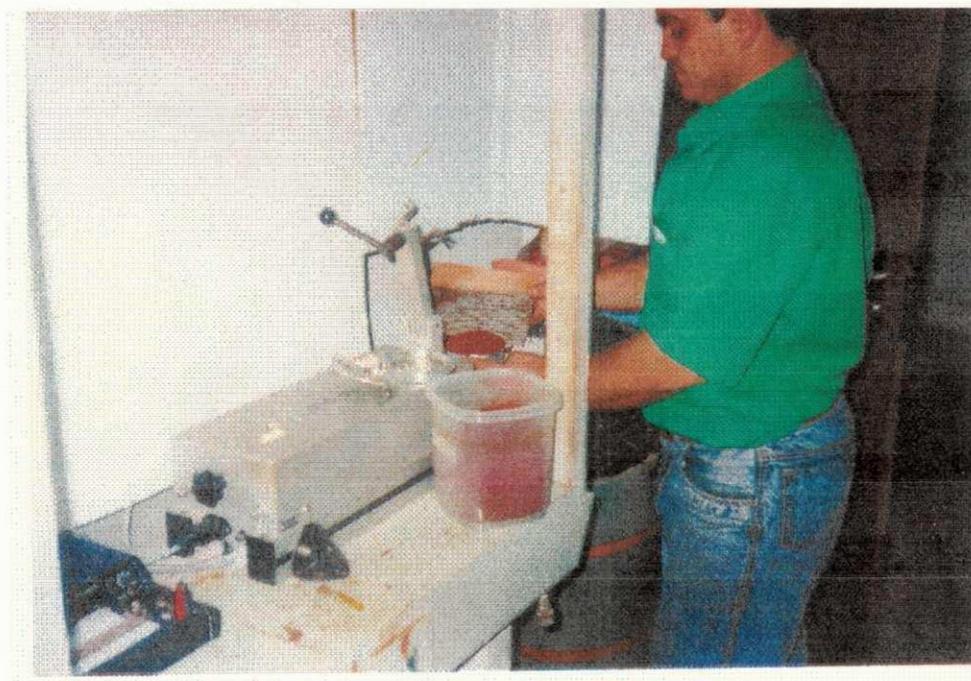


FIGURA 20 - Raspagem do excesso do produto

3.4.4.3.2 Consolidação da Amostra

Para a consolidação da amostra (Figura 21) procedesse da seguinte maneira.

a) coloca-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;

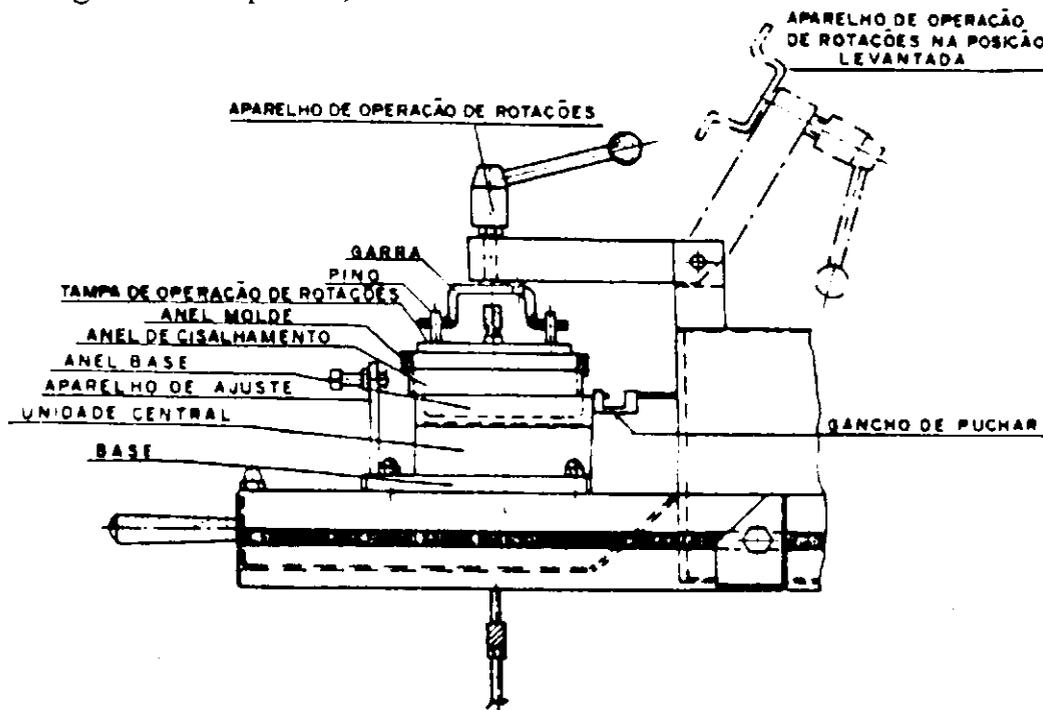


FIGURA 21 - Detalhe da consolidação da amostra (Milani, 1993, p 88)

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 estar compactada, e verificada o adensamento de aproximadamente 2mm ou mais, retira-se o pendural de pesos

- g) depois o pendural de pesos da tampa de twists é cuidadosamente retirado;
- h) cuidadosamente retira-se o anel molde, segurando levemente a tampa de operação de rotações para não afetar a posição original do anel de cisalhamento;
- i) remove-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;
- j) retira-se o excesso de produto em pequenas quantidades, nivelando-se com o topo do anel de cisalhamento, com o mesmo procedimento adotado anteriormente;

3.4.4.4 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, é feita a otimização. A otimização são testes preliminares, feitos com a intenção de verificar o nível de consolidação da amostra e para que ela obtenha a “consolidação crítica”.

3.4.4.5 Número de Rotações

Para os grãos do urucum usou-se 50 rotações (twist), devido este ser de difícil fluabilidade e 25 rotações para o colorau. Este resultado foi obtido a partir de ensaios realizados na fase de otimização em função da "consolidação crítica" do produto (Figura 03).

3.4.4.6 Teste de Cisalhamento

Depois dos testes de otimização onde se obteve a carga normal para a operação de rotações e o número de rotações requeridos para obtenção da "consolidação crítica" da amostra, os testes de cisalhamento foram realizados, em duas etapas: pré-shear (pré-cisalhamento) e shear (cisalhamento). Utilizou-se os níveis de cargas da Tabela 04 (item 3.4.4.2).

3.4.4.6.1 Pré-cisalhamento

Esta fase conduz a amostra a uma deformação plástica, desenvolvendo dentro dela uma zona de cisalhamento até ocorrer um fluxo de estado estável, com um valor da tensão de cisalhamento τ_p . Esta tensão de cisalhamento é mantida na célula, embora a distância de cisalhamento seja relativamente curta (varia em função do produto). Para determinar este valor e depois de transmitir este movimento a haste de medida de força é parada e invertida, até que a mesma perca o contato com o suporte (força de cisalhamento caindo a zero).

A estabilidade dos valores da tensão de cisalhamento τ_p , obtidos em estado estável do pré-shear, são uma indicação da reprodutibilidade de consolidação. Com amostras consolidadas corretamente, os valores individuais das tensões de cisalhamento em estado estável não deverão variar mais do que $\pm 5\%$, à uma dada carga normal de pré-shear (Manual SSTT).

3.4.4.6.2 Cisalhamento (Shear)

Depois do pré-shear, as cargas normais correspondentes ao pré-shear são reduzidas conforme a Tabela 04, e o mesmo é iniciado pela partida do motor propulsor da haste de medida de força com movimento para frente. A tensão de cisalhamento aumenta, passando por um máximo e depois diminuiu. O cisalhamento é 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 do Cisalhamento com Tempo de Consolidação

Os testes de cisalhamento com tempo de consolidação foram realizados após efetuados e analisados os testes instantâneos. Nos testes de tempo, as células de cisalhamento foram transferidas após a operação de pré-shear à uma bancada de consolidação, onde permaneceram durante 12, 48 e 72 horas sob a ação de uma força vertical, aplicada através de um pendural de pesos com cargas, e depois foram retornadas ao aparelho para os testes de cisalhamento. Cuidados especiais foram tomados na transferência das células, mudança e colocação das cargas, para que as condições inicialmente impostas não fossem alteradas. As células na bancada de consolidação ficam em condições herméticas para evitar a variação do teor de umidade do produto.

3.4.5.1 Níveis de Cargas Normais dos Testes de Pré-shear (pré-cisalhamento) e Shear (cisalhamento) com Tempo de Consolidação.

Para a carga pré-shear (W_p) adotou-se um valor médio das cargas de pré-shear utilizados na determinação de três lugares geométricos dos testes instantâneos. A

consolidação da amostra na bancada foi feita com a maior carga de consolidação utilizada nos testes anteriores. Os níveis de cargas de shear (W_s) foram escolhidos em função do pré-shear $W_s \cong 1/3 W_p$.

3.4.5.2 Tempo de Consolidação

Para o teste com o urucum, foram adotados os seguintes intervalos de tempo 0, 12, 48 e 72 horas, estes intervalos foram escolhidos em função das condições impostas nas condições de operações dos silos, nas indústrias.

3.4.6 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 pudessem 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 ergido (manualmente) da amostra de material da parede, para evitar que o anel se arraste com a amostra. Com o início do cisalhamento, as tensões de cisalhamento começam a aumentar e alcançam um estado estável diretamente ou passaram por um máximo antes de estabilizarem-se. 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 atingiu 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, é registrada e novamente a carga foi reduzida. Este procedimento continuou do começo ao fim dos níveis de cargas selecionadas.

No término de cada teste, a amostra de produto foi pesada e novamente preparada para o ensaio seguinte ou nas repetições adotadas para cada um.

Algumas vezes, ocorreu uma rápida oscilação da indicação da força de cisalhamento por causa do comportamento de "Slip-Stick" (escorrega-para), como mostra a Figura 13 (item 2.3.9). Neste caso, usa-se a tensão de cisalhamento máxima registrada durante o ensaio para determinar o ângulo de atrito da parede ϕ_w .

3.4.6.1 Célula de Cisalhamento Utilizada para Determinação do Ângulo de Atrito com a Parede

As células utilizadas na determinação do ângulo de atrito com a parede, obedeceu os mesmos critérios adotados na escolha dos testes de cisalhamento instantâneo, e foram diferenciadas destes testes através da substituição do anel base por uma amostra de material da parede, conforme mostra a Figura 23.

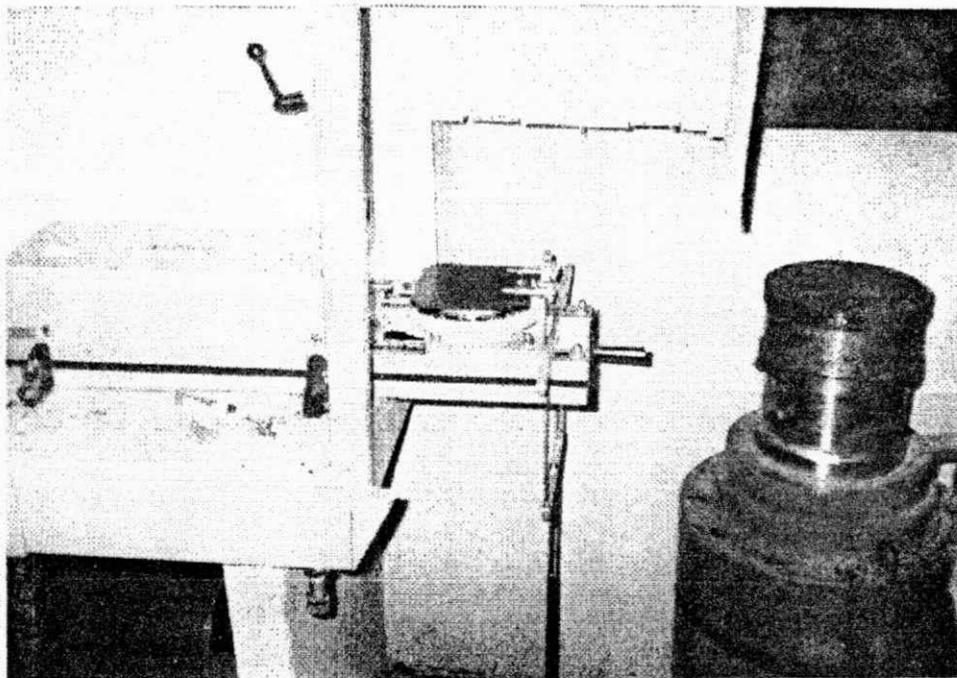


FIGURA 23 - Detalhe da preparação para o ensaio com a parede (aço rugoso)

3.4.6.2 Preparação da Amostra de Material da Parede para o Teste

Antes dos testes, as amostras do material da parede foram lavadas e secadas completamente, e sobre suas superfícies limpas esfregou-se o produto sob teste com as mãos, utilizando-se luvas.

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 permitiu uma passagem máxima do anel sobre a amostra durante o teste.

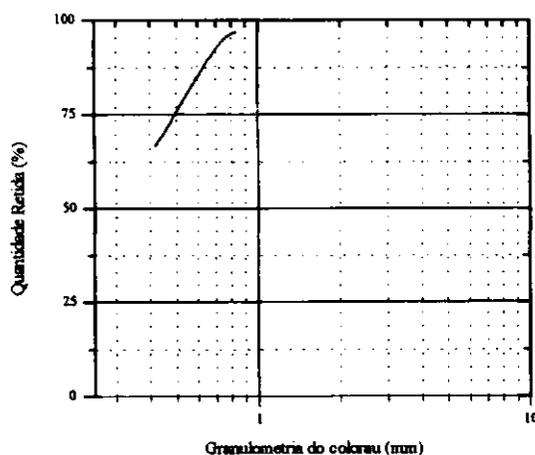
3.4.6.3 Seleção dos Níveis de Cargas Normais para Determinação do Ângulo de Atrito com a Parede

Conforme o manual da máquina de Jenike adotou-se o nível máximo de carga normal igual 5 daN e, a partir desse valor, os outros níveis são obtidos através da remoção sucessiva de 1 daN, até o pendural de pesos ficar sem cargas (carga mínima).

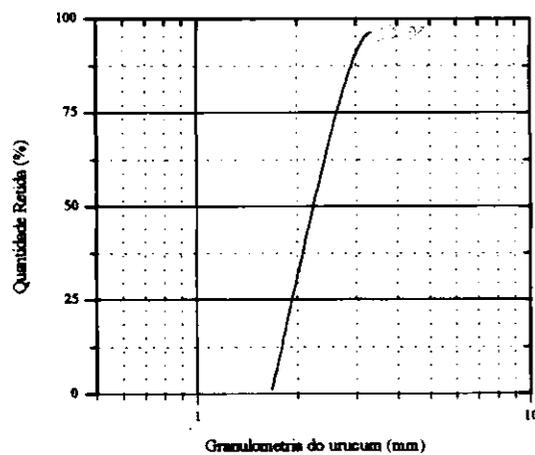
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Granulometria

Os resultados obtidos nos ensaios de granulometria para os grãos do urucum (*Bixa orellana L.*) e seu sub-produto o colorau, são apresentados nas Figura 24a e 24b, respectivamente e na Tabela 05. Da análise dos resultados, verificou-se que, os grãos foram 99,89% retido nas peneiras $2,00 < D < 3,36\text{mm}$ e o colorau 86,96% nas peneiras de $0,42 < D < 0,84\text{ mm}$. Segundo critério de classificação de produtos armazenáveis proposto por Calil Jr. (1984, p.106) os grãos do urucum é considerado como produto granular pois sua granulometria encontra-se no intervalo $D > 1\text{mm}$; e o colorau como produto pulverulento e/ou pulverulento coesivo com $0,297 \leq D < 1\text{mm}$.



(a)



(b)

FIGURA 24 - Granulometria do colorau (a) e dos grãos do urucum (b)

TABELA 05. Resultados dos ensaio de granulometria do colorau e dos grãos do urucum.

Peneiras		Colorau	Grãos de Urucum
Nº	Abertura(mm)	(%)	(%)
6	3,36	-	3,70
7	2,83	-	67,16
10	2,00	-	29,03
12	1,68	-	0,032
14	1,41	0,062	0,033
16	1,00	0,017	0,029
20	0,84	23,02	-
25	0,71	7,26	-
35	0,50	34,65	-
40	0,42	22,03	-
45	0,350	9,93	-
50	0,297	2,001	-

4.2 Densidade em Função da Consolidação

Os resultados de densidade obtidos a partir dos ensaios de cisalhamento instantâneo são apresentados na Tabelas 06, os grãos do urucum apresentou densidade (γ_1) de 6,46, 6,51 e 6,34kN/m³ e densidade (γ_u) de 6,71, 6,69 e 6,59kN/m³ para os teores de umidade de 9, 10 e 11% bu, respectivamente. Observou-se que houve uma pequena diminuição da densidade quando aumentou o teor de umidade, este comportamento mostra a perda de coesão.

A Tabela 07 apresenta os resultados de densidade (γ_d) de 7,07, 6,89 e 6,87kN/m³ e (γ_{tu}) 7,25, 7,14 e 7,16kN/m³, com tempo de consolidação de 12, 48 e 72 horas, respectivamente. Verifica-se que as densidades também diminuíram quando

aumentou o tempo de consolidação, isto mostra que houve diminuição na coesão e conseqüente diminuição dos ângulos de atrito.

O colorau apresenta densidade (γ_1) e (γ_u) de 8,05 e 8,29kN/m³ respectivamente, para o teor de umidade de 11% bu. Como mostra a Tabela 06.

O limite superior da densidade dos produtos serão utilizados para cálculo das pressões horizontais e verticais, e o limite inferior para cálculo do tipo de fluxo (Nascimento, 1996, p.63).

4.3 Resultados dos Teste de Cisalhamento Instantâneo

4.3.1 Ângulo de Atrito Interno e Efetivo Ângulo de Atrito Interno dos Grãos do Urucum, com a Variação do Teor de Umidade, e do Colorau com 11%bu

As Figuras 25a, 25b, 25c e 25d mostram o lugar geométrico instantâneo (YL), definido pela linha reta. 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 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 .

Observou-se que os grãos do urucum tem um comportamento diferente dos outros produtos granulares (feijão, soja milho etc.), com uma pequena variação do teor de umidade, a camada de bixina (camada que envolve o grão), funcionou como um lubrificante, diminuindo a força coesiva, o que provocou a diminuição do ângulo de atrito interno e do efetivo ângulo de atrito interno.

O sub-produto colorau apresentou ângulo de atrito interno inferior de 31° e superior 34° e efetivo ângulo de atrito interno inferior 29° e superior 32° .

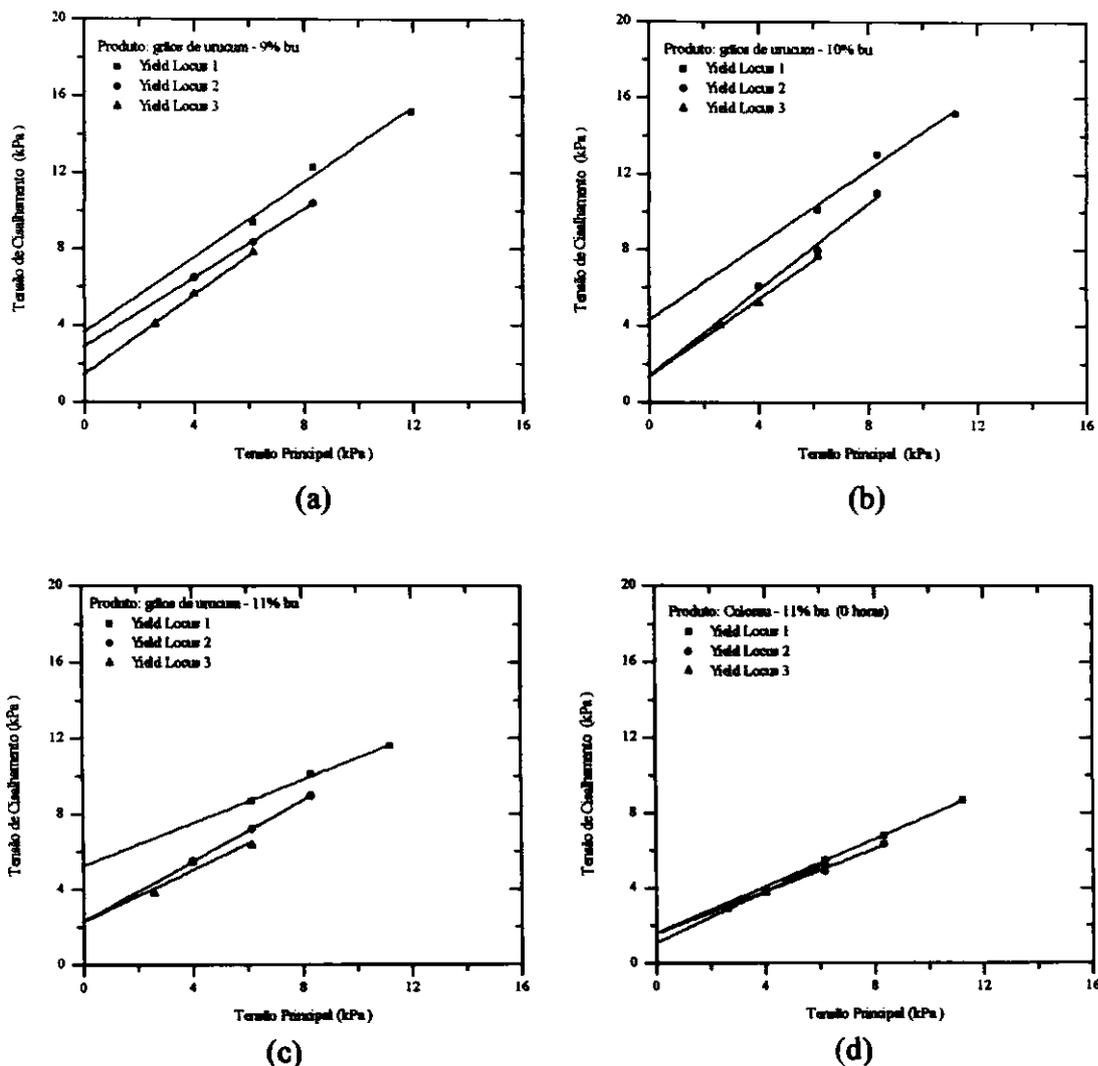


FIGURA 25 - Yield Locus dos grãos do urucum 9% (a), 10% (b) e 11% (c) e do sub-produto colorau 11% bu (d)

A Tabela 06 mostra, que, com o aumento de 2% no teor de umidade dos grãos de urucum não apresentou diferença para o efetivo ângulo de atrito interno (ϕ_{ei}) e uma diferença de 5° para (ϕ_{ca}). Porém essa variação segundo Calil Jr. (1990, p.4.3), não é representativa, pois devido as incertezas e variações nas propriedades dos produtos a

serem armazenados, o efetivo ângulo de atrito interno pode ser aumentado e diminuído em 10° , quando for usado em projetos de silos.

O ângulo de atrito interno inferior (ϕ_{il}) 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, p.64), desta forma os ângulos obtidos serão de grande utilidade para os profissionais que trabalham com o processamento e armazenamento destes produtos.

TABELA 06 - Densidade, ângulo de atrito interno (ϕ_i) e efetivo ângulo de atrito interno (ϕ_e) em função do teor de umidade dos grãos do urucum e do colorau para o teste de cisalhamento instantâneo

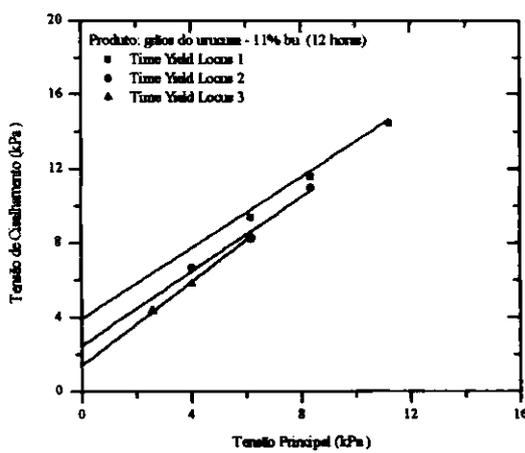
Produto	Teor de Umidade (%)	Densidade (kN/m ³)		Ângulo de atrito interno (ϕ_i)		Efetivo ângulo de atrito interno (ϕ_e)		Função Fluxo FF = σ_1/σ_c
		γ_l	γ_u	ϕ_{il}	ϕ_{iu}	ϕ_{el}	ϕ_{eu}	
Grãos do urucum	9	6,46	6,71	46	48	42	48	2,61
Grãos do urucum	10	6,51	6,69	45	48	42	47	2,55
Grãos do urucum	11	6,34	6,59	37	45	42	43	2,85
Sub-produto								
Colorau	11	8,05	8,29	31	34	29	32	3,45

4.4 Resultados dos Teste de Cisalhamento com Tempo de Consolidação

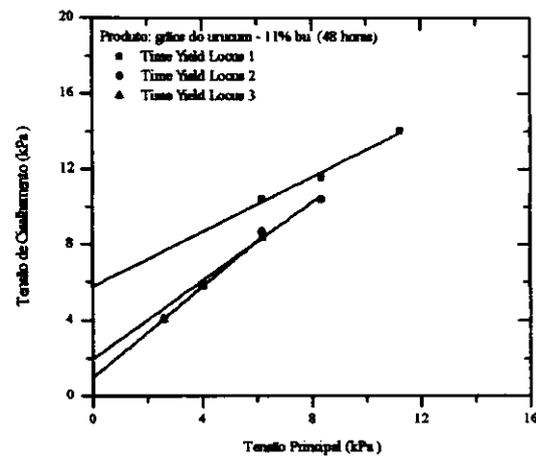
4.4.1 Ângulo de Atrito Interno e Efetivo Ângulo de Atrito dos Grãos do Urucum com Tempo de Consolidação

As Figuras 26a, 26b e 26c mostram o lugar geométrico com tempo de consolidação (TYL). O coeficiente angular do lugar geométrico com tempo de

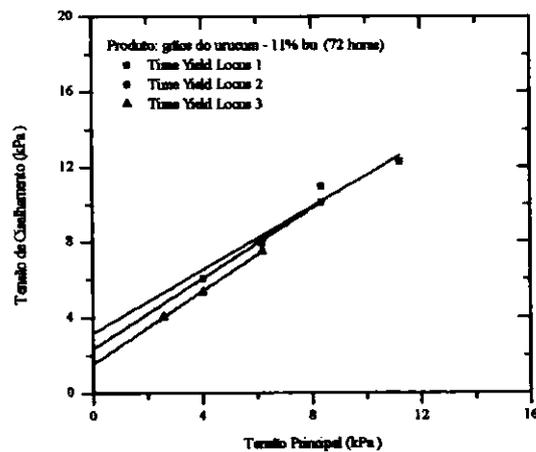
consolidação é o ângulo de atrito interno com o tempo ϕ_{it} . A linha reta que passa através da origem e do ponto de tangência do círculo de Mohr da tensão principal máxima σ_1 , define o efetivo lugar geométrico com tempo de consolidação (TEYL). O coeficiente angular do efetivo lugar geométrico com o tempo de consolidação é o efetivo ângulo de atrito interno com o tempo ϕ_{et} .



(a)



(b)



(c)

FIGURA 26 - Time Yield Locus dos grãos do urucum com tempo de consolidação de 12

(a), 48 (b) e 72 horas (c)

Através das Figuras 27a, 27b e 27c assim como da Tabela 07 foi constatado que os grãos do urucum adquire resistência com o tempo de consolidação, pois no diagrama σ versus τ o comportamento dos lugares geométricos com tempo ficaram acima do lugar geométrico instantâneo. Constatou-se que o urucum adquire resistência com o aumento de tempo de 12 horas, isto talvez seja pelo fato da camada de bixina que envolve os grãos ser lipossolúvel e desta forma após 12 horas de consolidação os grãos liberam teores de óleos que tornam-os menos aderentes.

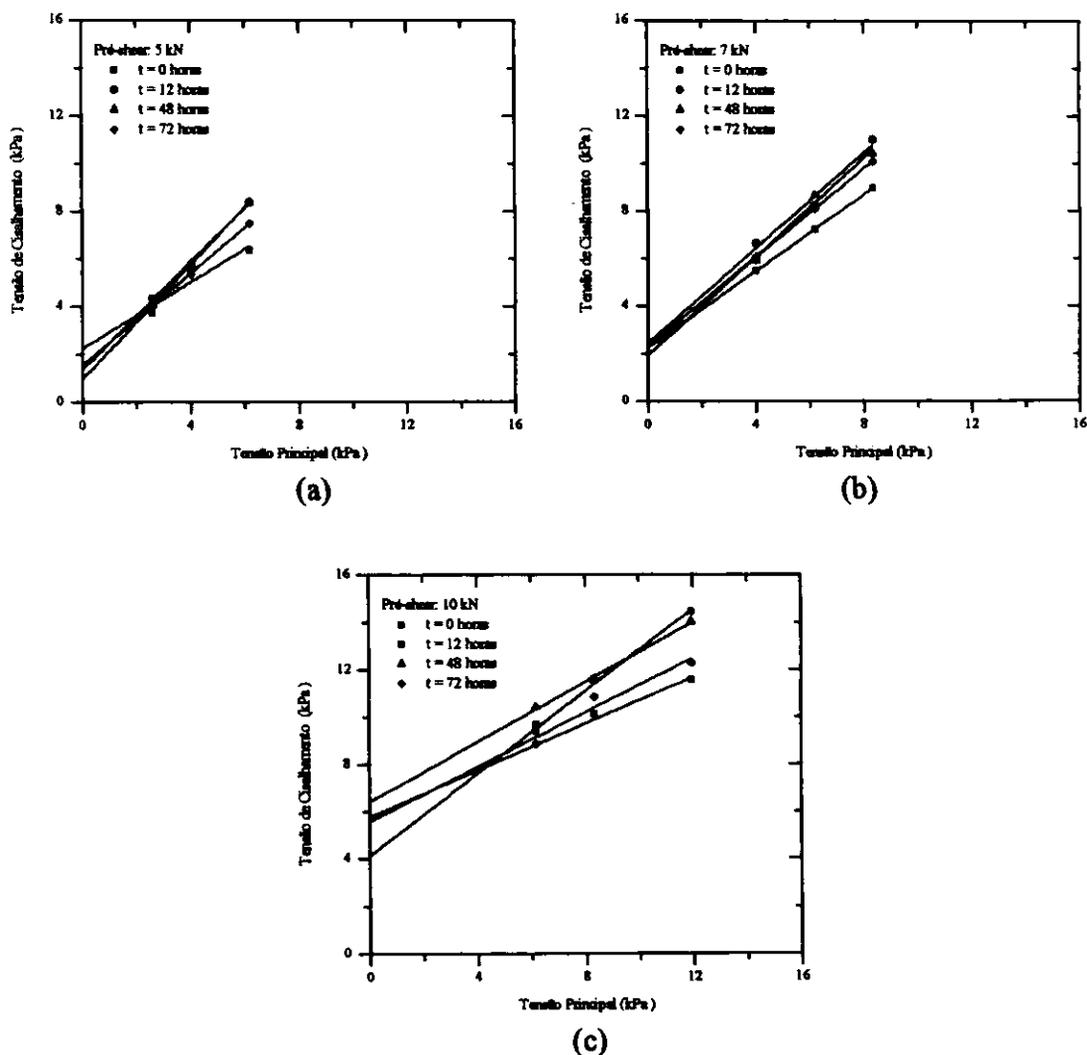


FIGURA 27 - Time Yield Locus dos grãos do urucum para o pré-shear 5 kN (a) 7 kN (b) e 10 kN (c) com o tempo de consolidação 0, 12, 48 e 72 horas

TABELA 07 - Densidade, ângulo de atrito interno (ϕ_{it}) e efetivo ângulo de atrito interno (ϕ_{et}) dos grãos do urucum (11%bu) com tempo de consolidação

Produto	Tempo de Consolidação (horas)	Densidade (kN/m ³)		Ângulo de atrito interno (ϕ_{it})		Efetivo ângulo de atrito interno (ϕ_{et})		Função Fluxo FF = σ_l/σ_c
		γ_l	γ_u	ϕ_{itl}	ϕ_{itu}	ϕ_{etl}	ϕ_{etu}	
Grãos do Urucum	0	6,34	6,59	37	45	42	43	2,85
Grãos do Urucum	12	7,07	7,25	45	47	41	46	2,21
Grãos do Urucum	48	6,89	7,14	44	45	35	47	2,04
Grãos do Urucum	72	6,87	7,16	42	43	43	47	2,94

4.5 Ângulo de Atrito (ϕ_w) do Colorau e dos Grãos do Urucum com a Parede

As Figuras 28a e 28b, mostram os resultados obtidos para o ângulo de atrito com a parede: aço rugoso, plástico e aço liso para o colorau.

Foi observado o comportamento slip-stick nos ensaios para determinação do ângulo de atrito do colorau com a parede de aço rugoso, aço liso e plástico, este comportamento ocorre devido a rugosidade da superfície da parede e a uniformidade das partículas do produto. Quando os profissionais forem projetar silo com parede destes materiais o fator fluxo da tremonha deve então ser multiplicado por um fator de 1,4 para a caracterização das propriedades e o ângulo da tremonha para o fluxo de massa deverá ser aumentado de 5° (BMHB, 1985, p.4.13).

Como o efetivo ângulo de atrito interno do colorau, aproximou-se do ângulo de atrito com a parede de aço rugoso, neste caso o atrito torna-se, particularmente entre as partículas do produto e não entre o produto e a parede, a chamada condição de “parede rugosa”. Segundo Calil Jr. (1990, p.2.12) se $\phi_w > \phi_c - 3^\circ$, o ϕ_c é usado para calcular o atrito com a parede no lugar de $\tan \phi_w$.

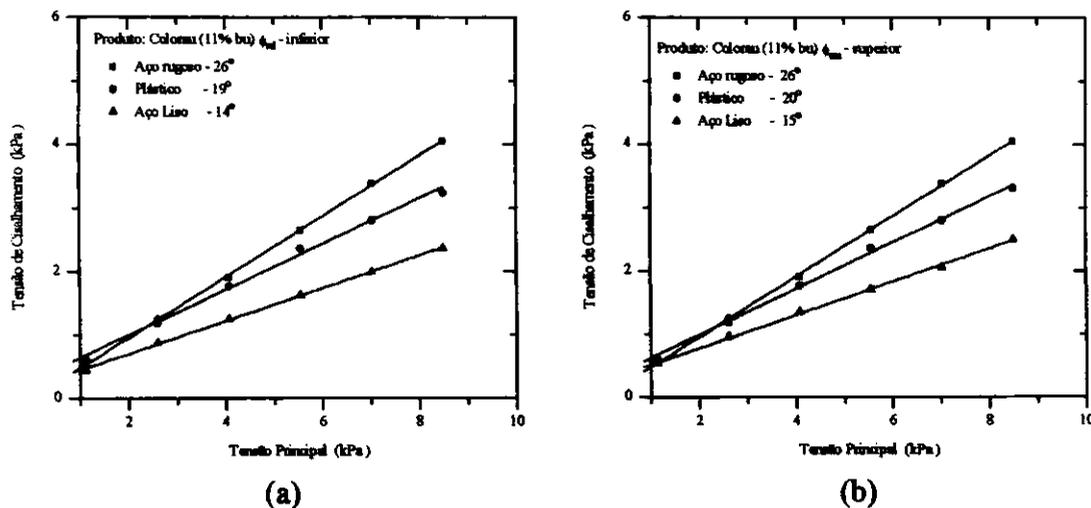
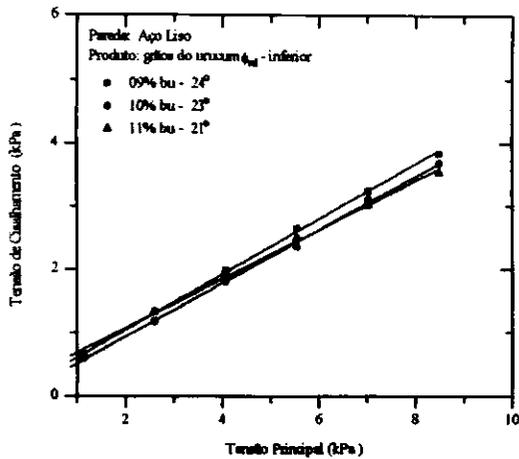
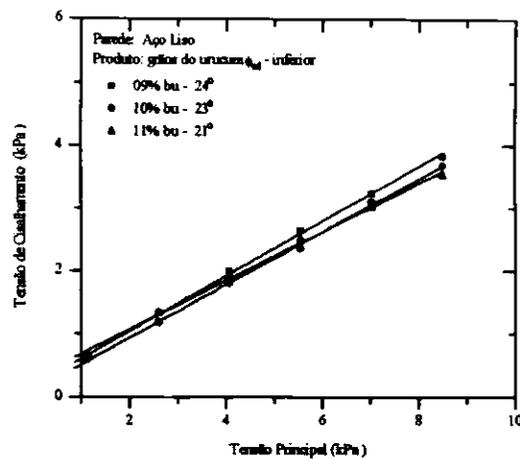


FIGURA 28 - Ângulo de atrito (ϕ_w) do colorau com a parede de Aço Liso, Aço Rugoso e Plástico: inferior (a) e superior (b)

As Figuras 29a e 29b apresentam os ângulos de atrito com a parede para os grãos do urucum em função do teor de umidade de 9, 10 e 11% bu, com material da parede de aço liso, com limites superior e inferior. Observou-se o mesmo comportamento, nos ensaios de cisalhamento instantâneo, os ângulos de atrito com a parede também diminuíram com o aumento de 2% nos teores de umidade apresentando um comportamento semelhante ao do item 4.3. I.



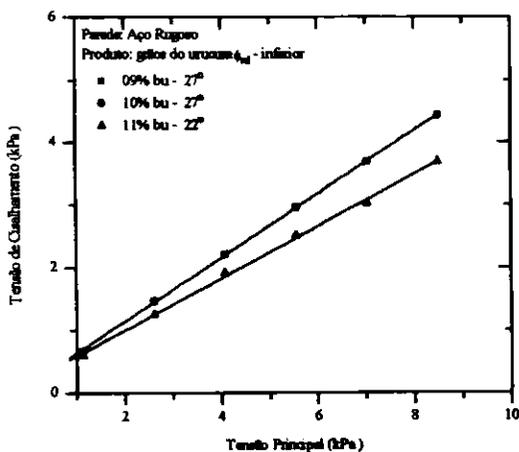
(a)



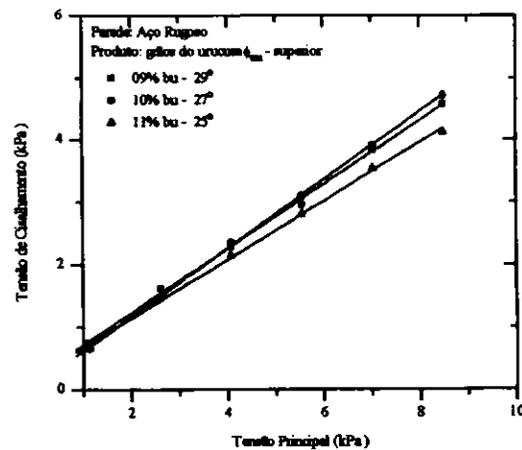
(b)

FIGURA 29 - Ângulo de atrito (ϕ_w) dos grãos do urucum com a parede Aço Liso: inferior (a) e superior (b)

As Figuras 30a e 30b apresentam os ângulos de atrito com a parede para os grãos do urucum, variando o teor de umidade de 9, 10 e 11% bu com material da parede de aço rugoso.



(a)



(b)

FIGURA 30- Ângulo de atrito (ϕ_w) dos grãos do urucum com a parede Aço Rugoso: inferior (a) e superior (b)

Foi obtido um mesmo ângulo para o inferior ângulo de atrito com a parede (ϕ_{wi}) entre os teores de umidade de 9 e 10%. O mesmo comportamento que foi observado para o aço liso, a diminuição do ângulo de atrito com a parede para o teor de umidade de 11% apresentou uma diferença de 5°, quando comparado ao teor de umidade de 9 e 10% bu. Verificou-se ainda que houve uma diminuição de 2° no superior ângulo de atrito com a parede (ϕ_{wu}), quando aumentou 1% no teor de umidade.

As Figuras 31a e 31b apresentam os ângulos de atrito com a parede para os grãos do urucum para o teor de umidade de 9, 10 e 11% bu com material da parede de alumínio.

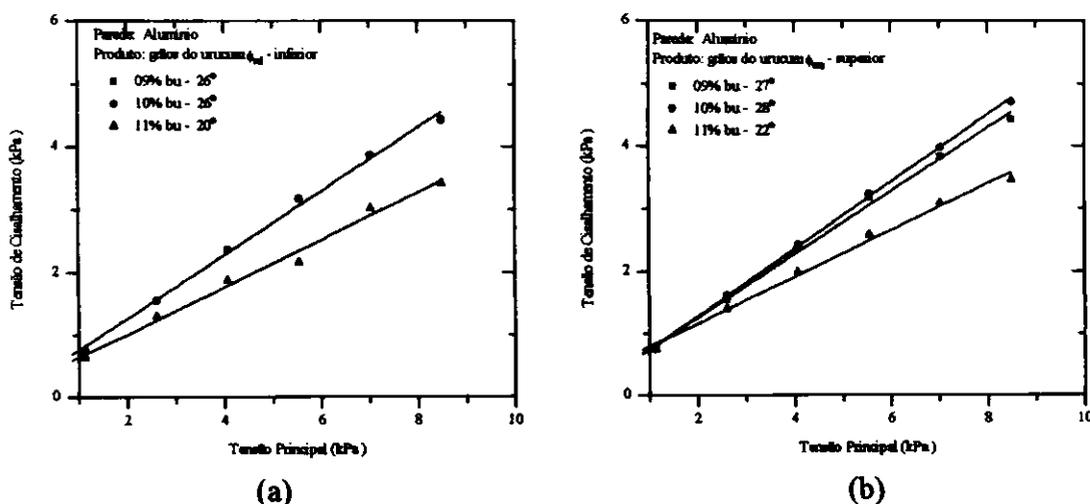


FIGURA 31 - Ângulo de atrito (ϕ_w) dos grãos do urucum com a parede de Alumínio: inferior (a) e superior (b)

Foi obtido para o inferior ângulo de atrito com a parede (ϕ_{wi}) entre os teores de umidade de 9 e 10%. O mesmo comportamento foi observado anteriormente, a diminuição do ângulo de atrito com a parede para o teor de umidade de 11% apresentou uma diferença de 5°, quando comparado ao teor de umidade de 9 e 10% bu. Observou-se

ainda que houve uma diminuição no superior ângulo de atrito com a parede (ϕ_{wu}) de 6°, quando aumentou o teor de umidade de 9 para 11%.

As Figuras 32a e 32b apresentam os ângulos de atrito com a parede para o urucum, variando o teor de umidade de 9, 10 e 11% bu com material da parede de concreto.

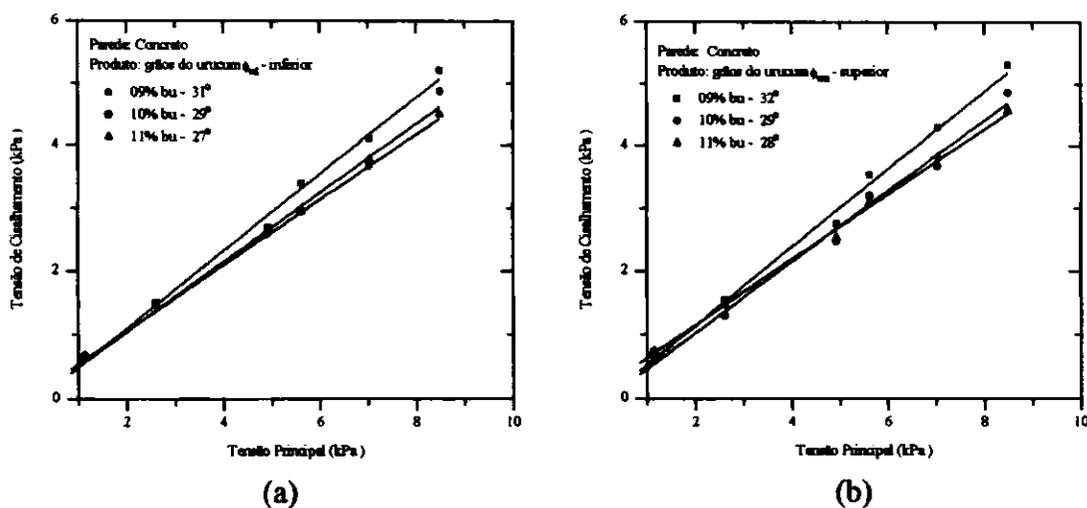


FIGURA 32 - Ângulo de atrito com (ϕ_w) dos grãos do urucum com a parede de Concreto: inferior (a) e superior (b)

Observou-se que não houve variação para o inferior ângulo de atrito com a parede (ϕ_w), variando os teores de umidade. O mesmo comportamento que foi observado anteriormente nos materiais de parede analisados, ocorreu diminuição do superior ângulo de atrito com a parede (ϕ_w), quando aumentou o teor de umidade.

O estudo feito com o concreto como material para construção de silos, foi a nível de pesquisa, pois estes resultados provavelmente serão pouco usados em projetos de

silos pulmões em indústrias de processamento de urucum, como a produção nacional e muito pequena e a quantidade utilizada no beneficiamento não comporta a construção de silos de concreto utiliza-se então os outros materiais estudados. Mas poderá ser utilizado moega para recepção do urucum e daí estes dados serão de extrema utilidade.

As Figuras 33a e 33b apresentam os ângulos de atrito com a parede para os grãos do urucum em função dos mesmos teores de umidade anteriores com material da parede de madeira.

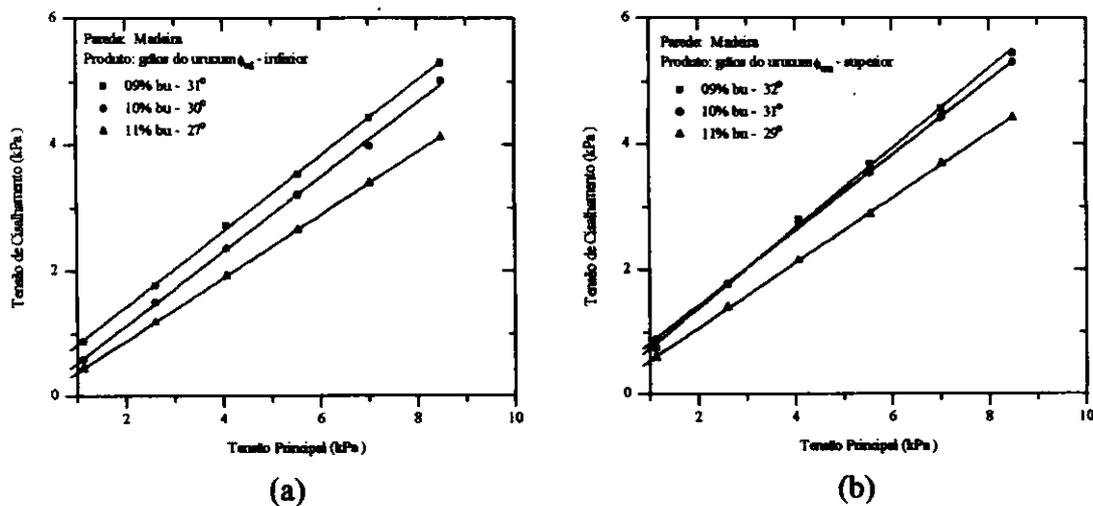


FIGURA 33 - Ângulo de atrito (ϕ_w) dos grãos do urucum com a parede de Madeira: inferior (a) e superior (b)

Com a variação do teor de umidade os grãos do urucum apresentou para o inferior ângulo de atrito com a parede (ϕ_w) diferença de 4° e para o superior ângulo de atrito com a parede (ϕ_w) diferença de 3° e com o aumento do teor de umidade houve diminuição no ângulo de atrito com a parede, este comportamento vem sendo observado para todos os tipos de paredes.

As Figuras 34a e 34b apresentam os ângulos de atrito com a parede para os grãos do urucum em função o teor de umidade de 9, 10 e 11% bu com material da parede de plástico.

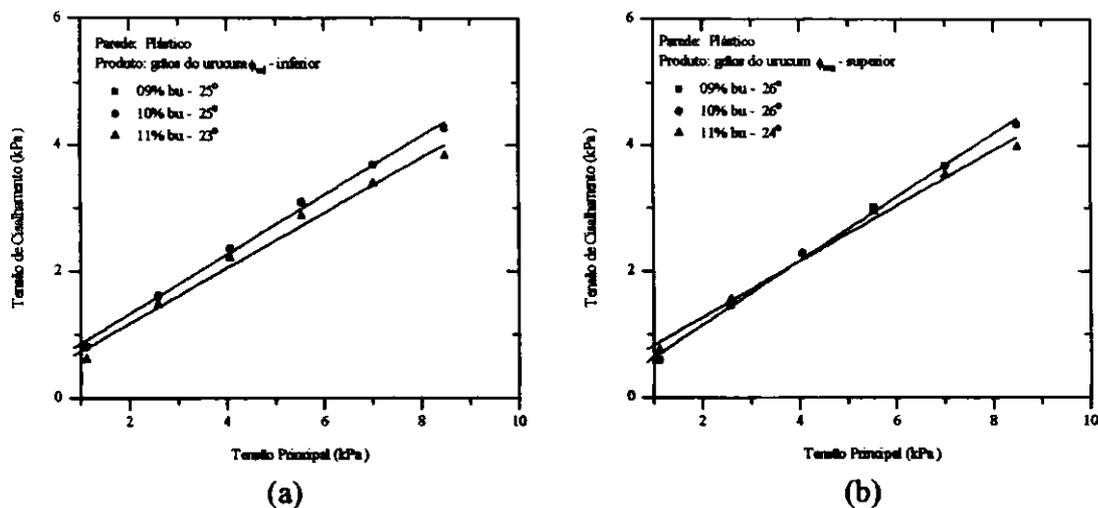


FIGURA 34 - Ângulo de atrito (ϕ_w) dos grãos do urucum com a parede de Plástico: inferior (a) e superior (b)

Observando-se as Figuras 34a e 34b verifica-se que para o teor de umidade de 9 e 10% não houve variação para os ângulos inferiores e superiores com o plástico e para os teores de umidade de 9 e 11% a diferença foi de 2°, mais uma vez com o aumento do teor de umidade houve diminuição do o ângulo de atrito com a parede.

Verificou-se que a variação do ângulo de atrito com a parede (ϕ_w) nos limites inferiores e superiores foram significativas ao nível de 5% de probabilidade, pelo teste T.

Na Tabela 08, encontra-se os resultados, dos ângulos de atrito com a parede para o urucum variando o teor de umidade e os materiais da parede e, do colorau com três diferentes materiais de parede.

TABELA 08 - Ângulo de atrito com a parede (ϕ_w) para os grãos do urucum e colorau

Tipos de Paredes	Urucum				Colorau			
	9%		10%		11%		11%	
	ϕ_{wl}	ϕ_{wu}	ϕ_{wl}	ϕ_{wu}	ϕ_{wl}	ϕ_{wu}	ϕ_{wl}	ϕ_{wu}
Aço Liso	24	26	23	25	21	21	14	15
Aço Rugoso	27	27	27	29	25	22	26	26
Alumínio	26	27	26	28	20	22	-	-
Concreto	31	32	29	29	27	28	-	-
Madeira	31	32	30	31	27	29	-	-
Plástico	25	26	25	26	23	24	19	20

O superior ângulo de atrito com a parede (ϕ_{wu}) é utilizado no cálculo da pressão horizontal máxima, carga vertical máxima na tremonha e pressão máxima na tremonha e o inferior ângulo de atrito com a parede (ϕ_{wl}), para cálculo da força máxima por atrito na parede do silo.

Segundo Nascimento (1996, p.70) atualmente 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 físicas do urucum e do colorau será de grande utilidade para os projetistas que trabalham com estados limites.

4.6 Função Fluxo dos Grãos do Urucum e Colorau para o Cisalhamento Instantâneo

As Figuras 35a, 35b, 35c apresentam as funções fluxo dos grãos do urucum em função do teor de umidade de 9, 10 e 11% para o cisalhamento instantâneo.

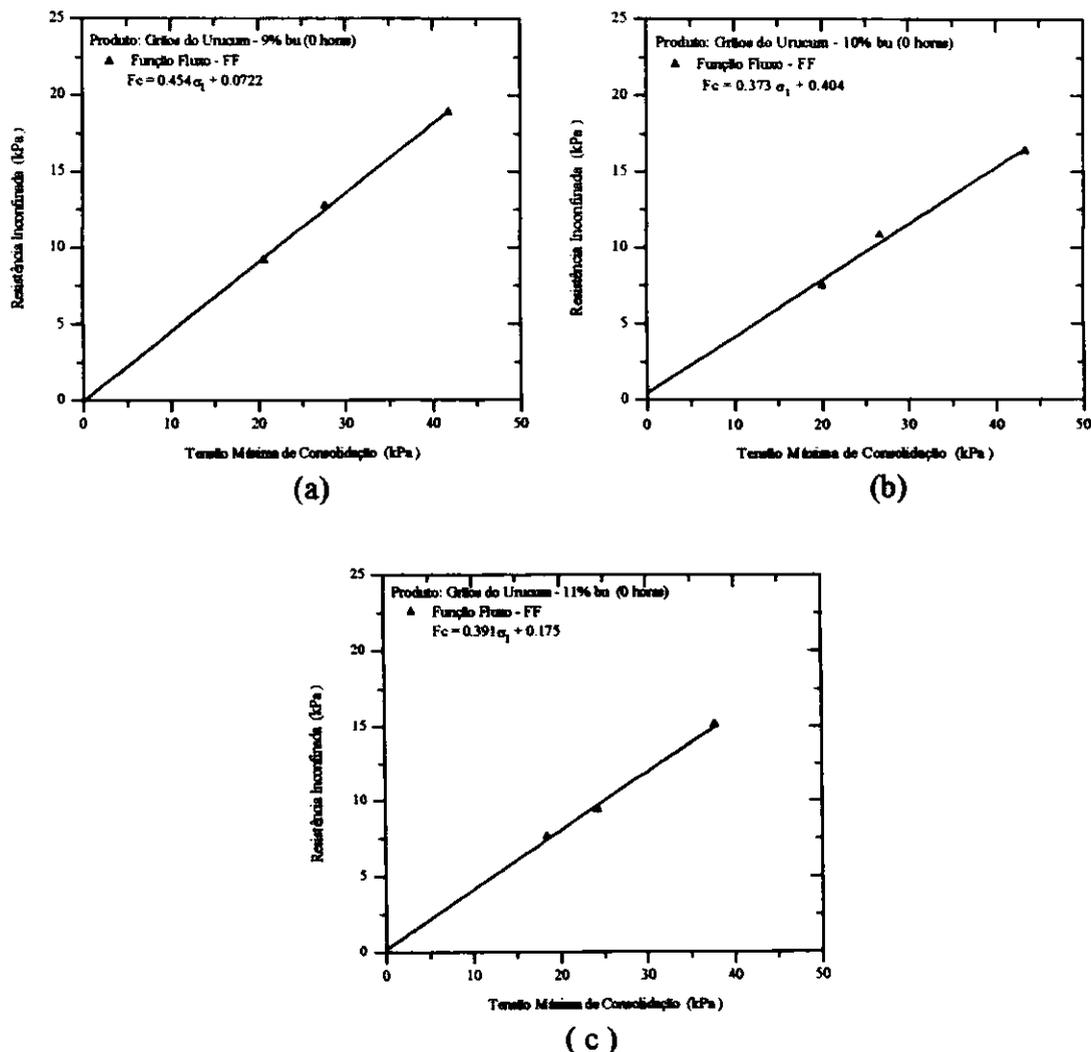
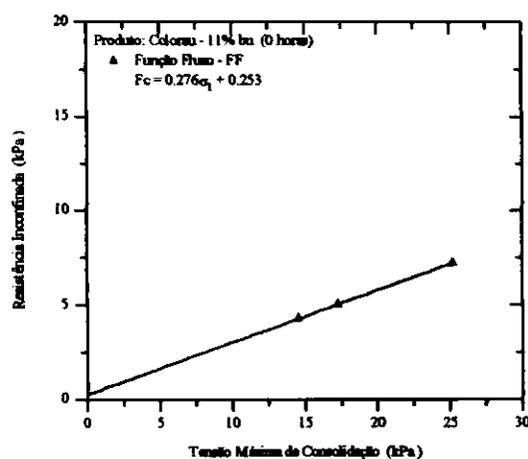


FIGURA 35 - Função Fluxo dos grãos do urucum com diferentes teores de umidade: 9% (a), 10% (b) e 11% bu (c)

Quando os resultados da função fluxo (FF) da Tabela 07 dos grãos do urucum são comparados com a classificação de Jenike para fluxo de massa (Jenike, 1987,

p.56) conclui-se que: os grãos do urucum para o cisalhamento instantâneo encontram-se na faixa de $2 < FF < 4$, e é classificado como produto coesivo.

A Figura 36 apresenta a função fluxo do colorau com o teor de umidade de 11% para o cisalhamento instantâneo.



(a)

FIGURA 36 - Função Fluxo do colorau com 11% bu (a)

Para os resultados da função fluxo (FF) do colorau, mostrados na Tabela 07, também são comparados com a classificação de Jenike (1987, p.56) para fluxo de massa de produtos armazenáveis; e o mesmo é classificado como produto coesivo, pois encontra-se na faixa de $2 < FF < 4$.

4.7 Função Fluxo dos Grãos do Urucum com Tempo de Consolidação

As Figuras 37a, 37b, 37c apresentam as funções fluxo dos grãos do urucum em função do tempo de consolidação e do teor de umidade de 11% bu.

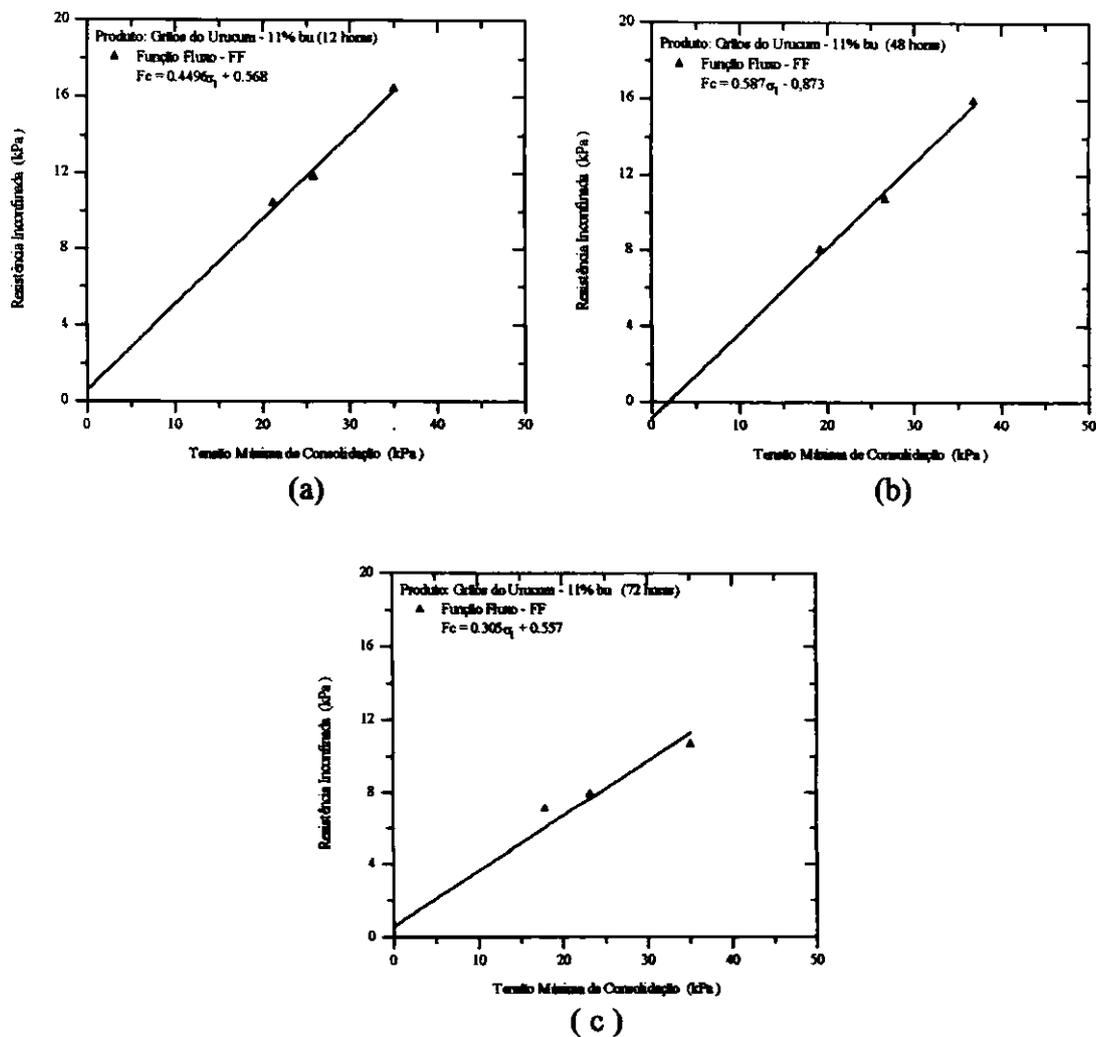


FIGURA 37 - Função Fluxo para os grãos do urucum com diferentes tempos de consolidação: 12 (a), 48 (b) e 72 horas (c)

Quando os resultados da função fluxo (FF) da Tabela 07 dos grãos do urucum são comparados com a classificação de Jenike para fluxo de massa (Jenike, 1987, p.56) conclui-se que: os grãos do urucum com tempo de consolidação encontram-se na faixa de $2 < FF < 4$, e é classificado como produto coesivo.

5 CONCLUSÕES

- o urucum é um produto granular e o colorau é uma produto pulverulento e/ou pulverulento coesivo segundo a classificação granulométrica;
- O urucum e o colorau são classificados segundo suas funções fluxo como produtos coesivos;
- Com o aumento do teor de umidade os ângulos de atrito interno e efetivo ângulo de atrito interno diminuíram;
- Os grãos do urucum adquire resistência com o aumento de tempo até 12 horas e depois diminui;
- houve uma diminuição do inferior ângulo de atrito com a parede (ϕ_w) e do o superior ângulo de atrito com a parede (ϕ_{wv}) para os grãos do urucum com o aumento no teor de umidade;
- Recomenda-se adotar fluxo de massa em projetos de silo para armazenamento de urucum.

Grãos do urucum			
Densidade (γ)	ϕ_i	ϕ_e	FF
6 - 7	37 - 48	35 - 48	2 - 3
Colorau			
8 - 9	31 - 34	29 - 32	3 - 4

Ângulo de atrito com a parede (ϕ_w) - Grãos do urucum					
aço liso	aço rugoso	plástico	alumínio	concreto	madeira
21 - 26	22 - 29	23 - 26	20 - 28	27 - 32	27 - 32
Ângulo de atrito com a parede (ϕ_w) - Colorau					
14 - 26	26	19 - 20	-	-	-

Para futuros trabalhos sugere-se:

- determinação dos ângulos de atrito variando o tempo de consolidação: 2 em 2 horas até 12 horas; 4 em 4h até 24 horas; 6 em 6h até 48horas, com objetivo de determinar a partir de que intervalo o urucum começa a perder aderência;
- determinação dos ângulos de atrito do colorau variando o tempo de consolidação de 2, 6, 12, 24 horas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

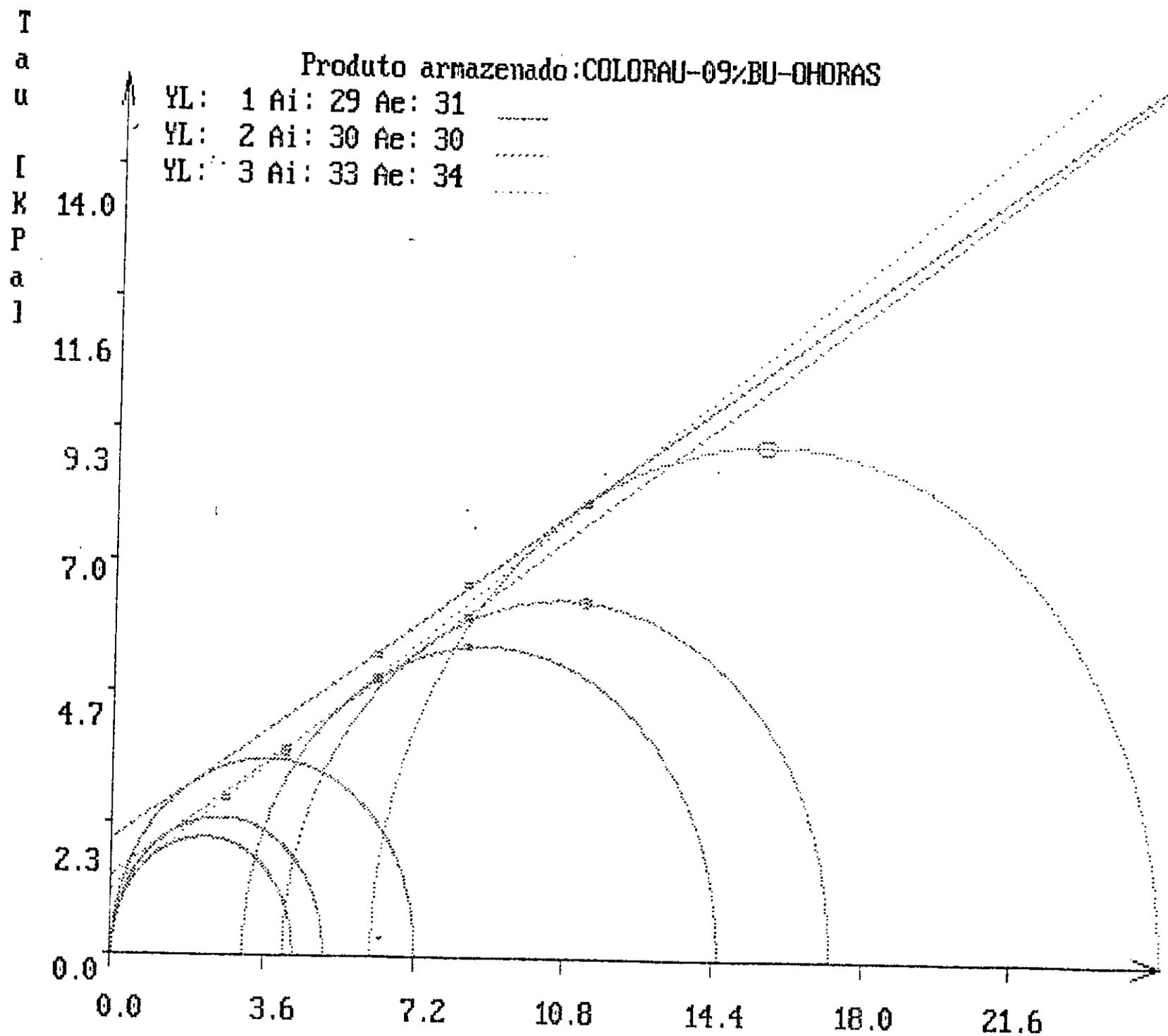
- *ARAÚJO, D. M. Aplicação e mercado do urucum - colorífico. In: Seminário de Corantes para Alimentos, 2, Simpósio Internacional de Urucum, 1, 1991, Campinas. **Resumos...** Campinas: ITAL, 1991. 321p.
- ARNOLD, P.C., MCLEAN, A.G., ROBERTS, A.W. **Bulk Solids: Storage, Flow and Handling.** TUNRA, The University of Newcastle, N.S.W., Austrália, 1987, ISBN 0725903031.
- AVT. **Operating Instructions for the Translational Shear Testes TSG-70-140.** AVT Anlagen und Verfahrenstechnik GmbH, Weigarten - Alemanha, s.d., 65p. (Manual técnico).
- *BATISTA, F. A. S. **Urucueiro: Instruções práticas para implantação e condução de um plantio.** João Pessoa. EMEPA/EMATER-PB, mar. 1988. 26p. il. (EMWPA-PB/EMATER-PB. Circular Técnica, 3).
- BMHB. British materials handling board. **Draf Cade of Practice for the Design of Silos, Bins, Bunkers and Hoppers.** Inglaterra, 1985. 101p.
- BOVI, O.A. Aspectos da cultura do urucum no Estado de São Paulo. In: Seminário de Corantes para Alimentos, 2, Simpósio Internacional de Urucum, 1, 1991, Campinas. **Resumos...** Campinas: ITAL, 1991. 321p.
- CALIL JR., C. **Sobrepressiones en las paredes de los silos para almacenamiento de productos pulverulentos cohesivos.** Barcelona, 1984, 184p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) Universidad Politecnica de Barcelona - UPB.
- _____. **Recomendações de fluxo e de cargas para o projeto de silos verticais.** São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 1990. 200p. (Apostila).

- ✕ CANCELLA, J.F. Aplicações e mercado do urucum na indústria da carne. In: Seminário de Corantes para Alimentos, 2, Simpósio Internacional de Urucum, 1, 1991, Campinas. **Resumos...** Campinas: ITAL, 1991. 321p.
- ✕ CARVALHO, P. R. Extração e utilização do corante de urucum. In: Seminário Corantes Naturais para Alimentos, 1989, Campinas. **Resumos...** Campinas: ITAL, 1989.
- ✕ CISNERO, R. Aplicação e mercado de corantes de urucum: Massas alimentícias. In: Seminário de Corantes Naturais para Alimentos, 2, Simpósio Internacional de Urucum, 1, 1991, Campinas. **Resumos...** Campinas: ITAL, 1991. 321p.
- DIDRINKSEN, C. Anatto on the European Market. In: Seminário de Corantes para Alimentos, 2, Simpósio Internacional de Urucum, 1, 1991, Campinas. **Resumos...** Campinas: ITAL, 1991. 321p.
- DIN 1055. Lastannahmen fur Bauten, Blatt 6, **Lasten in Silozellen**. Alemanha, 1987. 12 p.
- ✕ GUITMARÃES, I.S. de S. Urucum: situação atual e perspectivas. In: Seminário Corantes Naturais para Alimentos, 1989, Campinas. **Resumos...** Campinas: ITAL, 1989.
- ✕ IBGE. **Anuário Estatístico do Brasil - 1993**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 1993.
- ✕ FIBGE. **Censo Agropecuário - 1980**, Rio de Janeiro: Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 1980.
- 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.
- ✕ LORENA, W. Corantes artificiais e pigmentos. In: Seminário Corantes Naturais para Alimentos, 1989, Campinas. **Resumos...** Campinas: ITAL, 1989.
- ✕ LOURENÇO NETO, J. P. de M. O uso de corante de urucum na fabricação de queijos. In: Seminário de Corantes para Alimentos, 2, Simpósio Internacional de Urucum, 1, 1991, Campinas. **Resumos...** Campinas: ITAL, 1991. 321p.
- ✕ MELLO, A., LIMA, L.C.F. Urucum situação atual e perspectivas - Regiões Norte e Nordeste. In: Seminário Corantes Naturais para Alimentos, 1989, Campinas. **Resumos...** Campinas: ITAL, 1989.
- MILANI, A.P. **Determinação das propriedades de produtos armazenados para projeto de pressões e fluxo em silos**. São Carlos, 1993. 272p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estrutura) Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo.

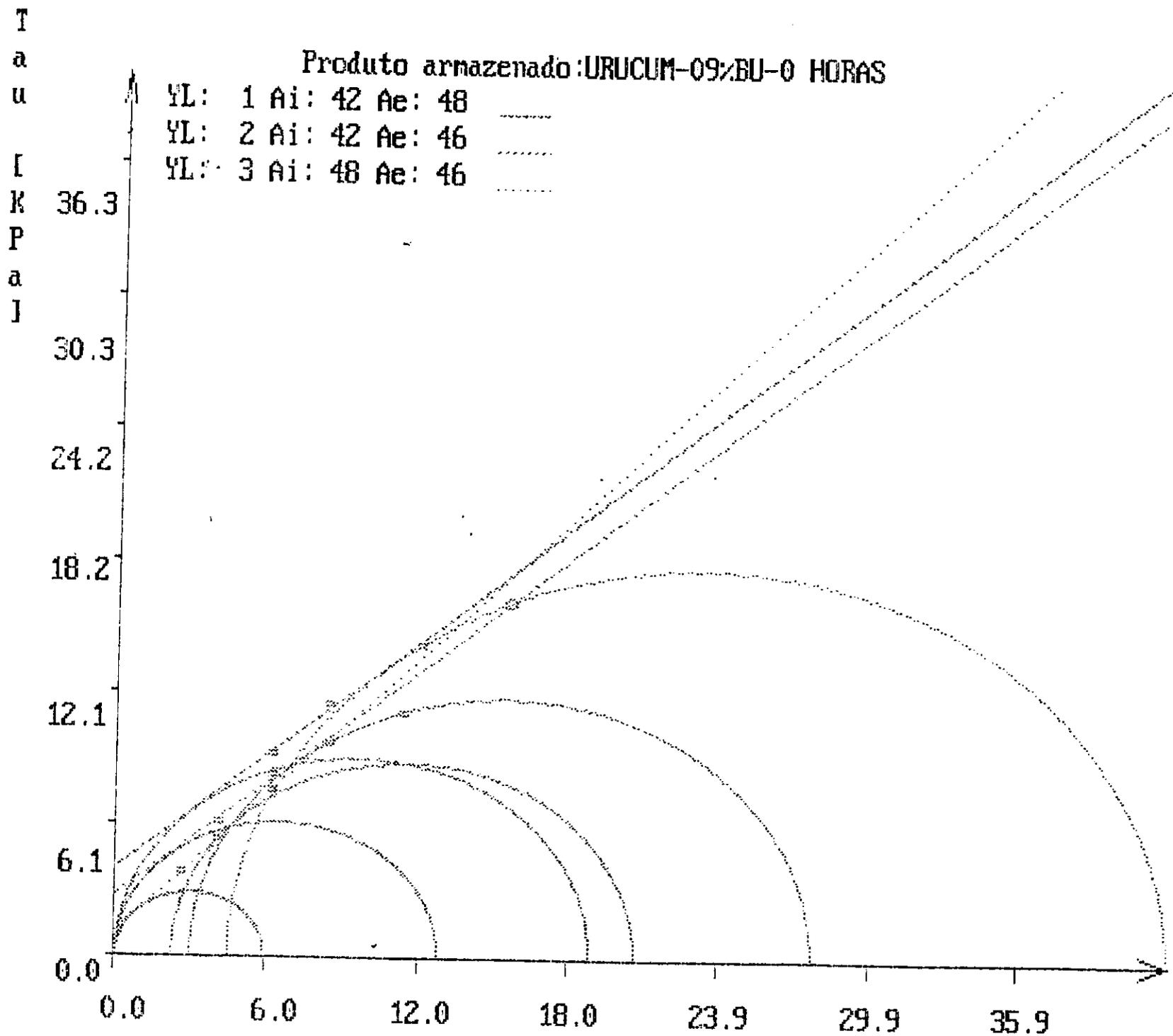
- NASCIMENTO, J.W.B. **Estudos dos silos metálicos prismáticos para fábrica de ração**. São Carlos, 1996. 152p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estrutura) - Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo.
- NCSE. **Guidelines for the assessment of loads on bulk solids containers**. National Committee on Structural Engineering. The Institution of Engineers Austrália. Austrália. 1987. 59p.
- ✧ OLIVEIRA, V.P. Cultivo do urucum. In: **Seminário Corantes Naturais para Alimentos**, 1989, Campinas. **Resumos...** Campinas: ITAL, 1989.
- RASÉRA, I. T. Anteprojeto da norma de identidade, qualidade, apresentação e embalagem do urucu para a comercialização interna. In: **Seminário de Corantes para Alimentos**, 2, **Simpósio Internacional de Urucum**, 1, 1991, Campinas. **Resumos...** Campinas: ITAL, 1991. 321p.
- 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.
- ✧ SILVA, G. F. da. **Processamento de urucum em leito de jorro**. Campina Grande, 1991. 138p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal da Paraíba.
- 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).
- ✧ ZIMBER, Karola. Corantes de Urucum - Aplicação em alimentos diversos. In: **Seminário de Corantes para Alimentos**, 2, **Simpósio Internacional de Urucum**, 1, 1991, Campinas. **Resumos...** Campinas: ITAL, 1991. 321p.

ANEXOS

7.1 ANEXO 1 - Yield Locus para o colorau: 11% bu



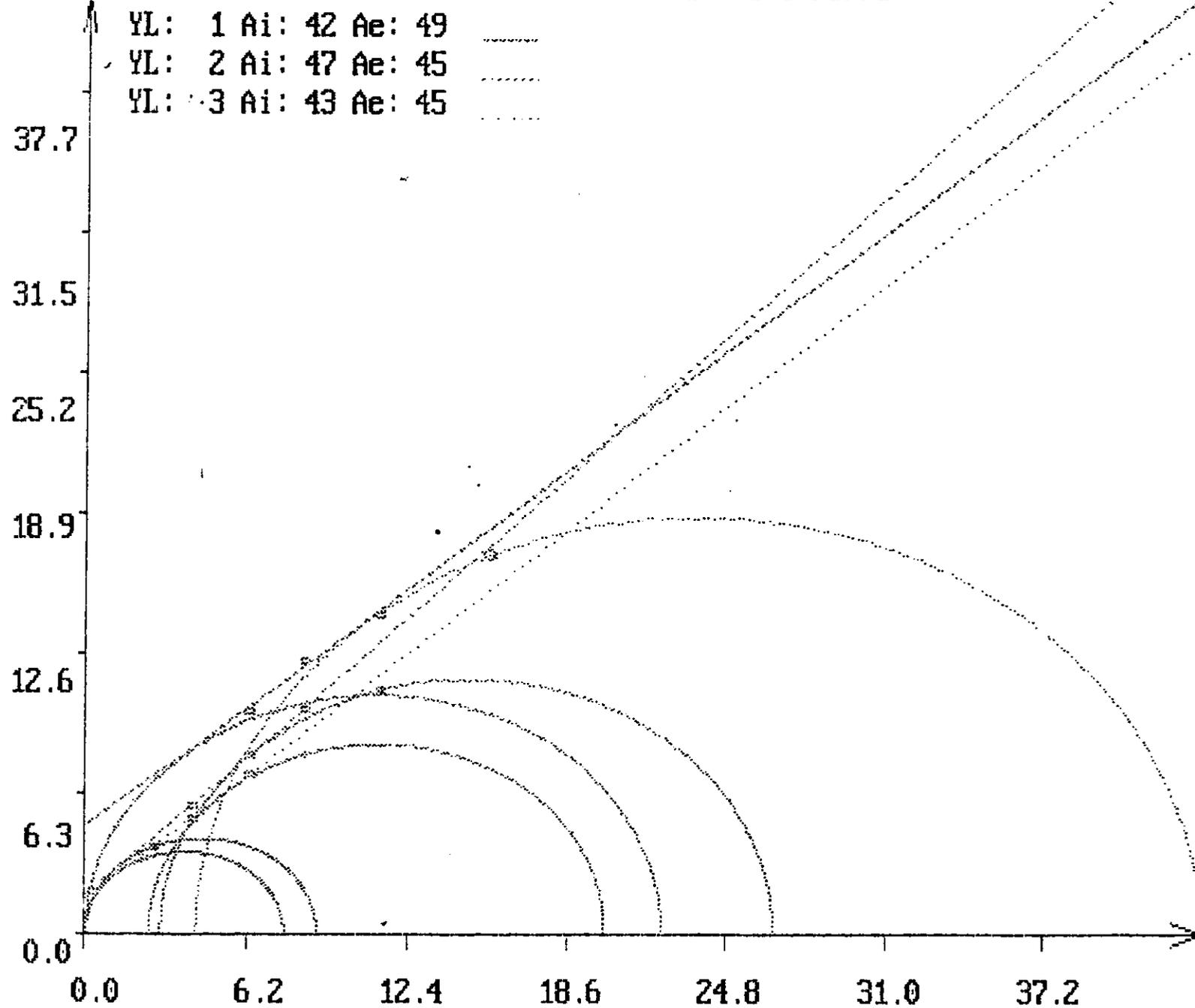
7.2 ANEXO 2 - Yield Locus dos grãos do urucum: 9, 10 e 11% bu



T
a
u

[
K
P
a
l

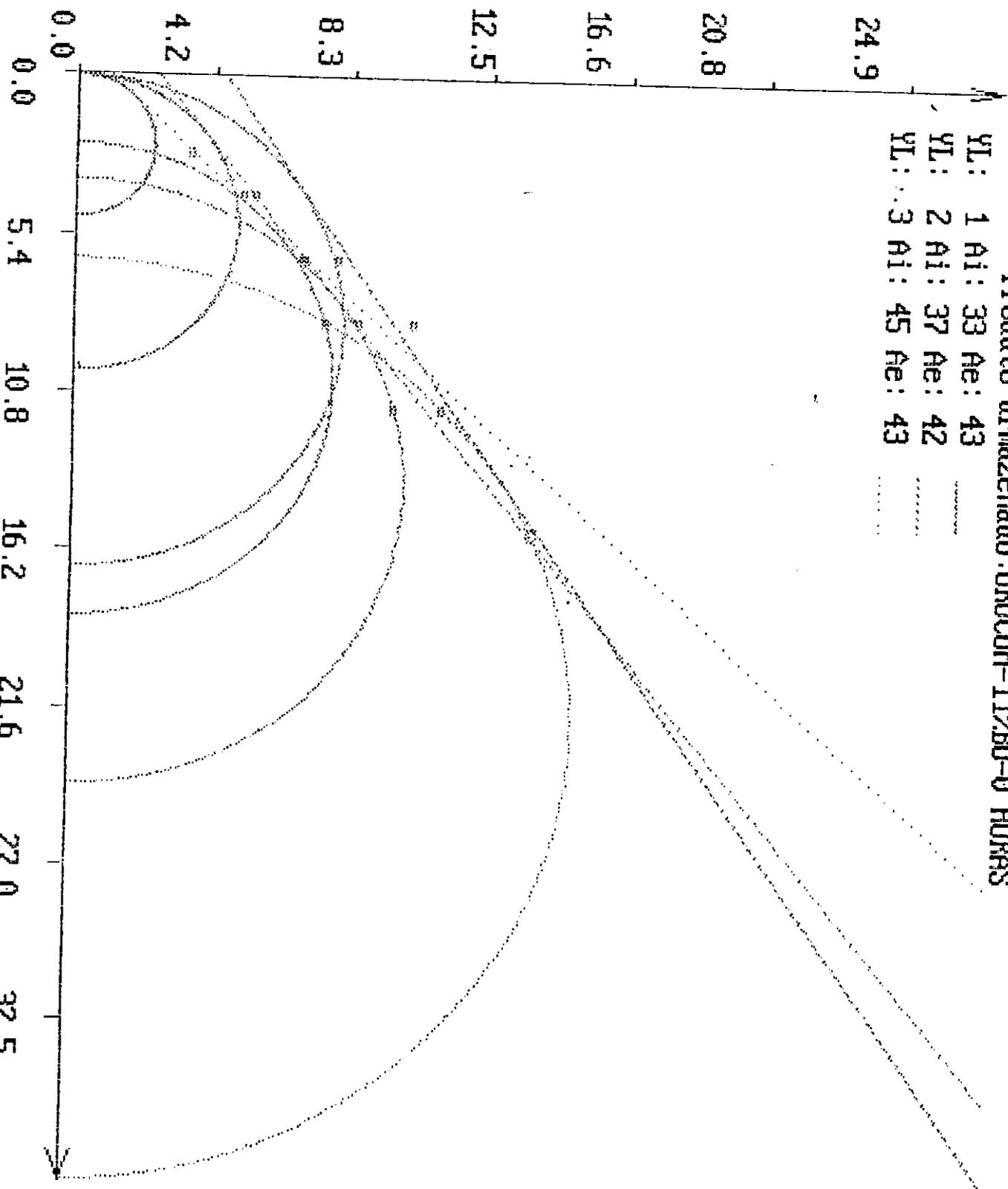
Produto armazenado: URUCUM-10%BU-0 HORAS



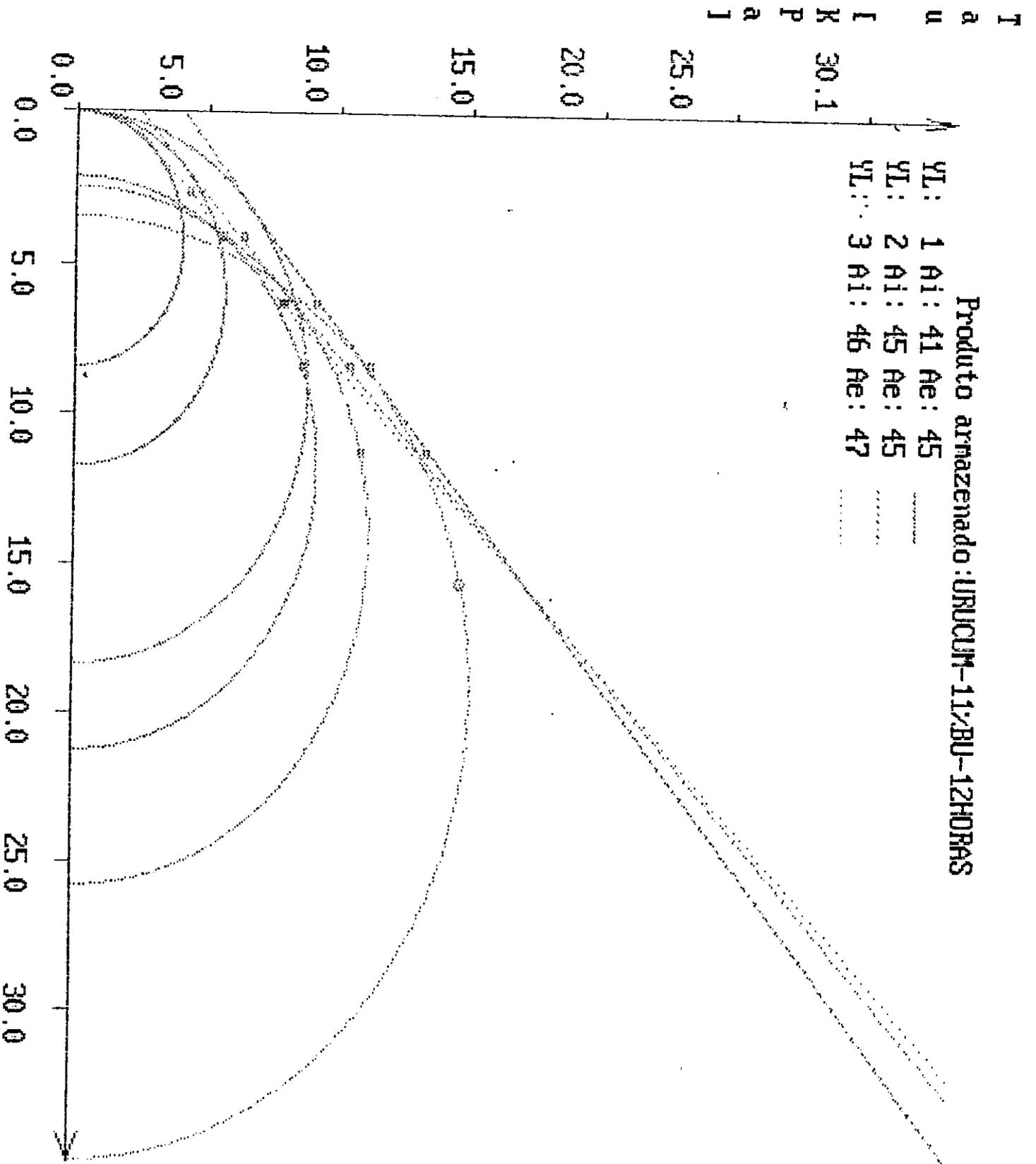
T
a
u
l
k
p
a
l

Producto armazenado: URUCUM-11/BU-0 HORAS

YL: 1	AI: 33	Ae: 43
YL: 2	AI: 37	Ae: 42
YL: 3	AI: 45	Ae: 43



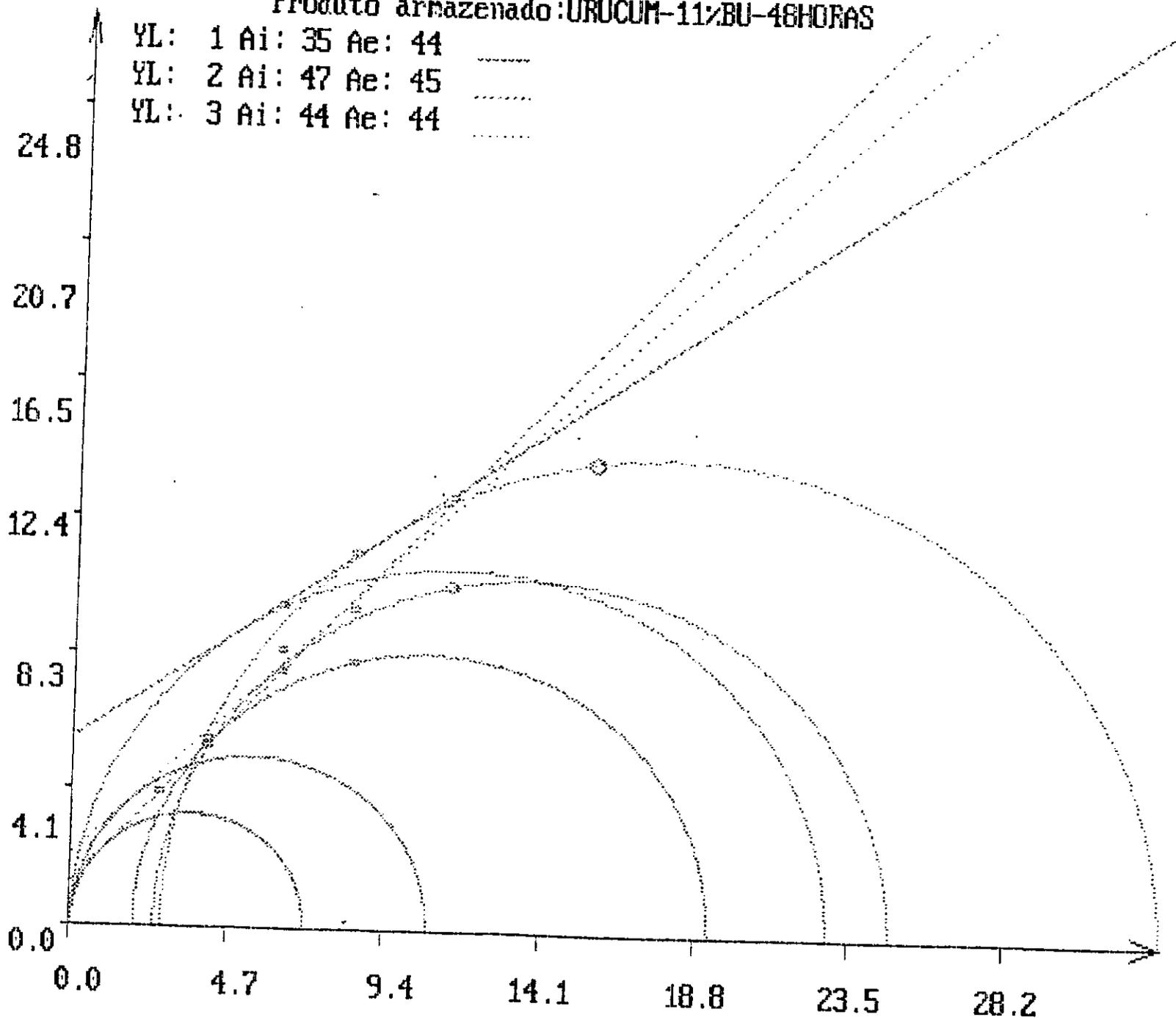
7.3 ANEXO 3 - Time Yield Locus dos grãos do urucum: 12, 48 e 72h



T
a
u
[
K
P
a
l

Produto armazenado: URUCUM-11½BU-48HORAS

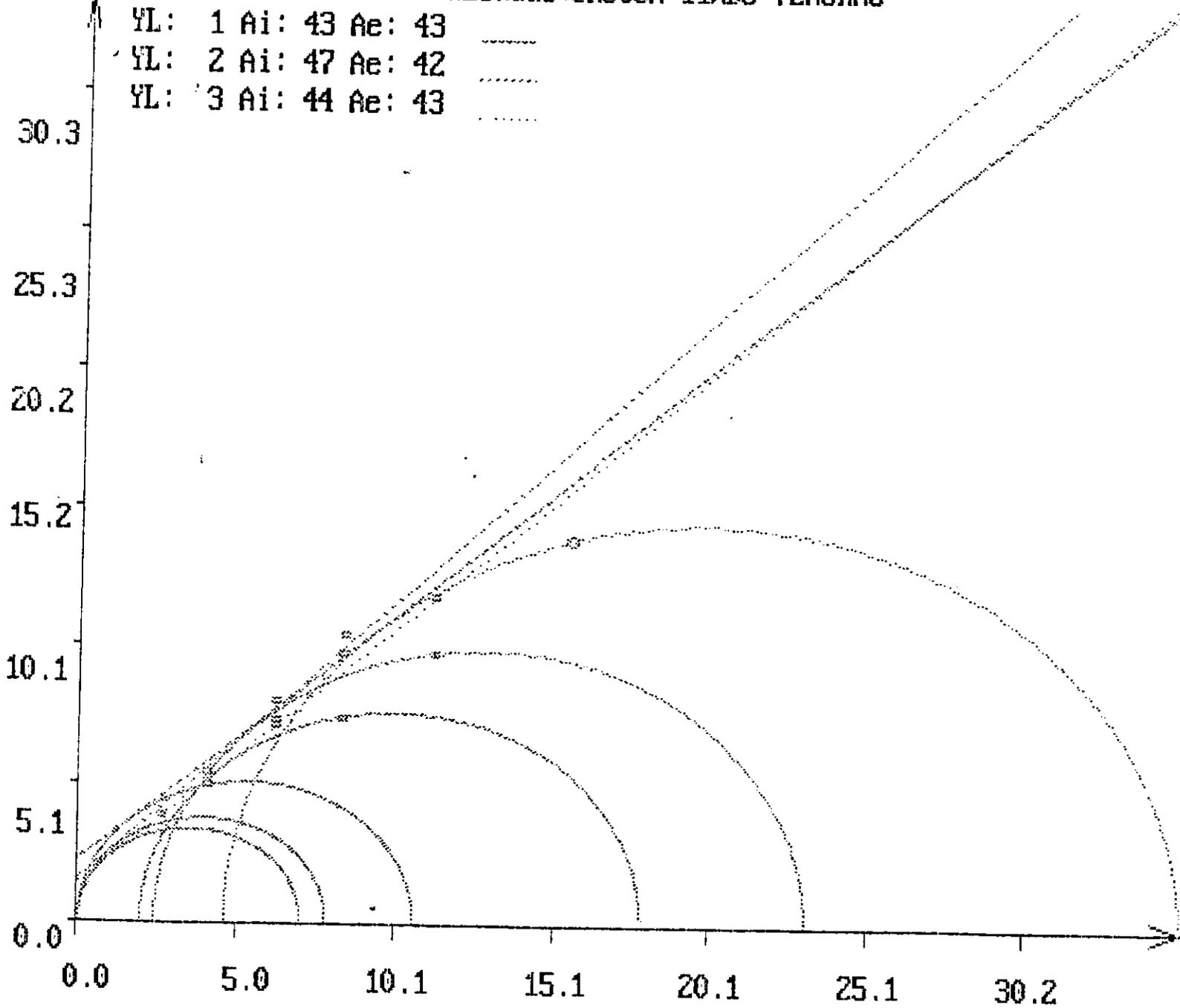
YL: 1 Ai: 35 Ae: 44
 YL: 2 Ai: 47 Ae: 45
 YL: 3 Ai: 44 Ae: 44



T
a
u

L
K
P
a
J

Produto armazenado: URUCUM-11/BU-72HORAS



GLOSSÁRIO

- ângulo de repouso: o máximo ângulo do talude do produto medido com a horizontal;
- canal de fluxo: canal é aquela parte da massa do produto que ocorre fluxo quando a boca de descarga é aberta ou acionado o alimentador;
- círculo de Mohr de tensões: representação gráfica do estado de tensões nos eixos de tensão normal e cisalhamento, isto é, plano $\sigma \times \tau$;
- coesão: resistência ao deslizamento do produto onde a tensão normal é igual a zero;
- compactação (consolidação): processo de redução do volume por aplicação de tensões;
- consolidação crítica: um produto está consolidado criticamente em relação à tensão normal aplicada, quando ele desliza sem mudanças na densidade e em estado de tensão constante;
- corante natural: obtido a partir de vegetal ou eventualmente, de animais, cujo princípio corante tenha sido isolado com emprego de processo tecnológico adequado;
- corante artificial: obtido por síntese mediante emprego de processo tecnológico adequado e não encontrado em produtos naturais;
- coloríficos ou colorau: são produtos que apesar de classificados como condimento ou ingrediente usam urucum na formulação e têm como principal função colorir os produtos onde são aplicados;

- deformação plástica (ou fluxo): deformação irreversível quando se retira a tensão;
- deslizamento (Y): deformação plástica do produto;
- EYL - efetivo lugar geométrico de deslizamento: lugar geométrico que passa através da origem do plano $\sigma \times \tau$ e é tangente ao círculo de Mohr em estado estável durante fluxo contínuo;
- função fluxo: gráfico da resistência ao deslizamento confinado versus tensão principal máxima para um produto específico;
- fluxo de funil: tipo de fluxo na tremonha ou no silo caracterizado pela ocorrência de fluxo confinado à uma região central acima da boca de descarga enquanto que o produto adjacente às paredes permanece estacionário;
- fluxo de massa: tipo de fluxo na tremonha ou no silo caracterizado pela ausência de zonas de produtos estacionários, isto é, todo o produto incluindo aquele adjacente à parede, está em movimento quando o silo é descarregado;
- JENIKE & JOHANSON (1979) - Instruções de operações do aparelho de fator de fluxo e da bancada de consolidação (Flow Factor Tester And Consolidating Bench Operating Instructions);
- pré-shear (pré-cisalhamento): formação de uma zona de cisalhamento no produto, com tensões normais e de cisalhamento em fluxo de estado estável;
- shear (cisalhamento): medição real das tensões de cisalhamento, com os valores dos níveis de tensões normais, para o deslizamento do produto;
- sobreconsolidação: um produto está sobreconsolidado em relação à tensão normal aplicada, quando o deslizamento é acompanhado por um aumento da densidade e a tensão aumenta diretamente até um máximo e depois diminui;

- SSTT - manual SSTT (STANDARD SHEAR TESTING TECHNIQUE), trabalho desenvolvido pela Federação Europeia de Engenharia Química WPMPS-1991 (WORKING PARTY THE MECHANICS OF PARTICULATE SOLIDS);
- subconsolidação: um produto está subconsolidado em relação à tensão normal aplicada, quando o deslizamento é acompanhado por um aumento da densidade e da tensão cisalhante;
- tensão principal: tensão normal atuando no plano onde não existe tensão de cisalhamento;
- TEYL - efetivo lugar geométrico com tempo de consolidação;
- TYL - lugar geométrico de deslizamento com tempo de consolidação: o lugar geométrico de um produto que permaneceu em repouso durante um certo tempo sob tensão normal;
- TSG 70-140 - manual da máquina (OPERATING INSTRUCTIONS FOR THE TRANSLATIONAL SHEAR TESTER TSG 70-140);
- WYL - lugar geométrico de deslizamento instantâneo com a parede: gráfico da tensão de cisalhamento com a parede pela tensão normal. É na maioria das vezes uma linha reta;
- YL (IYL) - lugar geométrico de deslizamento instantâneo do produto: curva da tensão de cisalhamento versus tensão normal;