

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

**ANÁLISE DE FLUXO DE RAÇÃO E FARELO DE TRIGO EM SILOS
PRISMÁTICOS INDUSTRIAIS**

IVANOSKA SALGADO DE ASSIS BANDEIRA

**Campina Grande - PB
dezembro - 1997**



B214a Bandeira, Ivanoska Salgado de Assis
 Análise de fluxo de ração e farelo de trigo em silos
 prismáticos industriais / Ivanoska Salgado de Assis
 Bandeira. - Campina Grande, 1997.
 71 f. : il.

 Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) -
 Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e
 Tecnologia.

 1. Farelo de Trigo - 2. Ração de Trigo - 3. Dissertação
 I. Nascimento, Jose Wallace Barbosa do, Dr. II.
 Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande (PB)

CDU 633.11(043)



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

PARECER FINAL DO JULGAMENTO DA DISSERTAÇÃO DA MESTRANDA

IVANOSKA SALGADO DE ASSIS BANDEIRA

Título: "Análise de Fluxo de Ração e Farelo de Trigo em Silos Prismáticos Industriais".

COMISSÃO EXAMINADORA

PARECER

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

APROVADO

Prof. Dr. Carlito Culil Júnior-Examinador

APROVADO

Prof. Dra. Maria Elita D. Braga-Examinador

Aprovada

DEDICATÓRIA

Ao meu esposo Tarcisio.

Aos meus filhos Breno, Arthur e Caio.

Aos meus pais Geraldo e Ivanil.

AGRADECIMENTOS

Ao Deus do meu coração, pela vida;

Ao Professor Dr. José Wallace Barbosa do Nascimento, pela orientação, dedicação e concessão de material bibliográfico;

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola;

Ao professor Francisco de Assis Santos e Silva, pelo apoio na análise estatística e concessão do software ASSISTAT;

Aos colegas do curso de pós-graduação, pela convivência e amizade, em especial Ana Costa Goldfarb e Hosaneide Farias Lima;

Ao colega João Rodrigues pela amizade e preciosa ajuda na elaboração do trabalho;

Ao Sr. Nelson José Araújo Barbosa pela confecção do modelo reduzido de silo prismático;

A Ênio pela colaboração na apresentação do trabalho;

À Indústria de ração GuarAVES, pelo fornecimento do produto utilizado nos ensaios;

Ao Laboratório de Madeira e Estrutura de Madeiras, da Escola de Engenharia de São Carlos, da USP, pelos ensaios realizados na máquina Jenike Shear Cell;

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (CAPES), pela bolsa concedida;

A todas as pessoas que contribuíram nesta minha caminhada.

IVANOSKA SALGADO DE ASSIS BANDEIRA

**ANÁLISE DE FLUXO DE RAÇÃO E FARELO DE TRIGO EM SILOS
PRISMÁTICOS INDUSTRIAIS**

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 Barbosa do Nascimento

**Campina Grande - PB
1997**

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABELAS.....	iii
LISTA DE QUADROS.....	v
LISTA DE SÍMBOLOS.....	vi
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	ix
RESUMO.....	x
ABSTRACT.....	xi
1 INTRODUÇÃO.....	01
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	04
2.1 Produtos - Ração Avícola e Farelo de Trigo.....	06
2.1.1 Generalidades.....	06
2.2 Fluxo.....	07
2.2.1 Análise Dimensional.....	11
2.3 Pressão.....	16
2.4 Propriedades Físicas.....	18
2.4.1 Granulometria.....	19
2.4.2 Densidade.....	20
2.4.3 Ângulo de Atrito Interno.....	20
2.4.4 Efetivo Ângulo de Atrito Interno.....	21
2.4.5 Ângulo de Atrito do Produto com a Parede.....	22
2.4.6 Função Fluxo (FF).....	22
2.4.7 Fator Fluxo da Tremonha (ff).....	23
2.4.7.1 Boca de Saída.....	24
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	25

3.1 Local dos Ensaios.....	25
3.2 Silo em Tamanho Reduzido.....	25
3.3 Produtos Utilizados.....	28
3.4 Determinação do Teor de Gordura.....	28
3.5 Metodologias para Determinação das Propriedades Físicas.....	29
3.5.1 Teor de Umidade.....	29
3.5.2 Granulometria.....	29
3.5.3 Metodologia para Determinação do Cisalhamento.....	30
3.5.3.1 Ensaio de Cisalhamento Instantâneo.....	32
3.5.3.2 Determinação do Ângulo de Atrito do Produto com a Parede....	33
3.5.3.3 Função Fluxo (FF).....	34
3.5.3.4 Fator Fluxo da Tremonha (ff).....	34
3.5.4 Densidade em Função da Consolidação.....	35
3.6 Determinação da Vazão Média de descarga.....	36
3.6.1 Análise Estatística.....	36
3.7 Análise de Fluxo.....	37
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	38
4.1 Teores de Umidade e Gordura.....	38
4.2 Granulometria.....	39
4.3 Propriedades Físicas.....	39
4.4 Vazão Média de Descarga.....	43
4.5 Análise de Fluxo.....	49
4.5.1 Produto - Ração 1.....	51
4.5.2 Produto - Ração 2.....	52
4.5.3 Produto - Farelo de Trigo.....	53
5 CONCLUSÕES.....	67
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	69

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 01 - Tipos de fluxo.....	09
FIGURA 02 - Determinação do tipo de fluxo (DIN 1055).....	10
FIGURA 03 - Tipos de obstruções do fluxo.....	11
FIGURA 04 - Modelo reduzido de silo utilizado por WANG <i>et al.</i> (1995)	13
FIGURA 05 - Lugar geométrico de deslizamentos e ângulos de atrito interno.....	22
FIGURA 06 - Função fluxo (FF) e fator fluxo (ff).....	24
FIGURA 07 - Corpo do silo prismático com conformação ziguezague e paredes em acrílico transparente.....	27
FIGURA 08 - Tremonha concêntrica de tronco piramidal em acrílico transparente.....	27
FIGURA 09 - Vista do aparelho de cisalhamento.....	31
FIGURA 10 - Vista do aparelho registrador de tensões.....	31
FIGURA 11 - Granulometria das rações e do farelo de trigo.....	40
FIGURA 12 - Função fluxo da ração 1 e fator fluxo da tremonha.....	42
FIGURA 13 - Função fluxo da ração 2 e fator fluxo da tremonha.....	43
FIGURA 14 - Formação de abóbada estável da ração 1 com a relação H/L igual a 1,76 e seção transversal da boca de saída 16cm ²	55
FIGURA 15 - Fluxo de massa da ração 1 para a relação H/L igual a 1,76 e seção transversal da boca de saída 64cm ²	56
FIGURA 16 - Fluxo de funil da ração 1 para a relação H/L igual a 3,5 e seção transversal da boca de saída 64cm ²	56

FIGURA 17 - Vista superior do efeito tubo da ração 1 para a relação H/L igual a 5,3 e seção transversal da boca de saída 64cm ²	57
FIGURA 18 - Vista inferior do efeito tubo da ração 1 para a relação H/L igual a 5,3 e seção transversal da boca de saída 64cm ²	57
FIGURA 19 - Formação do arco coesivo nas quatro superfícies da tremonha da ração 1 para a relação H/L igual a 5,3 e seção transversal da boca de saída 64cm ²	58
FIGURA 20 - Formação de abóbada estável da ração 2 para a relação H/L igual a 1,76 e seção transversal da boca de saída 16cm ²	59
FIGURA 21 - Fluxo de massa da ração 2 com H/L igual a 1,76 e seção transversal 64cm ²	60
FIGURA 22 - Fluxo de massa da ração 2 com H/L igual a 3,5 e seção transversal 64cm ²	60
FIGURA 23 - Fluxo de massa da ração 2 com H/L igual a 5,3 e seção transversal 64cm ²	61
FIGURA 24 - Fluxo de massa do farelo de trigo para a relação H/L igual a 1,76 e seção transversal 16cm ²	62
FIGURA 25 - Fluxo de massa do farelo de trigo para a relação H/L igual a 3,5 e seção transversal 16cm ²	63
FIGURA 26 - Fluxo de massa do farelo de trigo para a relação H/L igual a 5,3 e seção transversal 16cm ²	64
FIGURA 27 - Fluxo de massa do farelo de trigo para a relação H/L igual a 1,76 e seção transversal 64cm ²	65
FIGURA 28 - Fluxo de massa do farelo de trigo para a relação H/L igual a 3,5 e seção transversal 64cm ²	65
FIGURA 29 - Fluxo de massa do farelo de trigo para a relação H/L igual a 5,3 e seção transversal 64cm ²	66

LISTA DE TABELAS

TABELA 01 - Níveis de cargas utilizados nos ensaios de cisalhamento instantâneo	32
TABELA 02 - Valores dos teores de umidade e de gordura.....	38
TABELA 03 - Resultados da análise granulométrica.....	40
TABELA 04 - Propriedades físicas - densidade, ângulo de atrito interno, efetivo ângulo de atrito interno e ângulo de atrito do produto/parede.....	42
TABELA 05 - Vazão média de descarga para a relação H/L igual a 1,76.....	43
TABELA 06 - Vazão média de descarga para a relação H/L igual a 3,5	44
TABELA 07 - Vazão média de descarga para a relação H/L igual a 5,3	44
TABELA 08 - Análise de variância e coeficiente de variação dos ensaios da vazão média de descarga (kg/s).....	45
TABELA 09 - Valores médios da vazão média de descarga (kg/s) dos tratamentos.....	46
TABELA 10 - Valores médios da vazão média de descarga (kg/s) para a interação <i>teor de gordura x relação altura/lado</i>	47
TABELA 11 - Valores médios da vazão média de descarga (kg/s) para a interação <i>teor de gordura x seção transversal da boca de saída</i>	48
TABELA 12 - Valores médios da vazão média de descarga (kg/s) para a interação <i>relação altura/lado x seção transversal da boca de saída</i>	49
TABELA 13 - Tipo de fluxo para a relação H/L igual 1,76.....	50

TABELA 14 - Tipo de fluxo para a relação H/L igual 3,5.....	50
TABELA 15 - Tipo de fluxo para a relação H/L igual 5,3.....	50

LISTA DE QUADROS

QUADRO 01 - Problemas mais comuns nas indústrias.....	05
QUADRO 02 - Soluções encontradas para os problemas.....	05

LISTA DE SÍMBOLOS

B_m	- boca de saída mínima (m);
B_r	- peso da diferença dos balões em branco (g);
bs	- percentual de base seca (%);
bu	- percentual de base úmida (%);
C_1, C_2	- coeficientes;
D_p	- diâmetro das partículas (mm);
D_s	- diâmetro do silo (m);
d	- diâmetro do orifício (cm);
ff	- fator fluxo da tremonha;
FF	- função fluxo;
F_s	- força de cisalhamento;
F_v	- força vertical;
$F(\alpha)$	- coeficiente da equação (23)
g	- aceleração da gravidade (m/s^2);
$H(\alpha)$	- largura mínima da boca de saída para uma tremonha quadrada (m)
H/D	- relação altura/diâmetro;
H/L	- relação altura/lado;
IYL	- lugar geométrico de deslizamento;
$IWYL$	- lugar geométrico de deslizamento com a parede;
K	- relação entre as pressões horizontal e vertical;
m	- coeficiente da equação (23)
ÓLEO	- teor de óleo bruto (%);
P_{hc}	- pressão horizontal de carregamento;

P_{vc}	- pressão vertical de carregamento;
P_{wc}	- pressão de atrito por 1,0m de superfície de parede;
PA	- peso da amostra (g);
PS	- peso seco (soma do peso do balão com a quantidade de óleo extraído de uma amostra qualquer) (%);
Q	- taxa de fluxo (kg/s);
R	- raio hidráulico (m);
T	- peso do balão (g);
TU	- teor de umidade (%);
U	- tamanho do orifício (cm);
W_c	- peso total do pendural de cargas (daN);
Y	- coeficiente da equação (20)
YL	- lugar geométrico de deslizamento;
X	- coeficiente da equação (21)
z	- profundidade abaixo da superfície efetiva;
β_r	- ângulo de repouso (°);
γ	- densidade (kg/m^3);
γ_l	- densidade consolidada inferior (kg/m^3);
γ_u	- densidade consolidada superior (kg/m^3);
γ_p	- densidade da partícula (kg/m^3);
α	- ângulo da tremonha (°);
ϕ_e	- efetivo ângulo de atrito interno (°);
ϕ_{el}	- efetivo ângulo de atrito interno inferior (°);
ϕ_{eu}	- efetivo ângulo de atrito interno superior (°);
ϕ_i	- ângulo de atrito interno (°);
ϕ_{il}	- ângulo de atrito interno inferior (°);
ϕ_{iu}	- ângulo de atrito interno superior (°);
ϕ_w	- ângulo de atrito do produto/parede (°);
ϕ_{wu}	- ângulo de atrito do produto/parede superior (°);
λ	- fator de compressibilidade do sólido;
σ	- tensão normal (kPa);

- σ_c - resistência inconfínada (kPa);
- σ_1 - tensão principal máxima (kPa);
- θ - coeficiente da equação (22)
- μ - coeficiente de atrito do produto com a parede;
- τ - tensão de cisalhamento (kPa);

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
BMHB	- Norma Britânica para o cálculo de silos
CV	- Coeficiente de variação
DIN	- Norma Alemã para o cálculo de silos altos
DMS	- Diferença mínima significativa
E	- Fluxo expandido
EF	- Efeito tubo
EMBRAPA	- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
F	- Fluxo de funil
H/L1	- Relação altura/lado igual a 1,76
H/L2	- Relação altura/lado igual a 3,5
H/L3	- Relação altura/lado igual a 5,3
M	- Fluxo de massa
MG	- Média geral
SDA	- Superintendência de Desenvolvimento Agropecuário
ST	- Seção transversal da boca de saída do modelo
ST1	- Seção transversal da boca de saída do modelo 4 x 4cm
ST2	- Seção transversal da boca de saída do modelo 8 x 8cm
TG	- Teor de gordura
TG1	- Teor de gordura da ração 1
TG2	- Teor de gordura da ração 2
TG3	- Teor de gordura do farelo de trigo
USP	- Universidade de São Paulo

RESUMO

BANDEIRA, Ivanoska Salgado de Assis. **Análise de fluxo de ração e farelo de trigo em síos prismáticos industriais.** Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba, 1997. 71p. Tese Mestrado.

Visando analisar o comportamento do fluxo de ração avícola e farelo de trigo, foi confeccionado um modelo reduzido de silo prismático, com conformação zigzague, de acrílico transparente. O presente trabalho teve também como objetivos determinar a vazão média de fluxo dos produtos, bem como suas propriedades físicas: teor de umidade, granulometria, densidade consolidada, ângulo de atrito interno, efetivo ângulo de atrito interno, ângulo de atrito do produto com a parede, função fluxo e fator fluxo. Para obtenção dos resultados da análise de fluxo, foram feitas seqüências fotográficas do produto original intercalado por camadas do produto tingido de vermelho. Para a vazão média de descarga foi adotado o delineamento estatístico inteiramente casualizado, com arranjo fatorial $3 \times 3 \times 2$ (teor de gordura, relação altura/lado e seção transversal da boca de saída), com três repetições. Os resultados obtidos mostraram que o acréscimo do teor de gordura e a seção transversal da boca de saída do modelo influenciaram no tipo de fluxo dos produtos estudados.

Palavras-chave: fluxo; ração; farelo de trigo; modelo reduzido.

ABSTRACT

BANDEIRA, Ivanoska Salgado de Assis. Analysis of the flow of ration and wheat bran in industrial prismatic silos. Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba, 1997. 71p. Tese Mestrado.

With the aim of evaluate the behavior of the flow of the avian ration and wheat bran, it was made a reduced model of prismatic silos with a zigzag conformation of transparent material. The present work also had as objectives to determine the medium outflow of bulk solids, as well as their physical properties: humidity proportion, granulometry, consolidated density, angle of internal friction, effective angle of internal friction, kinetic angle of friction on a wall surface, flow function and flow factor. For the obtention of the results of the analysis, were made fotografic sequencies of the original product inserted by layers of bulk solids stained in red. For the medium flow of discharge it was adopted the statistical delineation entirely casualized with factorial arrangement $3 \times 3 \times 2$ (fat proportion, relation height/side and transversal section of the mouth of exit), with three repetitions. The obtained results showed that the increased fat proportion and the transversal section of the mouth of exit influenced in the kind of flow of the studied bulk solids.

Keywords: flow; ration; wheat bran; reduced model.

1 INTRODUÇÃO

O Brasil apresenta muitos problemas relacionados com o armazenamento de produtos agrícolas, principalmente pela carência de tecnologia de armazenagem, ocorrendo perdas irreparáveis.

A armazenagem de ração constitui um recurso de grande importância para empresas de processamento de produtos agrícolas. Do ponto de vista econômico, é justamente sobre o fator alimentação que recai a maior parcela dos significativos ônus da produção avícola, fazendo com que os benefícios finais da criação sejam sensíveis, conforme variem a eficiência das rações utilizadas, e mais especificamente, os custos de produção destas. Por isso, existe a preocupação das fábricas de rações em melhorar a eficiência desses produtos, adotando ou introduzindo tecnologia de fabricação ou construção de silos, cujo objetivo é utilizar o máximo da potencialidade dessas matérias-primas.

Atualmente o Brasil destaca-se no contexto mundial com a produção de frangos e suínos, ocupando a posição do principal exportador na América Latina. Esta produção depende essencialmente de ração industrializada; daí a importância do país possuir tecnologia de construção de silos para fábricas de ração (NASCIMENTO, 1996).

A construção de silos é um investimento compensador pelos reais benefícios que produz e quando o armazenamento destes produtos forem feitos com os devidos cuidados, será conservado o sabor e a qualidade da ração.

Os produtos agrícolas podem fermentar sob diversos teores de umidade e condições atmosféricas adquirindo resistência. Como a ração balanceada contém gordura na sua composição, sob condições de alto teor

de umidade e temperatura unirá as partículas formando uma massa de difícil fluxo.

Nos últimos anos, o setor de fabricação de ração tem dado ênfase à sua formulação, para que a mesma ofereça bom desempenho aos animais nas suas respectivas fases. Tem-se observado que o teor de gordura nessas está sendo incrementado a cada ano. Neste contexto, a determinação do teor de gordura da ração é de fundamental importância para projetar o tipo de fluxo durante a descarga. O conhecimento preciso do comportamento do fluxo é chave para dimensionar corretamente silos industriais para rações, permitindo um descarregamento uniforme, sem segregações, sem parada no processo industrial e desbalanceamento das rações, portanto, fluxo de massa.

Diferentes tipos de produtos são armazenados em silos para fábricas de ração: produtos granulares e produtos pulverulentos. Os silos são estruturas complexas de se projetar, sendo considerado uma das estruturas mais inseguras de construção (BENINK, 1989). Uma razão para a dificuldade em projetar silos é o limitado conhecimento que se tem sobre o comportamento das pressões e do fluxo dos produtos.

Tratando-se de instalações para o armazenamento de produtos pulverulentos, a pesquisa experimental sugere que cuidados especiais devem ser tomados no dimensionamento de silos, pois os mesmos apresentam problemas de fluxo.

Existem teorias que explicam os problemas de armazenamento de produtos pulverulentos coesivos, entretanto, na prática, os problemas de fluxo no descarregamento se apresentam em muitas instalações, ocasionando formação de abóbadas, fluxos de conduto e células sem descarregamento completo, tendo como consequência, dificuldade em conseguir uma quantidade desejável do produto num processo industrial de fabricação. Normalmente, quando um silo possui problemas, as causas são múltiplas e variadas, originando muitas vezes ruínas.

Devido ao grande número de indústrias no mundo que apresentam problemas de fluxo e o número limitado que dá importância ao equipamento

projetado e o conhecimento das propriedades físicas dos produtos pulverulentos, é evidente que o problema existe nos estágios de projeto e seleção de equipamentos.

Quando a teoria e a prática são deficientes, os modelos reduzidos de silos podem oferecer linhas de ações úteis para que os problemas destes produtos sejam entendidos.

Usualmente a escala não influencia no modelo de fluxo nos silos, o que torna possível realizar projetos práticos de silos de acordo com as mesmas regras para todos os tamanhos de silo, tornando-os mais baratos que o teste em escala real (ANDERSON & NIELSEN, 1986).

Este trabalho tem como objetivo principal analisar o comportamento do fluxo de ração avícola e do farelo de trigo, com teores de gordura diferentes, em modelo reduzido de silo prismático conformados em ziguezague.

Os objetivos específicos do presente trabalho foram:

- Determinar a vazão média de descarga para as relações altura/lado (H/L) iguais a 1,76, 3,5 e 5,3 ;
- Determinar as propriedades físicas das rações e do farelo de trigo, tais como:

- teor de umidade;
- granulometria;
- densidade em função da consolidação;
- ângulo de atrito interno;
- efetivo ângulo de atrito interno;
- ângulo de atrito do produto com a parede do silo;
- função fluxo;
- fator fluxo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Nos últimos anos, o aumento do custo de mão-de-obra e a competição entre produtores traz como consequência uma automatização de projetos de silos, que vão desde a recepção, armazenagem e expedição de todos os produtos a granel, chegando praticamente a eliminação da sacaria (RAVENET; 1975).

Este tipo de processo, no caso de produtos granulares está totalmente resolvido. Com relação a produtos pulverulentos o problema se complica, pois possuem uma granulometria muito pequena, apresentando a possibilidade de coesão.

Recentemente, JENIKE & JOHANSON (1995) conduziram uma pesquisa com o objetivo de avaliar os problemas nas indústrias causados pelas propriedades de fluxo dos produtos armazenados. Os setores industriais que submeteram-se ao levantamento foram: processamento químico, alimento, detergente, metais, minerais, farmacêutica e energia. A pesquisa consistiu em três partes: uma descrição geral dos produtos que estão sendo processados, as propriedades físicas dos produtos, armazenagem e práticas de seleção de equipamento.

Na primeira seção da pesquisa foi caracterizada a habilidade de processamento dos produtos e seus principais problemas, conforme mostra o Quadro 01.

Pode-se observar que foram listados mais de um problema e que os de fluxo eram iguais em todas as indústrias.

Uma pergunta chave da pesquisa, aos entrevistados, foi se a companhia onde trabalham faz testes preliminares das propriedades de fluxo

e 50% responderam afirmativamente. Entretanto, não identificaram que testes são realizados.

QUADRO 01 - Problemas mais comuns nas indústrias

80%	Arqueamento/Fluxo
45%	Explosões
35%	Segregação
35%	Taxa de fluxo limitada
30%	Inundação
10%	Falta de estrutura e equipamento

O Quadro 02 mostra o resumo da segunda etapa da pesquisa que procurou identificar como os problemas geralmente são resolvidos.

QUADRO 02 - Soluções encontradas para os problemas

60%	Equipamentos adaptados
45%	Sempre com problema
30%	São trocados
30%	São reparados
25%	Pede ao vendedor para resolver o problema

JENIKE & JOHANSON (1995) chegaram a conclusão que problemas de fluxo são freqüentemente resultado de uma atenção limitada dada as propriedades dos produtos antes da seleção do equipamento de descarga ou no projeto do silo por gravidade. Ao longo do tempo, instalar equipamento projetado adequadamente é certamente menos dispendioso que viver com problemas ou reparando/ trocando depois de tê-lo colocado na produção.

2.1 Produtos - Ração Avícola e Farelo de Trigo

2.1.1 Generalidades

Em decorrência da expansão do setor avícola nos últimos anos, verificou-se um expressivo aumento de produção de frangos, gerando com isso uma demanda maior de matérias-primas para a fabricação de ração. De uma maneira geral, a ração representa cerca de 70% do custo da produção avícola (SDA, 1981).

De acordo com PEIXOTO (1988), o desempenho de um animal é fruto da interação genótipo versus meio ambiente, dentre os quais a alimentação ocupa lugar de destaque.

TORRES (1987) define uma ração equilibrada ou balanceada como uma mistura de alimentos de composição variável que serve para satisfazer as necessidades da ave em todos os princípios nutritivos, sem falta nem excesso e os princípios nutritivos da ração são agrupados pelas suas propriedades semelhantes em: proteínas, hidrocarbonados, graxas, fibras, água, sais minerais, vitaminas e aditivos.

A quantidade de alimento que uma ave é capaz de consumir, ou precisa consumir diariamente, varia com diversos fatores, como sejam a idade, peso, sexo, constituição genética, valor energético da mistura, teor de aminoácidos essenciais, paladar da mistura, temperatura ambiente, etc.

DUTRA JÚNIOR (1991) *apud* LIMA (1994) afirma que nas rações, a energia representa o nutriente mais importante sendo o milho a principal fonte energética. As gorduras e óleos em rações para aves vêm sendo estudados há vários anos como fonte de energia.

Segundo TORRES (1987), a gordura da ração contribui para elevar seu valor energético, pois como fonte de energia vale quase 2,5 vezes o peso dos hidrocarbonatos. As gorduras são também um veículo para as vitaminas lipossolúveis e ajudam sua absorção, sua presença em pelo menos ao nível de 3 a 4% é sempre desejável, contribuindo para melhorar a aparência e a palatabilidade da ração.

O mesmo autor complementa que a adição de gordura às misturas para frangos de corte, com o objetivo de aumentar seu valor energético e, por consequência sua eficiência, é hoje uma prática comum nos Estados Unidos, onde há uma superprodução de gorduras.

Os cereais e seus subprodutos constituem 60 a 80% de uma mistura balanceada e são a principal fonte de energia. Um subproduto, como o farelo de trigo é um alimento de boa qualidade e muito consagrado na alimentação animal (MCDONALD *et al.* 1975; BATTERHAM & LEWIS, 1980; *apud* DESCHAMPS & PEIXOTO, 1986).

Para FURTADO *et al.* (1991), o farelo de trigo é um ótimo suplemento energético-protéico para bovinos de leite e de corte contendo 15% de proteína, é rico em fósforo, tem boa aceitação pelos animais e é de fácil conservação. Nas rações de suínos e aves constituem um ingrediente quase que obrigatório, pois quando utilizado em dosagens corretas, sempre contribui para melhorar a qualidade da ração.

Segundo PEIXOTO (1988), pesquisas realizadas em Pelotas mostraram que o limite da participação do farelo de trigo na ração para aves em crescimento é de 25%.

DESCHAMPS & PEIXOTO (1986) afirmam que o farelo de trigo apresenta elevado valor quando não constitui mais que 1/4 ou 1/3 da mistura concentrada.

2.2 Fluxo

O tipo de fluxo determina as características de descarga do produto, o tipo de segregação, a formação ou não de zonas de produto sem movimento e se o silo pode ser descarregado completamente (CALIL JÚNIOR, 1989).

Também determina a distribuição de pressões nas paredes do silo, na fundação, na integridade e no custo da construção. É necessário a determinação do tipo de fluxo na elaboração do projeto do silo ou quando

houver mudanças em sua estrutura e na manipulação dos produtos a serem armazenados.

De uma maneira geral, há dois tipos de fluxos bem definidos: fluxo de massa e fluxo de funil.

BENINK (1989) define o fluxo de massa como aquele em que todo o produto se põe em movimento ao abrir a boca de descarga do silo. E o fluxo de funil é caracterizado pelas regiões com produtos sem movimento, que pode se estender até o topo da superfície livre do produto ou pode tocar nas paredes em qualquer lugar do corpo do silo.

Numa célula com fluxc de massa o primeiro produto armazenado é o primeiro a sair; o fluxo é uniforme e bem controlado, conduz a uma vazão de descarga constante; não há segregações, perturbações ou separações de partículas, não há zonas de repouso no silo. Esse tipo de fluxo é o padrão ideal para produtos pulverulentos e deve ser usado, de preferência, sobretudo quando os produtos possuem características coesivas.

Para ROBERTS (1987), em geral, o fluxo de massa é usado para produtos que requerem controles de vazão, segregação de partículas e pouco tempo de armazenamento. Enquanto que, para o fluxo de funil, os produtos que exigem aqueles controles e podem ter um fluxo livre menor.

De acordo com CLANCY & EBNER (1994), existe o fluxo expandido que é uma combinação do fluxo de massa e do fluxo de funil. Esse tipo de fluxo não deve ser usado em projetos para estes produtos, pois caso funcione como fluxo de massa ocorrerá sobrepressões nas paredes dos silos provocando danos na sua estrutura. Os tipos de fluxo de produtos são mostrados na Figura 01.

Existem algumas regras gerais para a escolha do fluxo de massa ou fluxo de funil.

↳ Regras gerais para a escolha do fluxo de massa:

- a vazão de descarga é controlada sem indevidas flutuações;
- o tempo de armazenamento no silo não deve ser indevidamente prolongado;

- a segregação das partículas deve ser minimizada;
- o local disponível deve ser 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 para o fluxo de massa não forem muito importantes;
- os locais adequados ou altura forem limitados, ou antieconômicos;
- algumas flutuações na vazão de descarga, alguma segregação e tempo de armazenamento prolongado para o produto armazenado não causarem desvantagens;
- as saídas múltiplas forem necessárias;
- o produto for de fluxo livre, ou se também contiver partículas grandes, que possam compactar o produto em tremonhas com lados muito inclinados.

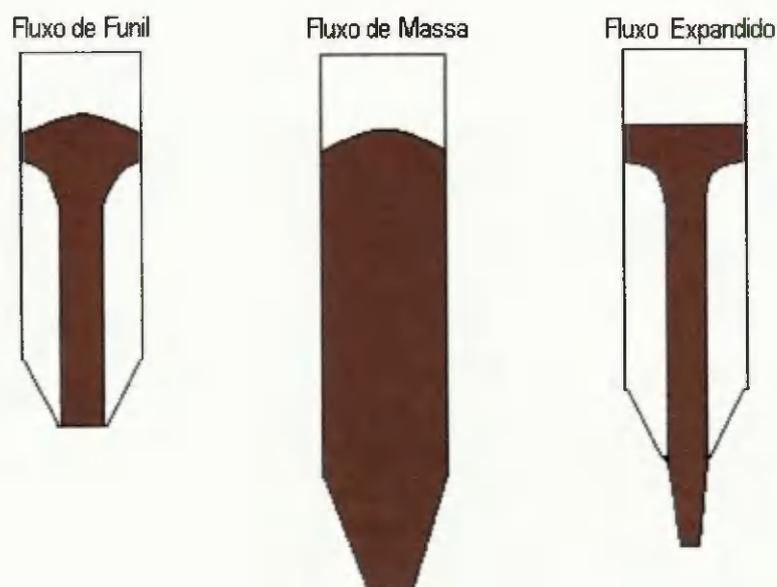


FIGURA 01 - Tipos de fluxo

Segundo NASCIMENTO (1996), o fluxo de massa requer sempre uma tremonha. E recomenda o método simplificado para determinar o ângulo de inclinação da tremonha utilizando o gráfico da Figura 02.

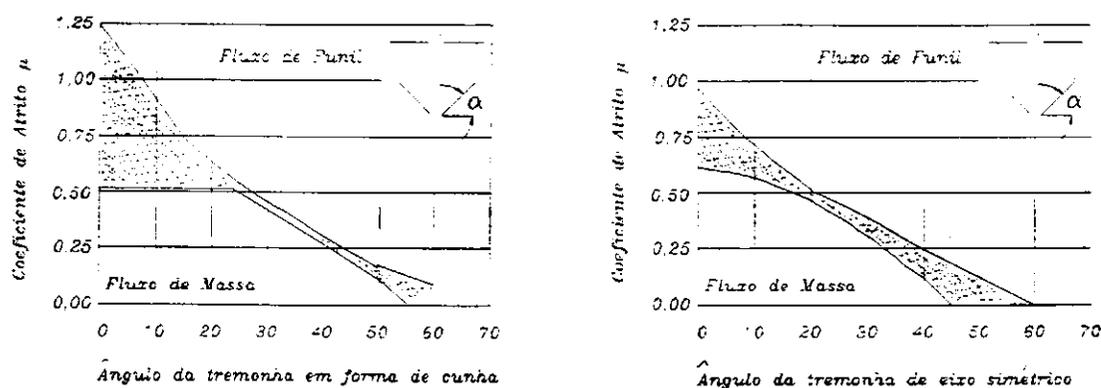


FIGURA 02 - Determinação do tipo de fluxo (DIN 1055)

Quando um silo já está construído e encontra-se com problemas durante o descarregamento, ocorrendo comportamentos instáveis de fluxo, são necessárias medidas como: fazer paredes da tremonha mais rugosas ou mais lisas; usar vibração ou outros métodos que possuam o efeito de reduzir o atrito da parede da tremonha.

CALIL JÚNIOR (1989) afirma que o objetivo no projeto de fluxo de massa é determinar o ângulo de inclinação da tremonha e a dimensão da boca de descarga, para prevenir a formação de arcos estáveis coesivos.

Quando se trata do projeto de silos para armazenamento com fluxo por gravidade, o objetivo desse projeto é garantir que o produto armazenado consiga fluir sem obstruções.

A boca de saída da tremonha deve ter dimensões suficientes para evitar a obstrução do fluxo devido a formação de arcos ou abóbadas (ARCHING), cúpulas (DOMING) e tubos estáveis (PIPING), (*apud* CALIL JÚNIOR *et al.* 1997).

São conhecidos dois tipos principais de obstrução de fluxo: arco coesivo ou abóbada estável e tubo, como mostra a Figura 03.

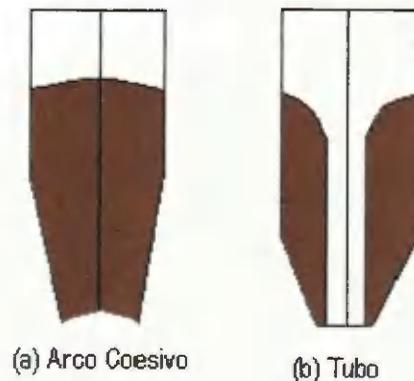


FIGURA 03 - Tipos de obstruções do fluxo

2.2.1 Análise Dimensional

Devido ao alto custo das instalações em escala real, os silos devem ser projetados corretamente antes de serem construídos. As correções de ensaios e erros após a construção de um silo são muito dispendiosas, principalmente quando a perda de produção é considerada (JOHANSON, 1969).

ANDERSON & NIELSEN (1986) afirmam que usualmente a escala influencia sobre a distribuição de pressão, mas para modelos de fluxo nos silos é considerada menos importante. Entretanto, os mesmos autores relatam que resultados recentes de testes com produtos que apresentam granulometria pequena revelaram grandes erros, mas pouca atenção tem sido dispensada com a intenção de verificar se a teoria é correta.

Segundo JOHANSON (1969), a escala ideal de modelo do produto teria algumas propriedades físicas constantes. E para o pesquisador existem condições para o estudo de modelo efetivo, tais como:

- se o objetivo do modelo é investigar os perfis de velocidade do produto em silos com fluxo de massa, o fator de compressibilidade do sólido (λ) não é importante. Como os silos com fluxo de massa não possuem regiões de não-fluxo e a estabilidade das regiões de não escoamento não

para prever números adimensionais básicos requeridos pela escala real (JOHANSEN, 1969).

WANG *et al.* (1995) construíram um silo de forma cilíndrica, com diâmetro de 304,8mm e 914,4mm de comprimento e diferentes configurações apresentando ângulos na base de 40°, 50° e 60° com relação à horizontal; abertura da boca de descarga de tamanho variado de 31,75mm, 63,5mm e 88,9mm; e o produto com teores de umidade de 10, 12 e 14%bu e diferentes tamanho de partículas. A finalidade do trabalho foi desenvolver um modelo matemático para prever a taxa de fluxo da farinha de soja usando análise dimensional.

O modelo reduzido de silo construído possuía como material um tubo de fibra de vidro e a tremonha cônica e concêntrica de aço galvanizado. A Figura 04 ilustra o modelo.

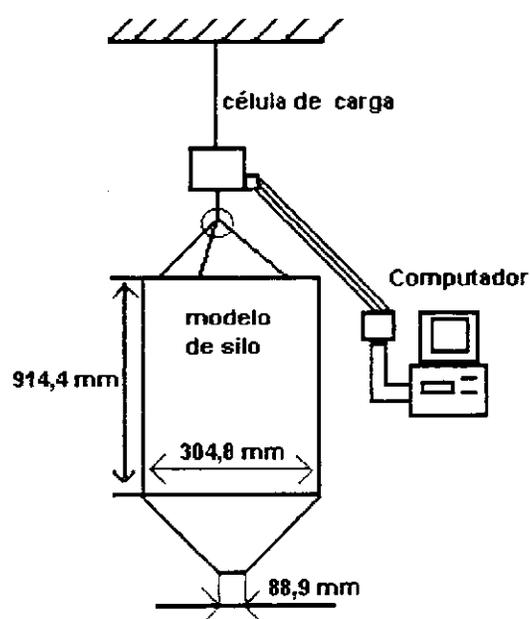


FIGURA 04 - Modelo reduzido de silo utilizado por WANG *et al.* (1995)

O modelo de silo foi suspenso sob uma célula de carga e, no momento de descarga do silo, a célula de carga detecta uma perda do

produto no silo testado. Um microcomputador equipado com um sistema de aquisição de dados fazia a leitura dos dados da célula carregada.

Desenvolvimento do modelo - O método Ralyleigh, *apud* WANG *et al.* (1995), foi usado para derivar a dimensionalidade do modelo sem fluxo. Considerando que a taxa de fluxo é função da densidade da partícula (γ_p), densidade de massa (γ), diâmetro do silo (D_s), diâmetro do orifício (d), ângulo da tremonha (α), ângulo de repouso (β_r) e aceleração da gravidade (g).

$$Q = Q(\gamma_p, \gamma, D_s, d, \alpha, \beta_r, g) \quad (02)$$

A dependência pode ser escrita como um produto pela separação das variáveis de acordo com:

$$Q = C_1 \cdot \gamma_p^{a_1} \gamma^{a_2} D_s^{a_3} d^{a_4} \alpha^{a_5} \beta_r^{a_6} \quad (03)$$

Escrevendo a equação (03) com as dimensões respectivamente substituídas para cada termo e substituindo o valor do logaritmo natural de cada:

$$\frac{Q}{\gamma d^{2.5} g^{0.5}} = C_1 \left(\frac{\gamma_p}{\gamma}\right)^{a_1} \left(\frac{D_s}{d}\right)^{a_3} \left(\frac{\alpha}{\beta_r}\right)^{a_5} \quad (04)$$

Na forma funcional:

$$\frac{Q}{\gamma d^{2.5} g^{0.5}} = Q\left(\frac{\gamma_p}{\gamma}, \frac{D_s}{d}, \frac{\alpha}{\beta_r}\right) \quad (05)$$

Com essa equação é possível começar a reduzir os dados:

$$\left(\frac{Q}{\gamma d^{2.5} g^{0.5}}\right)_1 = C_1 \left(\frac{\gamma_p}{\gamma}\right)_1^{a_1} \left(\frac{D_s}{d}\right)_1^{a_3} \left(\frac{\alpha}{\beta_r}\right)_1^{a_5} \quad (06)$$

e,

$$\left(\frac{Q}{\gamma d^{2.5} g^{0.5}}\right)_2 = C_1 \left(\frac{\gamma_p}{\gamma}\right)_2^{a_1} \left(\frac{D_s}{d}\right)_2^{a_3} \left(\frac{\alpha}{\beta_r}\right)_2^{a_5} \quad (07)$$

Dividindo a equação (06) pela equação (07), temos:

$$\frac{\left(\frac{Q}{\gamma_m d^{2.5} g^{0.5}}\right)_1}{\left(\frac{Q}{\gamma_m d^{2.5} g^{0.5}}\right)_2} = \left[\frac{\left(\frac{D_s}{d}\right)_1}{\left(\frac{D_s}{d}\right)_2}\right]^{a_3} \quad (08)$$

Aplicando o logaritmo natural da equação (07), encontra-se a expressão para a_3 :

$$a_3 = \frac{\ln \left[\left(\frac{Q}{\gamma_m d^{2.5} g^{0.5}} \right)_1 \div \left(\frac{Q}{\gamma_m d^{2.5} g^{0.5}} \right)_2 \right]}{\ln \left[\left(\frac{D_s}{d} \right)_1 \div \left(\frac{D_s}{d} \right)_2 \right]} \quad (09)$$

Adicionalmente, qualquer dos dados apontados dentro de um grupo pode ser usado para avaliar a_3 . O valor médio determinado foi $a_3 = -0,1778$, com um desvio padrão de 0,0321.

Segue que valores correspondentes são escolhidos nos grupos, como 1 e 4; 2 e 5; 6 e 9 ... por substituição, e dividindo o primeiro desses pelo segundo, então:

$$\frac{\left(\frac{Q}{\gamma_m d^{2.5} g^{0.5}} \right)}{\left(\frac{Q}{\gamma_m d^{2.5} g^{0.5}} \right)} = \frac{\left[\left(\frac{\alpha}{\beta_r} \right)_1 \right]^{a_3}}{\left[\left(\frac{\alpha}{\beta_r} \right)_4 \right]^{a_3}} \quad (10)$$

Similarmente, é determinado o valor médio de $a_5 = -0,2126$ com um desvio padrão de 0,0679.

Adotando que $C = C_1 (\gamma_p / \gamma_m)^{a_1}$ porque (γ_p / γ_m) é constante a uma dada temperatura. Adicionalmente,

$$\frac{Q}{\gamma_m d^{2.5} g^{0.5}} = C \left(\frac{D_s}{d} \right)^{-0.1778} \left(\frac{\alpha}{\beta_r} \right)^{0.2126} \quad (11)$$

$$C = \frac{Q}{\gamma_m d^{2.5} g^{0.5}} \left(\frac{D_s}{d} \right)^{0.1778} \left(\frac{\alpha}{\beta_r} \right)^{-0.2126} \quad (12)$$

O valor médio de $C = 0,7583$ foi obtido com um desvio padrão de 0,0552.

Então a equação (02) torna-se:

$$Q = 0,7583 \gamma_m d^{2.5} \sqrt{g} \left(\frac{D_s}{d} \right)^{0.1778} \left(\frac{\beta_r}{\alpha} \right)^{0.2126} \quad (13)$$

Com a unidade kg/s.

Os autores concluem que valores obtidos do modelo desenvolvido estão de acordo com os dados experimentais. O erro absoluto das previsões está na faixa de 0,025 a 0,067 kg/s para 12%, de 0,035 a 0,048 kg/s para 10% e de 0,028 a 0,044 kg/s para 14% das amostras. Este modelo prevê mais precisamente que o modelo de Fowler e Glastonbury, porém com a mesma precisão que o modelo Beverloo *et al.*

2.3 Pressão

Os inúmeros acidentes ocorridos em silos, com referência ao armazenamento de produtos pulverulentos coesivos, indicam, quase sempre, um desconhecimento das pressões nessas unidades, porque na realidade, ainda não foi possível comprovar a disponibilidade de teoria ou norma mundial segura para o cálculo de um silo destinado ao armazenamento desses produtos (CALIL JÚNIOR, 1987).

Para se conseguir um dimensionamento correto é necessário realizar ensaios em maquete para determinar o fluxo de descarga e as pressões de carga e descarga.

BENINK (1989) confirma que o conhecimento insuficiente que se tem sobre as pressões e do fluxo de produtos explica o grande número de silos com problemas de fluxo e com deformações nas paredes. Portanto, é necessário que o projetista esteja familiarizado com as pressões que ocorrem nas paredes do silo e do comportamento do fluxo do produto dentro do silo.

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

As normas internacionais existentes para a estimativa das ações em silos apoiam-se basicamente em duas teorias: a teoria de Janssen para a estimativa das pressões iniciais ou de carregamento no silo e a teoria de Jenike para o estudo de fluxo em silos com fluxo de massa e de funil.

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

Para o cálculo das pressões em silos altos, sugere-se a adoção da norma DIN 1055 (1987), 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).

A norma DIN 1055 (1987) apresenta como campo de aplicação:

- qualquer material de construção do silo;
- silos verticais cilíndricos e prismáticos;
- dimensões do silo: $H/D > 0,80$ e $P_{vc} / \gamma < 25m$;
- não é válida para produtos fortemente coesivos e produtos granulares que incham;
- o valor de K (relação entre as pressões horizontal e vertical) é definido pela expressão: $K = 1,2 (1 - \text{sen } \phi_i)$;
- as pressões de carregamento são dadas pelas expressões:

Pressão horizontal

$$P_{hc} = \frac{\gamma R}{\mu} \left(1 - e^{-\frac{\mu K}{R} z} \right) \quad (14)$$

Pressão vertical

$$P_{vc} = \frac{\gamma R}{\mu K} \left(1 - e^{-\frac{\mu K}{R} z} \right) \quad (15)$$

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

$$P_{wc} = \gamma R \left(1 - e^{-\frac{\mu K}{R} Z} \right) \quad (16)$$

2.4 Propriedades Físicas

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 realizadas visando o aumento de dados disponíveis aos engenheiros projetistas (BARRÊTO, 1997).

Segundo NASCIMENTO (1996), as propriedades físicas dos produtos armazenados são essenciais para o processamento dos sistemas de armazenagem durante o carregamento e o descarregamento. Segundo o mesmo autor, com os parâmetros conhecidos é possível a determinação e a predição das pressões que ocorrerão na estrutura e, principalmente os tipos de fluxo, muito importantes para o processamento e expedição da ração.

CALIL JÚNIOR (1985) afirma que, para a previsão de fluxo de instalações armazenadoras, é necessário conhecer as características do produto. Normalmente esses valores são adotados ou estimados, por motivo das deficiências das regulamentações brasileiras.

De acordo com CLANCY & EBNER (1994), existem muitos fatores que afetam as propriedades do produto, tais como: teor de umidade, temperatura, vazão de carregamento e tempo de armazenamento. Estes fatores podem apresentar variações importantes dos valores calculados.

Um projeto confiável de um silo pode ser possível se as propriedades do produto forem determinadas em ensaios com a máquina Jenike shear cell.

Segundo RAVENET (1981), na hora de executar o projeto de um silo, é muito importante realizar ensaios em laboratório com o produto e determinar fundamentalmente a densidade e o ângulo de atrito com a

parede, já que as tabelas existentes dão diferenças de até 70% ao aplicar as expressões que determinam as pressões nas paredes.

WANG *et al.* (1995) estudaram as características do fluxo por gravidade da farinha de soja, onde um modelo de silo cilíndrico foi construído em laboratório. Resultados mostraram que propriedades do produto, como teor de umidade e tamanho das partículas, têm efeitos significativos sobre o fluxo da farinha de soja. Amostras com baixo teor de umidade apresentam uma maior taxa de descarregamento, especialmente em boca de descarga de grande tamanho. Concluíram também que a farinha de soja original com o tamanho das partículas não uniformes tem uma maior taxa de descarregamento.

2.4.1 Granulometria

É fundamental a determinação da granulometria dos produtos armazenáveis para facilitar o dimensionamento da boca de descarga de um silo, uma vez que isto influenciará no tipo de fluxo.

CALIL JÚNIOR (1984) afirma que os resultados da granulometria mostram a relação da fluabilidade e a capacidade das partículas finas de formarem arcos, em comparação com o fluxo livre dos granulares.

Segundo RAVENET (1983), é necessário efetuar uma classificação das partículas de acordo com o tamanho e esta tem sido realizada por diversos autores e normas de vários países.

O pesquisador classifica as partículas nos seguintes tipos:

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

Dentro desse grupo pode existir a coesão.

- partículas extrafinas com dimensão inferior a 10microns.

Uma outra classificação dos produtos armazenados é feita por CALIL JÚNIOR (1984). *apud* BARRÊTO(1997), em função das dimensões do diâmetro (D_p) das partículas:

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

2.4.2 Densidade

A densidade de um produto necessita ser calculada, pois é um parâmetro importante para a determinação do fluxo e das pressões em silos (NASCIMENTO, 1996).

Segundo JENIKE (1964), a influência da compressibilidade de um produto (mudança de densidade com a pressão de consolidação) possui influência desprezível no processo de fluxo, entretanto, a densidade do produto necessita ser calculada.

2.4.3 Ângulo de Atrito Interno

As propriedades friccionais de produtos agrícolas são importantes no projeto de equipamentos para descarga de sólidos e de estruturas para armazenagem destes produtos.

O ângulo de atrito interno é o ângulo que o lugar geométrico instantâneo (YL) forma com a horizontal. Para YL convexo para cima, o ângulo de atrito interno diminui com o aumento da tensão de compressão.

Pesquisadores tentaram encontrar uma relação entre o ângulo de atrito interno e o ângulo de repouso (ângulo formado com a horizontal, na qual o produto permanecerá quando empilhado). Os resultados mostraram que os valores dos dois ângulos caminham quase que paralelos, mas não

existe uma relação simples que dê o valor do ângulo de atrito interno a partir do ângulo de repouso com precisão razoável (MOHSEININ, 1978).

2.4.4 Efetivo Ângulo de Atrito Interno

O efetivo ângulo de atrito interno é definido como o ângulo formado 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 e o inferior, usando esses 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 (NASCIMENTO, 1996).

Segundo MILANI (1993), através do lugar geométrico instantâneo, definido pela linha reta, são traçados dois semicírculos de Mohr para a determinação do ângulo de atrito interno e do efetivo:

- o primeiro é traçado passando pela origem e tangente ao lugar geométrico instantâneo (YL). O ponto máximo de interseção do círculo de Mohr com o eixo σ determina a resistência não confinada (f_c) do produto.
- o segundo é traçado passando através do ponto P (pré-shear) e tangente ao lugar geométrico instantâneo, sendo considerado só o círculo de Mohr com o ponto P situado à direita e coincidindo com o ponto de tangência (B).

O coeficiente angular do lugar geométrico instantâneo é o ângulo de atrito interno e a linha reta passando através da origem e do ponto de tangência (B) do círculo de Mohr de tensão principal máxima define o efetivo lugar geométrico (EYL). O coeficiente angular do efetivo lugar geométrico é o efetivo ângulo de atrito interno, como mostra a Figura 05 (MILANI, 1993).

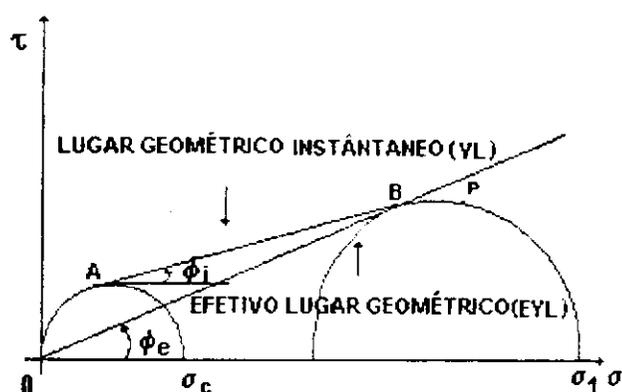


FIGURA 05 - Lugar geométrico de deslizamento e ângulos de atrito interno

2.4.5 Ângulo de Atrito do Produto com a Parede

A determinação do ângulo de atrito do produto com a parede é necessária, pois o tipo de fluxo que ocorrerá na célula durante a descarga depende dele.

As propriedades físicas do produto pulverulento atuam de forma direta sobre a parede do silo e dão origem a ângulos de atrito que variam entre valores máximos e mínimos. Outro fator que influencia esse ângulo de atrito é a rugosidade da parede do silo (RAVENET, 1983).

2.4.6 Função Fluxo (FF)

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

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

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

Segundo BARRÊTO (1997), a determinação da função fluxo é feita através do gráfico com os pontos de tensão máxima de consolidação, versus

resistência não confinada de deslizamento, tensões determinadas através dos lugares geométricos de deslizamento.

BOKHOVEN & LOHNES (1989) estudaram os efeitos da pré-consolidação sobre as características de escoamento da soja, onde foi utilizado o teste triaxial. Os resultados mostraram que a soja com o teor de umidade de 11.5% (bu) e 21°C não exibiu nenhuma coesão, no entanto, a coesão aumentou com o crescimento do teor de umidade e da tensão de consolidação.

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

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

2.4.7 Fator Fluxo da Tremonha (ff)

É a relação entre a pressão principal crítica de consolidação e a pressão crítica irrestrita de escoamento, determinada experimentalmente.

Estudiosos mostraram que numa dada tremonha, existe um fator fluxo e quando a curva da função fluxo encontra-se abaixo desta linha, a força do produto é suficiente para sustentar um arco e haverá obstrução no fluxo. Esta linha é chamada fator fluxo da tremonha e é denotada por ff. (MOHSEIN, 1978).

Enquanto a função fluxo depende apenas do produto, o fator fluxo da tremonha depende das propriedades físicas do produto armazenado e da geometria da tremonha.

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

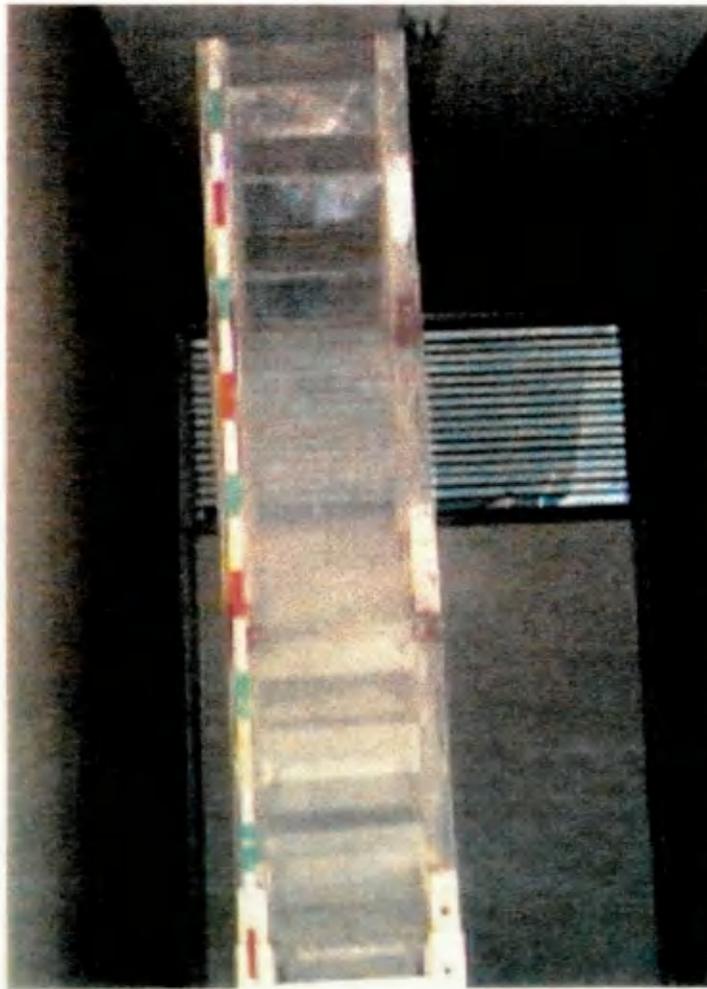


FIGURA 07 - Corpo do silo prismático com conformação em zig-zague e paredes em acrílico transparente

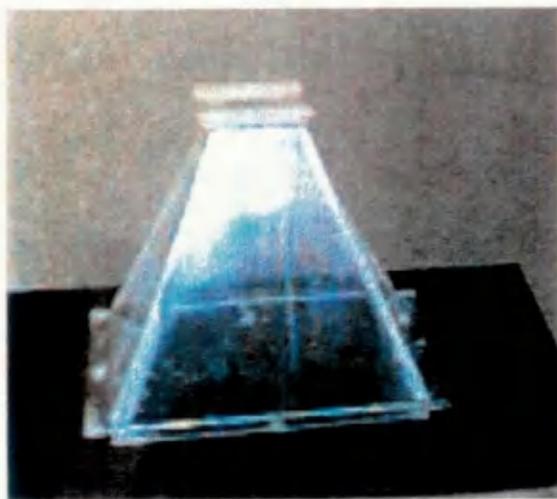


FIGURA 08 - Tremonha concêntrica de tronco piramidal em acrílico transparente

3.3 Produtos Utilizados

Os produtos utilizados foram o farelo de trigo e dois tipos de rações para aves.

O farelo de trigo foi adquirido no comércio local.

Foi utilizado o farelo de trigo por ser um alimento animal que encontra aplicação generalizada e peculiar para todas as espécies, e como um dos componentes de rações para frangos, tendo em vista o seu elevado teor de fibra e conseqüente baixo valor energético. Apresenta também como características: baixa densidade e baixo teor de gordura.

As rações utilizadas foram fornecidas pela fábrica GUARABIRA AVES LTDA (GuarAves), situada no município de Guarabira - PB.

Cada produto apresenta diferentes teores de gordura, que são usados pela fábrica na composição das rações, em função da idade da ave e do tipo de exploração, corte ou postura.

3.4 Determinação do Teor de Gordura

Para a determinação do teor de gordura a EMBRAPA-Algodão adota a metodologia de RANDALL (1974). Este método consiste em pesar 2g de cada amostra e transferir cartuchos de extração. Após preparação da prova em branco, coloca-se os cartuchos dentro dos balões de extração, previamente lavados, adicionando-se 50ml de éter de petróleo. Após aquecimento de 15 minutos em ebulição, suspende-se os cartuchos durante 30 minutos. Retira-se os balões, colocando-os em banho-maria até evaporar o éter. Posteriormente, coloca-se na estufa durante 2 horas e em seguida no dissecador por 30 minutos.

O teor de óleo é calculado através da seguinte equação:

$$OLEO(\%) = \frac{[(PS - T) - Br]}{PA} \times 100 \quad (18)$$

3.5 Metodologias para Determinação das Propriedades Físicas

3.5.1 Teor de Umidade

Determinou-se o teor de umidade para o farelo de trigo e cada tipo de ração, com o objetivo de avaliar a influência destes no fluxo.

Realizou-se a determinação do teor de umidade pelo método oficial da estufa a 105°C, com uma variação de até $\pm 3^\circ\text{C}$, durante 24 horas, efetuando-se três repetições. A metodologia de ensaio consiste em pesar amostras, de aproximadamente 20g, acondicionando-se em recipientes de alumínio, previamente taradas e em seguida, pesando-se através de balança digital com precisão de 0,001g para obter-se o peso úmido (Pu). Após o tempo de exposição na estufa, retira-se o produto, resfria-se em dissecador e novamente pesa-se, obtendo-se assim o peso final (Ps).

Com os valores iniciais do peso úmido (Pu) e finais do peso seco (Ps) das amostras, calcula-se os teores de umidade através da seguinte expressão:

$$TU(\%) = \frac{Pu - Ps}{Ps} \times 100 \quad (19)$$

3.5.2 Granulometria

Realizou-se a classificação granulométrica em função das dimensões das partículas, utilizando-se o método de peneiramento.

As peneiras usadas segundo a (ABNT) apresentam as dimensões: 10, 16, 30, 35, 40, 50, 60 e 100.

O método do peneiramento tem por objetivo retirar uma amostra do produto, previamente pesada com aproximadamente 200g, em seguida, passadas por um jogo de peneiras e colocadas no agitador elétrico marca RETSCH em um tempo determinado de 10 minutos, com uma velocidade

adequada de 80rpm. Após o peneiramento, pesa-se os produtos retidos em cada peneira e determina-se a granulometria.

3.5.3 Metodologia para Determinação do Cisalhamento

A determinação das propriedades físicas dos produtos armazenados depende do conhecimento dos lugares geométricos de deslizamento, determinados pela relação entre a tensão de cisalhamento e a tensão normal do produto armazenado, avaliando-se como desliza em relação a si próprio e com o material da parede do silo. Esta informação é obtida de testes em laboratórios usando células especiais de cisalhamento desenvolvidas para produtos armazenados. Através deste equipamento, pode ser determinada a tensão sob armazenamento e, as condições de fluxo que podem ocorrer nos silos destinados ao armazenamento e expedição de ração.

A máquina utilizada para o ensaio de cisalhamento (TRANSLATION SHEAR TESTER TSG 70-140) foi construída com base no aparelho de cisalhamento de Jenike (JENIKE SHEAR CELL), recomendada pela maioria das normas existentes no mundo. A máquina é constituída de duas partes principais:

- aparelho de cisalhamento (Figura 09);
- aparelho registrador de tensões (Figura 10).

A metodologia utilizada no ensaio de cisalhamento para determinação das propriedades físicas foi a proposta por MILANI (1993).

As propriedades físicas determinadas foram: densidade em função da consolidação, ângulo de atrito interno, efetivo ângulo de atrito interno, ângulo de atrito do produto com a parede do silo, função fluxo e fator fluxo.

Foi selecionada a célula de cisalhamento de tamanho I com 70cm² de área de seção transversal e em alumínio.

Os níveis de cargas normais utilizados foram 10kgf, 7kgf e 5kgf, baseados em resultados obtidos por MILANI (1993), e são mostrados na Tabela 01.

De acordo com ARNOLD *et al.* (1987), a função fluxo (FF) e o fator fluxo (ff), como é mostrado na Figura 06, apresenta o critério Fluxo e Não Fluxo.

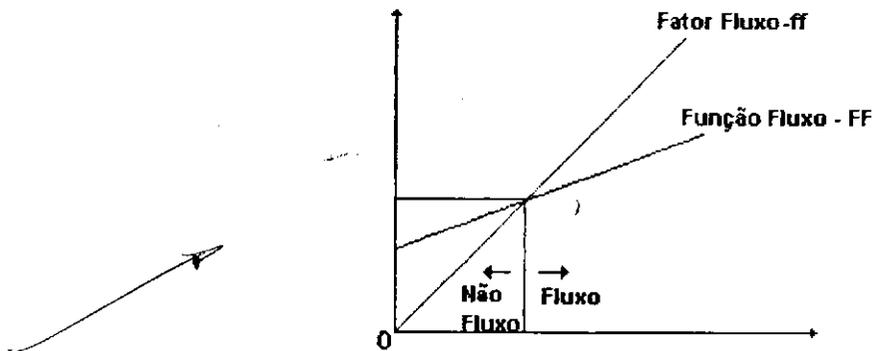


FIGURA 06 - Função fluxo (FF) e fator fluxo (ff)

2.4.7.1 Boca de Saída

Segundo CALIL JÚNIOR *et al.* (1997), a seção transversal adotada para o corpo do silo é a primeira referência para a escolha da seção transversal da tremonha. Posteriormente, define-se o ângulo de inclinação da parede com a horizontal e as dimensões da boca de saída.

De acordo com a BMHB (1985) e ROBERTS & OOMS (1987), a dimensão mínima da boca de saída de um silo para fluxo de massa é dada por:

$$B_m = \frac{H(\alpha)\sigma_c}{\gamma g} \quad (17)$$

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Local dos Ensaiois

A análise do comportamento do fluxo dos produtos, a determinação da vazão média de descarga e a granulometria foram desenvolvidas no Laboratório de Construções Rurais e Ambiência - LaCRA, Departamento de Engenharia Agrícola, do Centro de Ciências e Tecnologia, da Universidade Federal da Paraíba.

Os testes de determinação dos teores de umidade e de gordura foram realizados no Laboratório de Processamento e Armazenamento de Produtos Agrícolas, Departamento de Engenharia Agrícola - Campus II e no Centro Nacional de Pesquisa de Algodão (CNPQ/EMBRAPA - Algodão), em Campina Grande - PB, respectivamente.

Os ensaios da determinação das propriedades físicas dos produtos, como: ângulo de atrito interno, efetivo ângulo de atrito interno, ângulo de atrito do produto com a parede, densidade em função da consolidação, função fluxo e fator fluxo foram realizadas no Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeiras (LaMEM), Departamento de Engenharia de Estruturas, da Escola de Engenharia de São Carlos, pertencente a Universidade de São Paulo.

3.2 Silo em Tamanho Reduzido

Para analisar o comportamento do fluxo de ração e farelo de trigo, foi confeccionado um modelo reduzido de silo.

O material utilizado para a construção do modelo foi um plástico transparente (acrílico), com 1,7mm de espessura.

O silo prismático foi confeccionado com seção transversal quadrada, com 34cm de lado, em três módulos de 60cm de altura, isto é, a altura total do corpo do silo é de 180cm, como mostra a Figura 07. A altura das colunas de sustentação do silo foi de 110cm, perfazendo uma altura total do modelo de 290cm.

As dimensões utilizadas no modelo reduzido de silo prismático, foram em função do aproveitamento da chapa de acrílico fabricada nas indústrias (100cm de largura x 200cm de comprimento). Após a colagem da chapa nas colunas de sustentação e o dobramento da mesma em função do comprimento o modelo adquiriu as dimensões citadas acima.

As paredes dos módulos foram conformadas no sentido horizontal em forma de ziguezague, com uma inclinação de 70°. Esse tipo de conformação é utilizado em silos para armazenamento de produtos pulverulentos coesivos.

Segundo RAVENET (1983), as células quadradas que são construídas com o perfil em forma de ziguezague com inclinação 70°, permite um perfeito deslizamento dos produtos pulverulentos durante a descarga, e por outro lado, evita as pressões sobre o fundo que ocorreriam com células de chapa lisa.

A tremonha foi construída com o mesmo material das paredes do modelo e com uma inclinação de 70° com a horizontal, como mostra a Figura 08.

Para a seção transversal da boca de saída do modelo, foram dimensionadas duas áreas: 16cm² e 64cm². No cálculo das seções transversais foi utilizado o software apresentado na tese de doutorado de BENINK (1989), levando em consideração que o programa aplica-se para produtos granulares.

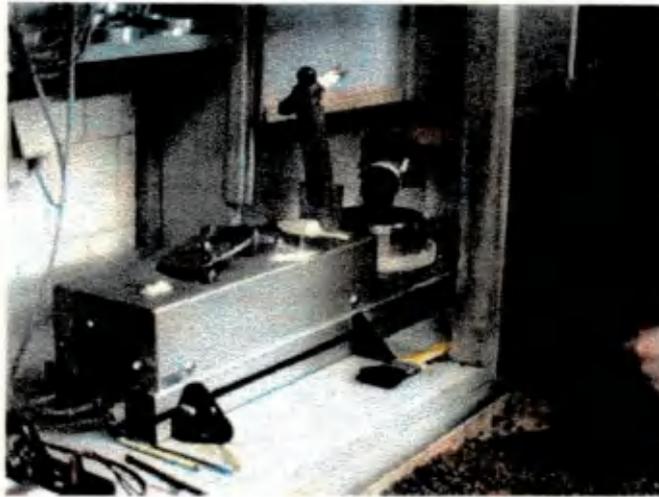


FIGURA 09 – Vista do aparelho de cisalhamento

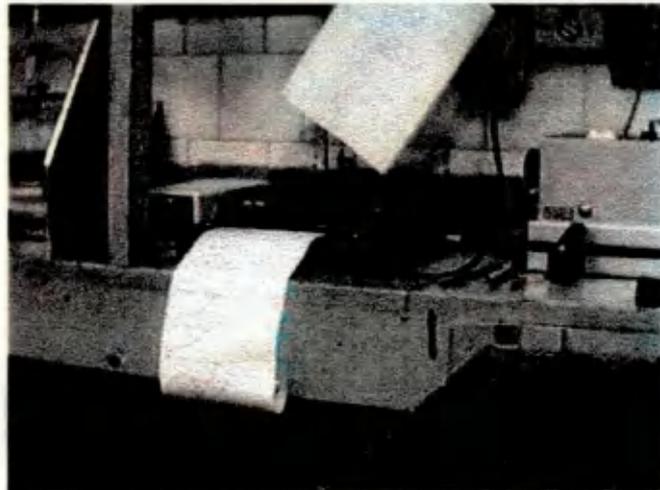


FIGURA 10 – Vista do aparelho registrador de tensões

TABELA 01 - Níveis de cargas utilizados nos ensaios de cisalhamento instantâneo

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

3.5.3.1 Ensaio de Cisalhamento Instantâneo

No ensaio de cisalhamento instantâneo, o produto a ser armazenado é conduzido à uma condição de deformação estável sob pressão normal pré-definida num plano de cisalhamento, ocorrendo em dois estágios conhecidos como: rotador e pré-shear.

No primeiro estágio, o produto é rotado em célula de cisalhamento sob pressão com o objetivo de preparar amostra uniforme. No segundo estágio, uma camada do produto através da área total da célula de cisalhamento é forçada a deformar sob pressão e tensão cisalhante até que uma força de cisalhamento estável ou quase aproximada é alcançada. Um processo de otimização é usado para determinar as pressões mais adequadas de rotações. Algumas vezes, uma seqüência de diminuição das pressões de pré-shear é também necessária.

Esse tipo de ensaio seguiu a seguinte metodologia:

- a) inicialmente, coloca-se o anel de cisalhamento em cima da base na posição off-set, através de uma pressão suave do anel com os dedos contra o parafuso fixo;

- b) coloca-se o anel molde sobre o anel de cisalhamento e preenche a célula teste com o produto e em seguida retira-se o excesso e nivela-se com o topo do anel molde;
- c) põe-se a tampa de operação de rotações sobre a superfície do produto e aplica-se uma força vertical (F_v) por meio de um pendural de pesos de peso total (W_c);
- d) em seguida, remove-se o pendural com as cargas, a tampa de operação de rotações e o anel molde;
- e) raspa-se e nivela-se o produto novamente com o topo do anel de cisalhamento;
- f) aplica-se a força horizontal ao suporte por uma haste de medida, acionada mecanicamente;
- g) fixa-se a haste a um sistema de forças e através de um transdutor mede-se a força de cisalhamento F_s .

Segundo MILANI (1993), durante a operação de cisalhamento, o anel de cisalhamento move-se da posição off-set inicial para a posição off-set final. 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.

3.5.3.2 Determinação do Ângulo de Atrito do Produto com a Parede

Os ângulos de atrito com a parede são determinados nas mesmas células de cisalhamento usadas para a determinação do IYL, pela remoção do fundo da célula, e instalando neste local um fundo do mesmo material da parede a ser testada, no caso o acrílico. Determina-se o IYL da parede para uma variedade de pressões de consolidação que irão atuar nas paredes do sílo.

As etapas para a determinação do ângulo de atrito dos produtos com a parede consistem nas seguintes:

- a) coloca-se as cargas normais, selecionadas de acordo com a citação anterior, sobre o pendural de pesos de modo que possam ser removidas;
- b) põe-se o pendural de pesos sobre a tampa de cisalhamento, posicionada sobre a superfície nivelada do anel de cisalhamento;
- c) antes de ligar o motor que aciona a haste de força, levanta-se levemente e manualmente o anel de cisalhamento da amostra do material da parede;
- d) inicia-se a operação de cisalhamento com vários níveis de cargas normais;
- e) no final de cada teste, pesa-se a amostra do produto e prepara-a novamente para os testes seguintes.

Para os produtos estudados foram determinados de 2 a 4 lugares geométricos de deslizamento com a parede (IWYL) com vários níveis de cargas normais. 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 registrado e novamente a carga foi reduzida.

3.5.3.3 Função Fluxo (FF)

A determinação da função fluxo foi feita plotando-se os pontos da tensão máxima de consolidação, versus resistência não confinada de deslizamento, que são determinadas através dos lugares geométricos de deslizamento (IYL).

3.5.3.4 Fator Fluxo da Tremonha (ff)

O fator fluxo é uma função da forma da tremonha e das propriedades dos produtos armazenados e foi determinado com boa aproximação pela seguinte equação da Norma Britânica (BMHB, 1985):

$$ff = \frac{\gamma(1 + \text{sen } \phi_{cu})}{2(X - 1)F(\alpha)\cos(\alpha)} \quad (20)$$

$$Y = \frac{[2(1 - \cos\theta)]^m \theta^{1-m} \cos\alpha + \text{sen } \beta(\text{sen } \theta)^{1+m}}{(1 - \text{sen } \phi_{cu})(\text{sen } \theta)^{2+m}} \quad (21)$$

$$X = \frac{2^m \text{sen } \phi_{cu} \left(\frac{\text{sen}(\beta + \theta)}{\cos\alpha} + 1 \right)}{1 - \text{sen } \phi_{cu}} \quad (22)$$

$$\theta = \beta + 90 - \alpha \quad (23)$$

$$F(\alpha) = \left(\frac{65}{220 - \alpha} \right)^m \left(\frac{200}{290 - \alpha} \right)^{1-m} \quad (24)$$

$$2\beta = \phi_{wu} + \text{sen}^{-1} \left(\frac{\text{sen } \phi_{wu}}{\text{sen } \phi_{cu}} \right) \quad (25)$$

Onde: $m = 1$ para silo com eixo simétrico;
 $m = 0$ para silo retangular com $L \geq 3d$

3.5.4 Densidade em Função da Consolidação

O método utilizado para determinação da densidade do produto em função da consolidação consistiu em pesar o conjunto (célula + produto) após o ensaio de cisalhamento, e em seguida, subtrair o peso da célula e dividir por seu volume.

3.6 Determinação da Vazão Média de Descarga

As vazões das rações e do farelo de trigo foram determinadas em função das seguintes relações altura/lado: 1,76, 3,5 e 5,3.

Inicialmente, o silo foi pesado e após o carregamento do modelo, de maneira manual, uniforme e com uma altura pré-definida, nova pesagem foi realizada. Em seguida, inicia-se a descarga e o tempo foi cronometrado.

3.6.1 Análise Estatística

A análise estatística dos dados da vazão média de descarga, foi realizada utilizando-se o delineamento inteiramente casualizado em esquema fatorial $3 \times 3 \times 2$ com três repetições. Os fatores foram representados pelas combinações:

a) Teor de gordura do produto

TG1 = Teor de gordura da Ração 1

TG2 = Teor de gordura da Ração 2

TG3 = Teor de gordura do Farelo de trigo

b) Relação altura/lado do modelo reduzido

H/L1 = Relação altura/lado igual a 1,76

H/L2 = Relação altura/lado igual a 3,5

H/L3 = Relação altura/lado igual a 5,3

c) Seção transversal da boca de saída do modelo reduzido

ST1 = Seção transversal da boca de saída igual a 16cm^2

ST2 = Seção transversal da boca de saída igual a 64cm^2

A partir da tabulação dos dados, utilizou-se o software ASSISTAT desenvolvido por SILVA (1996), do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal da Paraíba, para obtenção da análise estatística.

3.7 Análise do Fluxo

O fluxo foi analisado através de seqüências fotográficas, onde o modelo reduzido foi carregado com o produto original intercalado por camadas sucessivas do produto tingido com cores diferentes. A finalidade das camadas foi uma melhor visualização do escoamento do produto após a abertura da boca de descarga.

Foram utilizadas as relações altura/lado 1,76, 3,5 e 5,3 para cada produto.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Teores de Umidade e Gordura

Os resultados das determinações dos teores de umidade e de gordura dos produtos encontram-se na Tabela 02. Observa-se que para cada produto existe uma relação de proporcionalidade entre os valores dos teores, ou seja, a ração 1 apresenta o maior percentual de umidade e de gordura do que a ração 2, e esta por sua vez apresenta valores maiores que o farelo de trigo.

TABELA 02 - Valores dos teores de umidade e de gordura

Produto	Teor de umidade (%)	Teor de gordura (%)
ração 1	11,51	7,11
ração 2	10,50	5,53
farelo de trigo	9,80	2,65

As rações utilizadas nesta pesquisa são comercializadas pela empresa Guaraves S.A e fornecidas para frangos na fase final e inicial, respectivamente. Por este motivo, apresentam teores de umidade e de gordura diferentes.

O farelo de trigo é usado como alimento suplementar de animais, e na fabricação de rações para aves pode ser utilizado com ingrediente e é facilmente encontrado no comércio.

De acordo com TORRES (1987), a proporção de gordura nas rações é em média de 2,5 a 6%, porém não deve ultrapassar a 10%, embora não se

tenha determinado ainda esse limite com a devida precisão. Com relação ao teor de umidade, o autor afirma que os subprodutos industriais de boa origem, como as farinhas de carne, farelos, tortas e outros contém de 5 a 10%.

4.2 Granulometria

Os dados relativos à análise granulométrica dos produtos são apresentados na Tabela 03 e na Figura 11.

Verifica-se que todos os produtos tiveram os maiores percentuais retidos na peneira de malha 0,59mm e apresentaram um valor superior a 60% de produto retido em peneira de malha entre $0,297 \leq D_p \leq 0,59\text{mm}$.

De acordo com a classificação de RAVENET (1983), as partículas das rações e do farelo de trigo encontram-se compreendidas entre 5mm e 100microns e são denominadas partículas finas.

Segundo critério de classificação de produtos armazenáveis proposto por CALIL JÚNIOR (1984), os produtos estudados são pulverulentos e/ou pulverulentos coesivos, pois encontram-se com um percentual significativo no intervalo de $0,297 \leq D_p < 1\text{mm}$.

A ração 2 foi o produto que apresentou as menores partículas, tendo retido um percentual de 21,05% em malha inferior ou igual a 0,250mm.

De acordo com NASCIMENTO (1996), a ração industrializada com alto teor de gorduras vegetais, em média de 6%, dificulta a classificação granulométrica, pois quando peneiradas formam pequenas esferas mascarando o resultado.

4.3 Propriedades Físicas

As principais propriedades físicas utilizadas para determinações das ações nas paredes e no tipo de fluxo em silos são: ângulo de atrito interno, efetivo ângulo de atrito interno, densidade em função da consolidação, função fluxo do produto e ângulo de atrito produto/parede.

TABELA 03 - Resultados da análise granulométrica

N° ABNT	Peneira		Produto		
	Malha (mm)	Ração 1 (%)	Ração 2 (%)	Farelo de trigo (%)	
10	2,000	2,96	1,80	3,53	
16	1,190	18,32	13,70	16,67	
30	0,590	42,20	40,95	36,92	
35	0,500	6,98	7,55	11,38	
40	0,420	7,79	7,75	9,32	
50	0,297	7,13	7,20	8,92	
60	0,250	9,27	7,75	4,03	
100	0,149	4,25	10,80	8,32	

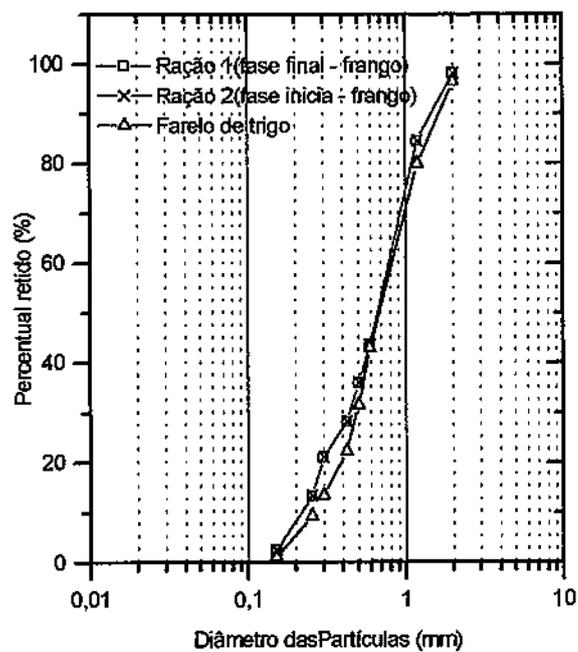


FIGURA 11 - Granulometria das rações e do farelo de trigo

Examinando os resultados da densidade a partir dos ensaios de cisalhamento, verifica-se que o produto que apresentou maior valor foi a ração 1, seguida da ração 2. Apesar da densidade do farelo de trigo ter sido determinada seguindo a metodologia da não compactação do produto, foi perfeitamente constatado que o farelo de trigo é o produto menos denso.

Seguindo a metodologia de MILANI (1993), não foi possível determinar algumas propriedades físicas do farelo de trigo como: ângulo de atrito interno, efetivo ângulo de atrito interno, função fluxo e fator fluxo. O farelo de trigo é um produto que apresenta compressibilidade muito alta e a maior dificuldade ocorre quando se varia a carga normal na célula e não se obtém a estabilização no cisalhamento. De acordo com JENIKE & JOHANSON (1979), produtos com essa característica são considerados de fluxo livre.

No caso das rações, os ângulos determinados apresentaram pouca diferenciação, com uma variação máxima de 5°.

Como regra geral, deve-se utilizar os dois limites das propriedades determinadas para o dimensionamento de silos, sendo o superior para o projeto de fluxo e o inferior para o projeto das ações (NASCIMENTO, 1996).

Com os resultados do ângulo de atrito interno do produto/parede, efetivo ângulo de atrito interno superior e utilizando a equação da BMHB (1985) foi calculado o valor do fator fluxo da tremonha (ff). As Figuras 12 e 13 mostram o fator fluxo da tremonha e a função fluxo das rações.

Observando a Figura 12, constata-se que o fator fluxo da tremonha está acima da função fluxo da ração 1 e não intercepta a mesma. Com esse resultado, o gráfico indica que há fluxo da ração, mas a análise não determina a dimensão mínima da boca de descarga do silo pela equação recomendada pela BMHB. Neste caso, a seção transversal da boca de saída pode ser determinada por outros parâmetros como a dimensão das partículas.

No caso da ração 2, a Figura 13 mostra que o fator fluxo intercepta a função fluxo, sendo neste ponto determinada a tensão crítica. Com esse

valor, a dimensão mínima da boca de saída pôde ser determinada utilizando a expressão fornecida pela BMHB (1985).

A Tabela 04 mostra os resultados das propriedades físicas dos produtos.

TABELA 04 - Propriedades físicas - densidade, ângulo de atrito interno, efetivo ângulo de atrito interno e ângulo de atrito do produto/parede

Produto	Densidade		Ângulo de atrito interno		Efetivo ângulo de atrito interno		Ângulo de atrito produto/parede (ϕ_w)
	(kg/m ³)		(ϕ_i)		(ϕ_e)		
	γ_i	γ_u	ϕ_{i1}	ϕ_{i2}	ϕ_{e1}	ϕ_{e2}	
ração 1	718	734	41	44	36	48	16
ração 2	706	714	40	42	39	43	13
farelo de trigo	242*		-		-		13

* Densidade inconfineda do farelo de trigo

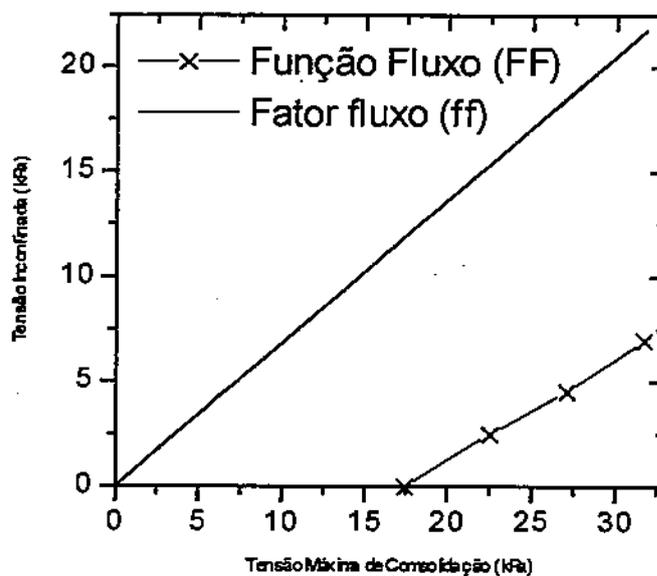


FIGURA 12 - Função fluxo da ração 1 e fator fluxo da tremonha

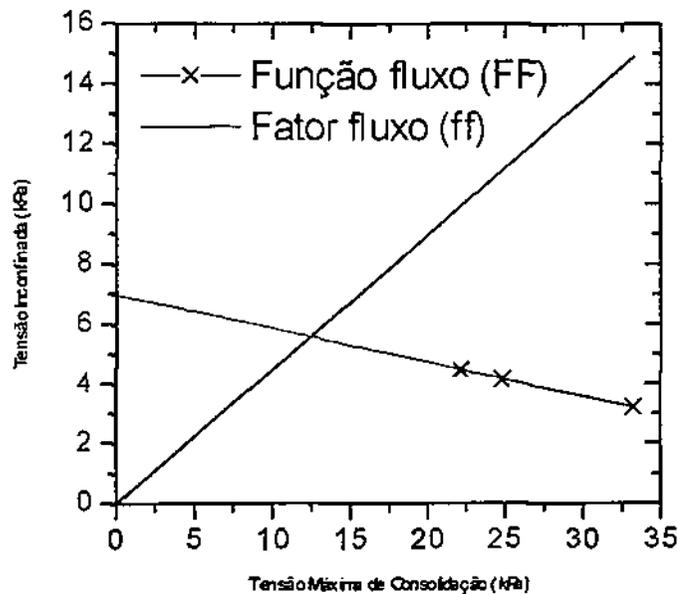


FIGURA 13 - Função fluxo da ração 2 e fator fluxo da tremonha

4.4 Vazão Média de Descarga

Os valores da vazão média de descarga, obtidos nos ensaios realizados encontram-se nas Tabelas 05, 06 e 07.

TABELA 05 - Vazão média de descarga para a relação H/L igual a 1,76

Teor de gordura/ Produto	Seção transversal da boca de saída					
	ST1			ST2		
	Rep. 1	Rep. 2	Rep. 3	Rep. 1	Rep. 2	Rep. 3
TG1						
ração 1	0,00	0,00	0,00	1,59	1,54	1,55
TG2						
ração 2	0,00	0,00	0,00	1,56	1,57	1,50
TG3						
farelo de trigo	0,17	0,18	0,18	0,79	0,77	0,78

TABELA 06 - Vazão média de descarga para a relação H/L igual a 3,5

Teor de gordura/ Produto	Seção transversal da boca de saída					
	ST1			ST2		
	Rep. 1	Rep. 2	Rep. 3	Rep. 1	Rep. 2	Rep.3
TG1						
ração 1	0,00	0,00	0,00	1,35	1,39	1,44
TG2						
ração 2	0,00	0,00	0,00	1,47	1,57	1,45
TG3						
farelo de trigo	0,18	0,18	0,17	0,81	0,79	0,78

TABELA 07 - Vazão média de descarga para a relação H/L igual a 5,3

Teor de gordura/ Produto	Seção transversal da boca de saída					
	ST1			ST2		
	Rep. 1	Rep. 2	Rep. 3	Rep. 1	Rep. 2	Rep.3
TG1						
ração 1	0,00	0,00	0,00	1,49	1,55	1,46
TG2						
ração 2	0,00	0,00	0,00	1,41	1,42	1,43
TG3						
farelo de trigo	0,17	0,18	0,18	0,77	0,78	0,78

Com base nos resultados obtidos nos ensaios, foi realizada a análise de variância da vazão média de descarga das rações e do farelo de trigo para os diferentes tratamentos e apresenta-se na Tabela 08.

Através da análise de variância verifica-se que os parâmetros analisados apresentam diferenças estatísticas significativas ao nível de 1%, quer entre os fatores quer para as interações.

TABELA 08 - Análise de variância e coeficiente de variação dos ensaios da vazão média de descarga (kg/s)

Fonte de variação	GL	SQ	QM	F
TG	2	0,8030	-0,4015	969,22**
H/L	2	0,0169	0,0084	20,40**
ST	1	19,0223	19,0223	45918,05**
TG x H/L	4	0,0173	0,0043	10,47**
TG x ST	2	2,2741	1,1370	2744,70**
H/L x ST	2	0,0169	0,0084	20,39**
Resíduo	36	0,0149	0,0004	
Total	53	22,1828		

CV% = 3,1198

MG = 0,6524

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade

Para a comparação das médias foi aplicado o teste de Tukey a 5% de probabilidade.

A Tabela 09 contém os dados médios da vazão para os parâmetros analisados. Comparando os valores médios dos tratamentos, verifica-se que as vazões para o tratamento teor de gordura das rações não diferem entre si. Por outro lado, ocorreu diferença entre a média da vazão do farelo de trigo.

Nas médias das vazões de descarga em função das relações altura/lado apresentadas na Tabela 09, observa-se que o tratamento relação altura/lado da ração 1 (H/L1) diferiu dos demais, sem entretanto, haver destaque. Esta constatação foi feita também por WANG *et al.* (1995), onde afirmam que a profundidade dos silos não tem efeito sobre a taxa de descarga de produtos armazenados.

Muitos pesquisadores estudaram o efeito da altura do silo sobre a vazão. NEWTON *et al.* (1945), citado por WANG *et al.* (1995), divulgou que a

taxa de descarga é proporcional a $H^{0,04}$. Resultados mais típicos indicam que a vazão é independente da altura.

Com relação a vazão de descarga em função da seção transversal da boca de descarga, os dois tratamentos mostraram-se muito diferentes entre si. Este fato deve-se a não ocorrência de fluxo das rações para a menor abertura da boca de saída (ST1), e o farelo de trigo apresentar uma taxa de fluxo com valor baixo.

TABELA 09 - Valores médios da vazão média de descarga (kg/s) dos tratamentos

Médias TG	Médias H/L	Médias ST
0,7422 a	0,6767 a	0,0589 b
0,7350 a	0,6350 b	1,2459 a
0,4800 b	0,6456 b	

As médias seguidas pela mesma letra maiúscula nas linhas e minúsculas nas colunas não diferem entre si, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

DMS = 0,0166

DMS = 0,0166

DMS = 0,0112

Observando os resultados dos dados médios da vazão de descarga para a interação *teor de gordura x relação altura/lado* na Tabela 10, verifica-se que a interação teor de gordura do farelo de trigo e todas as relações altura/lado (TG3 x H/L) mostraram-se diferentes de todos os tratamentos.

Estes resultados ocorreram em decorrência do baixo teor de gordura do farelo de trigo aliado a baixa densidade. Para o mesmo volume do modelo, o peso das rações foram superiores a duas vezes o peso do farelo de trigo e, em contrapartida, o tempo de descarga desse produto foi maior. Conseqüentemente, as rações apresentaram valores superiores da vazão média de descarga que o farelo de trigo.

Verifica-se ainda que para as interações *teor de gordura da ração 1, ração 2 e farelo de trigo x relação altura/lado igual a 5,3* (TG x H/L3) houve

diferenças entre todos os tratamentos, porém a diferença entre as interações das duas rações foi pequena.

TABELA 10 - Valores médios da vazão média de descarga (kg/s) para a interação *teor de gordura x relação altura/lado*

TG/ produto	H/L			Médias
	H/L1	H/L2	H/L3	
TG1/ração 1	0,78 a A	0,70 a B	0,75 a A	0,74
TG2/ração 2	0,77 a A	0,72 a B	0,71 b B	0,74
TG3/farelo de trigo	0,48 bA	0,49 bA	0,48 cA	0,48
Médias	0,68	0,64	0,65	0,65

DMS/coluna = 0,03 (letras minúsculas) DMS/linha = 0,03 (letras maiúsculas)

Examinando os resultados da Tabela 11, constata-se que, mesmo sem as rações fluírem para a boca de descarga de seção transversal 4 x 4cm, não houve diferenças entre os tratamentos. Isto ocorreu porque, apesar do farelo de trigo fluir, o valor da vazão média de descarga foi bastante baixo.

No caso da seção transversal maior, só existiu diferença entre a interação *teor de gordura do farelo de trigo x seção transversal da boca de descarga 64cm²* (TG3 x ST2).

Verifica-se ainda que as interações *teor de gordura versus seção transversal da boca de saída 1 e 2* (TG x ST1, ST2) diferiram entre si.

Esses resultados concordam com WANG *et al.* (1995) ao concluírem em estudo, que com o aumento da seção transversal da boca de saída do silo, o fluxo da farinha de soja aumenta significativamente.

CHANG *et al.* (1984) e CHANG & CONVERSE (1988), *apud* por WANG *et al.* (1995), mediram as taxas de fluxo do milho, trigo e sorgo através de orifícios circulares e quadrados em modelo de silo em função do teor de umidade. Verificaram que, a taxa de fluxo do sorgo aumenta com o

aumento do teor de umidade para a faixa testada de 11 a 18%bu; para o trigo, a taxa de fluxo não foi significativamente afetada pelo teor de umidade contida na faixa de 12 a 15%bu; o efeito do teor de umidade contida no milho, na faixa de 13 a 23%bu, foi pequena para orifícios menores que 20cm e a taxa de fluxo, para orifícios maiores que este tamanho, aumenta com o decréscimo da umidade.

TABELA 11 - Valores médios da vazão média de descarga (kg/s) para a interação *teor de gordura x seção transversal da boca de saída*

TG/ produto	ST		Médias
	ST1	ST2	
TG1/ração 1	0,00 a B	1,48 a A	0,74
TG2/ração 2	0,00 a B	1,47 a A	0,74
TG3/farelo de trigo	0,18 a B	0,78 bA	0,48
Médias	0,06	1,25	0,65

DMS/coluna = 0,02 (letras minúsculas) DMS/linha = 0,02 (letras maiúsculas)

A Tabela 12 mostra os valores médios da vazão média de descarga para a interação *relação altura/lado x seção transversal da boca de saída (H/L x ST)*.

Observa-se que não existem diferenças entre as interações *relação altura/lado x abertura da boca de descarga menor (H/L x ST1)*, porém a interação *relação altura/lado 1,76 x seção transversal da boca de saída maior* diferiu dos outros tratamentos com um pequeno valor (H/L1 x ST2).

Comparando os valores da vazão para as seções transversais estudadas em interação com as relações altura/lado, constata-se que todos os tratamentos apresentam diferenças, onde os valores da vazão para a seção transversal 64cm² são superiores a seção transversal 16cm².

Isto vem comprovar que o valor da vazão de descarga não está relacionado com a relação altura/lado (H/L), entretanto, tem muita influência da área da seção transversal da boca de saída.

TABELA 12 - Valores médios da vazão média de descarga (kg/s) para a interação *relação altura /lado x seção transversal da boca de saída*

H/L	ST		Médias
	ST1	ST2	
H/L1	0,06 a B	1,29 a A	0,68
H/L2	0,06 a B	1,21 bA	0,64
H/L3	0,06 a B	1,23 bA	0,65
Médias	0,06	1,25	0,65

DMS/coluna = 0,02 (letras minúsculas) DMS/linha = 0,02 (letras maiúsculas)

4.5 Análise do Fluxo

Os resultados dos ensaios realizados em modelo reduzido de silo prismático com parede de acrílico transparente para determinação do tipo de fluxo estão representados nas Tabelas 13, 14 e 15.

O farelo de trigo teve um comportamento igual para as duas seções transversais da boca de saída e todas as relações altura/lado utilizadas.

Os baixos valores do teor de gordura e densidade do produto contribuíram para a obtenção do fluxo de massa. De acordo com JENIKE & JOHANSON (1979), produtos com essas características são considerados de fluxo livre.

O comportamento do fluxo da ração 1 foi muito diversificado e irregular. Tratando-se da maior seção transversal da boca de saída do modelo, o produto conseguiu fluir, entretanto, apresentou fluxo de massa para a relação altura/lado igual a 1,76, fluxo de funil, expandido e formação do tubo para as duas outras relações altura/lado estudadas.

Como a ração 1 possui o percentual mais elevado do teor de gordura (7,11%), considera-se que esse parâmetro influenciou no tipo de fluxo, pois observou-se durante os ensaios um entrelaçamento das partículas causado pela coesão do produto.

Apesar da ração 2 não fluir com a área da boca de descarga 16cm^2 , observou-se fluxo de massa para a seção transversal 64cm^2 nas três relações altura/lado.

TABELA 13 - Tipo de fluxo para relação H/L igual a 1,76

Produto	Seção transversal da boca de saída					
	ST1			ST2		
	Rep. 1	Rep. 2	Rep. 3	Rep. 1	Rep. 2	Rep.3
ração 1	NF	NF	NF	M	M	M
ração 2	NF	NF	NF	M	M	M
farelo de trigo	M	M	M	M	M	M

TABELA 14 - Tipo de fluxo para relação H/L igual a 3,5

Produto	Seção transversal da boca de saída					
	ST1			ST2		
	Rep. 1	Rep. 2	Rep. 3	Rep. 1	Rep. 2	Rep.3
ração 1	NF	NF	NF	E	M	F
ração 2	NF	NF	NF	M	M	M
farelo de trigo	M	M	M	M	M	M

TABELA 15 - Tipo de fluxo para relação H/L igual a 5,3

Produto	Seção transversal da boca de saída					
	ST1			ST2		
	Rep. 1	Rep. 2	Rep. 3	Rep. 1	Rep. 2	Rep.3
ração 1	NF	NF	NF	E	M	ET
ração 2	NF	NF	NF	M	M	M
farelo de trigo	M	M	M	M	M	M

As Figuras de 14 a 29 mostram o comportamento do fluxo dos produtos durante a descarga através de seqüências fotográficas e citados nas Tabelas anteriores.

4.5.1 Produto - Ração 1

Teor de Gordura = 7,11%

Relação altura/lado - 1,76, 3,5 e 5,3

a) Seção transversal da boca de saída - 16cm²

Foi observado nos ensaios realizados para as três relações altura/lado, o não escoamento da ração e a formação do arco coesivo. Originalmente o arco se desenvolve como resultado da consolidação e resistência do produto armazenado, neste caso, a sua formação pode ter ocorrido devido ao alto teor de gordura que a ração 1 possuía, tornando-a mais coesiva e conseqüentemente adquirindo alta resistência.

O efeito do teor de umidade no aumento da coesão em produtos já foi estudado por vários pesquisadores. BOKHOVEN & LOHNES (1989) confirmam esse efeito em estudo com a soja.

Apesar do teor de umidade ser um dos parâmetros que exerce influência na resistência e consolidação dos produtos armazenáveis, os valores dos teores de umidade dos produtos não foram muito diferenciados. Nesse estudo, foi levado em consideração o alto teor de gordura que as indústrias de ração colocam nesses produtos com a intenção de elevar o seu valor energético.

Como mostra a Figura 14, foi formado uma abóbada estável imediatamente após a abertura da boca de descarga.

b) Seção transversal da boca de saída - 64cm²

As Figuras de 15 a 19 mostram o tipo de fluxo da ração 1 para a maior seção transversal da boca de saída e todas as relações altura/lado e

observa-se o comportamento diferenciado do produto em função da relação altura/lado.

Inicialmente o modelo aparece carregado com o produto original intercalado com o produto tingido com a cor vermelha.

Para a relação altura/lado igual a 1,76, a ração apresentou fluxo de massa, como mostra a Figura 15.

Conforme mostra a Figura 16, para a relação altura/lado 3,5, a ração 1 apresentou o fluxo de funil. Uma característica desse tipo de fluxo é a formação de uma zona em repouso onde o produto armazenado não flui.

Para a relação altura/lado maior, ao abrir a boca de saída, inicia-se a descarga apresentando fluxo de funil. De repente, interrompe-se o fluxo e forma-se o efeito tubo que é um conduto central formado desde a boca de saída até alcançar a superfície superior do modelo e, cujo diâmetro tem aproximadamente a dimensão da boca de saída, como mostram as Figuras 17 e 18. E observando a Figura 19, percebe-se que ocorreu a formação de abóbadas estáveis nas quatro superfícies da tremonha. Para a formação do tubo, o produto armazenado dentro do contorno da célula adquiriu resistência suficiente para suportá-lo

Segundo BOKHOVEN & LOHNES (1989), a resistência ao escoamento de um produto pode variar com as mudanças no grau de consolidação, teor de umidade, temperatura, tempo de armazenamento e degradação do produto. Acredita-se que o teor de gordura teve influência predominante na resistência ao fluxo e passa a ser mais uma variável que concorre para a consolidação dos produtos armazenáveis.

4.5.2 Produto - Ração 2

Teor de Gordura = 5,53%

Relação altura/lado - 1,76, 3,5 e 5,3

a) Seção transversal da boca de saída - 16cm²

Observando a Figura 20, para a seção transversal da boca de saída 16cm^2 , o resultado do ensaio da ração 2, foi semelhante ao que ocorreu com a ração 1, ou seja, não houve fluxo.

Apesar da ração 2 apresentar um valor do teor de gordura inferior ao da ração 1, conclui-se que ainda é elevado para o fluxo ocorrer neste dimensionamento da boca de descarga.

b) Seção transversal da boca de saída - 64cm^2

Após a abertura da boca de saída a ração 2 começa a fluir. O processo de descarga segue um caminho de fluxo de massa para todas as relações altura/lado estudadas, como pode ser observado nas Figuras 21, 22 e 23.

Com o aumento da seção transversal da boca de descarga, evitou-se a formação de abóbadas estáveis e o efeito tubo, fato que não ocorreu para a ração 1.

4.5.3 Produto - Farelo de Trigo

Teor de Gordura $\approx 2,65\%$

Relação altura/lado - 1,76, 3,5 e 5,3

a) Seção transversal da boca de saída - 16cm^2

As Figuras 24, 25 e 26 mostram o comportamento do fluxo do farelo de trigo para a menor seção transversal da boca de descarga e todas as relações altura/lado.

Observa-se em todas as fotografias que foi colocado produto de outra cor para contrastar com o produto na sua cor natural e ser apreciada a evolução da massa armazenada durante a descarga.

No início o modelo está carregado a ponto de iniciar a descarga e quando a boca de descarga é aberta o produto começa a fluir livremente, uniformemente, sem formação de abóbadas ou condutos. Como todo o farelo

de trigo se movimenta, onde o primeiro produto a entrar é o primeiro a sair, comporta-se em regime de fluxo de massa.

Quando é finalizada a descarga do produto, observa-se que não ficou retido produto nas paredes do modelo.

b) Seção transversal da boca de descarga - 64cm²

O comportamento do fluxo do farelo de trigo para a abertura da boca de saída com dimensão 8 x 8cm e todas as relações altura/lado estudadas, estão representadas pelas Figuras 27, 28 e 29.

Como o farelo de trigo no seu processo de descarga seguiu um caminho de fluxo de massa para a menor dimensão da boca de descarga, é evidente que para a abertura maior o produto conseguiu um escoamento similar, ou seja, o farelo de trigo fluiu por gravidade sem ocorrência de obstruções do fluxo. Sendo o farelo de trigo não tão compressível, acredita-se que não ganha muita resistência na boca de descarga do silo.

Em concordância com o ocorrido, CALIL JÚNIOR (1984) afirma que produtos pulverulentos de baixa densidade têm 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.



FIGURA 14 – Formação de abóbada estável da ração 1 com a relação H/L igual a 1,76 e seção transversal da boca de saída 16cm^2

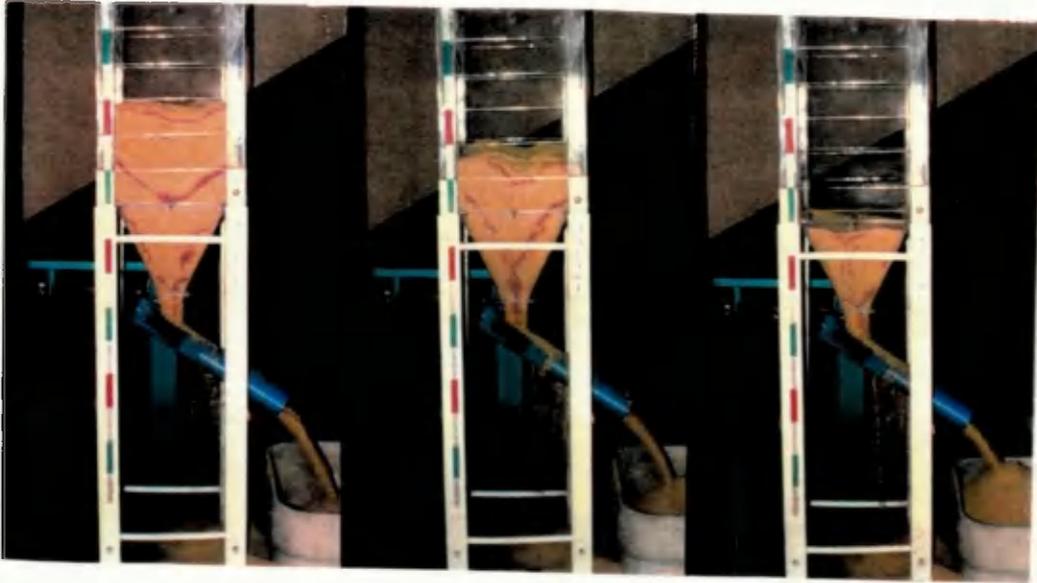


FIGURA 15 - Fluxo de massa da ração 1 para a relação H/L igual a 1,76 e seção transversal da boca de saída 64cm^2

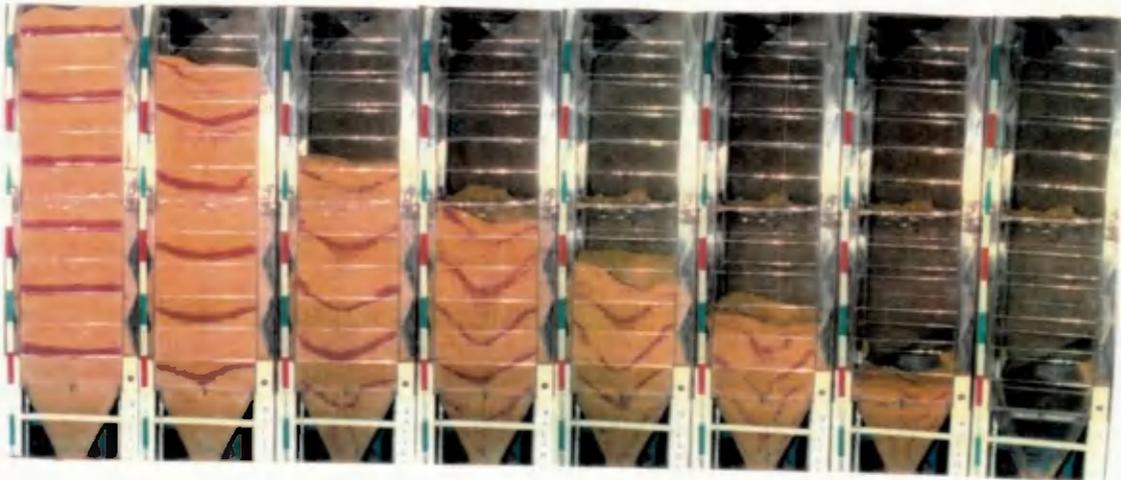
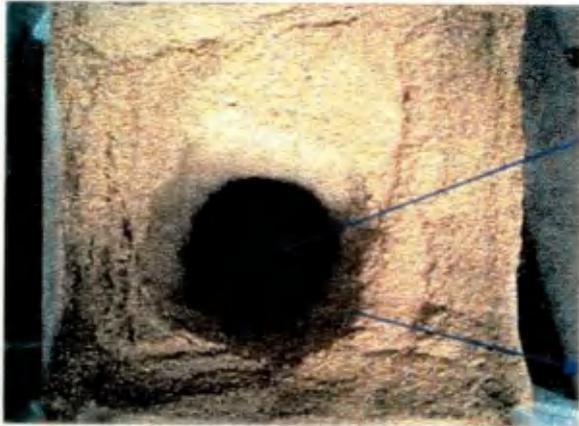


FIGURA 16 - Fluxo de massa da ração 1 para a relação H/L igual a 3,5 e seção transversal da boca de saída 64cm^2



Boca de descarga

Superfície superior do produto



Superfície superior do produto

Seção transversal da boca de descarga



FIGURA 19 - Formação do arco coesivo nas quatro superfícies da tremonha da razão 1 para a relação H/L igual a 5,3 e seção transversal da boca de saída 64cm^2

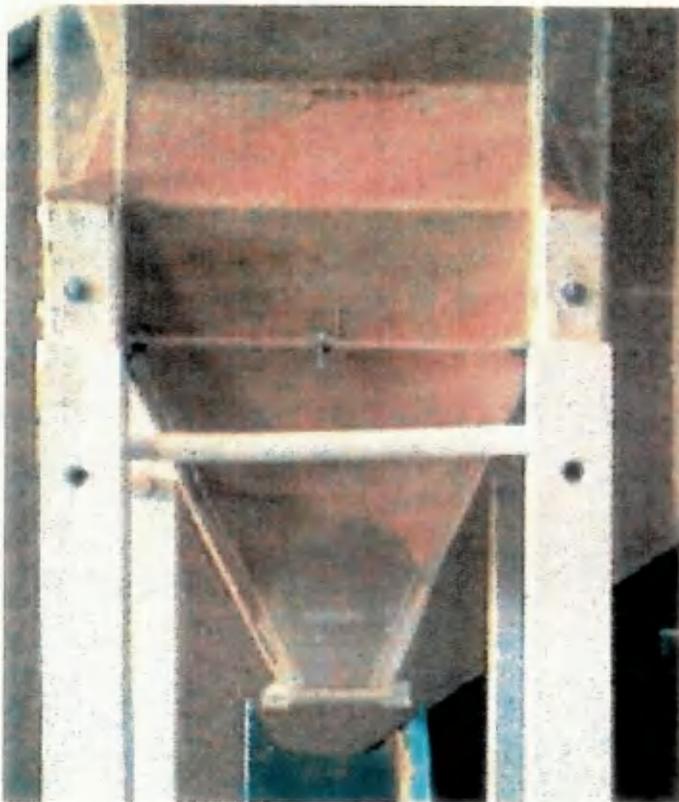


FIGURA 20 - Formação de abóbada estável da ração 2 para a relação H/L igual a 1,76 e seção transversal da boca de saída 16cm^2



FIGURA 21 - Fluxo de massa da ração 2 com H/L igual a 1,76 e seção transversal da boca de saída 64cm²



FIGURA 22 - Fluxo de massa para a ração 2 com H/L igual a 3,5 e seção transversal da boca de saída 64cm²

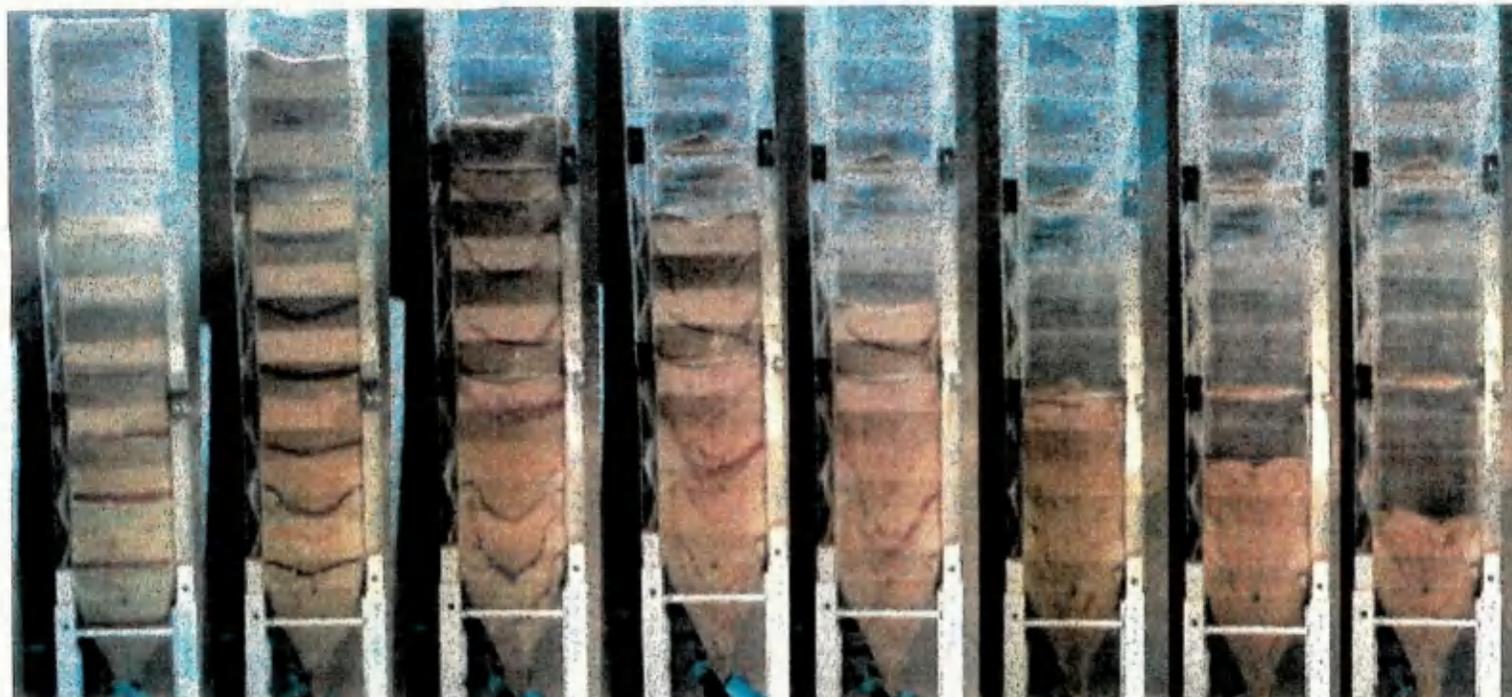


FIGURA 23 - Fluxo de massa da ração 2 com H/L igual a 5,3 e seção transversal da boca de saída 64cm^2

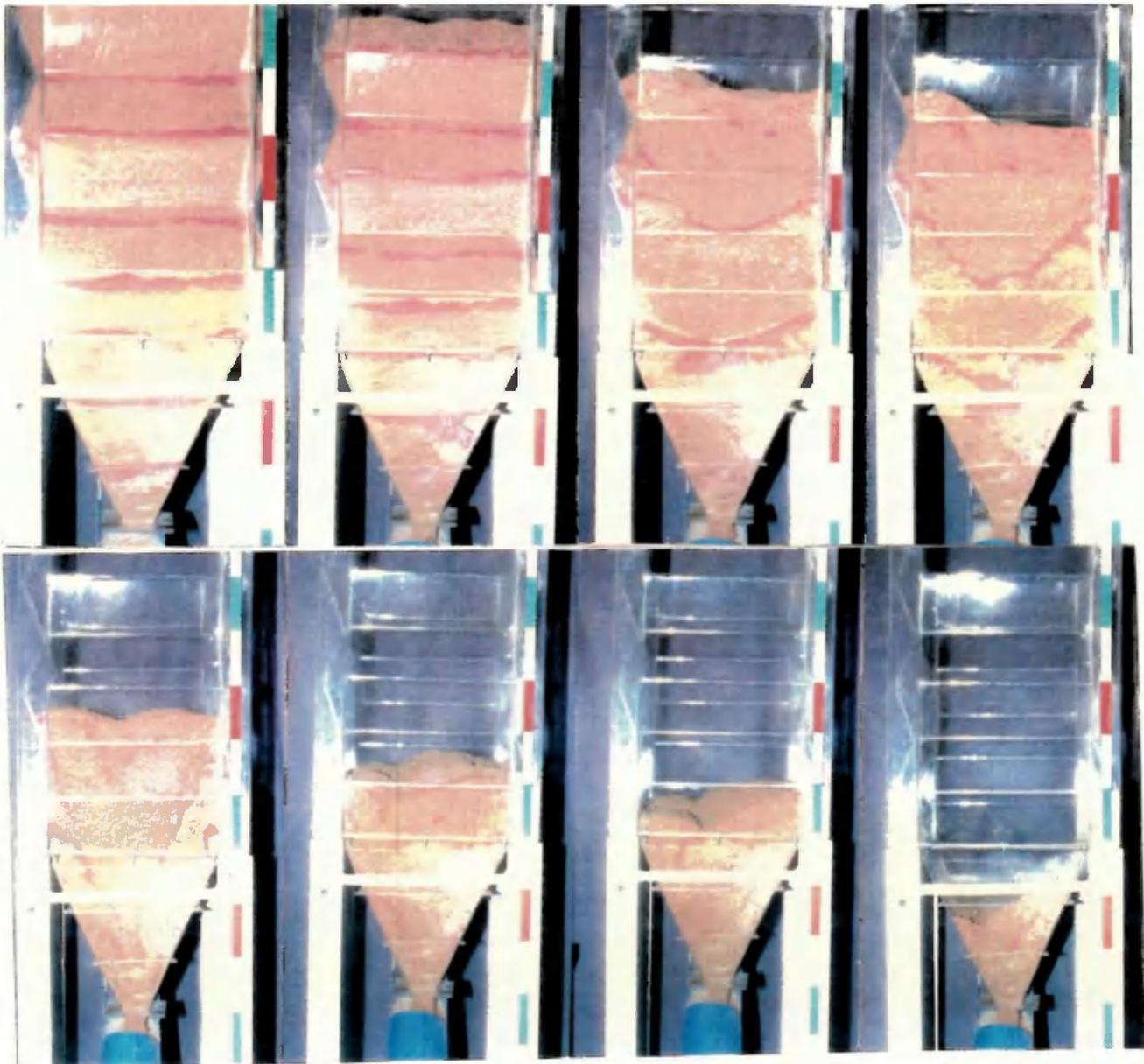


FIGURA 24 - Fluxo de massa do farelo de trigo para a relação H/L igual a 1,76 e seção transversal da boca de saída 16cm^2

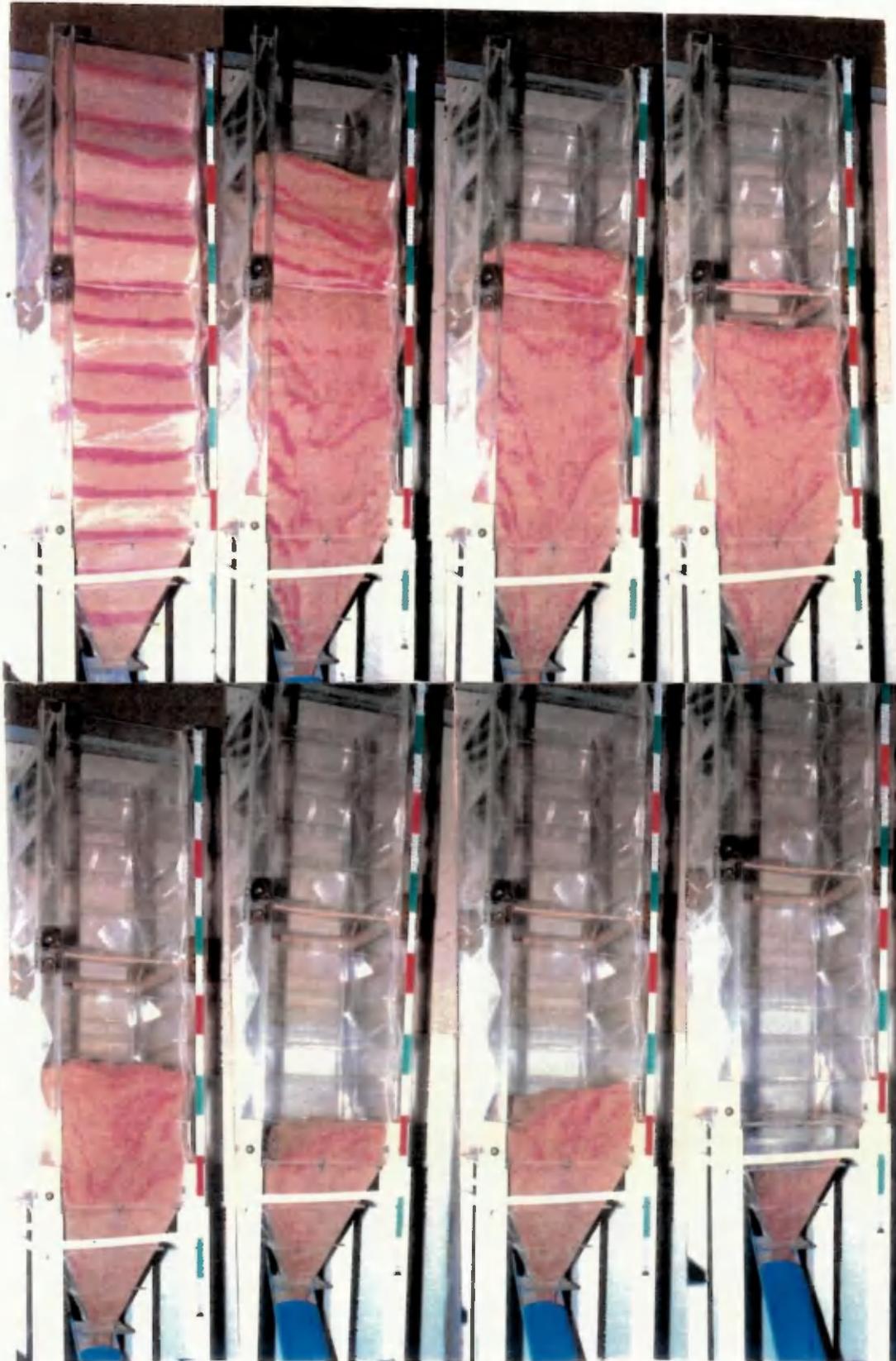


FIGURA 25 - Fluxo de massa do farelo de trigo para a relação H/L igual a 3,5 e seção transversal da boca de saída 16cm^2

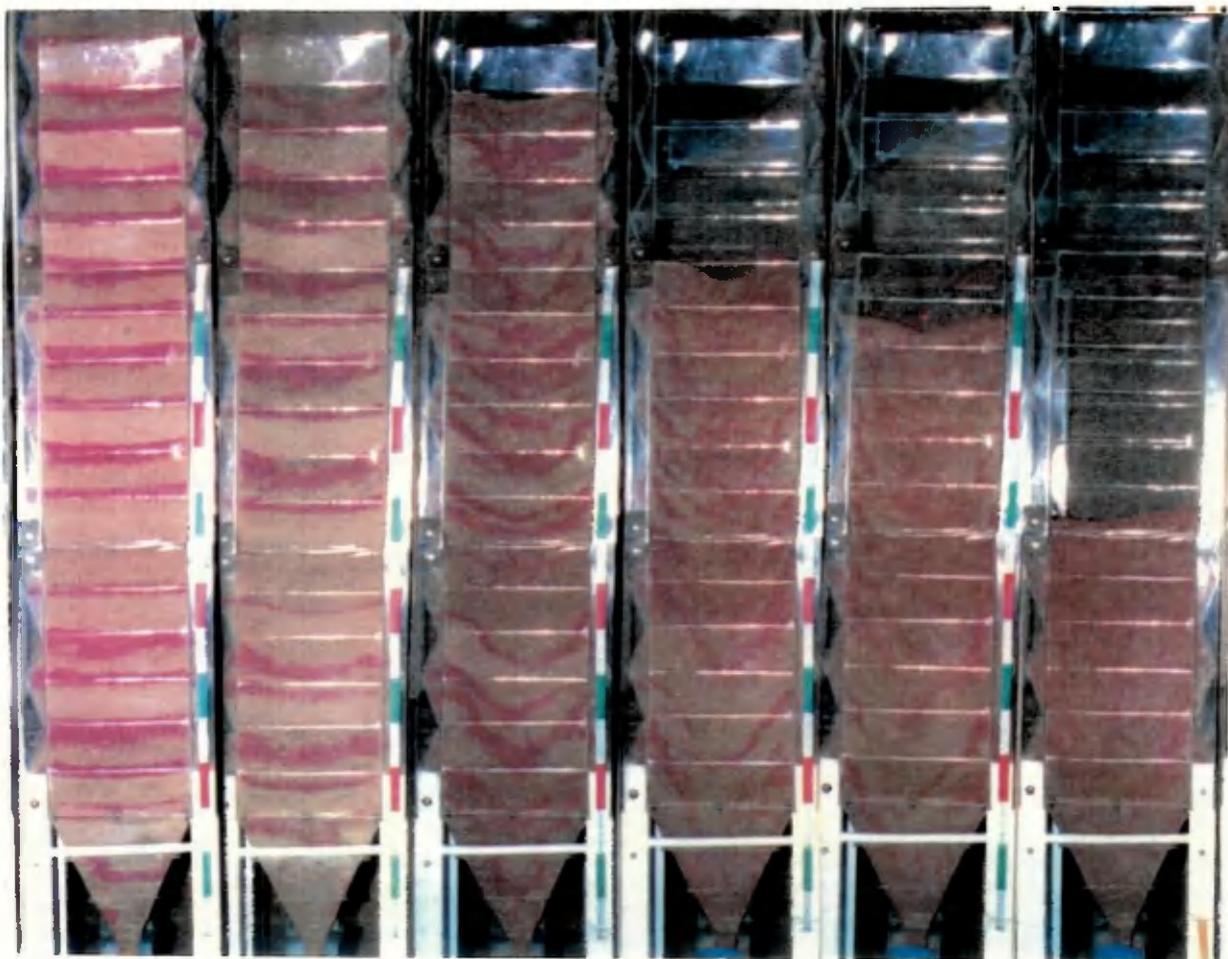


FIGURA 26 - Fluxo de massa do farelo de trigo para a relação H/L igual a 5,3 e seção transversal da boca de saída 16cm^2

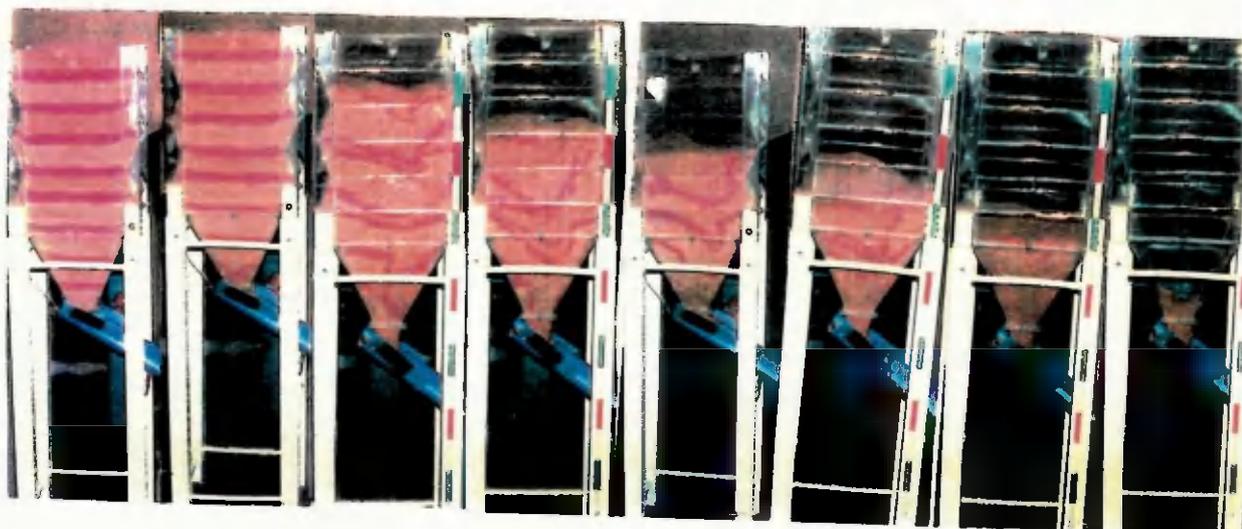


FIGURA 27 - Fluxo de massa do farelo de trigo para a relação H/L igual a 1,76 e seção transversal da boca de saída 64cm^2

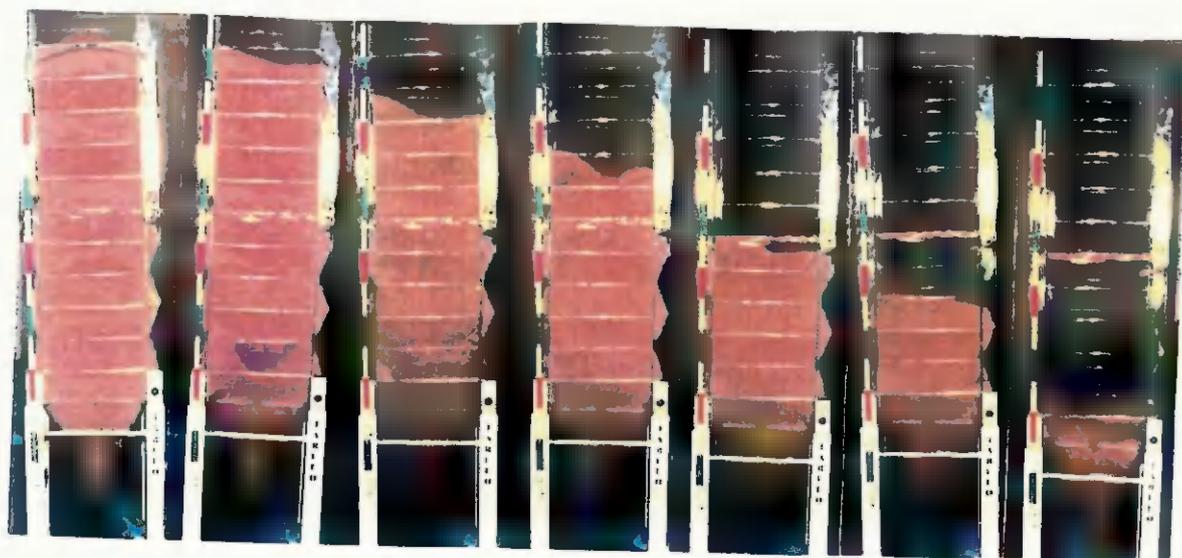


FIGURA 28 - Fluxo de massa do farelo de trigo para a relação H/L igual a 3,5 e seção transversal da boca de saída 64cm^2

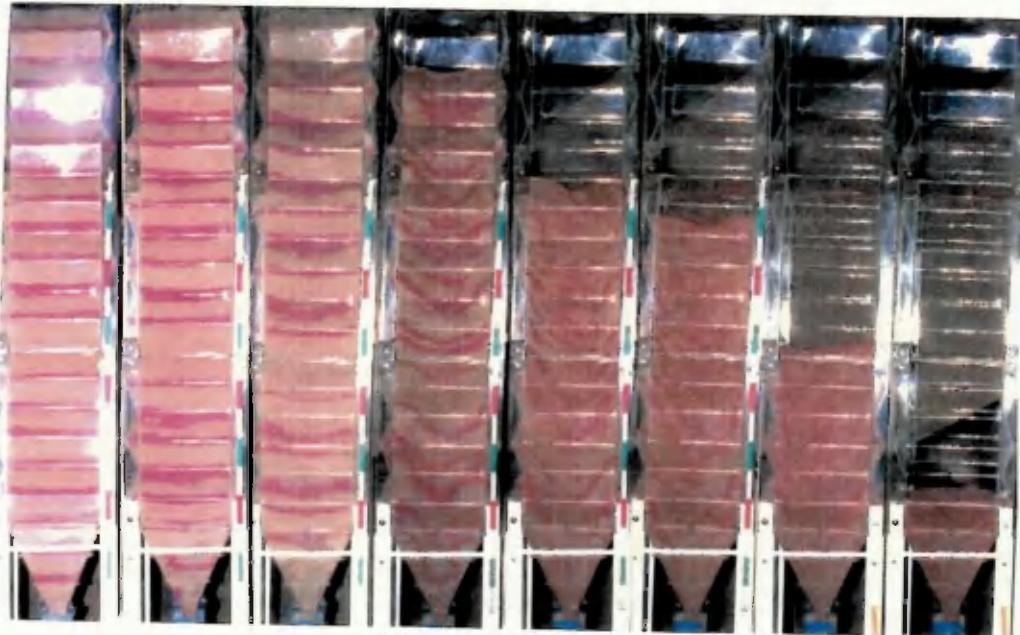


FIGURA 29 - Fluxo de massa do farelo de trigo para a relação H/L igual a 5,3 e seção transversal da boca de saída 64cm^2

5 CONCLUSÕES

Nas condições do presente trabalho, conclui-se que:

1. O modelo proposto é adequado para análise de fluxo de produtos armazenados e fornece uma boa previsão do tipo de fluxo que ocorre em instalações reais;
2. A vazão de descarga foi afetada pela seção transversal da boca de saída do silo e pelo teor de gordura do produto;
3. A relação altura/lado (H/L) não teve efeito sobre a vazão de descarga dos produtos;
4. O alto teor de gordura da ração 1 e a relação altura/lado (H/L) do modelo afetaram o tipo de fluxo desse produto;
5. As dimensões da seção transversal da boca de saída exerceram influência no tipo de fluxo das rações, enquanto que, o farelo de trigo apresentou o mesmo tipo de fluxo para as duas seções estudadas;
6. Para que ocorra fluxo de massa, com as propriedades físicas determinadas da ração 2, a dimensão mínima da boca de saída seguindo as recomendações da BMHB (1985) é de 17,6cm de lado para silos prismáticos;

7. Em silos para armazenamento de produtos com alto teor de gordura é necessário dimensionar a boca de saída com seção transversal maior que a mínima recomendada pela norma citada acima, para fluxo de massa;
8. Com a tendência do incremento do teor de gordura nas rações, os engenheiros projetistas de silos devem realizar ensaios em modelos reduzidos para avaliarem o tipo de fluxo dos produtos com as propriedades físicas iguais ou semelhantes a que serão utilizadas, e em seguida elaborarem projetos confiáveis.

Para futuros trabalhos sugere-se:

1. Estudar o comportamento do fluxo de rações em tremonhas excêntricas, com variação do ângulo de inclinação da tremonha e em fundo plano;
2. Realizar ensaios com o uso da tremonha e contratremonha seguindo determinação de RAVENET (1983);
3. Estudar a influência da velocidade e forma de carregamento do produto;
4. Estudar as pressões em silos e o fator K.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDERSON, J. M. ; NIELSEN, J. Size effects in slender grain silos. **Bulk Solids Handling**. v.6, n.5, p.885-889, oct. 1986.
- ARNOLD, P. C., MCLEAN, A. G., ROBERTS, A. W. **Bulk solids: storage, flow and handling**. Austrália: TUNRA, The University of Newcastle, 1987.
- AYUGA., F. Los empujes del material almacenado en silos. **Informes de la construcción**. Madrid, v.46, n.436, p. 27-33, março/abril. 1995.
- BARRÊTO, R. L. **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: Universidade Federal da Paraíba, 1997. 84p. Tese Mestrado.
- BENINK, E. J. **Flow and stress analysis of cohesionless bulk materials in silos related to codes**. Enschede, The Netherlands: Universiteit Twente, 1989. 162p. Tese Doutorado.
- BOKHOVEN, W. H.; LOHNES, R. A. Preconsolidation effects on flow characteristics of soybean meal. **American Society of Agricultural Engineers**. v.12, n.5, p. 1779-1783, sep-oct. 1989.
- BMHB - British Materials Handling Board. **Draft code of practice for design of silos, bins, bunkers and hoppers**. Inglaterra, 1985. 101p.
- CALIL JÚNIOR, C. **Sobrepressões en las paredes de los silos para almacenamiento produtos pulverulentos cohesivos**. Barcelona: Universidad Politecnica de Barcelona-UPB, 1984. 184p. Tese Doutorado.
- CALIL JÚNIOR, C. **Determinação das propriedades físicas de materiais granulares e pulverulentos para o projeto estrutural de silos**. **Revista Brasileira de Armazenamento**. Viçosa, v.9-10, n.1-2, p.3-6, 1985.
- CALIL JÚNIOR, C. **Sobrepressões nas paredes dos silos para armazenamento de produtos pulverulentos coesivos**. **Revista Brasileira de Armazenamento**. Viçosa, v.11, n.1-2, p. 3-8, jul/dez. 1987.

- CALIL JÚNIOR, C. **Recomendações de fluxo e de carga para o projeto de silos verticais; relatório de pesquisa.** São Carlos, 1989. 100p.
- CALIL JÚNIOR, C. ; NASCIMENTO, J. W. B. do. ; ARAÚJO, E. C. de. **Silos metálicos multicelulares.** São Carlos: Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, 1997. 177p.
- CLANCY, M. B.; EBNER, P. B. **Silos. Tecnología para la fabricación de alimentos balanceados.** Kansas State, Cap. 4.: American Feed Industry Association, Inc. 1994.
- DESCHAMPS, F. C. ; PEIXOTO, R. R. Avaliação do farelo de trigo em rações para terneiros holandês e jesej desaleitados precocemente. **Revista da Sociedade Brasileira de Zootecnia.** Viçosa, v.15, n.4. p.356-363. 1986.
- DIN 1055. Lastannahmen fur Bauter, Blatt 6, Lasten in silozellen. Alemanha, 1987. 12p.
- FURTADO, D. A. ; CAMPOS, J. ; SILVA, J. F. C. ; CASTRO, A. C. G. Farelo de trigo como suplemento energético-proteico para a cana-de-açucar (*Saccharum officinarum* L.) e silagem de milho. **Revista da Sociedade Brasileira de Zootecnia.** Viçosa, v.15, n.4, p.356-363. 1991.
- JENIKE, A. W. ; JOHANSON, J. R. Bulk solids handling survey. **Flow of solids newsletter.** East Coast, USA: v. XV, n. 1, aug. 1995.
- JENIKE, A. W. **Storage and flow of silos.** Bolletim 123. Utah Engineering Experiment Station. University of Utah. Sat Lake City. Estados Unidos, 1964, 197p.
- JOHANSON, J. R. Modeling flow of bulk solids. **American Institute of Chemical Engineers.** Jenike and Johansen, Inc., Winchester, Massachusetts. 1969. 12 p.
- LIMA, D. Q. **Efeitos dos níveis de energia e proteína no desempenho de frangos de corte.** Areia: Universidade Federal da Paraíba, 1994. 68p. Tese Mestrado.
- MILANI, A.P. **Determinação das propriedades de produtos armazenados para projetos de pressões e fluxo em silos.** São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, 1993. 272p. Tese Doutorado.
- MOHSEININ, N. N. **Physical propertios of plant and animal materials.** New York: Cordon ad Bpeach Science Publishers, 1978. 734p.

- NASCIMENTO, J. W. B. **Estudos dos silos metálicos prismáticos para fábricas de ração**. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, 1996. 152p. Tese Doutorado.
- PEIXOTO, R. R. **Nutrição e alimentação animal**. Pelotas: Editora UFPel, 1988. 147p.
- RANDALL, E. L. Improved method for fat and oil analysis by a new process of extractin. **Journal of the AOAP**. v.57, n.5, p.1167-1168. 1974.
- RAVENET, J. **Silos. flujo de vaciado de sólidos. formacion de bovedas. efectos**. Barcelona, Espanha: Técnicos Asociados SA, 1983. 335p.
- RAVENET, J. Problemas em silos (I). **Manutencion y Almacenaje**. v.45, p.590-594. 1981.
- RAVENET, J. Graneles continuos - El almacenaje de materiales cohesivos a granel. **Manutencion y Almacenaje**. n.75-76, p.115-120. 1975.
- ROBERTS, A. W. ; OOMS, M. **Flow properties of bulk solids**. Paper 4. Storage, flow and handling of bulk solids. Newcastle: A. W. Roberts, 1987.
- ROBERTS, A. W. **Storage, flow and handling of bulk solids**. The University of Newcastle, 1987.
- SCHWEDES, J. Measurement of flow properties of bulk solids. **Powder technology**. New York, v.88, p. 285-290, feb. 1996.
- SILVA, F. de A. S. e The ASSISTAT software: statiscal assistance. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTERS IN AGRICULTURE**, 6, Cancun, 1996. **Anais...** Cancun: American Society of Agricultural Engineers, 1996. p. 294-298.
- SUPERINTENDÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO AGROPECUÁRIO - SDA. **Coordenação de Desenvolvimento da Pecuária. Ação programada em produção animal**. Brasília, 1981.
- TORRES, A. P. **Alimentos e nutrição das aves domésticas**. São Paulo: Nobel, 1987. 324p.
- WANG, Y. J.; CHUNG, D. S.; SPILLMAN, C. K. Gravity flow characteristics of soybean meal. **Transactions of the ASAE**. v.38, n.4, p. 1179-1186. 1995.