



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
COPEAG - COORD. DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENG. AGRÍCOLA



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

Dissertação de Mestrado

CARACTERÍSTICAS DE FLUXO E VAZÃO
DE DESCARGA EM SILOS VERTICAIS

WANDERLEI FREIRE DE MEDEIROS

Biblioteca UFCG
SMBC_CDSA
CAMPUS DE SUMÉ
Reg. 10528/12

Campina Grande
Paraíba



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÕES RURAIS E AMBIÊNCIA

Dis
631(043.3)
M488c
ex. 01

CARACTERÍSTICAS DE FLUXO E VAZÃO DE
DESCARGA EM SILOS VERTICAIS

Campina Grande - PB

Março – 2012

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÕES RURAIS E AMBIÊNCIA

Ivanildo Freire de Medeiros

CARACTERÍSTICAS DE FLUXO E VAZÃO DE
DESCARGA EM SILOS VERTICAIS



Parte integrante dos requisitos
básicos do Programa de Pós-
Graduação nível Mestrado em
Construções Rurais e Ambiência
para obtenção do Título de Mestre

Área de Concentração: Construções Rurais e Ambiência

Orientador: Dr. José Pinheiro Lopes Neto

Campina Grande - PB

Março 2012

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

M488c Medeiros, Ivanildo Freire de.
Características de fluxos e vazão de descarga em silos verticais / Ivanildo Freire de Medeiros. – Campina Grande, 2012.
95 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Construções Rurais e Ambiência) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.

Orientador: Prof. Dr. José Pinheiro Lopes Neto.

Referências.

1. Fluxo. 2. Silos. 3. Grãos. 4. Pulverulentos. I. Título.

CDU 631.24(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA



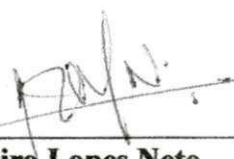
PARECER FINAL DO JULGAMENTO DA DISSERTAÇÃO

IVANILDO FREIRE DE MEDEIROS

**CARACTERÍSTICAS DE FLUXO E VAZÃO DE DESCARGA EM
SILOS VERTICAIS**

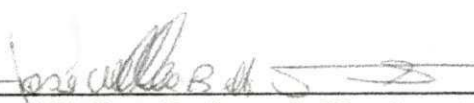
BANCA EXAMINADORA

PARECER



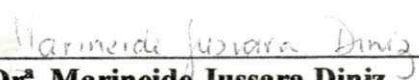
Dr. José Pinheiro Lopes Neto
Orientador (UAEA/UFPG)

APROVADO



Dr. José Wallace Barbosa do Nascimento
Examinador (UAEA/UFPG)

APROVADO



Dr. Marineide Jussara Diniz
Examinadora (UFERSA)

APROVADO

FEVEREIRO - 2012



DEDICATÓRIA

Aos meus amores Igor, Janne e
Elen, razão da minha alegria de
viver . A Elaine com toda a
minha admiração e respeito



AGRADECIMENTOS

À Deus pela benção, força e presença, em todos os momentos de minha vida.

A meus pais, pela vida, pelo apoio, pelos ensinamentos e pela dedicação, durante minha vida.

Ao meu orientador, professor Dr. José Pinheiro Lopes Neto, pelos ensinamentos e paciência, as orientações deste trabalho.

Aos irmãos Jailson, João Bosco, Haylton, José, Francisco, Graça, Rosania, Ana e Jeanne, pelo carinho e respeito, incentivo e apoio.

Aos amigos Gilberto e Janivan, por me terem acolhido em Campina Grande.

Aos colegas de mestrado e doutorado;

Enfim a todos que contribuíram, direta ou indiretamente, durante este curto espaço de tempo.

OBRIGADO!

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	vi
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE SÍMBOLOS	ix
RESUMO	xi
ABSTRACT	xii
1. INTRODUÇÃO	
1.1 OBJETIVOS	2
1.1.2 Objetivo Geral	
1.1.3. Objetivos específicos	
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	
2.1 IMPORTÂNCIA ECONÔMICA DA ARMAZENAGEM NO BRASIL	3
2.2 PROJETO DE FLUXO DE PRODUTOS SÓLIDOS	5
2.3 PROBLEMAS RELACIONADOS AO PROJETO DE FLUXO	9
2.4 ARQUEAMENTO	11
2.5 EFEITO TUBO	12
2.6 DESCARGA INCOMPLETA	13
2.7 INFORMAÇÕES REQUERIDAS DOS PRODUTOS SÓLIDOS ARMAZENÁVEIS	13

2.7.1. Densidade	15
2.7.2 Teor de umidade	15
2.7.3 Granulometria	16
2.7.4 Peso específico consolidado (γ)	16
2.7.5 Ângulo de atrito interno (ϕ) e Ângulo efetivo de atrito interno (δ)	16
2.7.6 Ângulo de atrito interno do produto com a parede (ϕ_w)	17
2.7.7 Função Fluxo (FF)	20
2.7.8 Fator fluxo da tremonha (ff)	21
2.8 USO DE IMAGENS DIGITAIS NA INVESTIGAÇÃO DO FLUXO EM SILOS	23
2.9 VAZÃO DE DESCARREGAMENTO EM SILOS	28
2.10 AÇÕES EM SILOS VERTICAIS	33
2.10.1 Representação das ações em silos	33
3. MATERIAL E MÉTODOS	
3.1 DESCRIÇÃO DO MODELO UTILIZADO	34
3.2 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS ADOTADOS	36
3.3 METODOLOGIAS APLICADAS	37
3.4 MODELOS TEÓRICOS PARA ANÁLISE DE VAZÃO	38
3.4.1 Metodologia de Beverloo et al. (1961)	38
3.4.2 Metodologia de Rotter (2001)	39
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	
4.1 PROPRIEDADES FÍSICAS E DE FLUXO	40
4.2 CARACTERÍSTICAS DE FLUXO	44



4.3 VAZÃO DE DESCARGA	61
4.4 COMPARATIVO ENTRE OS VALORES TEÓRICOS E EXPERIMENTAIS DE VAZÃO	68
5. CONCLUSÕES	74
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	75
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA	76

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1. Principais vantagens e desvantagens dos fluxos de massa e funil	9
Tabela 2. Classificação do tipo de fluxo de produtos sólidos	21
Tabela 3. Propriedades físicas dos produtos estudados	40
Tabela 3. Propriedades físicas dos produtos estudados	40
Tabela 5. Resultados da análise granulométrica para o feijão em grão	41
Tabela 6. Resultados da análise granulométrica para milho triturado	41
Tabela 7. Resultados da análise granulométrica para o farelo de soja	41
Tabela 8. Propriedades de fluxo dos produtos	43
Tabela 9. Relação H/D observada para o fluxo misto	50
Tabela 10. Vazão média de descarregamento para os produtos granulares	67
Tabela 11. Vazão média de descarregamento para os produtos pulverulentos	67

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Distribuição por região da produção nacional. Fonte: IBGE (2010)	3
Figura 2. Armazenagem no próprio local de produção. Fonte: CONAB (2006)	4
Figura 3. Tipos básicos de fluxo	6
Figura 4. Variações do tubo no fluxo de funil	6
Figura 5. Determinação gráfica do tipo de fluxo	7
Figura 6. Variações do fluxo misto	7
Figura 7. Variações do fluxo em função da esbeltez dos silos	8
Figura 8. Problemas funcionais em silos e seus precedentes	10
Figura 9. Arco mecânico	11
Figura 10. Arcos coesivos	12
Figura 11. Formação do efeito tubo	12
Figura 12. Silo com descarga incompleta	13
Figura 13. Aparelho de cisalhamento direto de Jenike	14
Figura 14. Lugares geométricos e ângulos de atrito interno	17
Figura 15. Lugar geométrico de deslizamento do produto com a parede	18
Figura 16. Deslizamento nas chapas trapezoidal e ondulada	19
Figura 17. Limites das propriedades dos produtos	20
Figura 18. Função Fluxo dos produtos	20
Figura 19. Determinação do deslocamento de uma área de interrogação	25
Figura 20. Magnitude e perfil da velocidade de sementes de amaranto	26
Figura 21. Perfis de velocidade em silo com tremonha de 85° com a horizontal	27
Figura 22. Modelo do silo	34
Figura 23. Fundo plano e seus detalhes dimensionais	35
Figura 24. Tremonha e seus detalhes dimensionais	35
Figura 25. produtos utilizados	36
Figura 26. Ensaio granulométrico	37
Figura 27. Ensaio para determinação das propriedades de fluxo	38
Figura 28. Curva granulométrica dos produtos ensaiados	42
Figura 29. Seqüenciamento de imagens para o fundo plano orifício 01	44

Figura 30. Seqüenciamento de imagens para o fundo plano orificio 02	
Figura 31. Seqüenciamento de imagens para o fundo plano orificio 03	45
Figura 32. Seqüenciamento de imagens para a tremonha cônica	46
Figura 33. Seqüenciamento de imagens para o fundo plano orificio 01	47
Figura 34. Seqüenciamento de imagens para o fundo plano orificio 02	47
Figura 35. Seqüenciamento de imagens para o fundo plano orificio 03	48
Figura 36. Seqüenciamento de imagens para a tremonha cônica	49
Figura 37. Seqüenciamento de imagens para a tremonha cônica	50
Figura 38. Seqüência de imagem para a tremonha cônica	52
Figura 39. Detalhe do arco coesivo	52
Figura 40. Seqüência de imagem para a tremonha cônica	53
Figura 41. Detalhe do arco coesivo	54
Figura 42. Seqüência de imagens para o fundo plano orificio 01	55
Figura 43. Seqüência de imagens para o fundo plano orificio 02	55
Figura 44. Seqüência de imagens para um fundo plano orificio 03	56
Figura 45. Seqüência de imagens para tremonha cônica	56
Figura 46. Seqüência de imagens para o fundo plano orificio 01	57
Figura 47. Seqüência de imagens para um fundo plano orificio 02	57
Figura 48. Seqüência de imagens para o fundo plano orificio 03	58
Figura 49. Seqüência de imagens para tremonha cônica	58
Figura 50. Seqüência de imagens para o fundo plano orificio 01	59
Figura 51. Seqüência de imagens para o fundo plano orificio 02	59
Figura 52. Seqüência de imagens para o fundo plano orificio 03	60
Figura 53. Seqüência de imagens para tremonha cônica	60
Figura 54. Arco coesivo instável	61
Figura 55. Curvas de vazão de descarga para milho em grão	61
Figura 56. Curvas de vazão de descarga para feijão em grão	62
Figura 57. Curvas de vazão de descarga para milho e feijão em grão (tempo 10 min)	63
Figura 58. Curvas de vazão de descarga para milho triturado e farelo de soja (10 min)	63
Figura 59. Curvas de vazão de descarga para milho triturado e farelo de soja (48 h)	64



Figura 60. Curvas de vazão de descarga para milho triturado e farelo de soja (120 h)	65
Figura 61. Curvas de vazão de descarga para farelo de soja (10 min)	65
Figura 62. Curvas de vazão de descarga para farelo de soja (48 h)	66
Figura 63. Curvas de vazão de descarga para farelo de soja (120 h)	66
Figura 64. Comparativo das vazões para milho em grão	68
Figura 65. Comparativo das vazões para feijão em grão	69
Figura 66. Comparativo das vazões para milho em grão com tremonha	69
Figura 67. Comparativo das vazões para feijão em grão com tremonha	70
Figura 68. Comparativo das vazões para milho triturado com tremonha	71
Figura 69. Comparativo das vazões para farelo de soja (tempo 10 min)	71
Figura 70. Comparativo das vazões para farelo de soja (tempos 48 e 120 h)	72
Figura 71. Comparativo das vazões para farelo de soja com tremonha	73

LISTA DE SÍMBOLOS

H = altura efetiva do produto armazenado (m);

D = diâmetro do silo inscrito em uma circunferência (m);

(γ) = Peso específico consolidado;

(\emptyset) = Ângulo de atrito interno;

(δ) = Ângulo efetivo de atrito interno;

(\emptyset_w) = Ângulo de atrito interno do produto com a parede;

(FF) = Função Fluxo;

(ff) = Fator fluxo da tremonha.

Q = vazão mássica (m^3/h);

C = constante;

γ_a = peso específico aerado (N/m^3);

g = aceleração da gravidade ($9,8 m/s^2$);

D = diâmetro do orifício de descarga (m);

k_s = constante;

d_p = diâmetro médio das partículas (m);

U = umidade (%);

H/D = relação altura diâmetro

RESUMO

Hoje com o avanço na agroindústria, o uso de silos é indispensável para que se mantenha a qualidade de produtos como grãos, sementes e demais insumos agrícolas. Em silos existem, basicamente, dois tipos de fluxo, o fluxo de massa e o fluxo de funil, onde o fluxo de massa é caracterizado pelo movimento de todas as partículas do produto, enquanto que no fluxo de funil existem três camadas, onde a primeira camada está se movimentando, a segunda camada fica a espera para que possa entrar em movimento e a terceira permanece estagnada durante todo o processo. Objetivou-se com esta pesquisa documentar e avaliar através de imagens de alta resolução o padrão de fluxo e suas variantes em silos industriais através de modelo reduzido de seção semicircular e mensurar sua vazão de descarga para quatro produtos armazenáveis. Para a análise das propriedades de fluxo utilizou-se a recomendação da British Material Handling Board enquanto que os resultados de vazão experimental foram comparados aos teóricos obtidos pelas equações de Beverloo et al. e Rotter. Observou-se que quando utilizado o fundo plano com grãos, ocorria o fluxo de massa até determinada relação H/D passando, depois, para fluxo de funil. Para farelo de soja o fluxo variou de acordo com a geometria do silo (fundo plano ou tremonha) entre massa e funil, enquanto para milho triturado o tipo de fluxo observado foi o de funil independentemente da utilização de fundo plano ou tremonha. Quanto aos valores de vazão de descarga, nenhuma das teorias testadas conseguiu reproduzir com exatidão os resultados experimentais indicando necessidade de adequação para cada situação em particular.

Palavras-chave: fluxo, silos, grãos, pulverulentos



ABSTRACT

Today with the advancement in the agricultural industry, the use of silos is essential in order to maintain the quality of products such as grains, seeds and other agricultural inputs. Silo are basically two flow patterns, the mass flow and funnel flow, where the mass flow is characterized by the movement of all particles in the product, while the funnel flow, there are three one, where the first layer is moving the second one is waiting for it to come in motion and the third remains flat during the process. The objective of this research were to document and assess through high resolution images of the flow pattern and its variants in silos through industrial scale model of semicircular cross section and measure its flow discharge for four bulk solids. For the analysis of the flow was used British Material Handling Board recommendations while the flow experimental results were obtained compared to the theoretical equations of Beverloo et al. and Rotter. It was observed that when using a flat bottom, there was the mass flow determined by H/D ratio passing then to flow funnel. For soybean flow varied depending on the geometry of the silo (flat bottom or hopper) between mass and dropping funnel, while for ground corn, the type of flow was observed regardless of the funnel using a flat or hopper. For the values of flow discharge, none of the theories tested was able to reproduce accurately the experimental results indicating a need to adapt them to each particular situation.

Keywords: flow, silos, grain, powders

1. INTRODUÇÃO

Hoje, com o avanço na agroindústria, o uso de silos é indispensável para que se mantenha a qualidade de produtos como grãos, sementes e demais insumos agrícolas.

A produção de grãos como a soja, milho, trigo e arroz, entre outros, constitui um dos principais segmentos do setor agrícola em todo o mundo. Após a colheita, a safra de grãos precisa ser direcionada a um destino durante o qual surge a imposição de se armazenar os produtos em construções específicas, ou seja, nos silos.

A demanda por silos é explicada, portanto, pela necessidade das cooperativas, produtores e indústrias, armazenar grandes quantidades de produtos em espaços reduzidos. Além disso, a estocagem se torna imprescindível em termos econômicos na medida em que permite o controle do escoamento da safra e abastecimento, reduzindo a necessidade de importação e também das especulações de mercado (MADRONA, 2008).

O Brasil, por ser um país com característica agrícola, é também um dos principais pontos na economia no armazenamento e no beneficiamento dos produtos agrícolas. O armazenamento de produtos em silos é considerado uma solução de grande viabilidade devido à economia de espaço físico, mão-de-obra e custos de transporte, assim como a possibilidade de conservação do produto ensilado (CALIL JUNIOR & CHEUNG, 2007), portanto, num país como o Brasil, cuja produção de grãos aumenta a cada ano acarretando o projeto e a construção de novos silos todos os dias, o conhecimento correto da determinação das ações que atuam sobre as paredes e fundo do silo, torna-se cada vez mais essencial.

Além disso, Palma & Calil Junior (2008) citam que para projetar um silo com segurança, economia e eficiência, é necessário que o projetista conheça as máximas pressões possíveis de atuar sobre as paredes do silo durante sua vida operacional; acrescenta-se, ainda, a premência de se conhecer o tipo de fluxo a ser desenvolvido para cada produto, em cada situação de uso dos silos.

Uma das grandes dificuldades encontradas para validação dos modelos criados para predição de fluxo e ocorrência de obstruções, é a possibilidade de comparação com situações reais, devido à opacidade das paredes dos silos; por outro lado e na tentativa de prever o tipo de fluxo durante a descarga em silos, muitos modelos consideram constantes propriedades como densidade e atrito com a parede durante todo o processo o que, em verdade, não ocorre.

1.1.OBJETIVOS

1.1.2 Geral

- Documentar e avaliar através de imagens de alta resolução o padrão de fluxo e suas variantes em silos industriais através de modelos reduzidos.

1.1.3 Específicos:

- Determinar as propriedades físicas e de fluxo de quatro produtos industriais armazenáveis;
- Analisar o padrão de fluxo durante o descarregamento de produtos industriais em um modelo reduzido com parede frontal transparente;
- Determinar os limites das zonas de movimentação e estagnação para as diferentes condições de descarregamento e produtos utilizados;
- Observar os fenômenos de formação de arcos coesivos e efeito tubo e mensurar suas dimensões críticas e;
- Determinar a vazão de descarga dos produtos industriais nas diferentes condições de descarregamento (fundo plano, tremonha, excentricidades de descarga e tempo de armazenagem) e comparar os resultados com teorias e normas existentes.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 IMPORTÂNCIA ECONÔMICA DA ARMAZENAGEM NO BRASIL

Atualmente o Brasil é um dos maiores produtores agrícolas do mundo, ocupando posição de destaque na produção de grãos, sendo os principais soja, milho, feijão, arroz e trigo. Em fevereiro de 2010 a produção de cereais, leguminosas e oleaginosas (caroço de algodão, amendoim, arroz, feijão, mamona, milho, soja, aveia, centeio, cevada, girassol, sorgo, trigo e triticale) foi da ordem de 145,1 milhões de toneladas, 8,5% superior à obtida em 2009 (133,8 milhões de toneladas) e 15% superior ao mesmo período de 2008 (IBGE, 2010).

Em termos absolutos, a produção nacional de cereais, leguminosas e oleaginosas, está assim distribuída pelas grandes regiões: a safra brasileira em 2010 teve a seguinte distribuição regional: Região Sul, 60,8 milhões de toneladas (+16,1%); Centro-Oeste, 49,9 milhões de toneladas (+2,2%); Sudeste, 16,4 milhões de toneladas (-4,2%); Nordeste, 14,0 milhões de toneladas (+20,6%) e Norte, 3,9 milhões de toneladas (+3,4%); o Paraná permaneceu como o maior produtor nacional de grãos, superando o Mato Grosso em 1,4 ponto percentual.

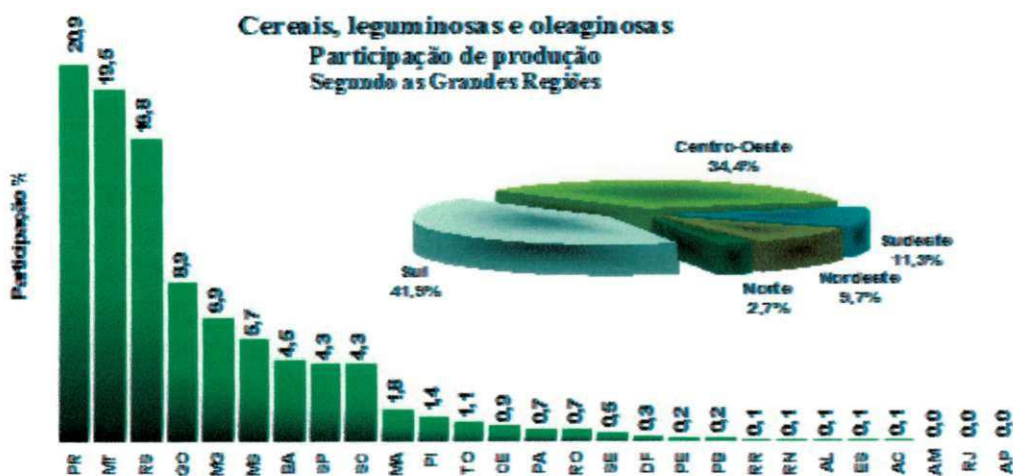


Figura 1. Distribuição por região da produção nacional. Fonte: IBGE (2010)

Mesmo sob esta condição privilegiada, o País possui uma estrutura de armazenagem deficiente, ou seja, o índice de armazenamento de produtos agrícolas nas fazendas e locais de distribuição, é insatisfatório frente ao seu potencial produtivo.

Do total das unidades existentes em fazendas, 64,2% se referem a armazéns para depósito de produtos a granel; na zona urbana os armazéns dessa modalidade representam 47% do total.

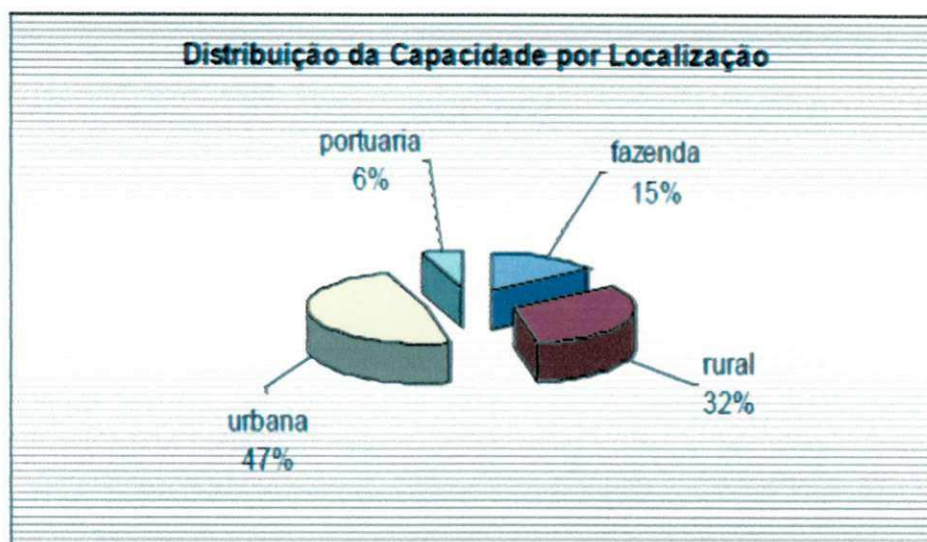


Figura 2. Armazenagem no próprio local de produção. Fonte: CONAB (2006)

Na zona rural, que responde por 32% da capacidade nacional de armazenagem, o equivalente a 38,9 milhões de toneladas, a maioria dos armazéns existentes é para produtos a granel, com 59% do total de armazéns nesse tipo de localização. (CONAB 2006).

Como agravante a este panorama nacional, estima-se que as perdas pós-colheita possam chegar a até 20% do total colhido, em que um dos grandes responsáveis por este desperdício é a necessidade de se transportar a produção agrícola até as unidades de distribuição, como cooperativas agrícolas localizadas, muitas vezes a longas distâncias do ponto de colheita e, por conseguinte, um novo transporte até os portos marítimos.

Segundo Calil Junior & Cheung (2007), uma unidade armazenadora tecnicamente projetada e bem conduzida, apresenta vantagens como:

- ✓ obtenção de um produto melhor conservado, longe do ataque de insetos e ratos.
- ✓ estocagem racional, segura, e principalmente, econômica, tendo em vista que o produtor que armazena a granel comercializa também a granel economizando, com isto, gastos significantes com sacaria e mão-de-obra ocupada para o ensacamento.
- ✓ economia do transporte, uma vez que os preços dos fretes aumentam durante o período da safra.
- ✓ diminuição do custo do transporte pela eliminação de impurezas e excesso de água pela secagem.
- ✓ formação de um estoque regulador do preço de mercado.
- ✓ concentração de grandes quantidades de produto em áreas relativamente pequenas.
- ✓ proteção da indústria contra as flutuações no preço das matérias-primas.

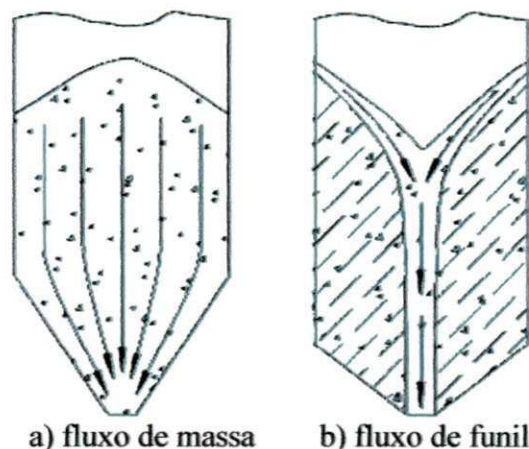
2.2 PROJETO DE FLUXO DE PRODUTOS SÓLIDOS

O fluxo de produtos sólidos pode ser descrito como o movimento sucessivo entre partículas em contato umas com as outras e com a superfície das paredes dos silos; e contudo, a possibilidade de ocorrência de fluxo é fortemente regida, dentre outros fatores, pela capacidade de dilatação do produto armazenado, por se acreditar que, durante a fase de armazenamento, o produto esteja sujeito a cargas constantes de consolidação responsáveis pelo aumento de sua densidade. No instante do fluxo o sólido armazenado deve, ser suficientemente capaz de se expandir e fluir por pequenos canais.

Calil Junior (1990) destaca que o tipo de fluxo caracteriza o descarregamento do produto, o tipo de segregação, a formação ou não de zonas de produto sem movimento e se o silo pode ser descarregado completamente. Determina, também, a distribuição das pressões nas paredes do silo e fundação, além da integridade e custo da construção.

Jenike (1964), pioneiro no estudo do comportamento de sólidos sob condições de armazenagem, definiu dois tipos básicos de fluxo: massa e funil. Define-se fluxo de massa aquele cujo produto entra, substancialmente, em movimento, em todas as partes

do silo no momento do processo de descarregamento (ocorre quando as paredes da tremonha são suficientemente inclinadas e lisas e não existem abruptas transições) (Figura 3a). Com relação ao fluxo de funil conceitua-se como sendo o tipo de fluxo onde apenas parte do produto entra em movimento, através de um canal vertical formado no centro do silo (Figura 3b).



a) fluxo de massa b) fluxo de funil
 Figura 3. Tipos básicos de fluxo

Para o fluxo de funil o tubo formado no seu interior no processo de descarregamento pode, ainda, assumir diferentes configurações, como visto na Figura 4.

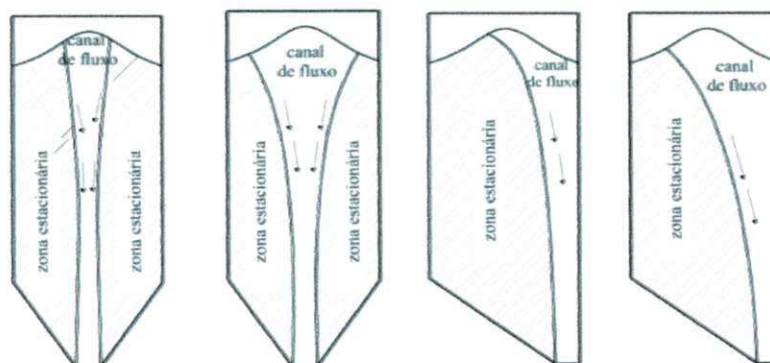


Figura 4 Variações do tubo no fluxo de funil

Segundo algumas normas internacionais, o tipo de fluxo pode ser predefinido com base no coeficiente de atrito do produto com a parede e na inclinação da tremonha. Para a escolha do ângulo de inclinação da tremonha Calil Junior & Cheung (2007) recomendam que seja sempre diminuído de 3° para se obter um padrão de fluxo seguro, devido às incertezas embutidas no processo, conforme se observa na Figura 5.

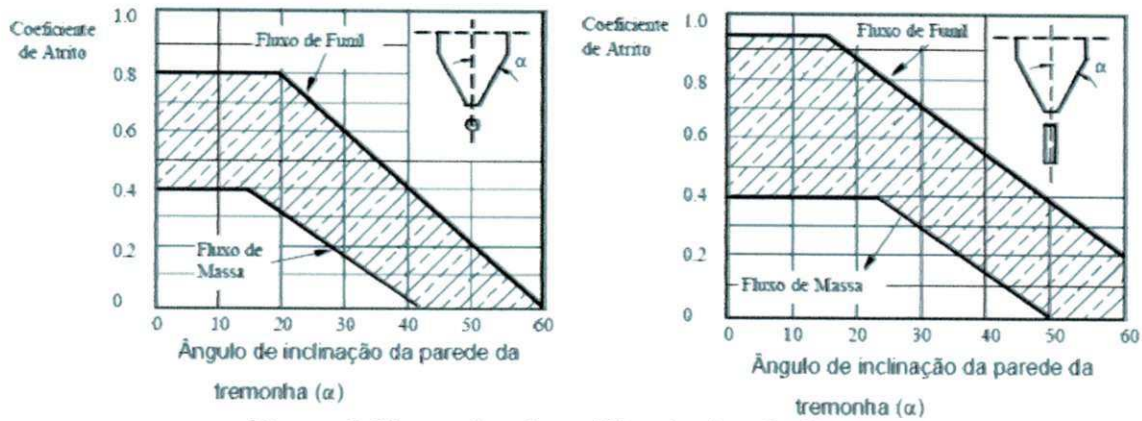


Figura 5. Determinação gráfica do tipo de fluxo

Além dos fluxos de massa e funil um tipo intermediário de fluxo pode surgir sendo caracterizado pelo movimento de todas as partículas da massa ensilada em uma parte do silo, juntamente com a formação do efeito tubo em outra parte; esse tipo intermediário é denominado fluxo misto, conforme a Figura 6.

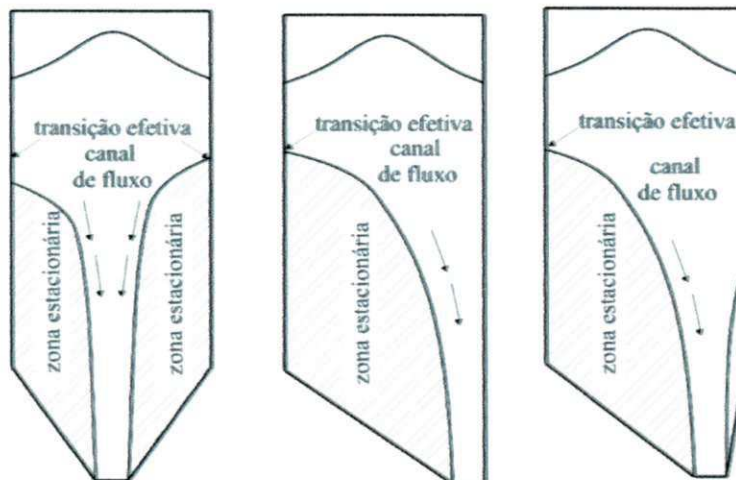


Figura 6. Variações do fluxo misto

É importante salientar que a saída excêntrica em silos com fluxo misto e em tubo, provoca carregamentos assimétricos, os quais são muito problemáticos para silos metálicos devido à pequena espessura das paredes e que, mesmo para saídas concêntricas, a transição efetiva pode não ocorrer na mesma altura, em todo o perímetro (CALIL JUNIOR et al., 2007).

Além da configuração da descarga do silo outro fator que contribui para a variação do fluxo no interior dos silos é sua esbelteza, relação definida entre a razão da

altura do corpo do silo H_c e seu diâmetro interno D_c (H_c/D_c). Quanto maior for esta relação mais esbelto será considerado o silo, na Figura 7 são apresentadas as prováveis configurações do canal de fluxo, em função da esbelteza do silo.

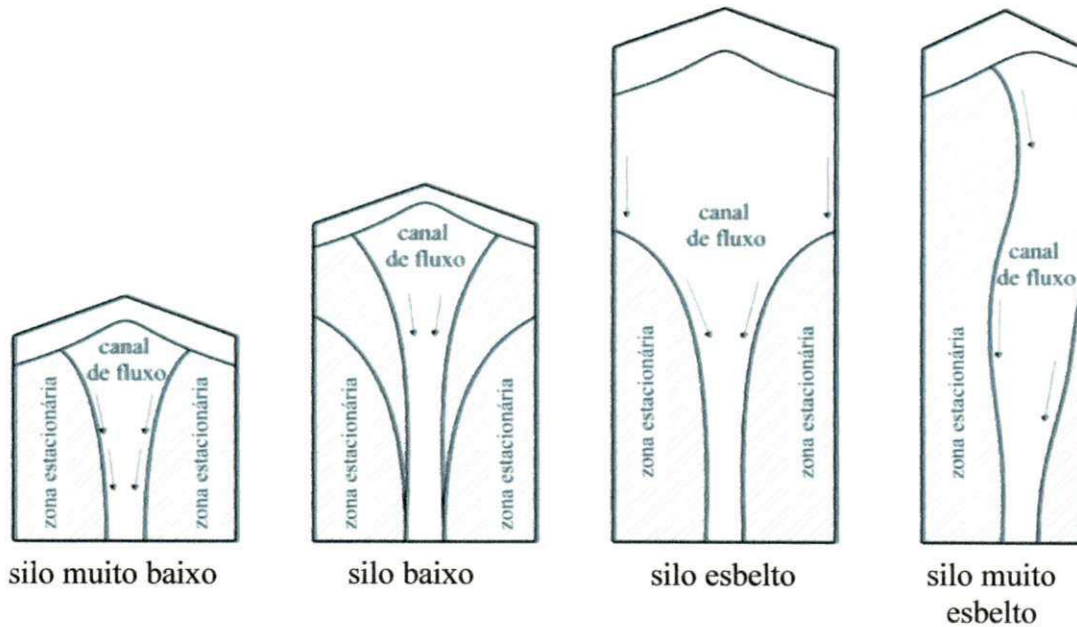


Figura 7. Variações do fluxo em função da esbelteza dos silos

Carson & Jenkyn (1993) afirmam que é possível e até mesmo provável que a geometria do canal de fluxo dependa de propriedades que ainda não são habitualmente medidas como no caso da dilatação sofrida pela massa armazenada durante o fluxo; desta forma, a correlação apenas entre as variáveis conhecidas para uma grande faixa de produtos e experimentos, ainda é insuficiente.

Como resultado, as avaliações de fluxo em silos empregam basicamente:

- ✓ Conhecimento relativo ao contorno entre fluxo de massa e funil;
- ✓ Observações experimentais de fluxo de funil em modelos e silos reais;
- ✓ Correlações entre observações-padrões de fluxo com propriedades simples dos produtos;
- ✓ Conceitos mecânicos simples relativos a orientações dos contornos do fluxo interno e;
- ✓ Empirismo, simplicidade e conservadorismo.

Para os dois tipos básicos de fluxo, Calil Junior et al. (2007) elencaram, na Tabela 1, as principais vantagens e desvantagens, de forma a permitir uma escolha coerente do sistema desejado de armazenamento e beneficiamento.

Tabela 1. Principais vantagens e desvantagens dos fluxos de massa e funil.

FLUXO DE MASSA		FLUXO DE FUNIL	
Vantagens	Desvantagens	Vantagens	Desvantagens
Vazão regular	Altas tensões na transição da tremonha	Menor altura da tremonha	Flutuações na vazão
O efeito de segregação radial é reduzido com a melhora da homogeneidade	Desgaste superficial da parede	Diminuição das pressões dinâmicas na região da tremonha	Efeitos de consolidação com o tempo podem causar obstruções no fluxo
Campo de tensões mais previsível	São necessárias tremonhas mais profundas	Menor desgaste superficial da parede	Grande favorecimento ao colapso
Toda capacidade é utilizada	Maior energia de elevação		Redução da capacidade de armazenagem
Maior capacidade de armazenagem, não possui regiões com produto estagnado	As partículas devem resistir à queda de alturas maiores		Formação de tubos
			Picos de pressão na região da transição efetiva

2.3 PROBLEMAS RELACIONADOS AO PROJETO DE FLUXO

De acordo com Rotter (2001), quatro problemas surgem regularmente, no projeto e funcionamento dos silos, sendo:

- ✓ A integridade estrutural do silo pode ser comprometida pelas pressões as quais podem ser muito altas, muito baixas ou muito assimétricas;
- ✓ O produto armazenado pode permanecer estagnado ou ocorrer fluxo com configuração irregular;
- ✓ O processo de carregamento ou tipo de fluxo pode causar segregação da massa ensilada;

- ✓ A descarga do silo pode gerar ruídos ou vibrações indesejáveis.

Os quatro problemas acima são inerentes à geometria do silo, às propriedades do produto armazenado, de modo que o produto é depositado no silo, o tipo de fluxo desenvolvido durante a descarga e outros fatores que afetam o estado das partículas armazenadas, a seguir se apresentada na Figura 8, os principais problemas funcionais dos silos e os parâmetros que os precedem.

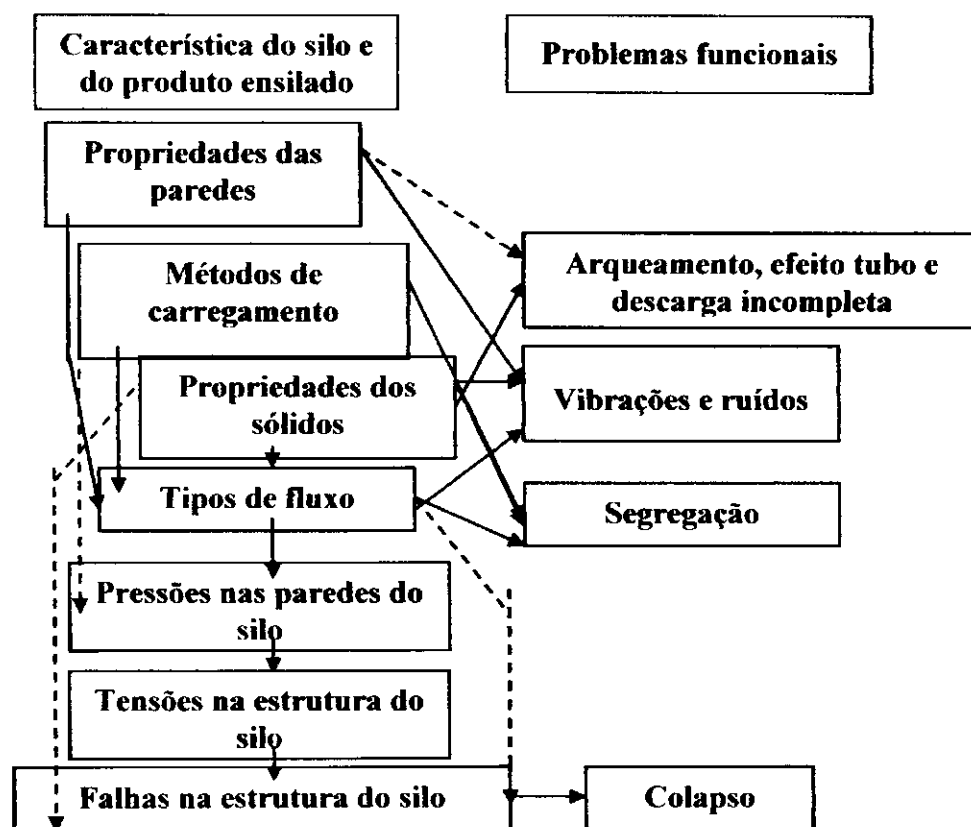


Figura 8. Problemas funcionais em silos e seus precedentes

Pode-se notar, através da figura anterior, que a redução da vida útil dos silos é influenciada diretamente pelas cargas que a estrutura terá que suportar e que, por sua vez, estão ligadas às propriedades dos sólidos, às características das paredes e aos métodos de carregamento, o que só reforça a idéia de que uma análise estrutural eficiente deve iniciar-se pela completa investigação das propriedades do que será armazenado, da forma de carregamento e do projeto correto das paredes. Rotter (2001) cita que fenômenos conhecidos como arqueamento sobre o orifício de descarga da

tremonha, efeito tubo e a descarga incompleta são os mais observados e geralmente responsáveis por irregularidades no fluxo.

2.4 ARQUEAMENTO

Diz-se do arqueamento quando ocorre a formação, por parte de uma porção da massa ensilada, de um elemento obstrutor, na forma de um arco, estável logo acima do orifício de descarga. Usualmente, isto ocorre quando o silo é dotado de tremonha, o que pode resultar em um fluxo irregular ou até mesmo em seu total impedimento.

O efeito de arqueamento pode ser dividido em arcos mecânicos e coesivos. Ravenet (1983) cita que os arcos mecânicos são, em geral, formados por partículas grossas em que, quando iniciado o fluxo, são impedidas de se movimentar no sentido axial e de rotação entre si, sobretudo quando os espaços vazios entre essas partículas são preenchidos por partículas de tamanhos menores, conforme Figura 9.

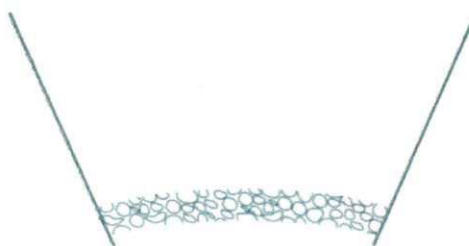
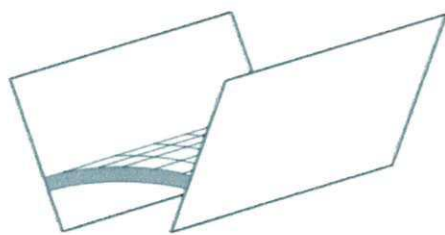
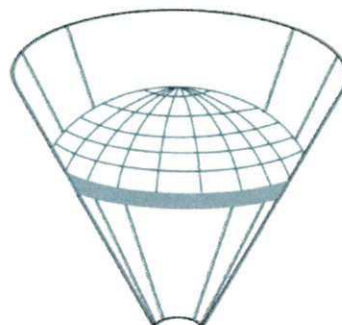


Figura 9. Arco mecânico

Já os arcos coesivos são formados substancialmente, por partículas finas que, sob ação de forças de coesão, se agrupam e adquirem resistência, prejudicando o processo de descarregamento. Os arcos coesivos podem assumir diferentes configurações em função da forma da tremonha utilizada, sendo comum o surgimento de arcos coesivos denominados “ponte” em tremonhas, na forma de cunha (Figura 10a) e de arcos, conhecidos como abóboda ou domo em tremonhas de eixo simétrico (Figura 10b).



a) arco tipo "ponte"



b) arco tipo abóboda ou domo

Figura 10. Arcos coesivos

Além de serem prejudiciais ao processo de descarga, tanto os arcos mecânicos quanto os coesivos representam grande perigo à integridade estrutural do silo uma vez que seu desprendimento tende a gerar efeito de sucção do ar na parte superior do corpo do silo, simultaneamente a um acréscimo abrupto de pressão nos elementos logo abaixo de sua localização. Obviamente, essas consequências se manifestam de forma mais indesejada em silos de paredes delgadas.

2.5 EFEITO TUBO

O efeito tubo ocorre, substancialmente, no fluxo de funil, sendo caracterizado pela estagnação e conservação de toda a massa ensilada adjacente ao canal de fluxo e ao longo de toda a altura do silo, mesmo após o término do esvaziamento (Figura 11).

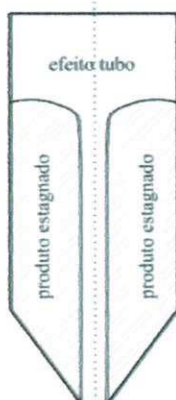


Figura 11. Formação do efeito tubo

Assim como a formação de arcos, o efeito tubo pode ser extremamente danoso à estrutura do silo se o produto começar, a princípio na condição estagnada, a se mover

no sentido axial; desta forma, as primeiras camadas movidas provocarão sucção do ar na parte superior do corpo do silo e uma expulsão abrupta do ar contido no tubo, pelo orifício de descarga podendo causar deformações e ruptura das paredes, na união tremonha-corpo do silo, no orifício de descarga e nos dispositivos de descarregamento.

2.6 DESCARGA INCOMPLETA

Ocorre devido a permanência de parte da massa armazenada no interior do silo; suas consequências, tal como no efeito tubo, vão desde a perda de capacidade efetiva de armazenagem até possíveis contaminações uma vez que uma mesma quantidade de produto pode permanecer no interior do silo por um período superior ao desejado como no caso de perecíveis, como leites em pó, farinhas e outros compostos alimentícios, conforme Figura 12.



Figura 12. Silo com descarga incompleta

2.7 INFORMAÇÕES REQUERIDAS DOS PRODUTOS SÓLIDOS ARMAZENÁVEIS

As características dos sólidos a serem contidos apresentam grande influência nas pressões exercidas nas paredes e fundo de um silo assim como no modelo de fluxo ocorrente; entretanto, pouco se conhece sobre as reais propriedades influentes e seus valores; mas quando se trata de armazenagem de modo geral, erroneamente o comportamento dos sólidos nos silos é associado aos de líquidos cujos mecanismos de fluxo apresentam diferenças significativas.

Quanto às suas determinações, Jenike (1964) deu grande contribuição científica ao desenvolver um aparelho de cisalhamento direto apropriado para produtos sólidos

denominado de “Jenike shear cell”. Com ele, é possível determinar os esforços sobre os quais o produto estará sujeito durante o armazenamento e nas condições de fluxo previstas para acontecer no silo conforme Figura 13.

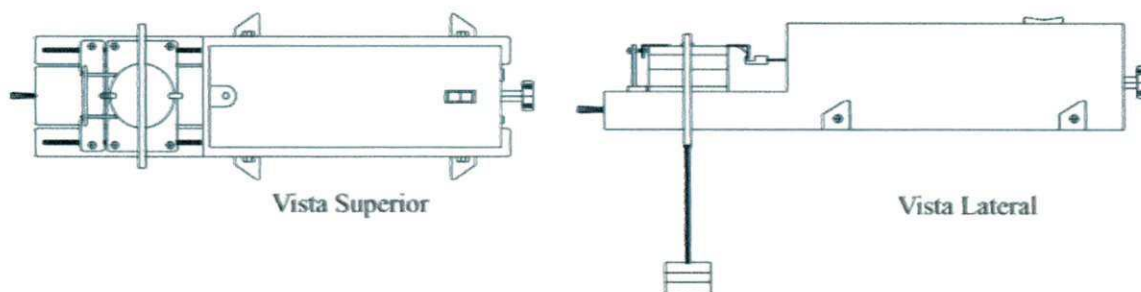


Figura 13. Aparelho de cisalhamento direto de Jenike

Com este aparelho é possível determinar as principais propriedades físicas e de fluxo de produtos sólidos armazenáveis, sendo elas:

Físicas:

- ✓ Densidade;
- ✓ Teor de umidade;
- ✓ Granulometria.

De fluxo:

- ✓ Peso específico consolidado (γ);
- ✓ Ângulo de atrito interno (θ);
- ✓ Ângulo efetivo de atrito interno (δ);
- ✓ Ângulo de atrito interno do produto com a parede (θ_w);
- ✓ Função Fluxo (FF);
- ✓ Fator fluxo da tremonha (ff).

2.7.1. Densidade

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

Jenike (1964) mostra que a influência da compressibilidade de um produto (mudança de densidade com a pressão de consolidação) no processo de fluxo é desprezível. Produtos pulverulentos de baixa densidade têm a vantagem de fluir com menor resistência à compactação na tremonha mas tem a desvantagem da inércia em repouso e alta resistência ao ar. Um produto pulverulento de alta densidade pode compactar para uma resistência maior na tremonha porém terá baixa inércia em repouso. O produto granular não é tão compressível e então não ganha muita resistência em sua boca de descarga do silo (Calil Junior, 1984).

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

2.7.2 Teor de umidade

Segundo Valentini (1998), Castro e Almeida (1998), a determinação do teor de umidade é um procedimento fundamental na armazenagem de grãos. Valores de umidade considerados seguros para armazenamento adequado do produto, são conhecidos e devem ser respeitados para que a qualidade dos grãos se mantenha durante a estocagem. Volumes grandes de grãos exigem amostragens numerosas e resultados rápidos são difíceis de serem obtidos em tempo hábil para tomada de decisões sobre a qualidade do produto e o processamento a que devem ser submetidos.

Os métodos para determinação da umidade de grãos são classificados em diretos e indiretos. Nos métodos diretos a água é retirada do produto, em geral por processo de aquecimento, e o teor de umidade é calculado pela diferença de peso das

amostras no início e ao final do processo; esta diferença corresponde à quantidade de água retirada. Devido à sua maior confiabilidade os métodos diretos são empregados como padrão para a aferição de outros procedimento e se enquadram nesta categoria os métodos de estufa, destilação, infra-vermelho e Karl Fisher PUZZI (1986).

No Brasil, o método oficial para determinação de umidade é o de estufa a $105^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas, estabelecido pelo Ministério da Agricultura BRASIL (1992).

2.7.3 Granulometria

Das propriedades físicas dos grãos o conhecimento da granulometria, associado ao teor de água, é de suma importância no projeto de silos considerado pelas principais normas internacionais (ACI, 1997; ASAE, 2000a; ASAE, 2000b; DIN, 1987; NRCC, 1995; AUSTRALIA STANDARDS, 1996), tal como na definição dos parâmetros a serem adotados na regulagem de implementos agrícolas, como colhedoras e plantadoras.

O procedimento utilizado para caracterizar o tamanho das partículas se chama granulometria. Este procedimento consiste no peneiramento de uma amostra do ingrediente em questão gerando informações que possibilitam as determinações do Módulo de Finura (MF), do Índice de Uniformidade (IU) e do Diâmetro Geométrico Médio (DGM) das partículas (ZANOTTO; BELLAVER, 1996).

2.7.4 Peso específico consolidado (γ)

Conforme Calil Junior (1989), não existe relação direta entre a razão peso e volume de uma amostra do produto com a predição do fluxo; entretanto, esta variável precisa ser calculada pois é um parâmetro importante para determinação das pressões em silos.

2.7.5 Ângulo de atrito interno (θ) e Ângulo efetivo de atrito interno (δ)

Para uma condição de consolidação o lugar geométrico de deslizamento de produtos granulares de fluxo livre é a reta obtida pelo cisalhamento de uma amostra do produto sob várias cargas normais. Com as tensões principais σ_M e σ_c atuantes em um



elemento do produto armazenado para uma dada condição de consolidação é construído o respectivo círculo de Mohr; a reta que tangencia todos os círculos é então chamada lugar geométrico de deslizamento do produto (YL) enquanto seu ângulo de inclinação é chamado ângulo de atrito interno do produto (ϕ), conforme Figura 14.

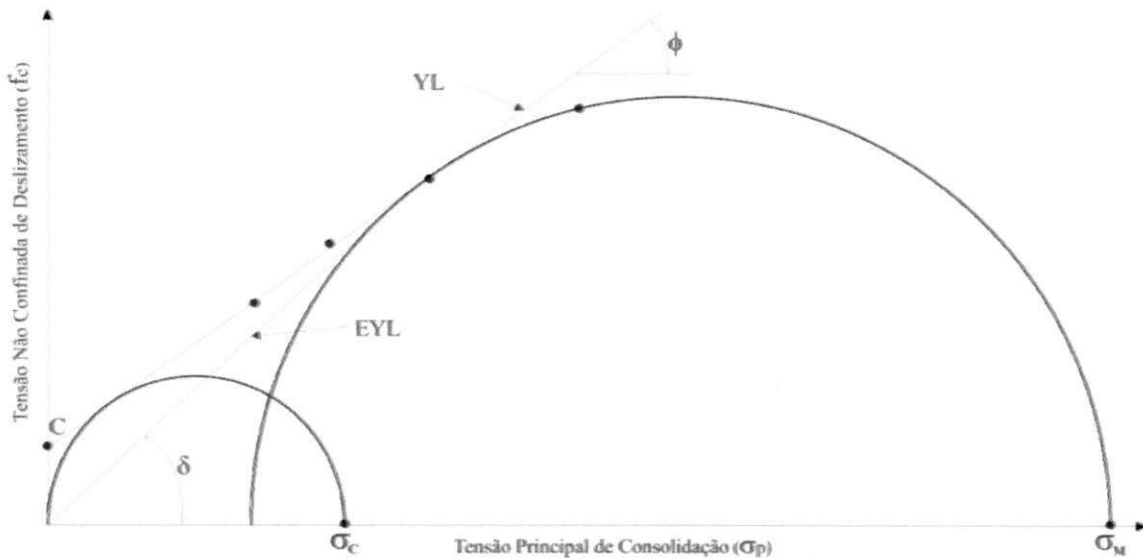


Figura 14. Lugares geométricos e ângulos de atrito interno

Quando o produto não é de fluxo livre, a reta construída da forma acima indicada não passa pela origem, caso em que a coordenada na qual essa reta corta a origem; é denominada coesão (C). O ângulo de inclinação dessa reta é ainda o ângulo de atrito interno mas a reta que passa pela origem e tangencia o círculo de Mohr definido pela maior e menor tensão principal, é então denominada lugar geométrico efetivo de deslizamento (EYL) e o respectivo ângulo de inclinação passa a ser denominado ângulo efetivo de atrito interno (δ).

2.7.6 Ângulo de atrito interno do produto com a parede (ϕ_w)

O critério para condições de deslizamento do produto ao longo da parede pode ser expresso como a relação entre a tensão de cisalhamento (τ_w) e a tensão normal à parede (σ_w), chamada de lugar geométrico de deslizamento na parede (WYL).

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

inclinação será o ângulo de atrito do produto com o material da parede do silo (BENINK, 1989).

O lugar geométrico de deslizamento na parede, WYL, para produtos de fluxo livre, pode ser obtido por uma linha direta que passa pela origem, como mostrado pela linha “a” na Figura 15. No caso de produtos coesivos, o WYL é uma linha direta com uma ordenada C_w , como ilustrado pela linha “b”. Em alguns casos, a combinação entre a parede e o produto não segue exatamente este conceito ideal e um WYL com pouca curvatura é obtido, como dado pela linha “c”. O ângulo de inclinação da reta que define o lugar geométrico de deslizamento da parede é denominado ângulo de atrito do produto com a parede (ϕ_w) cujo valor de sua tangente expressa o coeficiente de atrito produto-parede (μ).

$$\phi_w = \tan^{-1} \frac{\tau_w}{\sigma_w} \quad \text{Equação (1)}$$

$$\mu = \tan \phi_w \quad \text{Equação (2)}$$

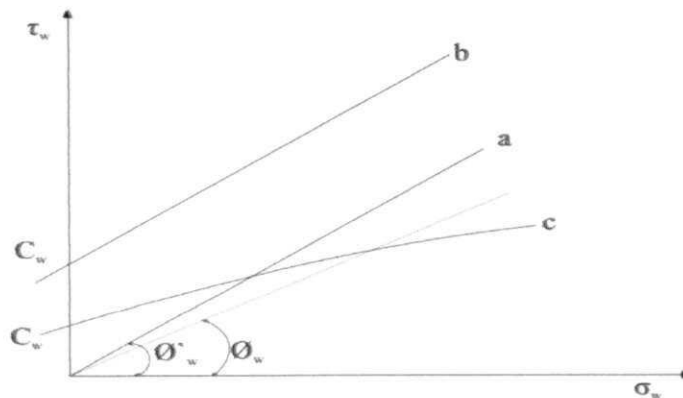


Figura 15. Lugar geométrico de deslizamento do produto com a parede

Para o caso de paredes de chapa ondulada ou trapezoidal, o coeficiente de atrito efetivo (μ_{ef}) pode ser um modelo com superfícies de deslizamento ponderadas expresso pela equação a seguir:

$$\mu_{ef} = \frac{b_e}{b_e + b_w} \tan \delta + \frac{b_w}{b_e + b_w} \mu_c \quad \text{Equação (3)}$$

Sendo $\frac{b_e}{b_e + b_w} + \frac{b_w}{b_e + b_w} = 1$

Em que μ_c é o coeficiente de atrito com a parte da parede considerada plana, b_e e b_w representam os comprimentos relativos dentro de uma onda completa da parede e estão indicados na Figura 16, e consiste observar que a proporção de deslizamento entre o produto em relação à parede e o comprimento do produto parado deve ser obtida experimentalmente.

Para chapas onduladas, a EUROCODE 1 (2005) recomenda um valor de $\frac{b_w}{b_e+b_w} = 0,2$, o que indica que 20% do atrito são mobilizados entre os grãos e a chapa ondulada e os 80% restantes são mobilizados entre grãos, conforme Figura 16.

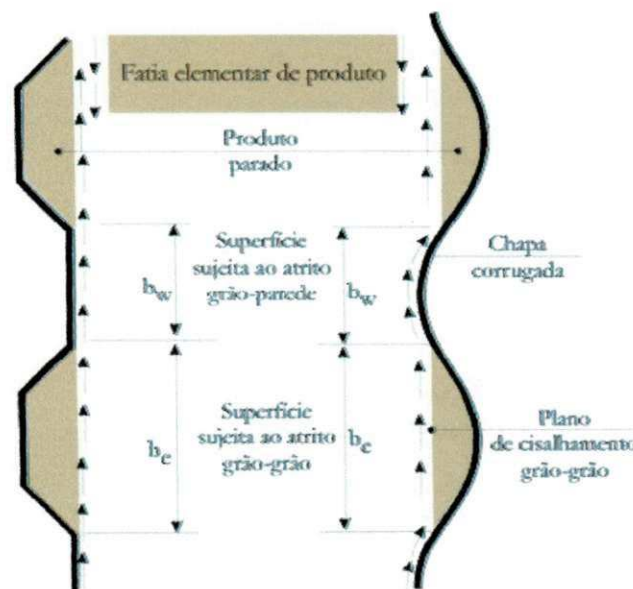


Figura 16. Deslizamento nas chapas trapezoidal e ondulada

Rotter (2001) comenta que devido ao tipo de silo e às diversas variações sofridas pelos sólidos, a identificação de apenas um limite de sua propriedade não seria suficiente para sua completa representação sendo necessário ter conhecimento dos prováveis valores máximos e mínimos.

Recomenda-se, então, que as determinações sejam feitas não apenas em função de um valor médio mas também, de seus limites máximos e mínimos, com probabilidade de ocorrência de 5%, conforme Figura 17.

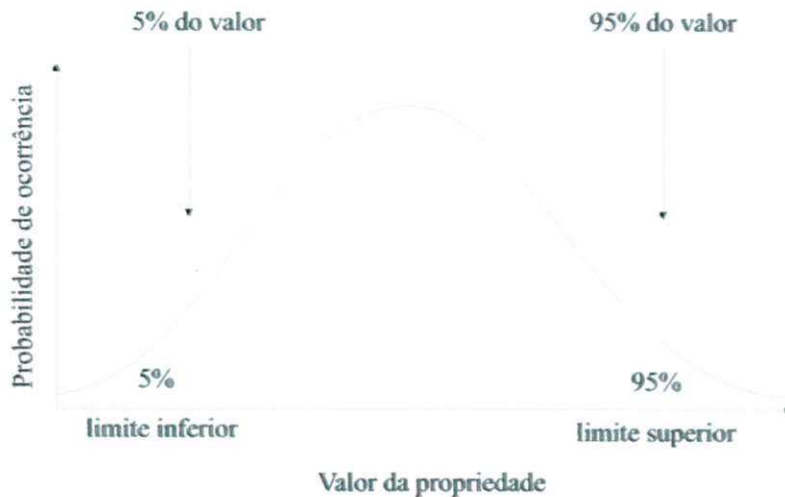


Figura 17. Limites das propriedades dos produtos

2.7.7 Função Fluxo (FF)

Calil Junior (1990) define Função Fluxo (FF) como sendo uma relação entre a resistência e pressões de consolidação atuantes em uma massa armazenada. A função fluxo é uma medida da escoabilidade ou fluidez de um produto e pode ser utilizada para obtenção da abertura mínima de descarga em um silo para prevenir o arqueamento (BENINK, 1989) devendo ser conhecida sob as mais severas condições de aplicação.

A função Fluxo de um produto é um gráfico no qual é plotada a tensão inconfínada de deslizamento do produto versus o maior valor de tensão de consolidação e representa o esforço atuante no produto quando em situação de consolidação, conforme Figura 18.

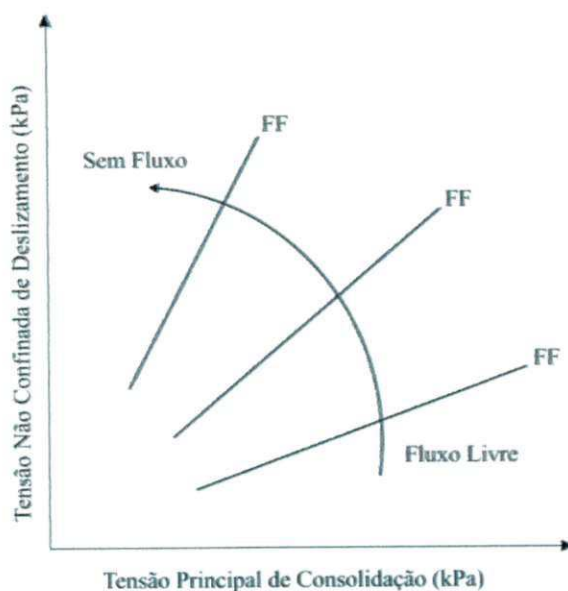


Figura 18. Função Fluxo dos produtos

Observa-se que a escoabilidade do produto é inversamente proporcional ao ângulo que a reta FF forma com a horizontal. Outro parâmetro importante é o Índice de fluxo (ff_c) o qual é definido como o inverso da inclinação de FF (JENIKE, 1964) e pode variar de uma condição de ausência de fluxo até outra caracterizada como de fluxo livre. Jenike usou o ff_c para classificar os produtos armazenáveis quanto à sua escoabilidade com altos valores representando uma condição de fluxo fácil.

Tabela 2. Classificação do tipo de fluxo de produtos sólidos

Tipo de fluxo	Índice de fluxo (ff_c)
Sem fluxo	$ff_c < 1$
Muito coesivo	$1 < ff_c < 2$
Coesivo	$2 < ff_c < 4$
Fácil	$4 < ff_c < 10$
Livre	$ff_c > 10$

Segundo Prescott (2000) apud Calil Junior & Cheung (2007), a fluidez de um produto não pode ser expressa por um valor único ou por um índice. A fluidez é um resultado da combinação das propriedades físicas do produto, as quais afetam o fluxo e o equipamento utilizado para sua manipulação, armazenagem ou processamento.

2.7.8 Fator fluxo da tremonha (ff)

Consiste em importante parâmetro para o estudo da fluidez dos produtos armazenáveis que, diferentemente da Função Fluxo, é uma propriedade do conjunto silo (geometria e ângulo de atrito com a parede) e do produto. De acordo com Calil Junior (1990), o fator fluxo da tremonha é uma função da forma da tremonha e das propriedades do produto armazenado e indica a escoabilidade do produto na tremonha; quanto menor este valor, melhor será a tremonha.

Jenike (1964) lançou mão de uma teoria para o cálculo do fator fluxo da tremonha denominada Teoria dos Campos de Tensões Radiais a qual determina as

tensões durante o esvaziamento perto da saída da tremonha, no entanto é comum a utilização da Teoria de Enstad para seu cálculo, conforme equações abaixo:

$$ff = \frac{Y(1+\sin \delta)}{2(X-1)F(\theta) \cos \theta} \quad \text{Equação (4)}$$

$$Y = \frac{(2+2 \cos \alpha)^2(\alpha^{1+m}) \cos \theta + \sin \beta (\sin \alpha)^{1+m}}{(1-\sin \delta)(\sin \alpha)^{2+m}} \quad \text{Equação (5)}$$

$$X = \frac{2^m \sin \delta \left[\frac{\sin(\alpha+\beta)+\cos \theta}{\cos \theta} \right]}{1-\sin \delta} \quad \text{Equação (6)}$$

$$\alpha = \beta + 90 - \theta \quad \text{Equação (7)}$$

$$F(\theta) = \left[\frac{65}{220-\theta} \right]^m \left[\frac{200}{290-\theta} \right]^{1-m} \quad \text{Equação (8)}$$

Onde: $m = 1$ (eixo simétrico) e $m = 0$ (retangular $L \geq 30$)

Outra teoria de grande aceitação para a determinação do fator fluxo (ff) foi proposta por Walker (1966) cujas expressões são:

$$ff = \frac{1+\sin \delta}{\Delta}; \quad \text{sendo } \alpha + \phi_w \geq 45^\circ \quad \text{Equação (9)}$$

$$ff = \frac{1+\sin \delta}{\Delta} \sin 2(\alpha + \phi_w), \quad \text{sendo } \alpha + \phi_w < 45^\circ \quad \text{Equação (10)}$$

Onde:

$$\Delta = 2 \sin \delta \sin 2(\alpha + \varepsilon) - \tan \alpha [1 - \sin \delta \cos 2(\alpha + \varepsilon)] \quad \text{Equação (11)}$$

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \left[\phi_w + \arcsen \frac{\sin \phi_w}{\sin \delta} \right] \quad \text{Equação (12)}$$

Outra propriedade igualmente importante, mas pouco comentada pelas referências científicas é o módulo efetivo de elasticidade do produto armazenado (E_f). A norma AS 3774 (1996) cita que o limite superior do módulo efetivo de elasticidade de um sólido depende da tensão vertical atuante sobre ele e que, a certa profundidade z , ele pode ser expresso pela seguinte equação:

$$E_f = xP_{vc} \quad \text{Equação (13)}$$

Onde:

E_f = módulo efetivo de elasticidade (kPa);

x = coeficiente de aproximação do módulo de elasticidade (adimensional) e;

P_{vc} = pressão vertical de carregamento (kPa).

Na ausência de dados experimentais o valor de x deve ser tomado da seguinte equação:

$$x = 3\gamma^{3/2} \quad \text{Equação (14)}$$

Sendo γ o peso específico consolidado do produto dado em kN/m^3 . Alternativamente, o valor de x pode ser aplicado como igual a 70 para grãos agrícolas secos, igual a 100 para minerais com baixa granulometria e igual a 150 para minerais com grandes dimensões de partículas.

2.8 USO DE IMAGENS DIGITAIS NA INVESTIGAÇÃO DO FLUXO EM SILOS

Uma dificuldade encontrada para validação dos modelos criados para predição de fluxo é sua comparação com situações reais devido à opacidade das paredes dos silos, o que vem sendo contornado pelo uso de protótipos confeccionados com material translúcido e construídos em laboratório.

No desejo de maximizar as possibilidades de exploração nesses modelos reduzidos, a obtenção de imagens computadorizadas de todas as etapas do fluxo vem sendo largamente empregada na tentativa de melhor compreensão de todos os detalhes inerentes ao fluxo de produtos armazenáveis.

Ostendorf e Schwedes (2005) citam que técnicas de análise de imagens como PIV (Particle Image Velocimetry) podem ser empregadas para se estudar o fluxo em silos o PIV, por exemplo, pode ser utilizado para determinar a intensidade e direção do vetor velocidade das partículas através de imagens de alta resolução.

Sielamowicz, Blonski e Kowalewski (2006) citam que o uso da técnica PIV na pesquisa do fluxo de produtos armazenáveis foi apresentado por Lueptow, Akonur e Shinbrot (2000) que a recomendaram para o estudo de fluxos semibidimensionais em modelos transparentes.

Seu funcionamento consiste na introdução de minúsculas partículas de baixa inércia e densidade neutra na massa armazenada cujas imagens capturadas por câmeras especiais. A partir da reflexão das luzes da câmera nessas partículas em intervalos de tempo conhecidos é possível a identificação do espaço percorrido, do traçado e, conseqüentemente, da velocidade desenvolvida em cada parte do silo (Steingart e Evans, 2005).

Ostendorf e Schwedes (2005) explicam que o emprego da técnica PIV inicia pela iluminação da área a ser estudada por um feixe de laser. Em seguida, um grande número de *tracers*, partículas refletoras do laser, é introduzido na massa refletindo sua luz. A cada movimento desses *tracers* sua nova posição é captada por uma câmera de alta velocidade e, para a medição da velocidade dos *tracers*, um conjunto de imagens é obtido em intervalos de tempo constantes entre *frames*.

Devido ao grande número de *tracers*, a obtenção de seu deslocamento separadamente torna-se impossível, então, cada *frame* é dividido em pequenas áreas quadradas denominadas de “áreas de interrogação”. O tamanho dessas áreas de interrogação depende da precisão desejada, da resolução da medição e da qualidade das imagens obtidas.

Sabe-se que essa tecnologia tem sido empregada com sucesso para investigar a velocidade em fluidos com uma ou multifases como a aerodinâmica de aeronaves e automóveis ou na otimização da combustão no interior de motores. Com o uso de PIV é possível analisar a velocidade em toda uma área em tempo real, entretanto, como no caso de medições visuais, o PIV é uma técnica de medição indireta, assim, somente o movimento de uma imagem de *tracers* pode ser observado e sua precisão é limitada pela resolução óptica da câmera, enfim a função do PIV é o cálculo do deslocamento de cada área de interrogação.

Na Figura 19 em que no cálculo do deslocamento de uma área de interrogação é demonstrado. No tempo $t = t_0$, Figura 19a, a câmera capta um *frame* com um padrão aleatório de partículas, no tempo $t = t_0 + \Delta t$, Figura 19b – d, o padrão foi modificado devido ao movimento das partículas; enfim para calcular seu deslocamento a área de interrogação estabelecida na Figura 19a é movida até sua coincidência com os *frames* das figuras seguintes, assim, para cada encontro de frames tem-se o valor do deslocamento e seu vetor direção.

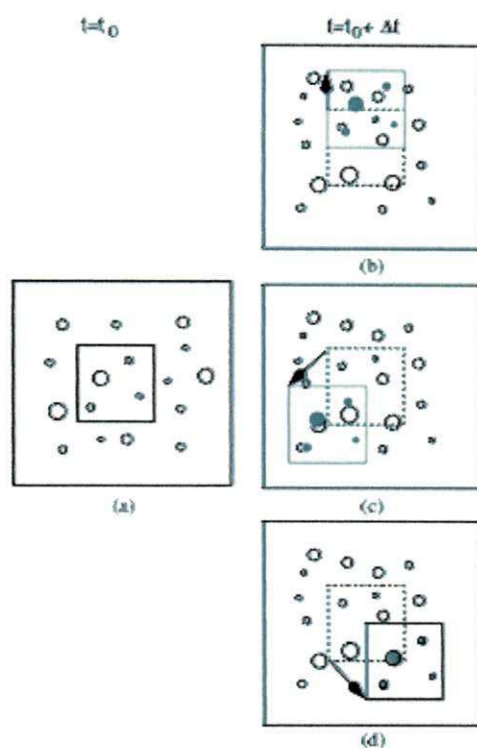


Figura 19. Determinação do deslocamento de uma área de interrogação

Ao aplicar a técnica PIV no fluxo de sementes de amaranto, Sielamowicz, Blonski e Kowalewski (2005) obtiveram uma sequência de 315 imagens tomadas em intervalos de 0,2666s (Figura 20). Observar-se a evolução do fluxo misto durante a descarga por gravidade. O desenvolvimento de uma região de alta velocidade (cor vermelha intensa) próxima ao orifício de descarga é perfeitamente visível com indicação dos limites das zonas estagnadas por meio da variação de intensidade da cor azul nas figuras. No início do descarregamento uma zona de fluxo misto se propagou para cima alargando-se e, quando atingiu o topo da massa armazenada, sua superfície assumiu forma côncava.

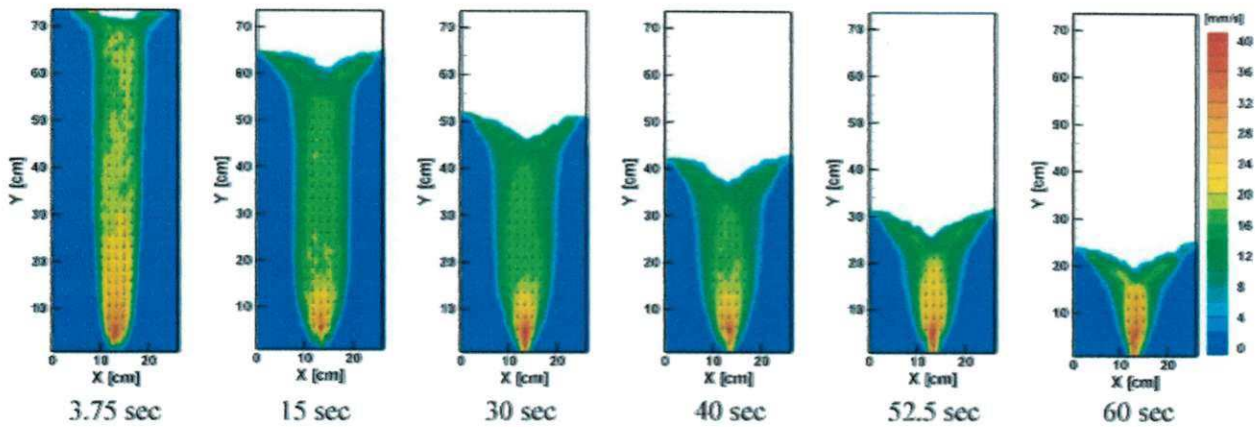


Figura 20. Magnitude e perfil da velocidade de sementes de amaranto

Como visto na Figura 20, a superfície superior do produto muda sua forma enquanto ocorre o fluxo; seu perfil é plano no início e se torna praticamente cônico nos estágios finais, nas zonas estagnadas a velocidade das partículas é nula, no interior da massa em fluxo o sentido do vetor velocidade na fase inicial é vertical, indicando ausência de deslocamentos laterais mensuráveis. Na camada superficial da zona em fluxo o vetor velocidade indica convergência lateral para a zona de fluxo.

A velocidade de fluxo torna-se máxima no eixo de simetria do silo próximo ao orifício de descarga e decresce em direção ao topo da massa armazenada e das paredes; nota-se, também, que os perfis de fluxo são simétricos; em um estágio avançado de fluxo, a dimensão lateral da região de fluxo aumenta; na região de fluxo de funil os vetores velocidade passam verticalmente pelo orifício de descarga eles têm o mesmo comprimento ao longo do eixo de simetria indicando alta velocidade; a direção de fluxo muda próximo ao orifício de descarga e os vetores velocidade passam diretamente pelo orifício de descarga mas seus *tracers* não são verticais em toda a região analisada.

Inicialmente, a largura do fluxo desenvolvido é relativamente pequena. A velocidade média diminui com o tempo, enquanto a região de fluxo de alta velocidade se localiza na vizinhança do orifício de descarga, já na fase final de fluxo a região de elevada velocidade de fluxo no orifício de descarga se espalha para cima na zona de fluxo.

Ostendorf e Schwedes (2005) estudaram o descarregamento de partículas cilíndricas de Politeftalato (PET) de 3 mm de diâmetro em um silo com tremonha de

15° com a vertical (Figura 21), e obtiveram as imagens por uma câmera de alta velocidade do tipo “Kodak motion corder” com um anel de memória para 546 frames com tamanho de 512 x 480 pixels.

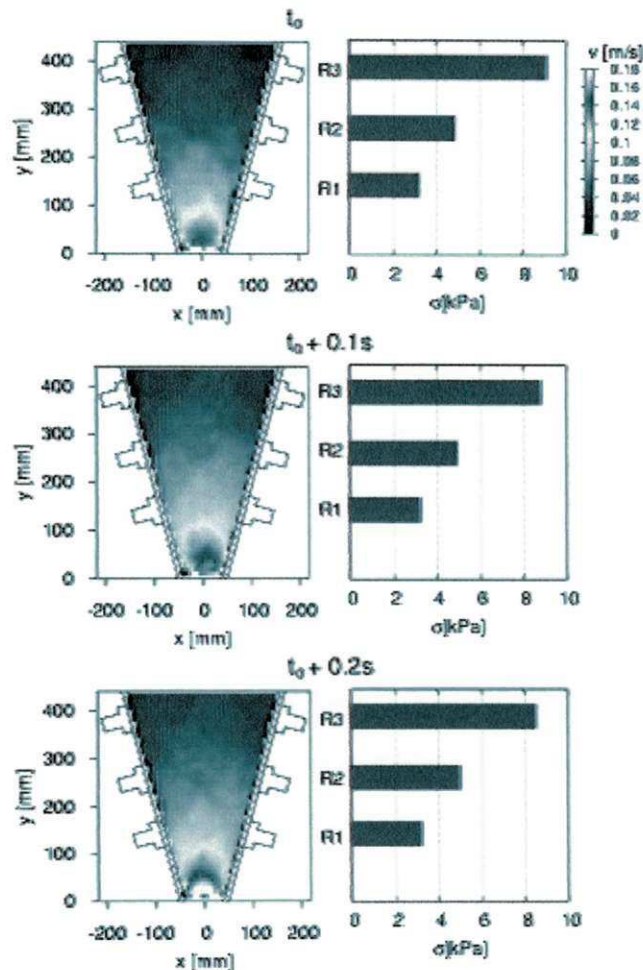


Figura 21. Perfis de velocidade em silo com tremonha de 85° com a horizontal

Percebe-se claramente a ocorrência de um fluxo do tipo massa uma vez que todas as partículas se encontram em movimento; as maiores velocidades foram encontradas próximo ao eixo de simetria do modelo e perto do orifício de descarga (aproximadamente 0,15 m/s); a velocidade decresceu em direção ao topo do silo e de suas paredes e a uma distância de 130 mm do orifício de descarga seu valor passou para cerca de 0,05 m/s.

2.9 VAZÃO DE DESCARREGAMENTO EM SILOS

A vazão de descarregamento está intrinsecamente relacionada à velocidade com que o produto armazenado se movimenta em direção ao orifício de descarga o que a torna uma variável de importância fundamental; por sua vez, a velocidade de descarregamento depende do tipo de fluxo desenvolvido e, por consequência, das propriedades do produto armazenado e das características geométricas dos silos.

Predizer e, sobremaneira, poder controlar a vazão de descarga de um silo significa poder prever com clareza o tempo máximo demandado para seu total esvaziamento bem como a possibilidade de uso em situações que requerem descargas parciais extremamente controladas, como no caso de sistemas de dosagem industrial situações em que flutuações na vazão de descarga podem representar perda de eficiência de trabalho e aumento dos custos de produção.

Para o caso do fluxo de massa sabe-se que flutuações na vazão de descarga são mínimas devido à sua característica de perfil de fluxo bem definido e à não ocorrência de zonas estagnadas, contudo, a obtenção do fluxo de massa só é possível, em geral, quando se descarrega um produto granular de baixas coesão e atrito interno por um silo com tremonhas de elevado grau de inclinação, em que sua desvantagem é direcionada às ações inerentes ao descarregamento, silos com fluxo de massa tendem a sofrer maiores ações pelo fato de todo produto se movimentar ao mesmo tempo em seu interior transmitindo, às paredes e ao fundo, suas máximas pressões.

Inversamente ao fluxo de massa, o controle de vazão em um silo com fluxo de funil é extremamente difícil em virtude do seu perfil desuniforme e variável. A existência de zonas estagnadas e o modo aparentemente desordenado de deformação do produto em seu interior no sentido do orifício de descarga o tornam, na maioria dos casos, um tipo de fluxo indesejável, o fluxo de funil tende a ocorrer com produtos pulverulentos e de alta coesão descarregados em silos de paredes rugosas com fundo plano ou tremonha pouco inclinada.

Por outro lado, as ações nas paredes e fundo do silo podem, a princípio, ser menos intensas que no fluxo de massa já que o produto, ao ser descarregado, tende a se deslocar em partes, separadamente, significando que apenas uma porção de produto se

movimenta por vez, aliviando a transferência de esforços para a estrutura do silo, fato por que o fluxo de funil seria estruturalmente mais recomendado, contudo, o fenômeno de formação de arcos coesivos e efeito tubo potencializa sua periculosidade estrutural já que a ruptura repentina dessas camadas compactadas causa enormes sobrecargas na estrutura; queda de arcos coesivos ou das paredes resultante do efeito tubo tem sido a causa de grande parte dos acidentes registrados com silos ao redor do mundo.

A pressão causada pelo desprendimento de uma camada compactada no interior do silo pode ser compreendida como uma carga acidental de elevada intensidade e curta duração; esta pressão tende a solicitar as paredes dos silos, em geral na zona de transição parede – tremonha ao mesmo tempo em que surge um efeito de sucção acima da superfície do produto solicitando sua cobertura; a ocorrência dessa carga acidental repetidas vezes pode contribuir para o enfraquecimento da estrutura ao longo do tempo e conseqüente redução de sua vida útil.

Segundo Hirshfeld e Rapaport (2001), vários estudos foram efetuados com objetivo de relacionar a vazão em silos com as dimensões do orifício de descarga e desses trabalhos foi possível estabelecer que:

- ✓ A vazão de descarga não depende da altura da massa armazenada H , prevendo uma relação $H > 2,5D$, em que D é o diâmetro do silo,
- ✓ A vazão de descarga independe de D se ambos $D > 2,5D$ e $D > B + 30d$, sendo B e d a abertura do orifício de descarga e o diâmetro médio das partículas do produto armazenado, respectivamente;
- ✓ Existe também uma conexão entre a dimensão do orifício de descarga e o diâmetro das partículas, assumindo que o diâmetro das partículas não seja demasiado pequeno, $D > 6d$, o fluxo ocorrerá sem maiores problemas e, caso a relação seja $D < 4d$, haverá interrupção do fluxo.

De acordo com a afirmação acima, parâmetros como B e g (aceleração da gravidade) podem afetar a vazão de descarga; através de algumas análises prever-se, que para um valor de B não elevado, que a vazão de descarga pode ser tomada como $\frac{1}{g^2} B^{\frac{5}{2}}$; devido ao tamanho das partículas deve-se assumir o tamanho efetivo da abertura de descarga, não como B , mas $B - kd$, em que kd seria a largura do então chamado “*empty annulus*” e k o número de seqüências que deveria ser determinado

experimentalmente para cada produto; a vazão de descarga seria dada, então, equação (15):

$$\frac{dN}{dt} = C\rho g^{\frac{1}{2}}(B - kd)^{\frac{5}{2}} \quad \text{Equação (15)}$$

em ρ seria a densidade do produto próximo à saída e C uma constante dependente do tipo de produto. Estudos de Nedderman et al. (1982) indicam boa concordância da equação acima com valores experimentais para uma gama de produtos analisados com o empregado do valor de k , geralmente entre 1 e 2.

Zuriguél et al. (2009) comentam que o termo $B^{\frac{5}{2}}$ deve ser empregado em casos de análises de descargas tridimensionais e, para o estudo bidimensional, a vazão de descarga é uma função de termo $B^{\frac{3}{2}}$ (2).

$$W = C\rho g^{0,5}(B - kd)^{\frac{3}{2}} \quad \text{Equação (16)}$$

Esta equação é conhecida como Lei de Beverloo e pode ser obtida através de uma análise dimensional; em adição ficou explicado que acima do orifício de descarga há uma zona de queda livre de partículas limitada, por um arco e, acima do arco, as partículas se encontram compactadas pelo peso das camadas superiores; abaixo do arco as partículas aceleram livremente sobre a influência da gravidade e tendem a ser descarregadas.

Se a dimensão desse arco for, de certo modo proporcional à dimensão do orifício de descarga, a velocidade das partículas atravessando esse orifício, v_g , pode ser obtida calculando-se a velocidade de uma partícula caindo sem a velocidade inicial a partir de uma distância proporcional ao orifício de descarga: $v_g \propto D^{\frac{1}{2}}$, sabendo-se que, em uma análise bidimensional $W \propto D v_g$, a vazão de descarga deve ser proporcional a $B^{\frac{3}{2}}$.

Algumas variações nesse comportamento foram reportadas por Mankoc et al. (2007) ao estudarem a vazão em pequenos orifícios para ambas as análises bi e tridimensionais, em que os autores citam que essas variações se tornaram evidentes quando a vazão de descarga foi medida para uma larga faixa de dimensões de saída, sendo possível propor uma modificação [3] na equação original de Beverloo, incluindo

um termo exponencial que permitiu um ajuste empírico dos valores de vazão para todos os orifícios estudados.

$$W = C' \left(1 - \frac{1}{2} e^{-b(R-1)} \right) (R - 1)^{\frac{3}{2}} \quad \text{Equação (17)}$$

W seria a vazão de descarga em número de porções/s, C' e b parâmetros de ajuste e R o tamanho da saída, normalizado pelo diâmetro das partículas. Os resultados de suas pesquisas mostraram que essas variações estavam bastante relacionadas com o surgimento de eventos na vazão para pequenos orifícios e que esses eventos consistiam em lapsos de tempo durante o qual o fluxo era temporariamente interrompido em virtude da formação de um arco instável e, por isso, incapaz de pausar o fluxo permanentemente, afirmar-se então que para pequenos orifícios, interrupções temporárias do fluxo se tornam estaticamente relevantes e provocam uma redução significativa da vazão média o qual se difere do comportamento previsto pela equação original de Beverloo.

Sielamowicz, Czech e Kowalewski (2011) utilizaram um modelo cinético desenvolvido por Choi et al. (2005) para avaliar a velocidade das partículas, sendo descarregadas em um silo transparente, equação (18).

$$v(x, z) = \frac{W}{\sqrt{4\pi bz}} e^{\frac{-x^2}{4bz}} \quad \text{Equação (18)}$$

Onde $v(x,z)$ denotaria a velocidade em determinado ponto, W a vazão de descarga e z a altura do ponto a ser considerado; a constante de proporcionalidade b foi denominada por Choi et al. (2005) de “comprimento de difusão”, mas é comumente conhecida como parâmetro cinemático. Sielamowicz, Czech e Kowalewski (2011) citam que a equação acima foi desenvolvida para um sistema semi-bidimensional semi-infinito ($-\infty < x < +\infty$) cujo orifício for considerado um ponto em $z = 0$.

O modelo cinético desenvolvido por Choi et al. (2005) é capaz de prever a velocidade com apenas um parâmetro b sendo determinado como proporcional ao diâmetro do grão. Medina et al. (1998) investigaram a variação desse parâmetro cinético em um silo com auxílio de imagens de alta definição e concluíram que seu valor deve variar entre 1,5 e 4d, enquanto Samadani, Pradhan e Kudrolli (1999) propuseram um valor constante de 3,5d.

Sielamowicz, Czech e Kowalewski (2010) utilizaram um modelo cinético empírico para avaliar a distribuição da velocidade vertical de fluxo de sementes de painço, usando a equação (19).

$$V_y = e^{A+Bx+Cx^2} = De^{Bx+Cx^2} \quad \text{Equação (19)}$$

Os autores excluíram o termo Bx devido à simetria de fluxo; propuseram, então que ao analisar a velocidade de fluxo a seguinte descrição para a velocidade vertical definida como um modelo cinético empírico poderia ser descrito como na equação (20):

$$V_y(x) = Ae^{Bx^2} \quad \text{Equação (20)}$$

Onde A e B são parâmetros determinados pelo método dos quadrados mínimos cujas unidades são mm/s e cm^{-1} , respectivamente, enquanto a distância x do eixo de simetria é dada em cm e a velocidade $V_y(x)$ em mm/s.

Sielamowicz, Czech e Kowalewski (2011) fizeram uma análise da velocidade de fluxo por um modelo cinético empírico modificado apresentado na equação (21).

$$V_y(x) = A(e^{Bx^2} + e^{-Cx^2}) \quad \text{Equação (21)}$$

Usando uma regressão não-linear (método de Newton-Gauss), os parâmetros A, B e C foram determinados para diferentes alturas e um novo valor de vazão pode, então, ser calculado sendo, a partir de então, estatisticamente mais precisos que os obtidos pelo modelo proposto por Choi et al. (2005).

Os autores concluíram, também, que o parâmetro cinético b dependia da altura da massa ensilada e variava consideravelmente na vizinhança do orifício de saída, atingindo seus valores máximos nessa região. Cerca de 10 cm acima do orifício, entretanto, o aumento do parâmetro b tornava-se imperceptível e divergente dos valores apresentados por Medina et al. (1998).

2.10 AÇÕES EM SILOS VERTICAIS

2.10.1 Representação das ações em silos

Visando à determinação das ações em silos, recomenda-se que sejam levados em consideração a própria estrutura do silo, as propriedades do material a se armazenar e o modelo de fluxo desenvolvido na descarga; incertezas quanto ao tipo de fluxo e sua geometria, excentricidades de carga e descarga e tempo de armazenagem também devem ser variáveis considerados no projeto.

De acordo com a EUROCODE 1 (2006), as ações em silos podem ser classificadas como:

- ✓ Cargas devidas ao produto armazenado devem ser classificadas como ações variáveis;
- ✓ Cargas simétricas devem ser classificadas como ações variáveis fixas;
- ✓ Cargas adicionais (patch load) associadas como processos de carregamento e descarregamento dos silos, devem ser classificadas como ações variáveis livres;
- ✓ Cargas excêntricas associadas como carregamentos e descarregamentos excêntricos, devem ser classificadas como ações variáveis fixas;
- ✓ Cargas devidas a pressões de gás atribuídas aos sistemas pneumáticos de transporte, devem ser classificadas como ações variáveis fixas;
- ✓ Cargas devidas à explosão devem ser classificadas como cargas acidentais;
- ✓ Os prováveis impactos de veículos na estrutura de suporte ou com o silo e pressões decorrentes da explosão de pós, devem ser classificados como ações excepcionais.

3. MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi desenvolvida no Laboratório de Construções Rurais da Universidade Federal de Campina Grande, *Campus* de Pombal, entre os meses de maio e novembro de 2011.

3.1 DESCRIÇÃO DO MODELO UTILIZADO

Para visualização do tipo de fluxo foi construído um silo metálico de paredes, rugoso em forma de semicírculo com fundo plano e tremonha cônica tendo sua parte frontal fechada por uma parede de vidro transparente de 8mm de espessura; as dimensões do corpo do silo utilizado nos ensaios são 1,1m de altura e 0,45m de diâmetro com uma capacidade de armazenagem de aproximadamente 80kg representando um silo com relação H/D igual a 2,4.

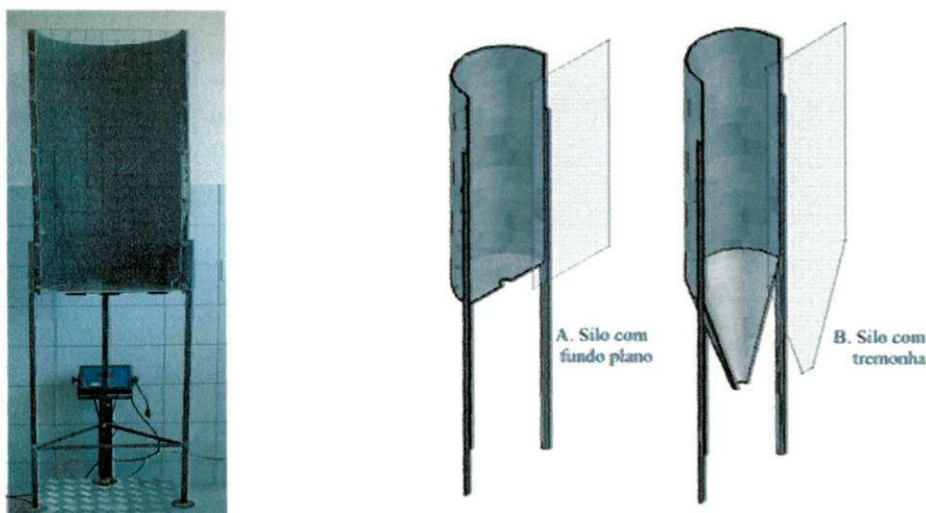


Figura 22. Modelo do silo

Na primeira fase do experimento utilizou-se um fundo plano com três orifícios de descarga, sendo um concêntrico e dois excêntricos, um a 50% e outro a 75% de distância em relação ao centro do fundo plano. Os três orifícios testados possuíam uma abertura de 60 mm de diâmetro; a configuração escolhida para o fundo plano se encontra melhor detalhada na Figura 23.

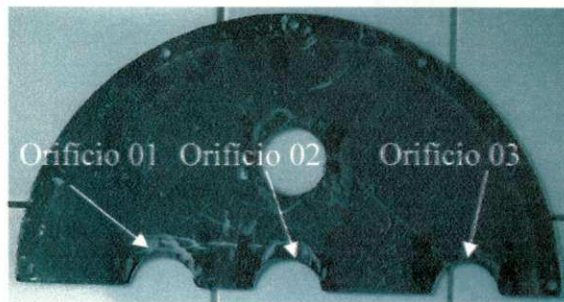


Figura 23. Fundo plano e seus detalhes dimensionais

Em um segundo momento utilizou-se uma tremonha concêntrica e de inclinação com a horizontal de aproximadamente 70° ; a elevada inclinação da tremonha se deve à necessidade de dar fluidez a massa armazenada no momento da descarga, principalmente para o farelo de soja triturada; assim como no fundo plano, o orifício de descarga da tremonha possuía 60 mm de diâmetro; na Figura 24 se observam maiores detalhes da tremonha utilizada nos ensaios.



Figura 24. Tremonha cônica

3.2 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS ADOTADOS

O silo foi colocado sobre uma balança eletrônica conectada a um computador para a aquisição dos dados e, com o auxílio de uma câmera digital, foram captadas as imagens do tipo de fluxo formado durante o descarregamento do silo; com essas imagens pode-se calcular o talude formado no fundo do silo pelo material em repouso, ou seja, que não descarregou.

O silo foi carregado concentricamente e descarregado por cada orifício em três repetições cujos produtos escolhidos para realização dos ensaios foram milho e feijão em grão, milho triturado e farelo de soja, conforme Figura 25.

Milho em grão Feijão em grão Milho triturado Farelo de soja

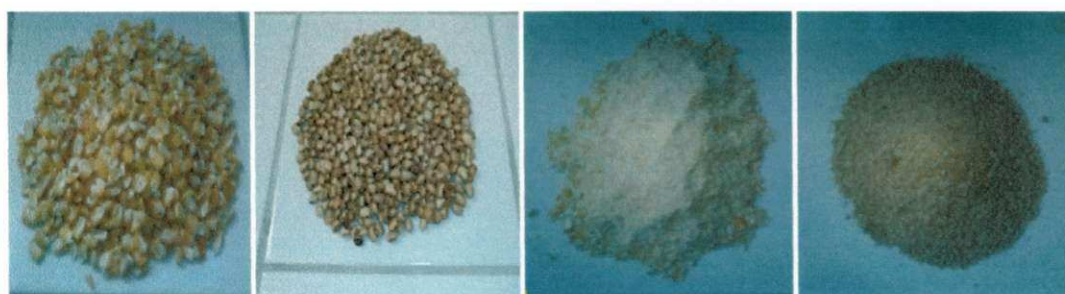


Figura 25. Produtos utilizados na pesquisa

A escolha desses produtos foi baseada na tentativa de se obter a maior variabilidade de dados possíveis, em função das características físicas e de fluxo de cada produto, foram realizados descarregamentos após os períodos de armazenagem, de 10 minutos, 48 e 120 h para a relação H/D igual a 2,4 (silo esbelto).

Para a aquisição dos valores de vazão mássica durante seu descarregamento, o silo foi colocado sobre uma balança eletrônica de precisão previamente conectada a um computador; a conexão entre a balança e o computador foi realizada pelo canal Hiperterminal, que possibilitava a coleta da variação de massa enquanto o tempo de descarregamento foi cronometrado do início ao fim do esvaziamento total do silo; com essa variação da massa em função do tempo pôde-se calcular a vazão mássica de cada produto, durante o descarregamento do silo.

3.3 METODOLOGIAS APLICADAS

A determinação da granulometria dos produtos analisados foi realizada por meio de peneiramento de amostra de 500g cada uma (Figura 26); após o peneiramento das amostras pesou-se cada porção de produto retido em cada peneira obtendo-se, portanto, a percentagem retida acumulada; o teor de umidade foi encontrado através do método Gravimétrico de secagem de amostra de 50g de cada produto em estufa a 105° C, por 24h; pela diferença entre massa úmida e massa seca obteve-se a quantidade de água inicial, que foi perdida no processo.



Figura 26 Ensaio granulométrico

A determinação das propriedades de fluxo ocorreu utilizando-se o aparelho de cisalhamento de translação conhecido internacionalmente por “Jenike Shear Cell” (Figura 27), seguindo-se a metodologia proposta pela British Material Handling Board (1985); para determinação do ângulo de atrito com a parede (θ_w) utilizou-se uma amostra de parede de aço rugoso, por ser o mesmo tipo empregado na construção do modelo reduzido.



Figura 27. Ensaio para determinação das propriedades de fluxo

3.4 MODELOS TEÓRICOS PARA ANÁLISE DE VAZÃO

3.4.1 Metodologia de Beverloo et al. (1961)

A metodologia de Beverloo et al. (1961) prevê o cálculo da vazão de descarregamento através da equação (22), a seguir:

$$Q = C\gamma\sqrt{g}(D - k_s d_p)^{2,5} \quad \text{Equação (22)}$$

Sendo:

Q = vazão mássica (m^3/h);

C = constante;

γ = peso específico consolidado (N/m^3);

g = aceleração da gravidade ($9,8 \text{ m}/\text{s}^2$);

D = diâmetro do orifício de descarga (m);

k_s = constante;

d_p = diâmetro médio das partículas (m);

3.4.2 Metodologia de Rotter (2001)

A metodologia de Rotter (2001) adotada para comparação aos valores experimentais é aplicada a silos com tremonhas com saídas circulares e consiste da equação (23), a seguir:

$$Q = 0,6\gamma_{inf}G_f \frac{(D-k_s d_p)^{2,5}}{\sqrt{g}} \text{ (ton/s)} \quad \text{Equação (23)}$$

donde:

Q = vazão mássica (m^3/h);

γ_{inf} = valor inferior do peso específico (kg/m^3);

D = diâmetro do orifício de descarga (m);

k_s = constante de forma da partícula podendo ser adotado 1,6 para partículas próximas ao formato esférico e 2,4 para partículas muito angulares;

d_p = diâmetro médio das partículas (m);

g = aceleração da gravidade ($9,8 \text{ m/s}^2$);

G_f = fator que depende se o fluxo no orifício de descarga está em contato localmente com a tremonha podendo ser calculado pela comparação do ângulo interno da tremonha α com a inclinação do canal de fluxo α_0 .

Quando o fluxo for interno ($\alpha < \alpha_0$), o fator G_f será 1,0; quando o fluxo estiver em contato com a tremonha ($\alpha > \alpha_0$), o fator G_f poderá ser calculado pela equação (24), a seguir:

$$G_f = 0,75 \frac{(1-0,08 \cos \alpha)}{\sqrt{\sin \alpha}} \quad \text{Equação (24)}$$

Sendo α a inclinação da tremonha com o eixo vertical.

O ângulo natural do canal de fluxo com a vertical pode ser estimado para um silo esbelto como $\alpha_0 = 90^\circ - \emptyset_e$, sendo \emptyset_e o efetivo ângulo de atrito interno.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 PROPRIEDADES FÍSICAS E DE FLUXO

Na Tabela 3 se encontram as propriedades físicas dos produtos estudados; para o peso específico aerado, não houve variação entre os produtos milho grão e feijão em grão; entretanto, no milho triturado e no farelo de soja ocorre uma variação de 8,34% do peso específico aerado.

Tabela 3. Propriedades físicas dos produtos estudados

Produto	γ_a	U
Milho em grão	8152	11,5
Feijão em grão	6878	12,0
Milho triturado	6424	7,2
Farelo de soja	7031	6,5

γ_a = peso específico aerado (N/m^3); U = teor de umidade (%).

Nas Tabelas 4, 5, 6 e 7 se encontram os resultados das análises granulométricas para milho e feijão em grãos, milho triturado e farelo de soja, respectivamente, enquanto houve para os produtos granulares milho e feijão em grão, o maior percentual de massa retida foi na peneira 4,8mm com 99,6% seguida das peneiras 2,4 e 1,2mm com quantidades não significativas; para os produtos pulverulentos a maior quantidade de massa retida foi na peneira 1,2mm com 37,5 e 42,7% seguida das peneiras 0,6 e 0,3mm, para o milho triturado e farelo de soja, respectivamente.



Tabela 4. Resultados da análise granulométrica para milho em grão

Peneiras	Massa Peneira	Peneira + Produto	Produto	% retida	% Retida acumulada
9,5	434,5	434,5	0	0	0
4,8	392,36	890,57	498,2	99,642	99,6
2,4	390,95	392,71	1,8	0,352	100,0
1,2	363,77	363,83	0,1	0,012	100,0
Fundo	402,95	403,96	1,0	0,202	100,2
			501,0	100,2	

Tabela 5. Resultados da análise granulométrica para o feijão em grão

Peneiras	Massa Peneira	Peneira + Produto	Produto	% retida	% Retida acumulada
9,5	434,36	434,36	0	0	0
4,8	392,18	889,4	497,2	99,444	99,4
2,4	390,79	393,68	2,9	0,578	100,0
1,2	363,67	363,69	0,0	0,004	100,0
Fundo	279,97	279,97	0,0	0	100,0
			500,1	100,0	

Tabela 6. Resultados da análise granulométrica para milho triturado

Peneiras	Massa Peneira	Peneira + Produto	Produto	% retida	% Retida acumulada
4,8	392,28	402,24	10,0	2,0	2,0
2,4	390,88	478,18	87,3	17,5	19,5
1,2	363,8	551,18	187,4	37,5	56,9
0,6	398,87	491,59	92,7	18,5	75,5
0,3	341,67	431,29	89,6	17,9	93,4
0,15	380,15	402,54	22,4	4,5	97,9
Fundo	461,1	471,08	10,0	2,0	99,9
			499,4	99,9	199,7

Tabela 7. Resultados da análise granulométrica para o farelo de soja

Peneiras	Massa Peneira	Peneira + Produto	Produto	% retida	% Retida acumulada
4,8	392,28	393,4	1,1	0,2	0,2
2,4	390,89	406,76	15,9	3,2	3,4
1,2	363,75	577,02	213,3	42,7	46,1
0,6	398,88	568,11	169,2	33,8	79,9
0,3	341,66	408,05	66,4	13,3	93,2
0,15	380,24	402,1	21,9	4,4	97,5
Fundo	461,22	472,67	11,5	2,3	99,8
			499,2	99,8	199,7

Ja Figura 27 se encontram as curvas granulométricas dos produtos granulares e pulverulentos podendo-se destacar a perfeita similaridade em distribuição granulométrica para os produtos granulares; já para o milho triturado e o farelo de soja, os valores passam a coincidir a partir da peneira com abertura 0,3mm.

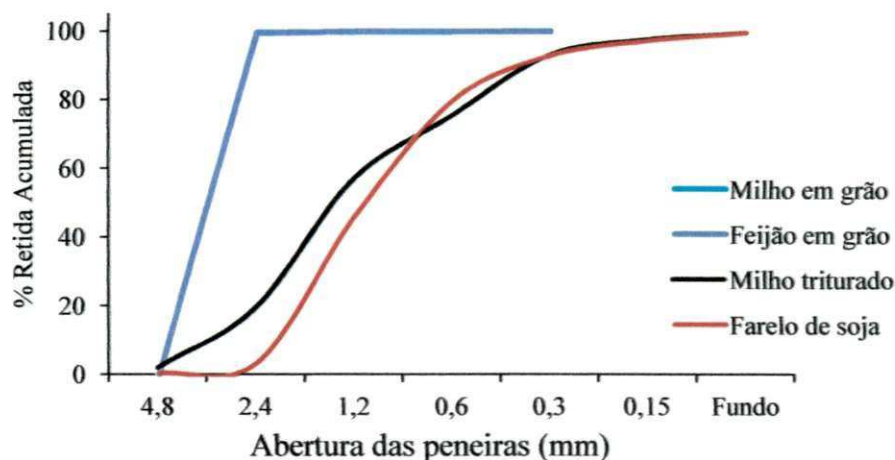


Figura 28. Curva granulométrica dos produtos ensaiados

Na Tabela 8 se acham os resultados das propriedades de fluxo para os produtos analisados, o peso específico consolidado tanto do milho como do feijão em grão, foi de 7395,1 e 7405,5N/m³, respectivamente; para os limites inferior e superior do ângulo de atrito interno do milho, os valores encontrados foram de 21,1 e 22,9⁰ respectivamente enquanto o efetivo ângulo de atrito interno ficou entre 23,9 e 25,0⁰; o índice fluxo do milho em grão foi de 13,6 classificado como fluxo livre.

Para o feijão em grão os limites inferior e superior do ângulo de atrito interno foram de 21,6 e 27,5⁰, respectivamente, enquanto para o efetivo ângulo de atrito interno os limites foram de 26,2 e 29,0⁰, respectivamente. O índice de fluxo encontrado para o feijão foi de 6,9, classificado de acordo com JENIKE (1964) como fluxo fácil.

A baixa variação entre as propriedades expostas são devidas às similaridades entre os dois grãos analisados sendo observada maior diferença quando comparados os valores de predição do tipo de fluxo, os quais apresentam fluxo livre e fácil para milho e feijão em grão, respectivamente.

Tabela 8. Propriedades de fluxo dos produtos

Produto	γ		\emptyset		\emptyset_e		\emptyset_w		C	f_c
	inf	sup	inf	sup	inf	sup	inf	sup		
Milho em grãos	7395,1	7405,5	21,1	22,9	23,9	25,0	13,2	15,8	400,6	13,6
Feijão em grãos	7395,1	7405,4	21,6	27,5	26,2	29,0	14,9	15,6	630,2	6,9
Milho triturado	7441,4	7638,1	25,3	33,3	34,3	38,8	23,0	23,9	753,3	4,0
Farelo de soja	6564,2	6640,1	32,8	35,1	34,1	35,5	23,4	25,0	128	54,3

γ = peso específico consolidado (N/m^3); \emptyset = ângulo de atrito interno ($^\circ$); \emptyset_e = efetivo ângulo de atrito interno ($^\circ$); \emptyset_w = ângulo de atrito interno com parede de aço rugoso ($^\circ$); C = coesão de partículas (Pa); f_c = Índice de fluxo de Jenike; inf; sup = limite inferior e superior, respectivamente

Encontram-se ainda na Tabela 8 os valores do milho triturado e do farelo de soja; para o milho triturado o peso específico variou de 7441,4 a 7638,1 N/m^3 e no seu ângulo de atrito interno os limites inferior e superior foram 25,3 $^\circ$ e 33,3 $^\circ$, respectivamente; no efetivo ângulo de atrito interno seus limites inferior e superior foram, 34,3 a 38,8 $^\circ$ respectivamente, com índice de fluxo encontrado de 4,0, conforme a classificação de JENIKE (1964) também como fluxo coesivo; entretanto, o farelo de soja, apesar de ser um produto pulverulento, como o milho triturado, teve seu peso específico consolidado de 6564,2 inferior e superior de 6640,1 N/m^3 e seu ângulo de atrito interno de 32,8 a 35,1 $^\circ$ limites inferior e superior; já para o efetivo ângulo de atrito interno seus respectivos valores inferior e superior foram de 34,1 e 35,5 $^\circ$; tendo um índice de fluxo de 54,3 que, de acordo com a classificação de JENIKE (1964), é considerado um fluxo livre.

Apesar do milho triturado e do farelo de soja serem produtos pulverulentos, o índice de fluxo encontrado para o farelo de soja foi cerca de 13,6 vezes maior que o obtido para o milho triturado, variação devida à composição intrínseca de cada produto, em que o milho triturado estava com todos os elementos de sua composição natural como ácidos graxos, óleos e amido enquanto o farelo de soja era o subproduto da soja (bagaço) de onde foram extraídas suas principais substâncias elementares, como gorduras e óleos.

4.2 CARACTERÍSTICAS DE FLUXO

A Figura 29 mostra a sequência de descarregamento do silo para o fundo plano, orifício de descarga excêntrico com milho em grão pelo orifício 01 localizado a uma distância do orifício central de 50% do comprimento do raio do silo; o tempo de armazenagem foi de aproximadamente 10 minutos.

Iniciado o descarregamento constatou-se predominância do fluxo de massa, até atingir profundidade de 50 cm ou relação H/D igual a 1,3; após este ponto houve uma mudança no tipo de fluxo, passando a predominar o do tipo funil, até o final do descarregamento, situação esta conhecida como fluxo misto (plug flow) por apresentar, em um único processo de descarregamento, dois modelos distintos de fluxo.

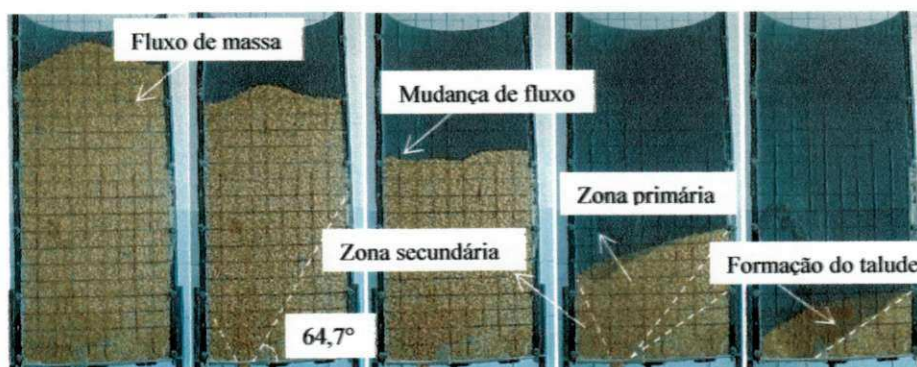


Figura 29. Sequenciamento de imagens para o fundo plano orifício 01

Nota-se que no início do descarregamento o talude formado apresentava forma cônica com concavidade voltada para cima e, aos poucos, alterou-se até atingir a forma plana indicando, neste exato momento, a mudança de fluxo; a partir de então a superfície antes côncava para cima passou a inverter seu sentido, até assumir a forma final do talude.

Observa-se a seguir a sequência do descarregamento do silo para o fundo plano, com milho em grão no orifício 02 (concêntrico); o descarregamento também foi iniciado com um fluxo do tipo massa com predominância até uma profundidade de 60

cm ou a uma relação H/D de 1,1; após esta profundidade houve mudança para o tipo de fluxo com predominância até o fim do descarregamento e, novamente, todo o processo é conhecido como fluxo misto ou plug flow.

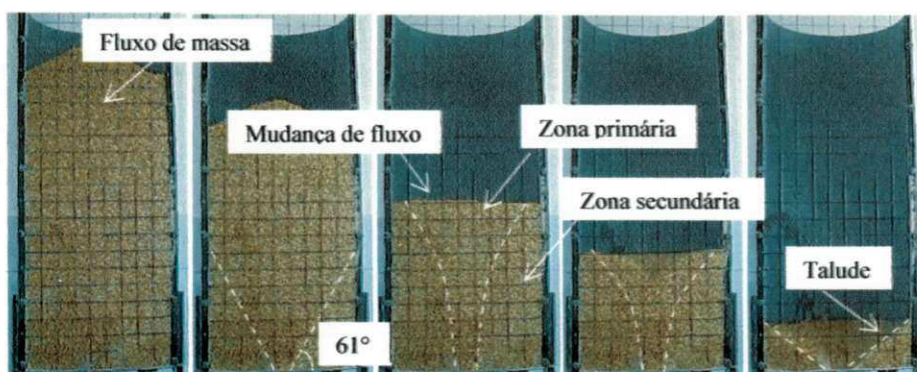


Figura 30. Sequenciamento de imagens para o fundo plano orifício 02

A seqüência de imagens da Figura 31 mostra o descarregamento do silo para o fundo plano com milho em grão, pelo orifício 03 localizado a 75% de excentricidade. Iniciando o descarregamento também com um fluxo de massa e predominando até uma profundidade de 30 cm ou relação H/D de 1,8 passando, então para um fluxo de funil com predominância até o fim do descarregamento, considerado fluxo misto.

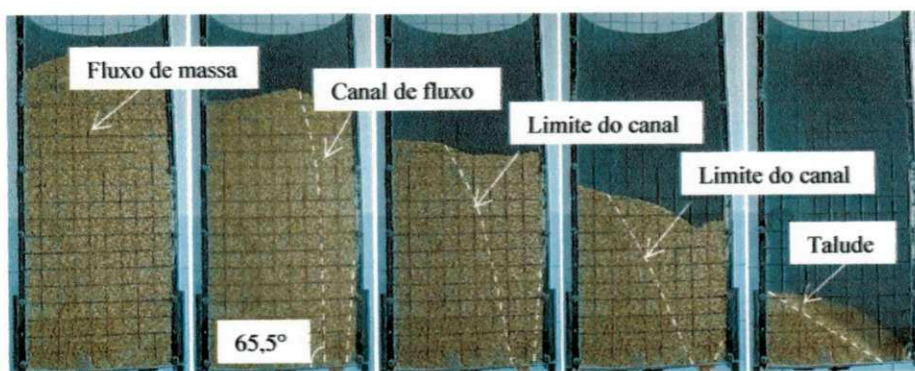


Figura 31. Sequenciamento de imagens para o fundo plano orifício 03

É interessante destacar que ocorre formação de um canal de fluxo estreito excêntrico mais definido que o observado para o descarregamento a 50% de excentricidade. Rotter (2001) denomina este canal estreito de tubo de fluxo (pipe flow)

e seu limite esquerdo, contrário ao posicionamento do orifício, atinge a superfície da parede vertical a uma profundidade de 70 cm ou relação H/D igual a 0,9 definindo, então, o ponto de transição efetiva. Segundo Calil Junior et al. (2007) esta configuração do canal de fluxo também é conhecida como tubo interno paralelo excêntrico.

A sequência de imagens abaixo, Figura 32, demonstra o descarregamento do silo com tremonha cônica de 75° carregado com milho em grão; durante todo o processo foi observada predominância do fluxo de massa com todos os grãos em movimento simultâneo em direção ao orifício de descarga; ressalta-se que a forma cônica da superfície superior dos grãos só foi alterada apenas quando atingida a transição corpo do silo-tremonha.

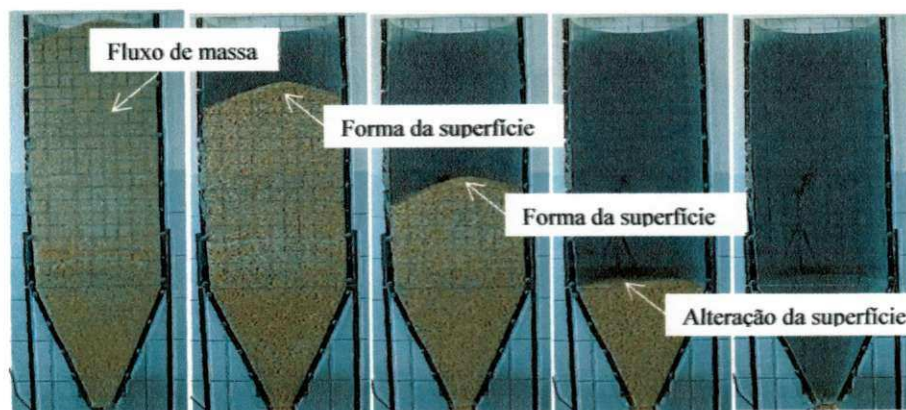


Figura 32. Sequenciamento de imagens para a tremonha cônica

Na Figura 33 observar-se o descarregamento do silo com o fundo plano carregado com feijão em grão e descarregado pelo orifício 01 localizado a 50% de excentricidade após 10 minutos de armazenagem; semelhante ao constatado para milho em grão, o tipo de fluxo desenvolvido foi do tipo misto, iniciando-se com fluxo de massa e predominando até uma profundidade de 45 cm ou relação H/D de 1,4; após esta profundidade ocorre uma mudança no fluxo, passando a ser fluxo de funil.

A variação de profundidade observada para a mudança de fluxo entre esses dois produtos granulares, foi de cerca de 11% maior para feijão em grão e pode estar relacionada com a forma mais arredondada do produto.

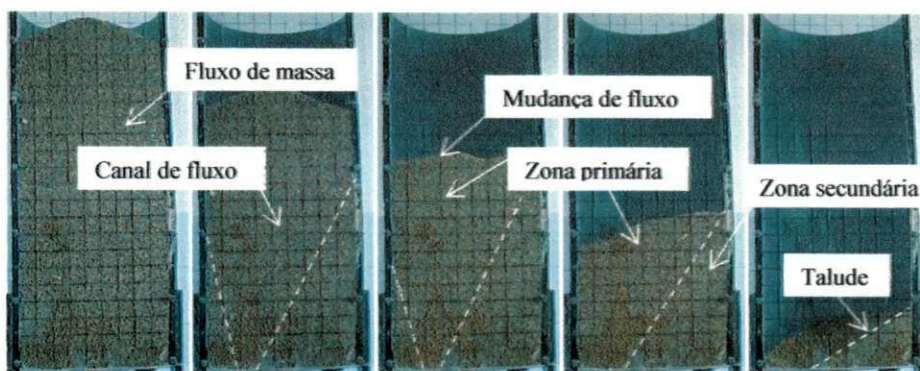


Figura 33. Sequenciamento de imagens para o fundo plano orifício 01

Na Figura 34 observa-se as imagens referentes ao descarregamento do silo com o fundo plano pelo orifício concêntrico 02, novamente o tipo de fluxo desenvolvido foi do tipo misto, iniciando com fluxo de massa e predominando até uma profundidade 50 cm ou relação H/D de 1,1; após esta profundidade houve uma mudança no fluxo passando a ser fluxo de funil.

Curiosamente, a relação H/D observada para a mudança de fluxo entre os dois produtos nesta condição, foi idêntica em virtude, provavelmente do descarregamento concêntrico proporcionar condições mais uniformes de movimentação de grãos reduzindo, assim, as diferenças quanto à forma dos grãos.

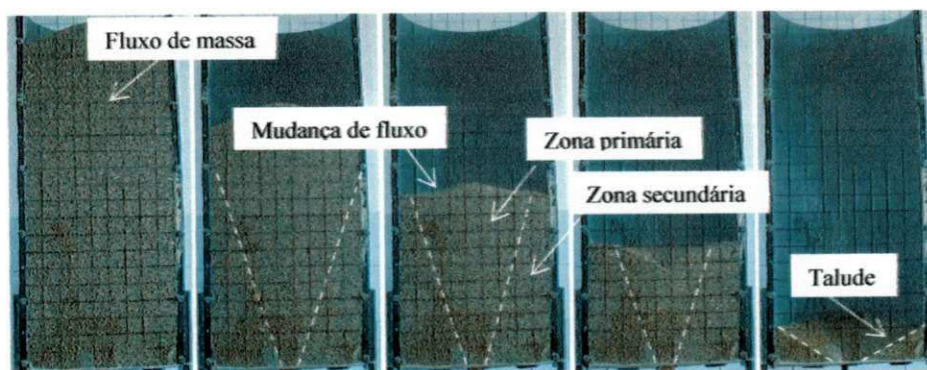


Figura 34. Sequenciamento de imagens para o fundo plano orifício 02

A condição de fluxo misto é, segundo Sadowski & Rotter (2011), caracterizada quando os limites do canal de fluxo chegam a interceptar as paredes do silo, ainda

durante o processo de descarregamento e são característicos de silos classificados como esbeltos, cuja relação H/D é maior ou igual a 2.

A sequência abaixo, Figura 35, mostra o descarregamento de um silo com o fundo plano, carregado com feijão em grão e descarregado pelo orifício localizado a 75% de excentricidade; o tipo de fluxo desenvolvido foi do tipo misto, iniciando-se com fluxo de massa e predominando até uma profundidade igual a 82,5 cm ou relação H/D de 1,83; após esta profundidade houve mudança no fluxo passando a ser do tipo funil. Comparando os dois grãos, pode-se destacar uma ligeira diferença no ponto de mudança de fluxo ocorrendo cerca de 3 cm mais acima para o feijão em grão.

Ressalta-se que durante o fluxo de funil o limite do canal de fluxo formado atingiu a superfície vertical das paredes a uma profundidade de 60 cm, 10 cm abaixo do observado para o milho em grão, informação esta importante, por representar possíveis alterações na distribuição das pressões nas paredes.

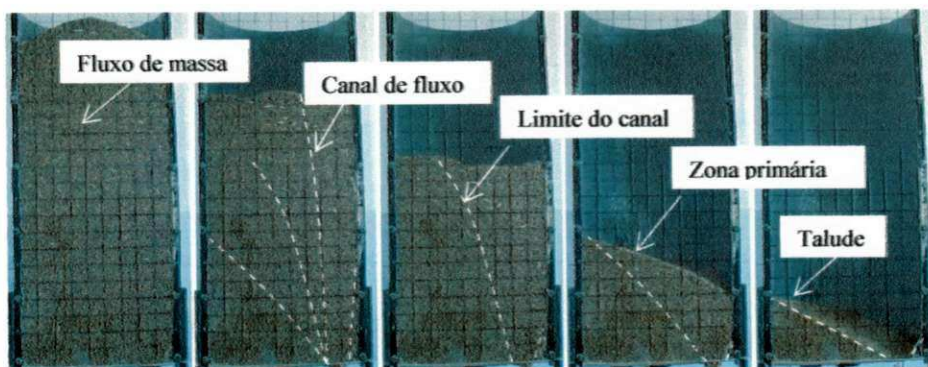


Figura 35. Sequenciamento de imagens para o fundo plano orifício 03

A sequência de imagens a seguir, Figura 36, demonstra o tipo de fluxo desenvolvido no silo com tremonha de 75° carregado com feijão em grão com armazenagem de 10 minutos. Idêntico ao observado para o descarregamento com milho em grão, ocorreu durante todo o processo o fluxo de massa até atingir a zona de transição corpo do silo-tremonha com preservação da forma da superfície superior da massa armazenada até o término das paredes verticais.

O fluxo de massa apresenta vantagens em relação ao fluxo de funil, principalmente quando se deseja evitar flutuações na vazão de descarga e reduzir os efeitos de segregação radial, melhorando a homogeneidade; em contrapartida, o fluxo apresenta as desvantagens de ocorrer elevadas tensões na zona de transição e de maior desgaste superficial das paredes, devido ao atrito constante (Calil Júnior & Cheung, 2007).

Neste caso a tremonha com 70° de inclinação com a horizontal demonstrou eficiente para os produtos granulares produzindo um descarregamento com fluxo de massa bem definido e sem flutuações no tempo de descarga.

O uso de silos com tremonha para o armazenamento de feijão é de fundamental importância pois o feijão tem problema de escurecimento do grão e com o uso da tremonha vai facilitar no descarregamento sendo que o primeiro feijão armazenado será o primeiro a sair, minimizando o problema na sua armazenagem.

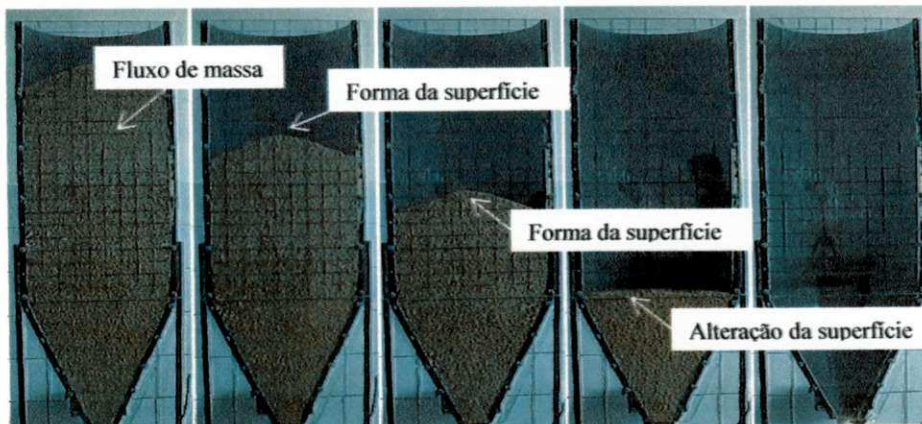


Figura 36. Sequenciamento de imagens para a tremonha cônica

Não foram realizados ensaios de descarregamento com tempo de armazenagem superior a 10 minutos para os produtos milho e feijão em grão, em razão da sua natureza granular.

Na Tabela 9 estão reunidos os valores de relação H/D críticos para a mudança de fluxo de massa para funil nos descarregamentos dos dois produtos granulares testados, destaca-se que a menor relação H/D observada foi durante o descarregamento

concêntrico, orifício 01, enquanto que o orifício que proporcionou a mudança de fluxo a uma relação igual a 1,8.

A mudança no tipo de fluxo durante o descarregamento pode exercer enorme influência no comportamento das pressões nas paredes e fundo do silo uma vez que cada tipo de fluxo é responsável por um comportamento distinto destas ações. Assim, seu profundo conhecimento é fundamental para um correto dimensionamento de silos verticais.

Tabela 9. Relação H/D observada para o fluxo misto.

Produto	Relação H/D		
	Orifício 01	Orifício 02	Orifício 03
Milho em grão	1,3	1,1	1,8
Feijão em grão	1,4	1,1	1,8

A seguir são apresentadas as informações de descarregamento de milho triturado (produto pulverulento) em silo com tremonha cônica concêntrica com armazenagem de 10 minutos. Salienta-se que não houve ensaios de descarregamento deste produto com utilização de fundo plano devido a sua incapacidade de fluir significando a importância de utilização de dispositivos provedores de descarga e, ainda, confirmando a predição do Índice de fluxo de Jenike (1964) o qual classificou como fluxo coesivo.

Na Figura 37 pode-se notar que mesmo com utilização de tremonha, o milho triturado apresentou grande resistência ao descarregamento com sucessivas tentativas de formação do efeito tubo. Durante todo o processo foi observado grande instabilidade na vazão de escoamento e a predominância do fluxo de funil mal definido e de difícil identificação.

Nascimento (1996) cita que alguns dos principais fatores responsáveis por afetar a escoabilidade de sólidos em silos e tremonhas, são: teor de umidade, umidade relativa, temperatura, pressão, teor de gordura, dimensões de partículas e adições de agentes de fluxo.

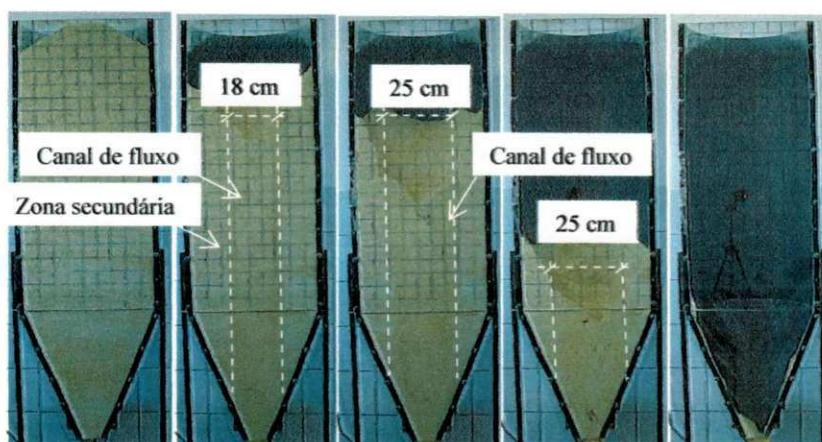


Figura 37. Sequenciamento de imagens para a tremonha cônica

Antes do início do descarregamento, a massa armazenada encontrava-se confinada e sujeita a um estado ativo de tensões e a esta tensão dá-se o nome de tensão de consolidação (σ_M). Com a abertura do orifício de descarga as tensões passaram a atuar em uma única direção e estabeleceu-se um estado passivo de tensões. A esta tensão dá-se o nome de tensão não confinada de deslizamento (f_C) (JENIKE, 1964 e SCHULZE, 2008).

A mudança do estado de tensão ativo para o passivo provocou um efeito de cisalhamento no produto resultando em um deslizamento de parte de sua massa e, por conseguinte, a ocorrência de fluxo.

Visualmente observou-se que no momento de abertura do orifício de descarga o fluxo foi realizado por um canal vertical formado por sucessivas movimentações ascendentes pelo produto a partir do orifício de descarga cujos movimentos assemelharam-se ao de uma onda propagando-se verticalmente. Ainda, que ao atingir determinada altura, a onda cessava dando início ao movimento do produto em direção gravitacional.

Acredita-se, portanto, que a propagação desta onda era responsável pelo desprendimento de determinada porção do produto dando início ao fluxo; a queda sucessiva de porções do produto pode resultar em forte instabilidade da estrutura e seguramente refletia na intensidade e distribuição das pressões dinâmicas.

Inicialmente, foi registrada uma largura do canal de fluxo três vezes maior que orifício de descarga e, à medida que ocorria o descarregamento, esta diferença alcançava 5 vezes o diâmetro do orifício.

Em seguida se apresenta na Figura 38, o descarregamento do silo com tremonha com milho triturado armazenado durante 48 h; observou-se que o fluxo foi do tipo funil, porém mal definido e de difícil classificação em virtude da sua instabilidade, durante o descarregamento.

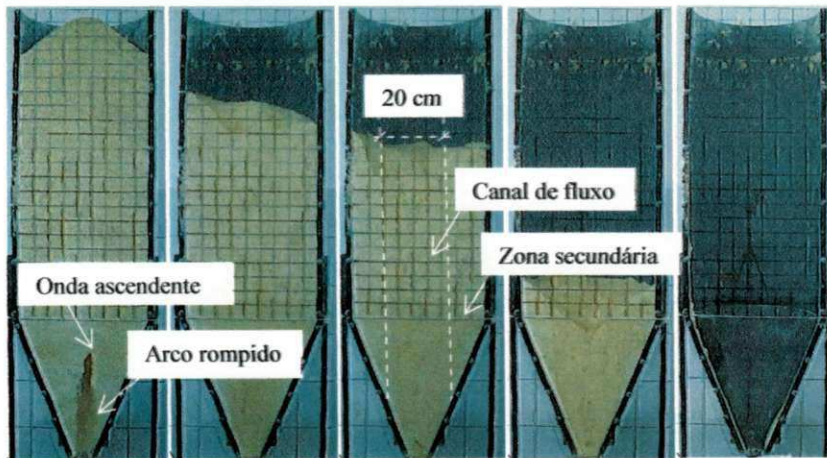


Figura 38. Sequência de imagem para a tremonha cônica

Devido ao período de armazenagem de 48 h ocorreu a formação do arco coesivo impedindo o descarregamento do silo, o qual foi rompido de forma manual, Figura 39; a partir de então foi possível observar, com maior clareza, a propagação ascendente de uma porção do produto em razão da mudança de estado de tensão; este movimento culminou na desagregação de uma zona de produto que, imediatamente entrou em movimento descendente.

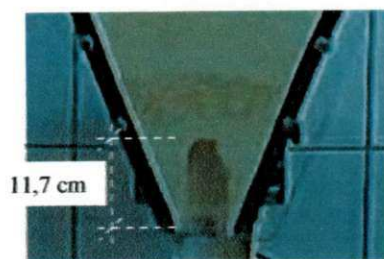


Figura 39. Detalhe do arco coesivo

O arco coesivo formado apresentou uma forma mais tubular obedecendo ao diâmetro do orifício de descarga com relação à altura/largura de 1,95; uma maneira de se evitar sua formação seria a adoção de maiores valores para o orifício de descarga, contudo, para que o estabelecimento de uma relação ideal altura/largura capaz de impedir a estabilidade do arco coesivo seja efetuado, é necessário que estudos específicos também sejam efetuados.

Semelhante ao ocorrido para o tempo de armazenagem de 10 minutos, neste ensaio a tentativa de formação do efeito tubo se deu de forma evidente e o fluxo ocorreu com grande flutuação na vazão e seguidas paralisações com posterior desprendimento de porções de milho triturado; novamente, a estrutura apresentava-se perturbada com o impacto.

Quanto ao canal de fluxo sua largura permaneceu praticamente constante durante todo o processo sendo cerca de 4 vezes maior que a dimensão do orifício de descarga utilizado.

Em seguida na Figura 40, apresenta o descarregamento de milho triturado com tremonha e armazenado por 120 h; foi observado que o fluxo ocorrente foi do tipo funil cuja característica é a formação de um canal de fluxo alinhado com a boca de descarga, cercado por uma zona na qual o produto permanece estático (zona parada ou estagnada).

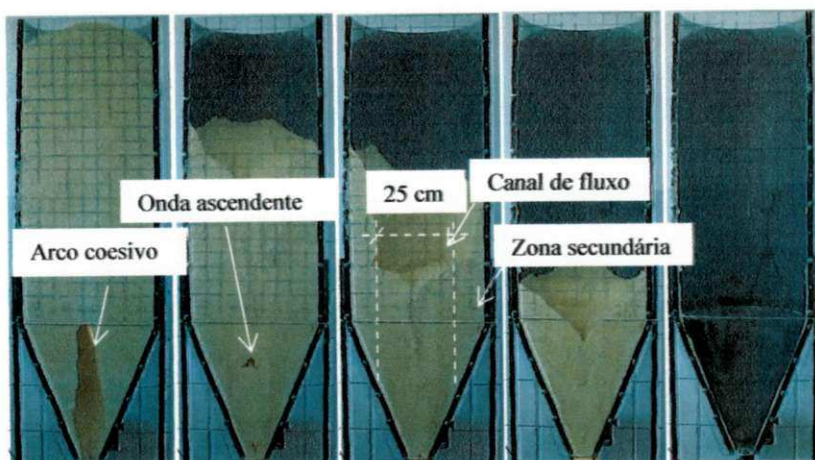


Figura 40. Sequência de imagem para a tremonha cônica

Novamente o tempo de armazenagem prolongado favoreceu um aumento da coesão das partículas que, por conseguinte, ocasionou na formação do arco coesivo; a mesma formação do arco coesivo foi constatada por Lopes Neto et al., (2007), quando nos seus ensaios experimentais analisou o tempo de armazenamento de rações avícolas; após a abertura do orifício, o mesmo teve que ser rompido manualmente dando início ao processo de propagação da onda ascendente.

Durante o descarregamento foi observada à instabilidade do produto em fluir com sucessivas tentativas de formação do efeito tubo e, a cada nova tentativa, o canal de fluxo se tornava maior até atingir dimensão 5 vezes superior ao orifício de descarga.

Na Figura 41 é mostrado o exato momento de estabilidade do arco coesivo apresentando-se de forma cônico tubular com base e topo 1,5 e 1,4 vez maior e menor que o diâmetro do orifício de descarga, respectivamente.

As dimensões assumidas pelo arco coesivo nas diferentes situações representam parâmetro imprescindível para a predição de sua formação enquanto suas variações deveriam ser levadas em consideração quando da elaboração de modelos matemáticos o que, aparentemente, não é feito; as relações altura/largura da base e altura/largura do topo estabelecidas neste arco, foram de 7,25 e 15,34, respectivamente.

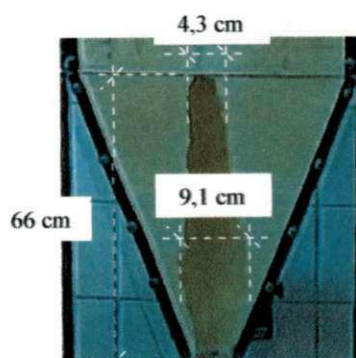


Figura 41. Detalhe do arco coesivo

A Figura 42 representa o descarregamento de farelo de soja com armazenagem de 10 minutos utilizando-se fundo plano e orifício 01 com 50% de excentricidade. Desde o princípio do descarregamento ocorreu fluxo de funil com a formação de um

canal excêntrico de fluxo do tipo tubo (pipe flow) conforme descrição da norma AS 3774 (1996).

Notou-se que o plano superior do canal de fluxo apresentou inclinação praticamente constante, até a formação do talude final.

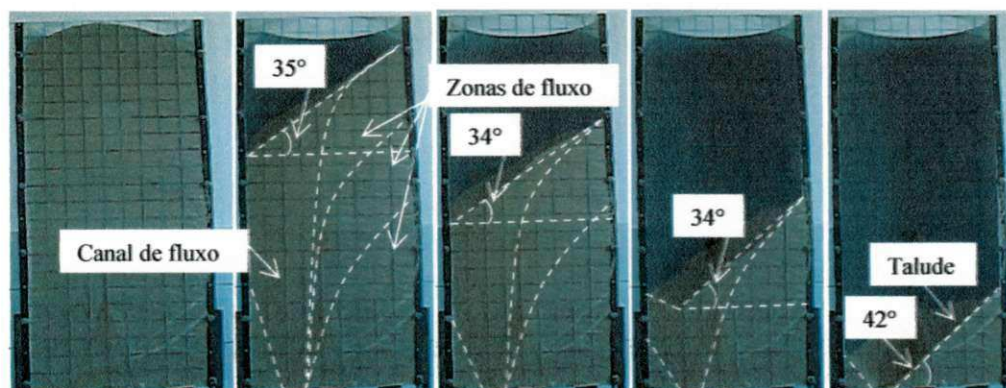


Figura 42. Sequência de imagens para o fundo plano orifício 01

A Figura 43 representa o descarregamento de farelo de soja pelo orifício concêntrico e período de armazenagem de 10 minutos; observou-se o clássico fluxo de funil formado de três camadas, uma que entra em movimento logo após a abertura do orifício de descarga, a outra é uma camada intermediária que permanece estática até o momento em que a superfície do canal de fluxo a encontra e a terceira camada que permanece estática do início ao final do processo, formando o talude.

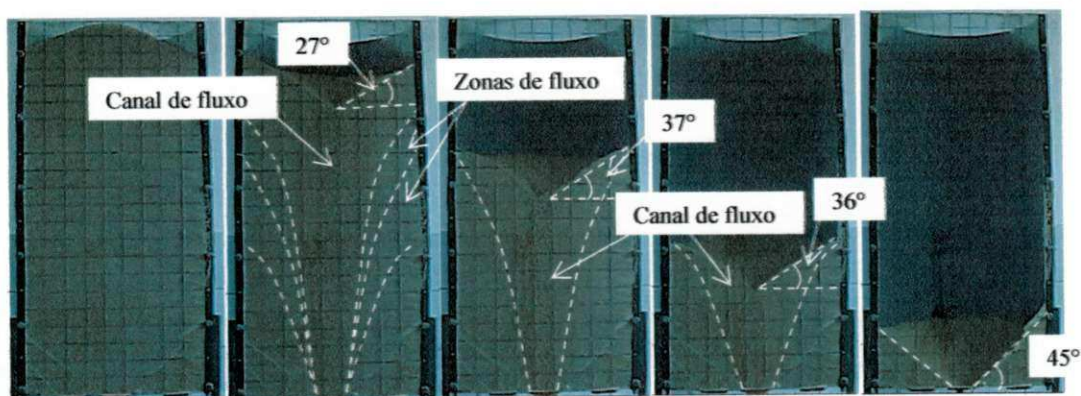


Figura 43. Sequência de imagens para o fundo plano orifício 02

A inclinação do plano superior do canal de fluxo apresentou variação entre maiores e menores ângulos observados de 10° até atingir a zona morta ou estagnada com inclinação da superfície de 45°.

Na Figura 44, pode-se notar o descarregamento pelo canal excêntrico de fluxo do tipo tubo (pipe flow) melhor definido em razão da maior excentricidade; o plano inclinado da superfície do produto durante o descarregamento permaneceu em torno de 35°, semelhante ao descarregamento excêntrico a 50% com o talude final de 38°.

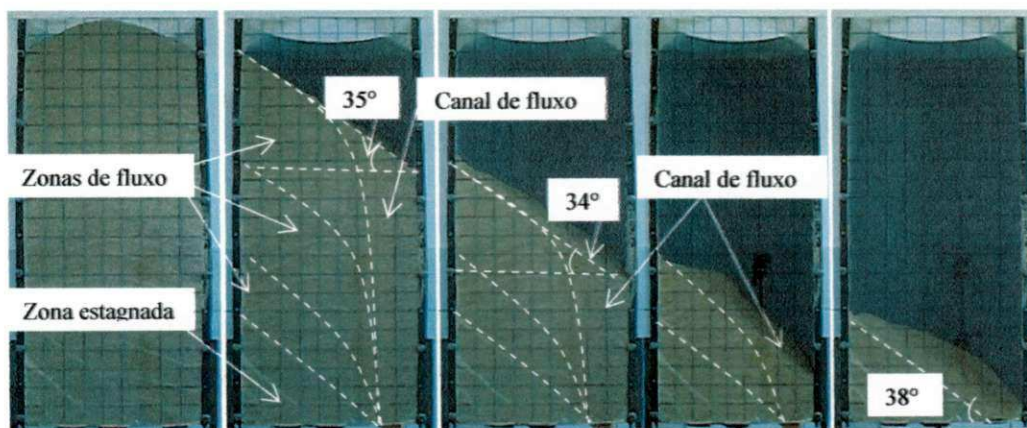


Figura 44. Sequência de imagens para um fundo plano orifício 03

No descarregamento de farelo de soja em silo com tremonha, Figura 45, o fluxo misto ocorreu com a mudança do tipo massa para funil na relação $H/D = 1,5$ quando houve distinção de um canal de fluxo mais veloz com limites periféricos atingindo as paredes verticais a uma relação $H/D = 0,9$.

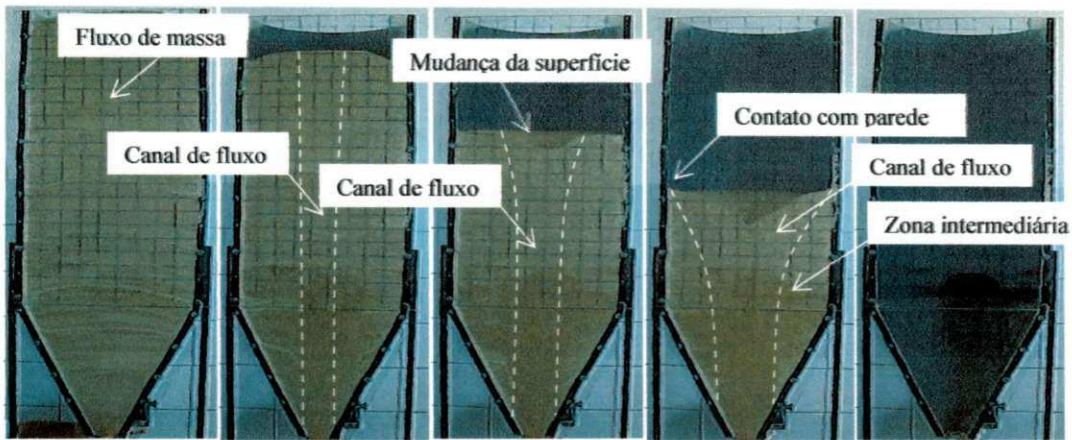


Figura 45. Sequência de imagens para tremonha cônica

A variante deste tipo de fluxo pode ser percebida pela mudança da forma da superfície superior do produto que, lentamente, deixa de ter concavidade para cima, passando por uma forma plana e assumindo, por fim, uma concavidade inversa.

As Figuras 46, 47 e 48 representam os descarregamentos de farelo de soja pelos orifícios 01, 02 e 03, respectivamente, para o período de armazenagem de 48 h; para a Figura 46 pode-se comentar que o fluxo se deu de modo pouco uniforme e de difícil classificação; a abertura do orifício de descarga causou desprendimento de uma pequena porção localizada próximo à saída dando início ao fluxo, contudo, grande parte do produto em contato com a parede localizada do lado oposto ao orifício permaneceu estagnada inicialmente e, ao se movimentar, o fazia de forma abrupta causando enorme impacto de queda.

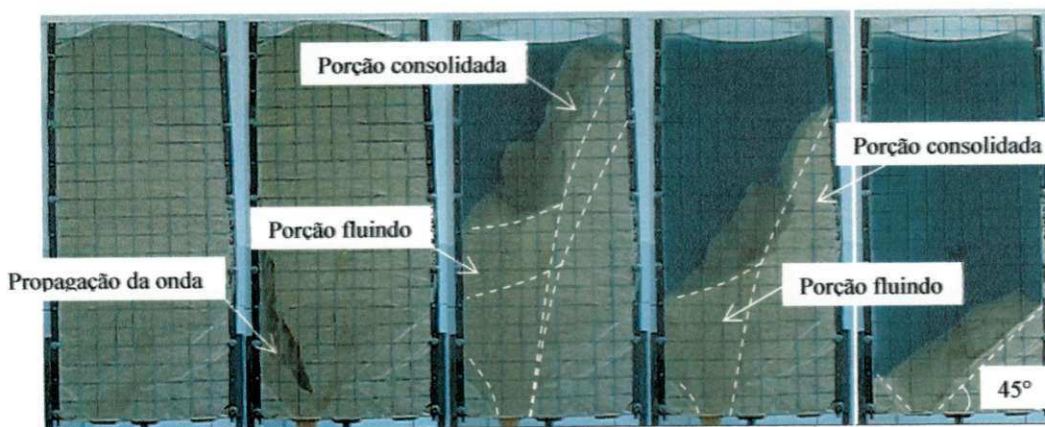


Figura 46. Sequência de imagens para o fundo plano orifício 01

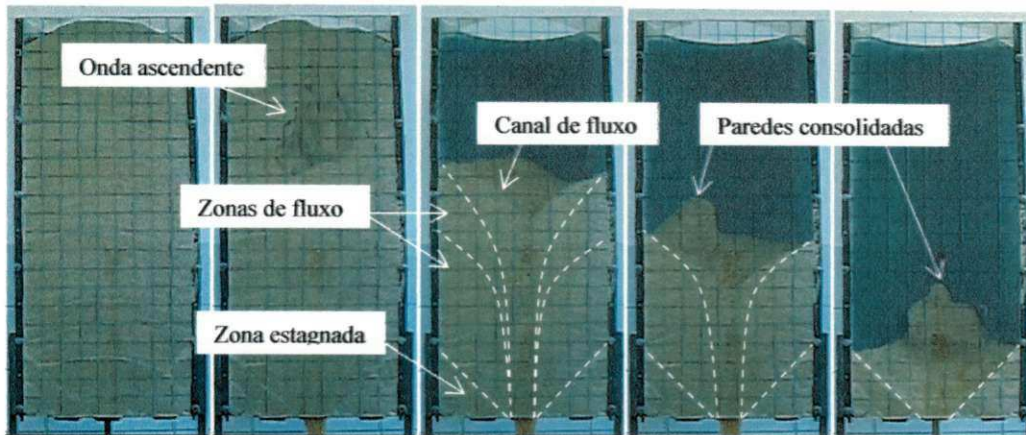


Figura 47. Sequência de imagens para um fundo plano orifício 02



Figura 48. Sequência de imagens para o fundo plano orifício 03

Para a Figura 47 é importante salientar que o fluxo predominante foi do tipo funil com a superfície superior do produto logo assumindo a direção da concavidade para baixo; quando aberto o orifício, o fluxo era acionado pela propagação de uma onda em sentido vertical e ascendente, enquanto para o descarregamento excêntrico a 75% o fluxo se deu de forma semelhante ao registrado na Figura 46.

A seguir são apresentadas as imagens do uso da tremonha cônica com predominância do fluxo de massa durante todo o processo sendo facilmente percebido pela conservação da forma superior da superfície da massa armazenada; para este tratamento não foi observado o surgimento de um canal de fluxo de maior velocidade como visto na Figura 45 significando que o tempo de armazenagem não interferiu na consolidação das partículas.

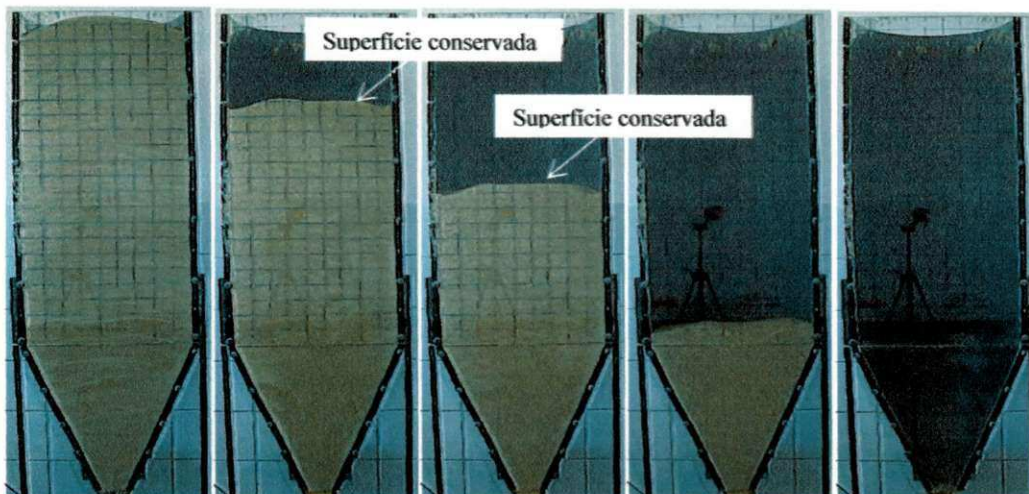


Figura 49. Sequência de imagens para tremonha cônica

A seguir são apresentadas as Figuras 50, 51 e 52 relativas ao descarregamento pelos orifícios 01, 02 e 03, respectivamente, após uma armazenagem de 120 h; é provável que o avançado tempo de armazenagem tenha contribuído para tornar mais evidente a visualização das camadas se desprendendo uma a uma em direção à saída, como observado nas duas primeiras descargas.

Ficaram bastante evidenciados, também, os limites do canal de fluxo excêntrico do tipo tubo para a Figura 50; já para o descarregamento concêntrico, Figura 51, o canal formado inicialmente tendeu a tomar uma direção vertical mais próxima à parede direita, sentido excêntrico, devido, sem dúvida ao arranjo das partículas e as excentricidades de carregamento não previstas. Calil Junior et al. (2007) comenta que este movimento é característico de silos muito esbeltos; por fim, sua direção assumiu sentido concêntrico, enquanto nenhum efeito mais evidente de consolidação de partículas foi observado na Figura 52.



Figura 50. Sequência de imagens para o fundo plano orifício 01

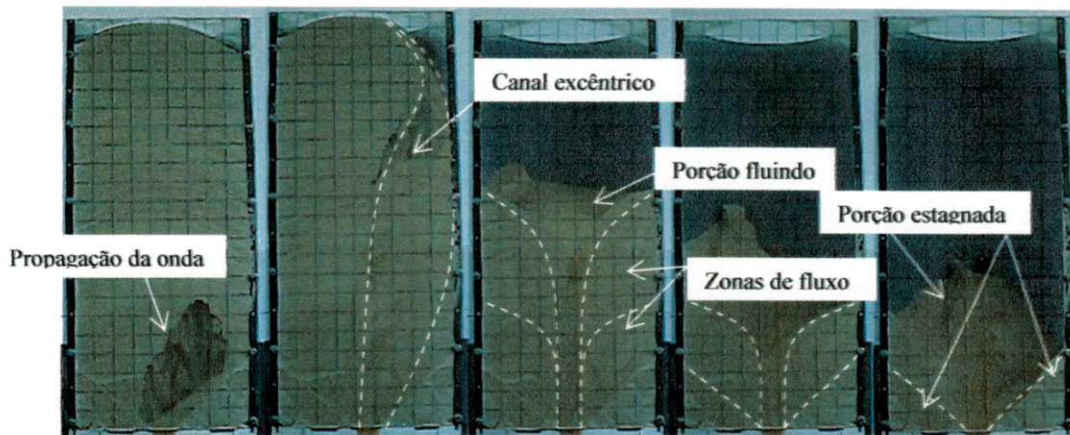


Figura 51. Sequência de imagens para o fundo plano orifício 02



Figura 52. Sequência de imagens para o fundo plano orifício 03

Quando utilizada tremonha para uma armazenagem de 120 h pôde-se observar que imediatamente após a abertura do orifício de descarga, ocorre a formação de um arco coesivo instável que logo se rompe dando início ao fluxo predominantemente do tipo massa. Isto indica que mesmo utilizando uma tremonha de 70° a estabilidade do arco coesivo para farelo de soja pode ser alcançada caso se aumente o tempo de armazenagem.

Na Figura 54 se encontram maiores detalhes do arco coesivo pouco antes de sua ruptura. Sua forma cilíndrica atingiu altura de 66 cm e maior largura de 12 cm resultando em uma relação altura/largura igual a 5,5.

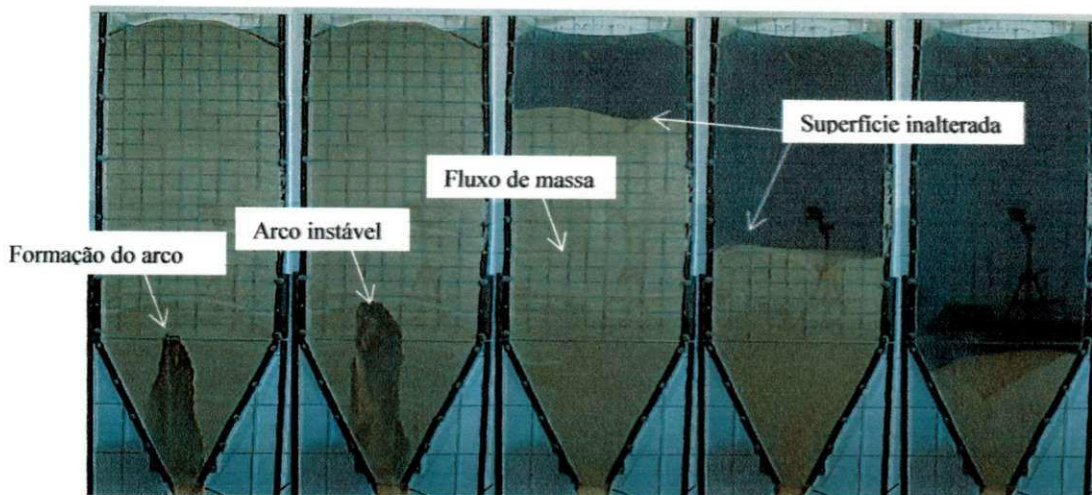


Figura 53. Sequência de imagens para tremonha cônica

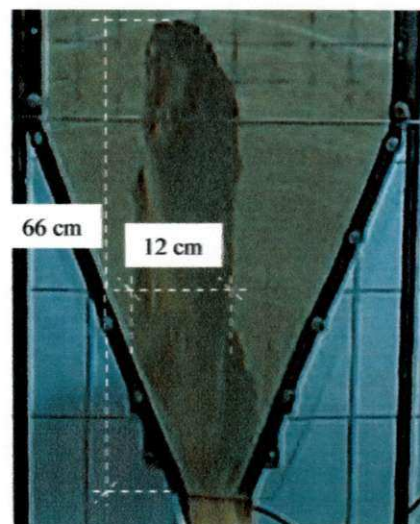


Figura 54. Arco coesivo instável

4.3 VAZÃO DE DESCARGA

A Figura 55 representa o descarregamento de milho em grão para o silo com fundo plano e três orifícios de descarga ficando patente que a maior vazão ocorreu no orifício 03, sendo 30,7% mais rápida que no orifício 01 e 7,7% superior ao orifício 02; esta maior vazão se deve ao maior ângulo de inclinação do limite do canal de fluxo proporcionando um deslizamento do produto com maior velocidade em direção ao orifício de descarga.

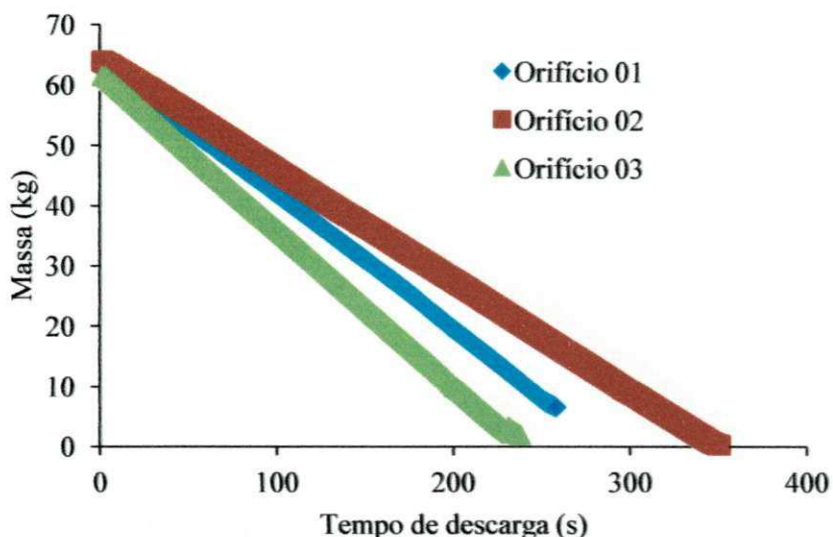


Figura 55. Curvas de vazão de descarga para milho em grão

A Figura 56 representa o descarregamento de feijão em grão para o silo com fundo plano e três orifícios de descarga constatado-se que a maior vazão ocorreu no orifício 01 com uma vazão de 19,23% superior à do orifício 02 que, por sua vez, foi 7,7% mais rápido que o orifício 03

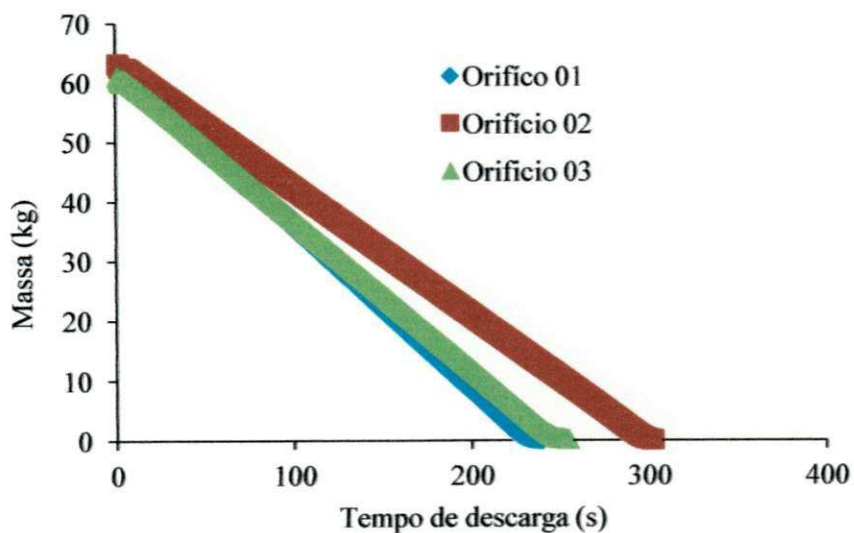


Figura 56. Curvas de vazão de descarga para feijão em grão

A Figura 57 representa o descarregamento do silo para dois produtos granulares com tremonha cônica; com isto o feijão teve uma vazão superior a vazão do milho, em média 0,19kg/s e essa maior vazão maior se deve ao formato do grão. O grão de feijão tem, no seu formato, um grão mais arredondado, facilitando o deslizamento

das partículas enquanto o grão de milho, por ser achatado e angular, facilita o acomodamento das partículas dificultando o descarregamento.

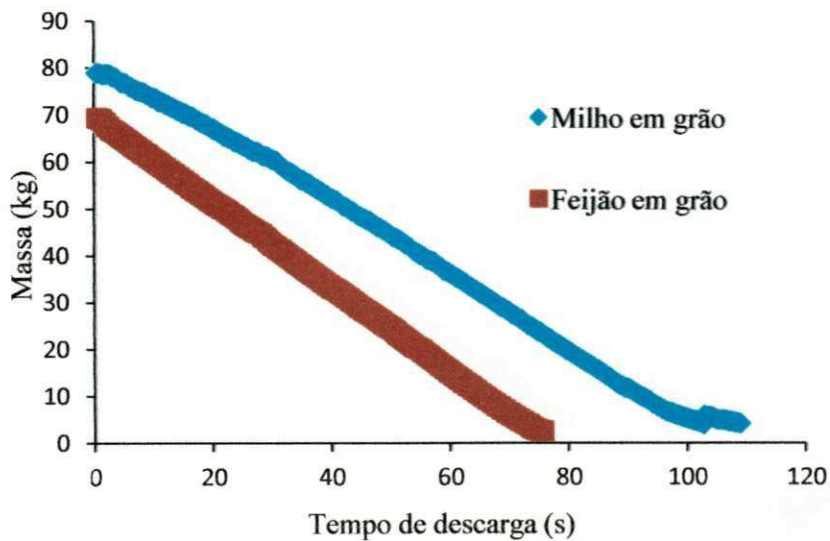


Figura 57. Curvas de vazão de descarga para milho e feijão em grão (tempo 10 min)

A Figura 58 representa o descarregamento do silo para os dois produtos pulverulentos com tremonha cônica de 70°. O milho triturado teve uma vazão de 0,33kg/s enquanto a do farelo de soja foi igual de 0,66kg/s, ou seja, superior ao do milho triturado em 100%; esta maior vazão se deve à composição de cada produto, já que o milho triturado continha todos os seus elementos naturais tais como ácidos graxos, amido e óleos e que o farelo de soja era o subproduto restante da retirada de seus elementos naturais.

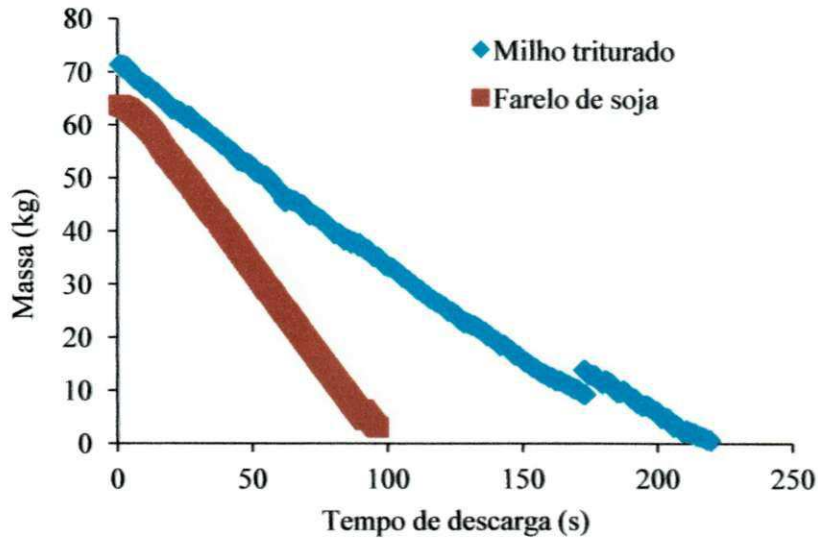


Figura 58. Curvas de vazão de descarga para milho triturado e farelo de soja (10 min)

A Figura 59 representa o descarregamento do silo para os dois produtos pulverulentos com tremonha cônica e com tempo de armazenamento de 48 horas. O tempo de armazenamento não influenciou na vazão, tendo o farelo de soja uma vazão de 0,60kg/s e do milho triturado de 0,37kg/s.

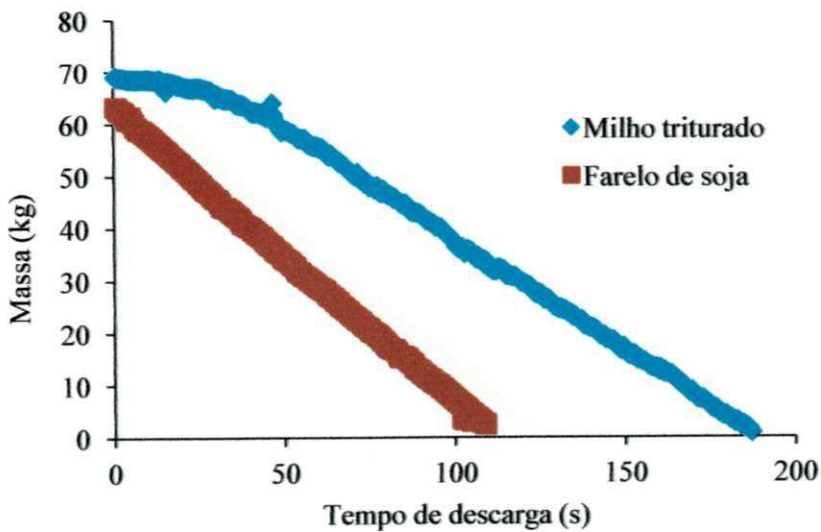


Figura 59. Curvas de vazão de descarga para milho triturado e farelo de soja (48 h)

A Figura 60 representa o descarregamento do silo para os dois produtos pulverulentos com tremonha cônica e com tempo de armazenamento de 120 horas, o

qual também não influenciou na vazão tendo, por sua vez, o farelo de soja com maior vazão.

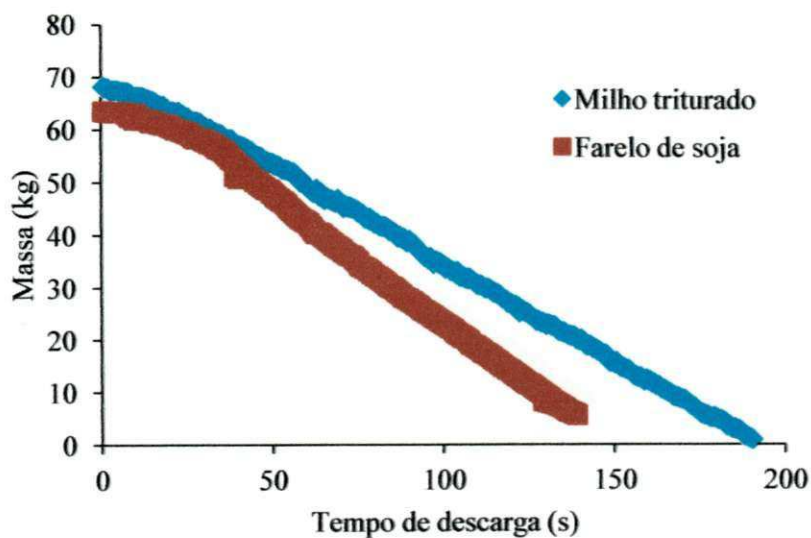


Figura 60. Curvas de vazão de descarga para milho triturado e farelo de soja (120 h)

A Figura 61 representa o descarregamento do farelo de soja para o silo com fundo plano e três orifícios de descarga no tempo de 10min; observou-se que a maior vazão ocorreu no orifício 03, seguido pelo orifício 02 e 01 com vazões de 0,22, 0,20 e 0,19kg/s respectivamente.

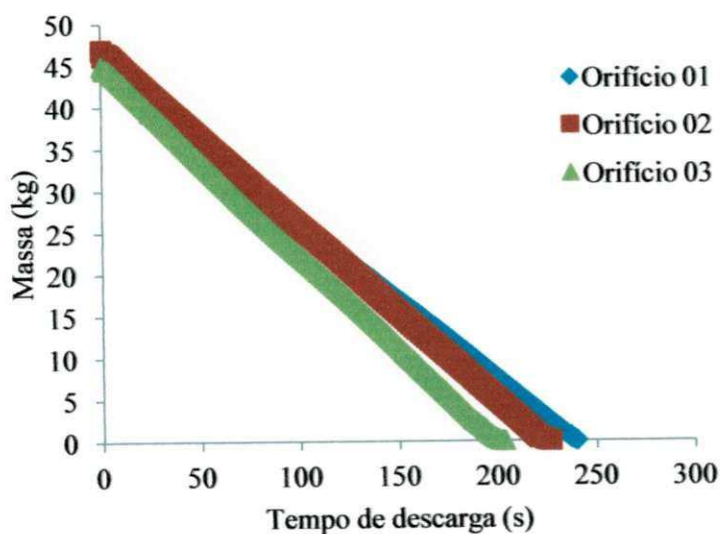


Figura 61. Curvas de vazão de descarga para farelo de soja (10 min)

A Figura 62 representa o descarregamento do farelo de soja para o silo com fundo plano e três orifícios de descarga no tempo de armazenamento de 48 horas; observou-se que o tempo de armazenamento de 48h não influenciou na vazão, permanecendo o orifício 03 com a maior vazão, seguido pelo orifício 02 e 01 0,22, 0,21 e 0,19kg/s.

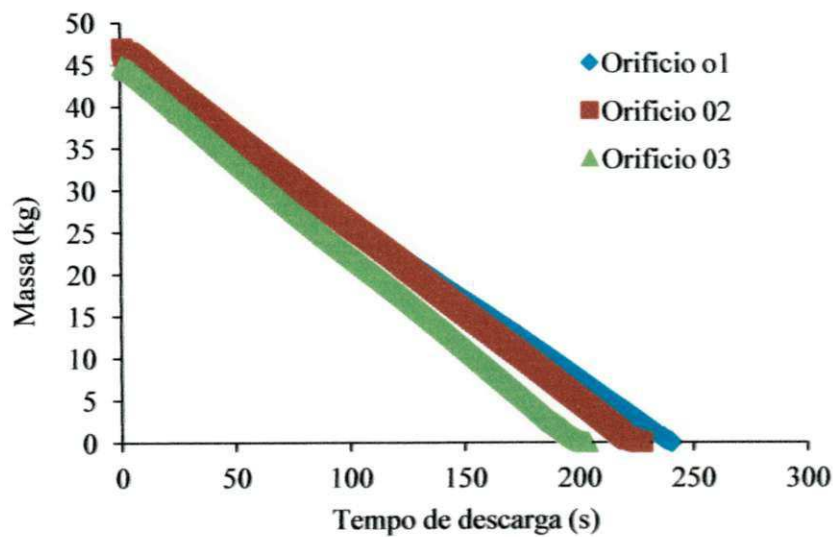


Figura 62. Curvas de vazão de descarga para farelo de soja (48 h)

A Figura 63 representa o descarregamento do farelo de soja para o silo com fundo plano e três orifícios de descarga no tempo de 120 horas; constatou-se que o tempo de armazenamento não influenciou na vazão de descarga, permanecendo o orifício 03 com a maior vazão, seguido dos orifícios 02 e 01, respectivamente.

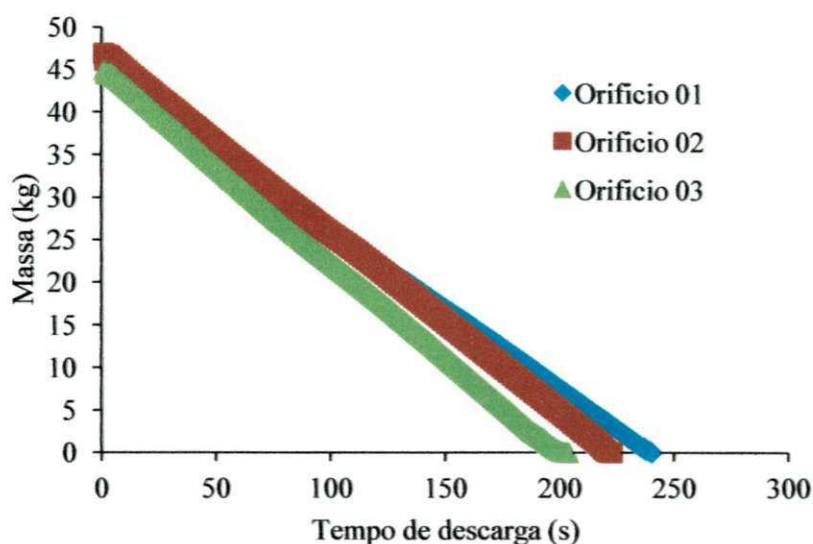


Figura 63. Curvas de vazão de descarga para farelo de soja (120 h)

Apresentam-se seguir os valores médios de vazão de descarga para todas as situações estudadas; pode-se destacar na Tabela 10, a diferença encontrada quando da utilização da tremonha cônica tendo o feijão em grão uma vazão 20,6% maior que a observada para o milho em grão; quando utilizados o fundo plano, não se observou variação da vazão superior a 15%.

Tabela 10. Vazão média de descarregamento para os produtos granulares

Produto	Fundo plano			Tremonha cônica
	Orifício 01	Orifício 02	Orifício 03	
Milho em grão	0,24	0,18	0,26	0,73
Feijão em grão	0,26	0,21	0,24	0,92

Valores em kg/s

Analisando a Tabela 11 diz-se que o tempo de armazenagem empregado no estudo não afetou a vazão para o farelo de soja em qualquer orifício utilizados; tal observação pode, ainda, ser estendida para o uso da tremonha cônica para os dois primeiros tempos de estudo quando, a partir de então, notou-se uma queda de vazão de 21,6%; ara o milho triturado os diferentes tempos de armazenagem não interferiram em seus resultados médios.

Tabela 11. Vazão média de descarregamento para os produtos pulverulentos

Produto	Tempo 10 minutos			Tremonha cônica
	Fundo plano			
	Orifício 01	Orifício 02	Orifício 03	
Milho triturado	--	--	--	0,33
Farelo de soja	0,19	0,2	0,22	0,66
Produto	Tempo 48 horas			Tremonha cônica
	Fundo plano			
	Orifício 01	Orifício 02	Orifício 03	
Milho triturado	--	--	--	0,37
Farelo de soja	0,19	0,21	0,22	0,6
Produto	Tempo 120 horas			Tremonha cônica
	Fundo plano			
	Orifício 01	Orifício 02	Orifício 03	
Milho triturado	--	--	--	0,35
Farelo de soja	0,19	0,21	0,22	0,47

4.4 COMPARATIVO ENTRE OS VALORES TEÓRICOS E EXPERIMENTAIS DE VAZÃO

A Figura 64 representa os valores experimentais e teóricos para o milho em grão utilizando-se fundo plano. Ficou patente que os valores experimentais de vazão foram menores do que os valores propostos por Beverloo et al. (1961) e Rotter (2001), permanecendo o orifício 3 com maior vazão.

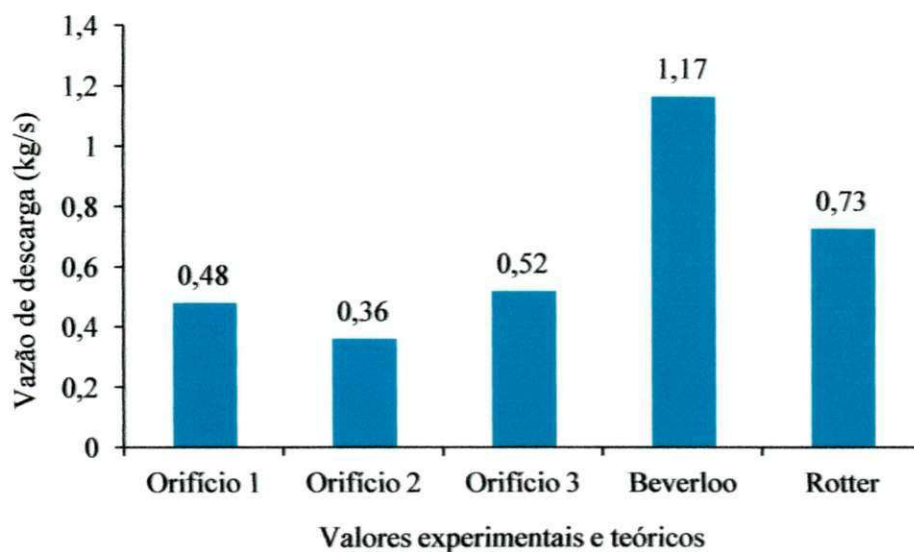


Figura 64. Comparativo das vazões para milho em grão

A Figura 65 representa os valores experimentais e teóricos para o feijão em grão utilizando fundo plano; observou-se que os valores experimentais de vazão também foram menores que os propostos por Beverloo et al. (1961) e Rotter (2001), tendo o orifício 1 a maior vazão.

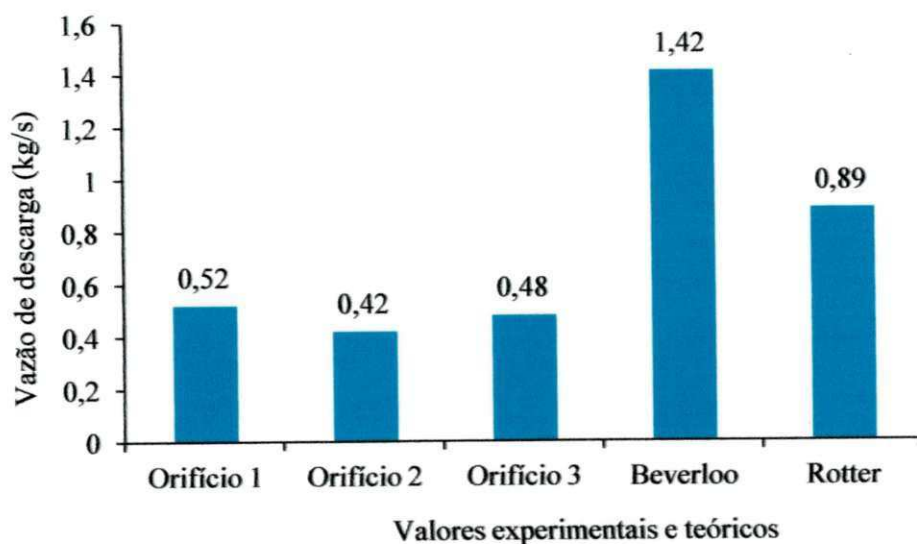


Figura 65. Comparativo das vazões para feijão em grão

A Figura 66 representa o valor experimental e o teórico para o milho em grão utilizando-se tremonha cônica. No comparativo da vazão experimental com a vazão teórica propostas por Beverloo et al. (1961) e Rotter (2001), a teoria de Rotter (2001) foi a que mais se aproximou do resultado experimental.

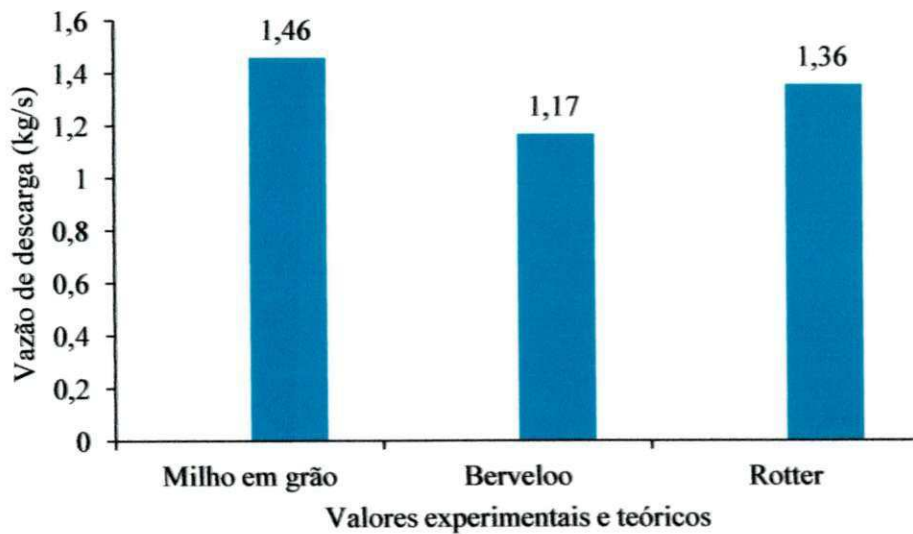


Figura 66. Comparativo das vazões para milho em grão com tremonha

A Figura 67 representa o valor experimental e teórico para o feijão em grão utilizando-se tremonha cônica; resultado de vazão experimental foi superior ao teórico, sendo a teoria de Rotter (2001) a que mais se aproxima.

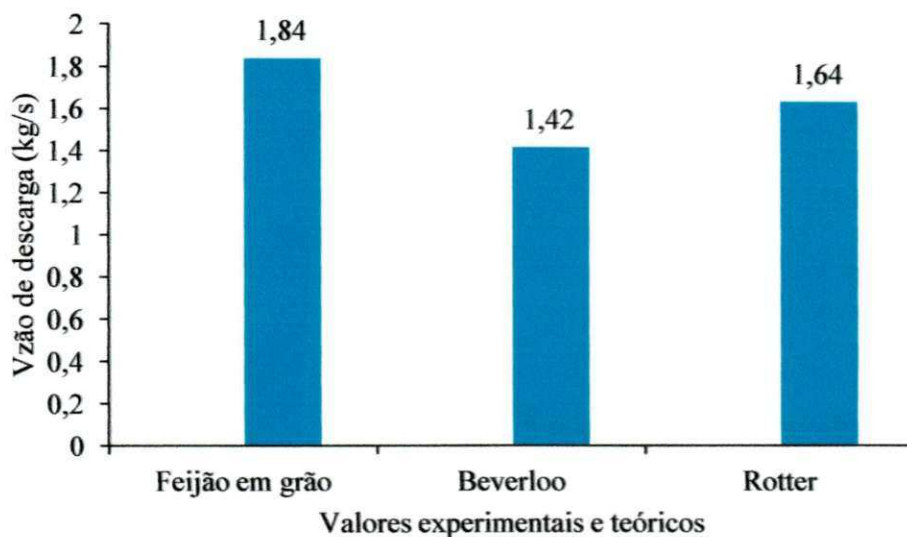


Figura 67. Comparativo das vazões para feijão em grão com tremonha

A Figura 68 representa os valores experimentais e teóricos para o milho triturado utilizando-se tremonha cônica com três tempos de armazenamento; observou-se que o tempo de armazenamento não influenciou nos resultados encontrados e a teoria que mais se aproximou da vazão experimental foi a de Rotter (2001).

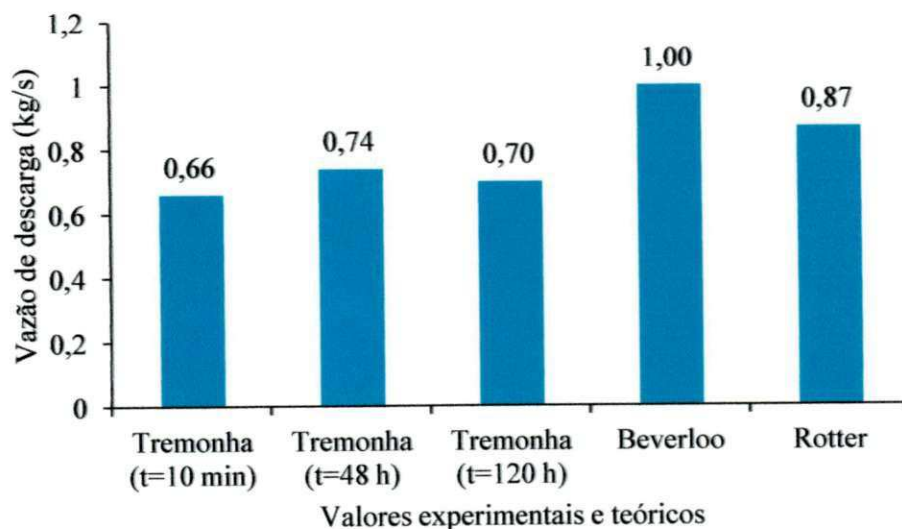


Figura 68. Comparativo das vazões para milho triturado com tremonha

A Figura 69 representa os valores experimentais e teóricos para o farelo de soja utilizando-se fundo plano; os resultados experimentais encontrados foram menores subestimando os propostos por Beverloo et al. (1961) e Rotter (2001).

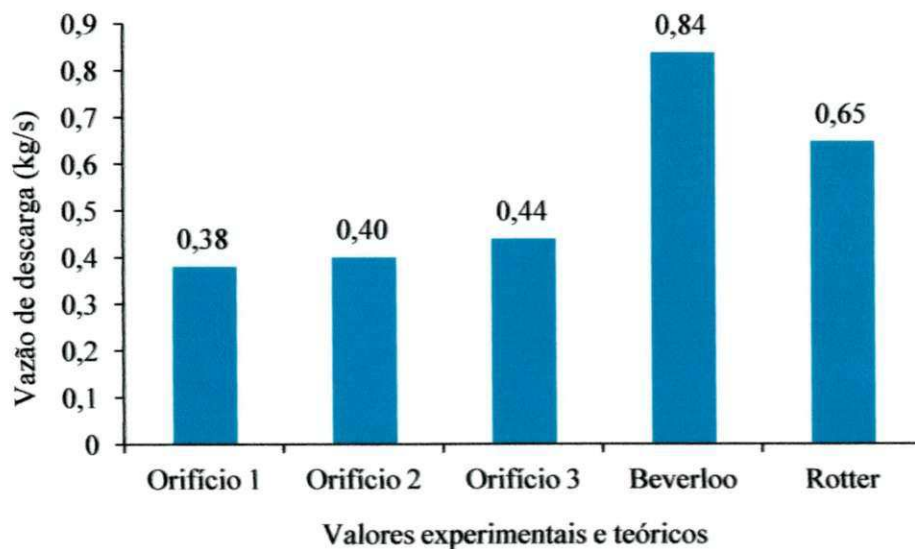


Figura 69. Comparativo das vazões para farelo de soja (tempo 10 min)

A Figura 70 representa os valores experimentais e teóricos para o farelo de soja utilizando-se fundo plano para os períodos de 48 e 120 h de armazenagem, concordado se que os resultados experimentais encontrados foram menores que os teóricos subestimando os propostos por Beverloo et al. (1961) e Rotter (2001); acrescenta-se que não foi observado variação na vazão quando comparados os valores de 48 e 120h.

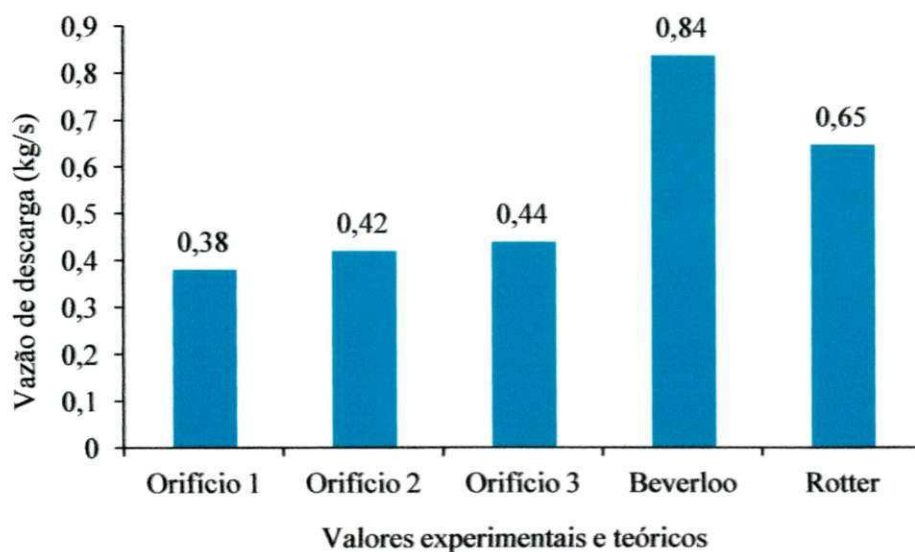


Figura 70. Comparativo das vazões para farelo de soja (tempos 48 e 120 h)

A Figura 71 representa o comparativo dos valores experimentais com os teóricos para o farelo de soja, utilizando-se tremonha cônica; observou-se que os valores experimentais encontrados para o tempo de armazenamento 10 e 48 horas permaneceram dentro da média de vazão proposta por Rotter (2001), enquanto a teoria de Beverloo et al. (1961) apresentou um valor 12% inferior ao menor valor de vazão experimental encontrado.

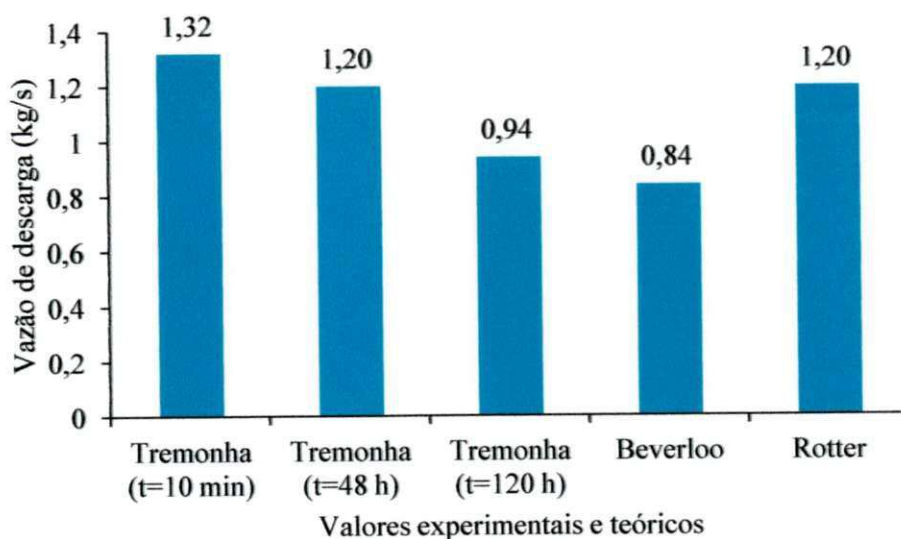


Figura 71. Comparativo das vazões para farelo de soja com tremonha

UFCC - BIBLIOTECA

5. CONCLUSÕES

✓ As propriedades de fluxo para os produtos granulares (milho e feijão em grão) tiveram seus índices de fluxo de 13,6 e 6,9, considerado fluxo livre e fácil, respectivamente; para o produto pulverulento milho triturado, o índice de fluxo foi 4,0 classificado fluxo coesivo; entretanto, o farelo de soja, apesar de ser um produto pulverulento, teve seu índice de fluxo igual a 54,0 classificado fluxo livre.

✓ O modelo de silo de seção semicircular demonstrou-se adequado para investigação do tipo de fluxo, de suas camadas limites e variações.

✓ Ao descarregar milho e feijão em grão pelo fundo plano, o fluxo foi do tipo misto com a mudança em diferentes relações H/D, enquanto com utilização da tremonha o fluxo foi do tipo massa, para os dois produtos analisados.

✓ O fluxo do farelo de soja variou conforme a geometria do fundo do silo (fundo plano e tremonha) com ocorrência de formação de arco coesivo instável com a utilização da tremonha no tempo de 120 h.

✓ Para os produtos granulares utilizando-se fundo plano, o orifício 02 foi o que apresentou menor vazão de descarga; quando descarregados por tremonha cônica, a vazão obtida para feijão em grão foi 1,26 vez superior que a do milho em grão.

✓ Para os produtos pulverulentos utilizando-se tremonha cônica, foram observados valores até duas vezes superiores para o farelo de soja; já quando descarregado pelo fundo plano, a vazão do farelo de soja permaneceu praticamente constante, independente do período de armazenagem.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

As análises desenvolvidas neste trabalho de pesquisa sugerem alguns estudos para melhor compreensão dos produtos armazenáveis.

- ✓ Comparar os resultados de vazão obtidos para um silo de seção transversal semicircular com os valores de um silo com seção transversal circular e outro prismática;
- ✓ Diferenciar as camadas desses produtos para melhor visualização do comportamento de fluxo;
- ✓ Efetuar o carregamento de forma mecanizada com o intuito de reduzir as interferências e possíveis excentricidades;
- ✓ Analisar o descarregamento de outros produtos armazenáveis e;
- ✓ Avaliar as pressões exercidas pelo produto, nas condições de fluxo testadas nesta pesquisa.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

ASAE Standards. **Loads exerted by free-flowing grain on bins**. St. Joseph, 2000a. ANSI/ASAE.

_____. **Loads exerted by free-flowing grains on shallow storage**. St. Joseph, 2000b. ANSI/ASAE EP545 EP433

ACI. **Standard practice for design and construction of concrete silos and stacking tubes for storing granular materials and commentary**. Detroit: American Concrete Institute. 1997. (ACI 313r-97)

BATISTA, C. da S.; **Estudo teórico e experimental do fluxo de sólidos particulados em silos verticais**. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia. 102 f.: il. color .Campina Grande, 2009.

BENINK, E.J. **Flow and stress analysis of cohesionless bulk materials in silos related to codes**. 1989. 162p. Thesis - Universiteit Tweste, Netherlands, 1989.

BEVERLOO, W. A.; LENIGER, H. A.; and DE VELDE, J. V. The flow of granular solids through orifices. **Chemical Engineering Science**, v.15, p. 260 -269. 1961.

BRASIL. **Regras para Análise de Sementes**. Ministério da Agricultura e da Reforma Agrária, 1992, 365 p

BRITISH MATERIALS HANDLING BOARD. BMHB. **Draft code of practice for the design of silos, bins, bunkers and hoppers**. Berkshire: 1985.

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

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

CALIL JUNIOR, C. et al. **Silos: pressões, fluxo, recomendações para o projeto e exemplos de cálculo**. São Carlos, EESC. 232p. 2007.

CARSON, J. W. & JENKYN, R. T. Load development and structural considerations in silo design. In: **Reliable Flow of Particulate Solids II**, Oslo, Norway, August 1993.

CHOI, J.; KUDROLLI, A. e BAZANT, M. Z. Velocity profile of granular flows inside silos and hoppers. *Journal of Physics Condensed Matter*, n. 17, p. 2533-2548, 2005.

COMPANIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB 2006). **Anuário da produção agrícola nacional Ano 2006**. Disponível em: <http://www.conab.gov.br>. Acesso em: 15 de Dezembro de 2011.

COMPANIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB 2006). **Situação da Armazenagem no Brasil 2006**. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/713c763e53bbfc388225a7fcc52eb6ae.pdf>>. Acesso em 18 de Dezembro de 2011.

DIN. Lastnahmen fur bautten- en lasten in silozellen (Design loads for buildings- Loads in silos). Deutsche, 1987. (DIN 1055, Part 6)

EUROCODE 1 PART 4. **Actions on silos and tanks**. Bruxelas: 1995.

HIRSHFELD, D e RAPAPORT, D. C. Granular flow from a silo: discrete-particle simulations in three dimensions. *The European Physical Journal*, n. 4, p. 193-199, 2001.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE 2010). **Levantamento sistemático da produção agrícola**. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/noticia_impresao.htm>. Acesso em: 12 Set de 2011.

JENIKE, A.W. **Storage and flow of silos**. Salt Lake City. University of Utah. Bulletin 123. Engineering Experiment Station (1964).

LOPES NETO, J. P.; NASCIMENTO, J. W. B. do; SILVA, V. R. da. Efeito do tempo de armazenagem de rações avícolas no dimensionamento de silos. **Engenharia Agrícola Jaboticabal**, v.29, n.4, p.518-527, out./dez. 2009.

LUEPTOW, R. M.; AKONUR, A; SHINBOT A. PIV for granular flows. *Experiments in fluids*, n. 28, p. 183-186, 2000.

MADRONA, F. S. **Pressões em silos esbeltos com descarga excêntrica**. 2008. 178 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2008.

MANKOC, C.; JANDA, A.; ARÉVALO, R. PASTOR, J. M.; ZURIGUEL; GARCIMARTIN, A. e Maza, D. **The flow rate of granular materials through an orifice**. *Granular Matter*, n. 9, p. 407–414, 2007.

MEDINA, A.; CÓRDOVA, J. A.; LUNA, E. e TREVINO, C. Velocity field measurements in granular gravity. *Physics Letters*, n. 250, p. 111-116, 1998.

NASCIMENTO, J. W. B. do. **Estudos de silos metálicos prismáticos para fábricas de ração**. São Carlos: Tese Doutorado USP, 222p 1996..

NRCC. NATIONAL FARM BUILDING CODE OF CANADÁ. **Canadian Commission on Building and Fire Codes**. Ottawa: National Research Council of Canada, 1995. (NRCC 38732)

OSTENDORF, M. E SCHWEDES, J. Application of particle image velocimetry for velocity measurements during silo discharge. **Powder Technology**, n. 158, p. 69-75, 2005.

PALMA, G. **Pressões e fluxos em silos esbeltos ($h/d \geq 1,5$)**. Dissertação Mestrado em Engenharia de Estruturas. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2005. 121p

PALMA, G.; CALIL JUNIOR C. Pressões e fluxo em silos esbeltos ($H/D \geq 1.5$). **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, São Carlos, v. 10, n. 42, p. 129-150, 2008

PUZZI, D. **Abastecimento e armazenagem de grãos**. Campinas, Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 1986. 603 p.

RAVENET, J. **Silos. Flujo de vaciado de solidos. Formacion de bovedas. Efectos**. Barcelona: Editores Técnicos Asociados, 335 p., 1983

ROTTER, J. M. **Guide for the economic design of circular metal silos**. London: Spon Press, 28p. 2001.

SADOWSKI, A. J.; ROTTER, J. M. Steel silos with diferente aspect ratios: II — behaviour under eccentric discharge. *Journal of Constructional Steel Research*, n. 67, p. 1545 – 1553, 2011.

SAMADANI, A.; PRADHAN, A. e KUDROLLI, A. Size segregation of granular matter in silo discharges. *Physical Review*, n. 60, p. 7203, 1999.

SCHULZE, D. **Powders and bulk solids. Behavior, characterization, storage and flow**. 1.ed. Berlin: Springer, 2009. 517p.

SIELAMOWICZ, I.; CZECH, M. e KOWALEWSKI, T. A. Empirical description of flow parameters in eccentric flow inside a silo model. **Powder Technology**, n. 198, p. 381-394, 2010.

SIELMAMOWICZ, I; BLONSKI, S. e KOWALEWSKI, T. A. Digital particle image velocimetry (DPIV) technique in measurements of granular materials flows, Part 2 of 3 – converging hoppers. **Chemical Engineering Science**, n. 61, p. 5307-5317, 2006.

SIELMAMOWICZ, I; CZECH, M. e KOWALEWSKI, T. A. Empirical description of granular flow inside a model silo with vertical walls. doi:10.1016/j.biosystemseng.2011.01.004, 2011.

STANDARDS AUSTRALIA. **Loads on bulk solids containers**. Homebush, Austrália. 1996. (AS 3774-1996).

STEINGART, D. 3 EVANS, J. W. Measurements of granular flows in two-dimensional hoppers by particle image velocimetry. Part I: experimental method and results. *Chemical Engineering Science*, n. 60, p. 1043-1051, 2005.

VALENTINI, S. R. de T.; CASTRO, M. F. P. M. de., ALMEIDA, F. H. de . Determinação do teor de umidade de milho utilizando aparelho de microondas. **Ciências Tecnologia de Alimentos**. vol. 18 n. 2 Campinas May/July 1998

ZANOTTO, D. L.; BELLAVER, C. **Método de determinação da granulometria de ingredientes para uso em rações de suínos e aves**. EMBRAPA. (Comunicado técnico ISSN 0100 – 8862). 1996.

WALKER, D. M. An approximate theory for pressures and arching in hoppers. **Chemical Engineering Science**, v. 21, p. 975-997, 1966.

ZURIGUEL, I.; JANDA, A.; GARCIMARTÍN, A. e MAZA, D. Flow rate in the discharge of a two-dimensional silo. Powders and Grains. In: Proceedings of the 6th International Conference on Micromechanics of Granular Media **edited by M. Nakagawa and S. Luding 2009 American Institute of Physics 978-0-7354-0682-7/09/S25.00**