



Universidade Federal de Campina Grande

Centro de Ciências e Tecnologia - Campus I

Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia de Processos

**Estudo teórico e experimental do fluxo de sólidos particulados
em silos verticais**

CLÁUDIA DA SILVA BATISTA

CAMPINA GRANDE

NOVEMBRO 2009

Estudo teórico e experimental do fluxo de sólidos particulados em silos verticais

Por

CLÁUDIA DA SILVA BATISTA

Orientadores: Prof. Dr. José Wallace Barbosa do Nascimento

Prof. Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto

Tese apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande em cumprimento às exigências para obtenção do título de Doutor em Engenharia de Processos, na Área de Desenvolvimento de Processos.

CAMPINA GRANDE

Paraíba - Brasil

Novembro / 2009

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

B333e

Batista, Cláudia da Silva

Estudo teórico e experimental do fluxo de sólidos particulares em silos verticais / Cláudia da Silva Batista. — Campina Grande, 2009.

102 f.: il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia.

Referências.

Orientadores: Prof. Dr. José Wallace Barbosa do Nascimento, Prof. Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto.

1. Produtos Granulares 2. Vazão Mássica 3. Rugosidade I. Título.

CDU 631.24(043)

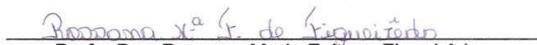
MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA TESE DE DOUTORADO DE
CLÁUDIA DA SILVA BATISTA APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS DO CENTRO DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA
GRANDE

Tese de Doutorado **Aprovada** em 06 de novembro de 2009


Prof. Dr. José Wallace Barbosa do Nascimento
ORIENTADOR – UFCG/CTRN/UAEAg


Prof. Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto
ORIENTADOR – UFCG/CCT/UAEQ


Prof. Dr. Francisco Carlos Gomes
EXAMINADOR EXTERNO – UFLA/DEG

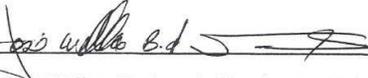

Profa. Dra. Rossana Maria Feitosa Figueirêdo
EXAMINADORA EXTERNA – UFCG/CTRN/UAEAg


Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima
EXAMINADOR INTERNO – UFCG/CCT/UAEM


Profa. Dra. Josivanda Palmeira Gomes
EXAMINADORA INTERNA – UFCG/CTRN/UAEAg

Campina Grande, novembro de 2009
PB - Brasil

Este exemplar corresponde à versão final da Tese de Doutorado em Engenharia de Processos, defendida por Cláudia da Silva Batista e aprovada pela banca examinadora em 06 de novembro de 2009.



Prof. Dr. José Wallace Barbosa do Nascimento (Orientador)
UFCG/CTRN/UAEA

DEDICATÓRIA

Aos meus amores Caio, Iago e Isaac ,
razão de minha alegria de viver
dedico. A Claudianor que merece
minha admiração e amor, por seu
respeito e compreensão ofereço.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que me dá tudo que necessito para ser feliz;

Aos Professores Dr. José Wallace Barbosa do Nascimento e Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto, pela orientação;

Ao Professor Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima, pela colaboração no desenvolvimento e na conclusão deste trabalho;

A Comissão Examinadora;

A minha mãe, pela vida, pelo apoio, pelos ensinamentos e pela dedicação em todos os momentos;

Aos irmãos, Itamar e Iliomax, pelo carinho e respeito, pelo incentivo e apoio;

Ao amigo Neto, especialmente, pela ajuda e pela certeza de amizade sincera;

Aos amigos Enivaldo, Valneide e Fernanda, pela amizade e pela ajuda;

A todos que, de alguma forma, deram sua parcela de contribuição para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	viii
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE SÍMBOLOS	xii
RESUMO	xiv
ABSTRACT	xv
1 - INTRODUÇÃO	1
2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 - Silos: definições e conceitos	5
2.2 - Classificação dos silos	5
2.3 - Fluxo de sólidos em silos	7
2.3.1 - Modelos de fluxo e sua variação com a geometria do silo	8
2.4 - Problemas relacionados ao projeto de silos	15
2.4.1 - Arqueamento	16
2.4.2 - Efeito tubo	18
2.4.3 - Descarga incompleta	19
2.5 - Slip-Stick	20
2.6 - Propriedades de fluxo dos sólidos	22
2.7 - Orifício de descarga	27
2.7.1 - Determinação da dimensão mínima da boca de descarga	27
2.8 – Rugosidade das paredes	29
2.9 – Forma e tamanhos das partículas	32

2.10 – Modelos empíricos de vazão mássica em silos	33
2.11 – Relação H/D (altura/diâmetro)	35
3 – MATERIAL E MÉTODOS	39
3.1 – Local dos ensaios	39
3.2 – Produtos utilizados	39
3.3 – Silo em modelo reduzido	40
3.4 – Rugosidade das paredes	42
3.5 – Aquisição de dados	43
3.5.1 – Balança	43
3.6 – Obtenção dos dados	44
3.7 – Propriedades de fluxo dos produtos utilizados	45
3.8 – Determinação das propriedades físicas dos produtos	47
3.8.1 – Teor de umidade	47
3.8.2 - Granulometria	47
3.8.3 – Ângulo de repouso (β)	48
3.8.4 – Porosidade, massa específica real e aparente	49
3.9 - Modelo empírico para descarga no silo	50
4 – RESULTADOS E DISCURSSÃO	52
4.1 – Propriedades físicas dos produtos	52
4.2. – Propriedades de fluxo dos produtos	53
4.3 – Vazão mássica	55
4.3.1 – Efeito da rugosidade das paredes	55

4.3.2. – Efeito da inclinação da tremonha	58
4.3.3 – Efeito da excentricidade de descarregamento	58
4.3.4 –Efeito do tamanho e forma das partículas	59
4.3.5 – Efeito da velocidade de carregamento	60
4.3.6 – Efeito da excentricidade de carregamento	61
4.3.7 – Efeito da relação H/D	62
4.4 – “Slip sick”	63
4.5 – Modelo matemático proposto	66
4.5.1 – Comparação entre os modelos	67
5 – CONCLUSÕES	69
6 - SUGESTÕES	69
7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70
APÊNDICE	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais vantagens e desvantagens dos fluxos de massa e funil.	13
Tabela 2 - Fluxo dos produtos armazenáveis	23
Tabela 3 – Designação da rugosidade da parede	27
Tabela 4 – Valores característicos das propriedades de fluxo de produtos sólidos.	28
Tabela 5 - Classificação dos produtos em função do diâmetro das partículas.	29
Tabela 6. Classificação geométrica dos silos de acordo com a relação H/D	33
Tabela 7 Valores médios das propriedades físicas dos produtos avaliados	48
Tabela 8 – Propriedades de fluxo dos produtos estudados	50
Tabela 9 - Variação das vazões mássicas média entre as rugosidades das paredes (%)	53
Tabela 10 – Valores do ângulo de atrito com a parede (θ_w) em (°)	56
Tabela 11 – Índices da equação do modelo matemático proposto	65
Tabela 12 - Erro relativo entre os valores experimentais e os valores dos modelos preditos	67
Tabela 13 – Valores da vazão mássica média (kg/s) para as rugosidades das paredes e variação das vazões entre as rugosidades das paredes (%)	80
Tabela 14 - Vazões mássicas médias (kg/s) para os modelos teóricos considerando todos os produtos	81

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Silos equipados com tremonha	5
Figura 2 - Silos formados por fundo plano	5
Figura 3. - Aparelho de cisalhamento de Jenike	6
Figura 4 - Zonas de fluxo de sólidos	7
Figura 5 - Modelos básicos de fluxo de produtos sólidos	8
Figura 6 – Variações do tubo no fluxo de funil	9
Figura 7 – Determinação gráfica do tipo de fluxo	10
Figura 8 – Variações do fluxo misto	10
Figura 9 - Variações do fluxo em função da esbeltez do silo	11
Figura 10 - Limites para fluxo de massa e funil	12
Figura 11 - Arco mecânico.	15
Figura 12 - Arcos coesivos	15
Figura 13 - Formação do efeito tubo	16
Figura 14 - Silo com descarga incompleta	17
Figura 15 - Lugares geométricos e ângulos de atrito interno	22
Figura 16 – Lugar geométrico de deslizamento do produto com a parede	23
Figura 17 – Determinação da função $G(\emptyset)$	25
Figura 18 – Amostra do painço	36
Figura 19 – Amostra da areia.	37
Figura 20 – Farelo de milho (Amostra do M1)	37
Figura 21 – Farelo de milho (Amostra do M2)	37

Figura 22 – Farelo de milho (Amostra do M3)	37
Figura 23 –Silo utilizado	38
Figura 24 – Tremonhas de 45° e 30°	38
Figura 25 – Fundos planos concêntrico e excêntrico	39
Figura 26 – Silo revestido com lixa	40
Figura 27 – Balança utilizada	40
Figura 28 – Célula de carga utilizada	41
Figura 29 – Lugares geométricos e ângulos de atrito interno	43
Figura 30 – Representação do ângulo de repouso	45
Figura 31 – Desenho esquemático do picnômetro	46
Figura 32 - Vazão mássica instantânea em função do tempo para o produto areia, considerando as rugosidades das paredes (ϵ), (a) 0,06 μm , (b) 6,56 μm , e (c) 11,95 μm	51
Figura 33 - Vazão mássica média para o produto areia para as diferentes formas de descarregamento em função da rugosidade da parede	54
Figura 34 - Vazão mássica instantânea do tempo para o produto areia, considerando as diferentes inclinações da tremonha (α), (a) 45°, (b) 30° e (c) 0°	55
Figura 35 – Vazão mássica média do produto painço para descarregamento concêntrico e excêntrico	56
Figura 36 – Vazão mássica instantânea em função do tempo para o produto areia, considerando as diferentes excentricidades de saída, (a) saída concêntrica, com d igual a 5cm, e (b) saída excêntrica, com d igual a 5cm	57
Figura 37 – Vazão mássica instantânea em função do tempo para os produtos (a) areia, (b) painço, (c) farelo de milho M1, (d) farelo de milho M2, (e) farelo de milho M3.	59

Figura 38 – Vazão mássica média de descarga, para a areia, em função do diâmetro de saída e ângulo da tremonha para diferentes velocidades de carregamento. tremonhas e orifícios de saída de 3,5 cm	60
Figura 39 – Vazão mássica média do painço em função da excentricidade de carregamento, considerando as diversas formas de descarga	61
Figura 40 – Relações H/D em função das rugosidades das paredes do silo para o descarregamento do farelo de milho M3	62
Figura 41 – Velocidade de descarga dos farelos de milho (M1, M2 e M3) em relação às diversas formas de descarga	63
Figura 42 – Erro de leitura da balança em função da vibração do sistema devido ao efeito “slip-stick” para (a) farelo de milho M1, (b) farelo de milho M2 e (c) farelo de milho M3.	64
Figura 43 – Semicírculo de Mohr	78
Figura 44 – Círculos de tensões de Mohr e ângulos de atrito (pré-carga 5 kg) para o produto painço	79

LISTA DE SIMBOLOS

δ - efetivo ângulo de atrito interno ($^{\circ}$);

H – é uma função do ângulo da tremonha;

γ - peso específico consolidado (kN/m^3);

\emptyset - ângulo de atrito interno ($^{\circ}$);

α - ângulo de inclinação da tremonha ($^{\circ}$);

\emptyset_w - ângulo de atrito interno do produto com a parede ($^{\circ}$);

\emptyset_r – ângulo de repouso

YL - lugar geométrico de deslizamento;

EYL - lugar geométrico efetivo de deslizamento;

WYL - lugar geométrico de deslizamento da parede;

g - aceleração da gravidade (m/s^2)

Ps - peso seco

Pu – peso úmido

σ_c - tensão não confinada de deslizamento;

σ_m - tensão principal da consolidação;

τ - tensão de cisalhamento (kPa);

b_{\min} - diâmetro do orifício de saída (m);

σ_{crit} – tensão crítica (PA)

K – relação entre a pressão vertical e horizontal;

dp – diâmetro da partículas (mm);

X e J são constantes;

d – diâmetro de saída;

A – área do diâmetro de saída ;

d_h – diâmetro hidráulico médio do orifício;

ρ_b – densidade volumétrica

Q – vazão volumétrica;

d – tamanho do orifício (diâmetro ou comprimento do lado quadrado);

C_1 e C_2 são coeficientes;

ρ_t – densidade da partícula;

D – diâmetro do silo;

C – coesão

U – teor de umidade do produto, b.u (base úmida);

P_u – peso úmido da amostra do produto;

P_s - peso seco da amostra do produto;

d_{ps} – diâmetro médio do sauter;

d_{pi} – diâmetro médio para cada partícula;

X_1 – fração mássica retida;

P – porosidade;

ρ_{ap} – massa específica aparente;

ρ – massa específica real;

W – vazão mássica;

ε – rugosidade.

RESUMO

BATISTA, Cláudia da Silva. **Estudo teórico e experimental do fluxo de sólidos particulados em silos verticais**. Tese de Doutorado (Universidade Federal de Campina Grande – Campina Grande, 2009).

Este trabalho teve por objetivo principal apresentar um estudo teórico e experimental da vazão mássica e do fluxo de produtos granulares para subsidiar o projeto estrutural em silos. Foi desenvolvido um modelo matemático para prever a vazão de descarregamento para distintos produtos. Estudou-se as características físicas e de fluxo de cinco produtos granulares: painço, areia fina e três farelos de milho, e avaliou-se o comportamento do fluxo das partículas em um silo cilíndrico, equipado com fundo plano e tremonhas de 30 e 45° de inclinação com a vertical; diferentes orifícios de descarga, 3,5 e 5 cm de diâmetro; e três rugosidades das paredes, 0,06, 6,56 e 11,9 μm . Concluiu-se que a rugosidade da parede, para a faixa estudada, não influenciou na vazão de descarregamento, para todos os produtos. As maiores vazões de descarregamento no silo foram registradas para a areia e as menores foram observadas para o farelo de milho M1, cuja razão aproximada foi de 2,5 para as diversas formas de descarregamento. As maiores vazões de descarga foram observadas quando o diâmetro do orifício de saída foi de 5 cm chegando a um valor de 1,35 kg/s. As menores vazões de descarregamento dos produtos foram registradas quando se utilizou a tremonha com inclinação de 30° com o valor de 0,16 kg/s para o produto que apresentou as menores vazões, farelo de milho M1. O fenômeno “slip stick” foi verificado para as diferentes granulometrias do farelo de milho, sendo mais intenso para o M2. O modelo proposto apresentou ajuste razoável em relação aos dados experimentais.

Palavras-chave: produtos granulares, vazão mássica, rugosidade.

ABSTRACT

BATISTA, Cláudia da Silva. **Theoretical and experimental study of the flow of particulate solids in vertical silos.** Tese de Doutorado (Universidade Federal de Campina Grande – Campina Grande, 2009).

This work was aimed at presenting a theoretical and experimental study of the mass flow and the flow of granular products to support the structural design of silos. We developed a mathematical model to predict the flow of discharge for different products. We studied the physical characteristics and flow of five granular products: millet, fine sand and three meals of corn, and evaluated the flow behavior of particles in a cylindrical silo, equipped with flat bottom hoppers 30 and 45° inclination to the vertical, different discharge outlets, 3.5 and 5 cm in diameter and three roughness of the walls, 0.06, 6.56 and 11.9. It was concluded that the roughness of the wall, in the range studied did not influence the flow of discharge for all products. The highest rates of discharge were recorded in the silo for sand and the lowest was observed for the corn bran M1, whose approximate ratio was 2.5 for the various forms of discharge. The highest rates of discharge were observed when the diameter of the exit hole was 5 cm reaching a value of 1.35 kg / s. The lowest flow rate of discharge of the products were recorded when using the 30° to the value of 0, 16 kg/s for the product hopper with an inclination of 30° that had the lowest flow rates, corn bran M1. The phenomenon "slip stick" was observed for different particle size of corn bran, being more intense for the M2. The proposed model presented a reasonable adjustment in relation to the experimental data.

Keywords: granular materials, flow rate, wall roughness.

1 - INTRODUÇÃO

Com o movimento crescente da industrialização mundial em termos de capacidade e diversidade de produção, viu-se a necessidade de importar a utilização dos silos dos campos para os pátios das indústrias englobando, a partir desse momento, a possibilidade de armazenamento de produtos oriundos de indústrias de fiação, de carburetos e aços, da construção civil e farmacêutica, entre outras.

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

Silos são usados extensamente na indústria com vantagens de utilização eficiente de espaço, conservação do estoque, abastecimento do processo de fabricação. Contudo, são estruturas complexas de se projetar, apresentando freqüentemente problemas operacionais, uma vez que existem diferentes tipos de produtos que podem ser armazenados. Estes problemas ocorrem nos sistemas onde as estruturas são projetadas sem conhecimento das características relevantes do fluxo do produto a ser armazenado.

O estudo do fluxo é de fundamental importância para subsidiar o projeto estrutural e o tipo de fluxo em silos, como também para avaliar o escoamento dos sólidos evitando a obstrução do fluxo no descarregamento, o que acarreta invariavelmente prejuízos às indústrias.

A compreensão do comportamento do fluxo de um sólido é essencial para identificar problemas de segregação e descarga. Torna-se então necessário caracterizar as propriedades de fluxo para se projetar um sistema seguro.

A caracterização de um produto deve ser uma das primeiras etapas feitas ao projetar ou modificar um sistema de carga e descarga. A caracterização do produto a armazenar consiste em determinar suas propriedades físicas, tais como: teor de umidade, massa específica, porosidade, ângulo de repouso, granulometria, as quais devem ser realizadas nas condições mais severas que podem ocorrer no silo.

Diversos experimentos têm sido usados para determinar as propriedades de fluxo, ângulo de atrito interno, efetivo ângulo de atrito interno, ângulo de atrito do produto

com a parede. O aparelho de cisalhamento Jenike Shear Test é um equipamento adequado para medir essas propriedades em escala industrial. Este teste de cisalhamento é comum na tecnologia de produtos pulverulentos para caracterização da fluabilidade (escoabilidade) dos pós, visto que é um método rápido para a determinação das propriedades de fluxo.

As recomendações das normas estrangeiras para a predição de pressões e fluxo de produtos armazenados, de um modo geral, são baseadas em duas fontes: experimentais, nas quais as pressões e o fluxo são medidos e observados em silos reais ou em modelos de silos, e em modelos teóricos. A forma matemática dos modelos deve satisfazer dois critérios: (a) deve ser simples o suficiente para tornar o projeto possível, e (b) possuir certas características do processo às quais são pertinentes às otimizações. Um modelo matemático ótimo deve ser capaz de predizer adequadamente um processo físico.

Os estudos realizados sobre as vazões em silos, em geral se limitam aos problemas encontrados nas indústrias, tais como a formação de arcos coesivos e interrupção da descarga do silo, provocando parada total ou parcial em determinado setor de produção, e ou distribuição. Isto acarreta prejuízos devido ao aumento dos custos de produção, comprometimento no atendimento dos contratos comerciais firmados pelas empresas (vendas internas e/ou externas), diminuição da margem de contribuição (lucro bruto), o que poderá causar a médio prazo o início de um processo de descontinuidade da indústria.

Deve-se ressaltar que esses problemas estendem-se tanto às agroindústrias, como as indústrias: alimentícia (por exemplo, leites e farinhas), química, farmacêutica, siderúrgica e de mineração (por exemplo, carvão mineral e calcário), quanto à da construção civil, para armazenagem de produtos sólidos como argilas, cimentos, bentonitas, pozolanas e agregados devendo-se este fato ao elevado nível industrial alcançado nos últimos anos bem como ao desenvolvimento de novos produtos armazenáveis como fibras e polímeros.

Diante do exposto este trabalho objetivou o estudo experimental da vazão e do fluxo de produtos granulares para subsidiar o projeto estrutural em silos, como também desenvolver um modelo matemático que possa predizer a vazão de descarregamento para distintos produtos. Especificamente, objetivou-se:

- Determinar as propriedades físicas (massa específica, porosidade, ângulo de repouso, granulometria) e de fluxo (ângulo de atrito interno, efetivo ângulo de atrito interno, ângulo de atrito do produto com a parede) de cinco produtos granulares, areia fina, painço e três farelos de milho (M1, M2 e M3), com diferentes granulometrias.
- Avaliar o comportamento do fluxo de partículas em modelo reduzido de silo cilíndrico e tremonhas com diferentes ângulos de inclinação (0, 30 e 45°).
- Propor um modelo empírico capaz de prever a vazão de descarregamento em função do produto, rugosidade da parede do silo, diâmetro do orifício e inclinação da tremonha.
- Comparar os resultados obtidos com o modelo proposto com resultados experimentais e com resultados obtidos de modelos empíricos disponibilizados na literatura, para avaliar o modelo e otimizar o processo.

2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - Silos: definições e conceitos

Denomina-se silo toda construção destinada ao armazenamento de produtos sólidos, entretanto, esta definição sempre esteve associada à idéia de depósito agrícola cuja única finalidade seria de estocar e conservar apenas cereais e forragens.

FREITAS (2001) define silo como sendo um termo genérico indicado para designar toda e qualquer construção cuja finalidade seja de armazenar produtos granulares ou pulverulentos, podendo a mesma ser equipada com dispositivos de carregamento e que seja capaz de ser esvaziada por gravidade, preferencialmente, ou através de meios mecânicos ou pneumáticos.

Os silos recebem diversas denominações, internacionalmente, por exemplo, as mais comuns são “bins” e “bunkers” cujas definições se apresentam bastante confusas e variadas de acordo com o país ou autor que as utilize. SAFARIAN & HARRIS (1985) afirmam que os termos *silo*, “bin” e “bunker” possuem diferentes significados em diferentes partes do mundo e variam de autor para autor. Nos Estados Unidos, por exemplo, o termo “bin” engloba ambas as denominações *silo* e “bunker” fazendo-se uma pequena subdivisão ao nomear silo àquele “bin” cuja relação altura/diâmetro seja elevada e “bunker” aquele de baixa relação altura/diâmetro.

2.2 - Classificação dos silos

Não existe entre grande parte dos pesquisadores perfeita concordância sobre os parâmetros definidores de classificação de silos, podendo os mesmos serem discriminados de acordo com sua geometria, tipo de fluxo desenvolvido no processo de descarregamento, geometria do fluxo e tipo de fundo (Figuras 1 e 2). Para a norma australiana AS 3774 (1996), os silos podem ser classificados em função da rugosidade interna do material de composição das paredes, da flexibilidade circunferencial das paredes, da continuidade das paredes na direção vertical, da configuração do orifício de descarga e das razões de escolha de cada fluxo. Sabe-se que os silos também são diferenciados conforme sua construção em relação ao nível da superfície, sendo

considerado silo elevado aquele cuja altura é maior que o diâmetro e silo horizontal aquele cujo comprimento se desenvolve na horizontal.



Figura 1 - Silos equipados com tremonha. Fonte: SMA Comércio e Serviços Agrícolas (2009)



Figura 2 - Silos formados por fundo plano. Fonte: SIM Agroindustrial LTDA (2009)

2.3 – Fluxo de sólidos em silos

JENIKE (1964) deu grande contribuição científica ao desenvolver um aparelho de cisalhamento direto apropriado para produtos sólidos denominado de “Jenike Shear Cell” sendo possível determinar os esforços sobre o qual o produto estará sujeito durante o armazenamento e nas condições de fluxo previstas para acontecer no silo (Figura 3).

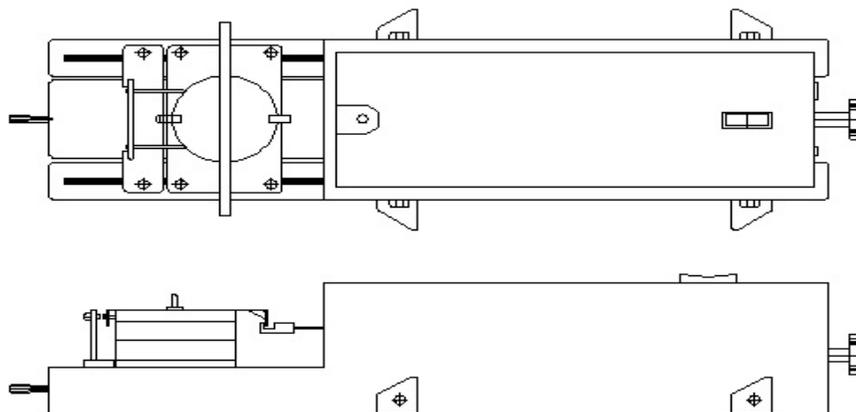


Figura 3 - Aparelho de cisalhamento de Jenike

Segundo SCHWEDES (1981), a principal razão desta popularidade, è a versatilidade do aparelho de Jenike, pois permite a determinação da função de fluxo, ângulo de atrito interno, ângulo de atrito com a parede e o efeito de consolidação. Sendo possível também, através de uma análise bi-dimensional dos esforços, o desenvolvimento de uma metodologia matemática específica capaz de determinar o ângulo mínimo da tremonha e dimensão de seu orifício de descarga para o fluxo de massa e funil para as formas cônicas e de cunha.

Um grupo denominado “Working Party on the Mechanics of Particulate Solids (WPMPS)” da federação europeia de engenheiros químicos, com o intuito de avaliar a confiabilidade das propriedades de fluxo, coordenou vários ensaios com o aparelho de Jenike. Após detalhada análise dos resultados experimentais e da experiência dos membros da WPMPS, foi elaborado um novo procedimento padrão de teste, o qual forneceu instruções detalhadas para a operação do aparelho de Jenike, que recebeu o nome de “standart shear testing technique for particulate solids using the Jenike Shear Cell” (PALMA, 2005).

Segundo ROTTER (1998), uma descrição completa de todas as propriedades de fluxos é atualmente impossível, pois ainda não são conhecidos todos os parâmetros que deveriam ser medidos, nem como algumas das propriedades conhecidas deveriam ser medidas.

2.3.1 - Modelos de fluxo e sua variação com a geometria do silo

CALIL JÚNIOR (1990) afirma que o tipo de fluxo desenvolvido por um sólido está intimamente relacionado com as características geométricas do silo e pode caracterizar o descarregamento do produto, o tipo de segregação, a formação ou não de zonas de estagnação de movimento e se o silo pode ser esvaziado completamente. A forma como um produto escoar por gravidade em um silo é restringido por um lado, pelas próprias propriedades físicas do produto e, por outro, pela geometria e estrutura da superfície de contato (atrito com a parede) da tremonha.

Na Figura 4 podem ser observadas 5 zonas de fluxo, durante a descarga de um silo, definidas como: ao longo da zona A, as partículas fluem livremente. Tal movimentação influencia a ocorrência de um escoamento desacelerado e na forma de blocos na zona B. Tão logo as partículas ou camadas em movimento alcancem o campo C, elas sofrem uma aceleração e, na zona D, perdem contato com a vizinhança caindo livremente. A zona E permanece quase que totalmente estática durante todo o processo (BROWN & NIELSEN, 1998).

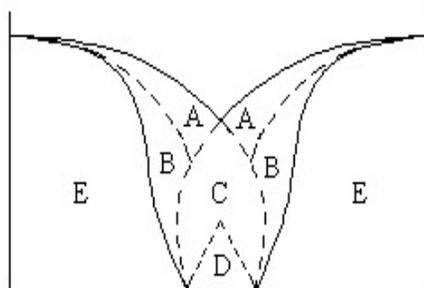


Figura 4 - Zonas de fluxo de sólidos. Fonte: BROWN & NIELSEN (1998)

Até o momento, não há modelos físicos capazes de prever com exatidão as características de fluxo assumidas pelo produto no processo de movimento em um silo, o comportamento da massa do produto, ilustrado na Figura 4 é derivado de observações

visuais. OOI *et al.* (1998) citam que a caracterização do tipo de fluxo torna-se difícil já que o movimento não pode ser facilmente detectado do lado externo da estrutura em virtude da opacidade do material de construção do silo em escala real, e que em laboratório os modelos em escala reduzida muitas vezes não representam o verdadeiro fenômeno em um silo de escala industrial.

JENIKE (1964) apresenta dois modelos básicos de fluxo:

- Fluxo de funil: aquele no qual apenas parte do produto entra em movimento através de um canal vertical (efeito tubo) formado no interior do silo. O fluxo de funil tende a ocorrer quando as paredes da tremonha são rugosas e seu ângulo de inclinação com a vertical é elevado (Figura 5);
- Fluxo de massa: corresponde a movimentação de todas as partículas contidas no silo simultaneamente, promovendo um descarregamento uniforme, e ocorre quando as paredes da tremonha são suficientemente inclinadas e lisas e não existem abruptas transições (Figura 5).

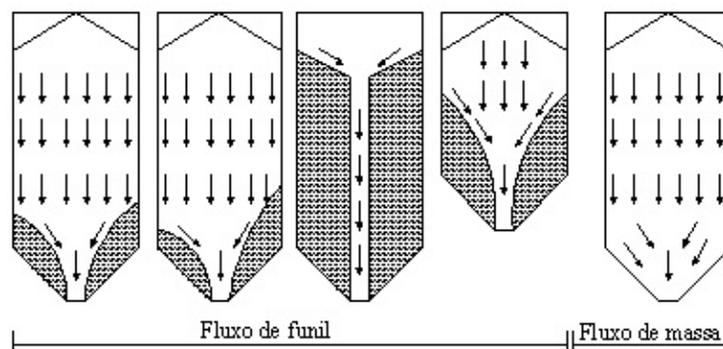


Figura 5 - Modelos básicos de fluxo de produtos sólidos. Fonte: DIN 1055 (1987)

Para o fluxo de funil, o tubo formado no seu interior no processo de descarregamento pode, ainda, assumir diferentes configurações como visto na Figura 6.

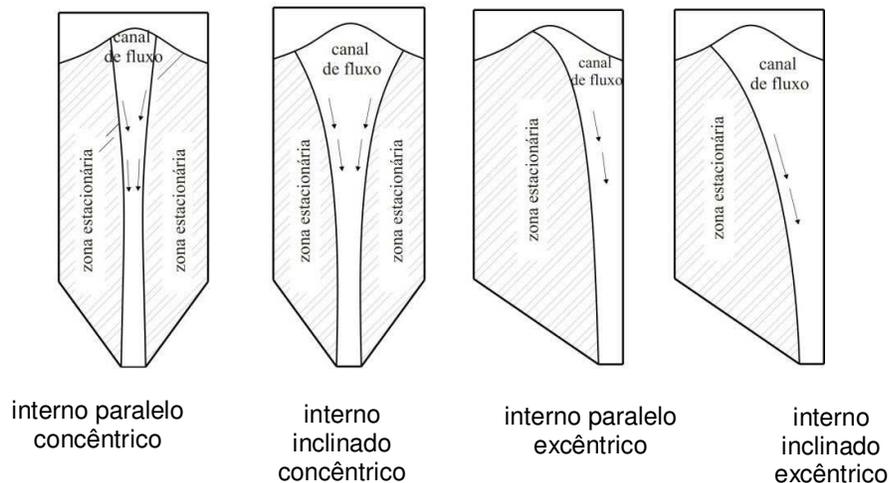


Figura 6 - Variações do tubo no fluxo de funil. Fonte: CALIL JÚNIOR & CHEUNG (2007)

Conforme a BMHB (1985), o fluxo de massa deve ser escolhido se: a vazão de descarga for controlada sem indevidas flutuações; a segregação nas partículas obtidas puder ser minimizada; o tempo de armazenamento no silo não for indevidamente prolongado ou se o local escolhido for adequado para tremonha cujos lados sejam muito inclinados. Somando a essas, pode-se citar que para produtos coesivos, é recomendável a utilização de fluxo de massa para prevenir a formação de elementos obstrutores de fluxo.

Segundo algumas normas internacionais, DIN 1055 (1987), por exemplo, o tipo de fluxo pode ser pré-definido 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 JÚNIOR & CHEUNG (2007) recomendam que seja sempre diminuído de 3° para se obter um padrão de fluxo seguro, devido às incertezas embutidas no processo (Figura 7).

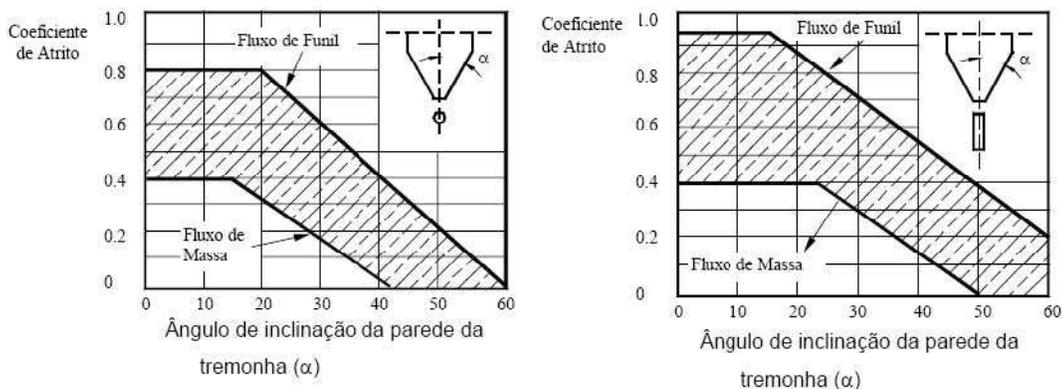


Figura 7 - Determinação gráfica do tipo de fluxo. Fonte: DIN 1055 (1987)

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 de fluxo misto (Figura 8).

É importante salientar que a saída excêntrica em silos com fluxo misto e em tubo provoca carregamentos assimétricos que 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 JÚNIOR & CHEUNG (2007).

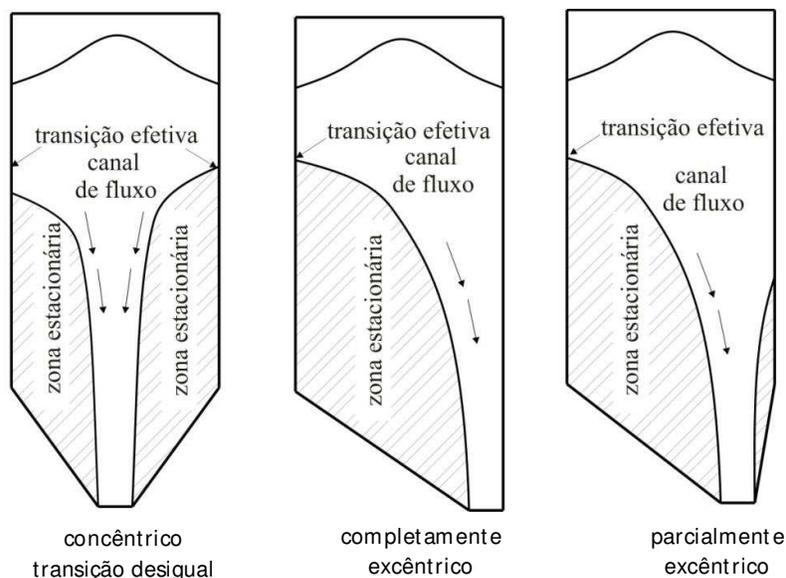


Figura 8 - Variações do fluxo misto. Fonte: CALIL JÚNIOR & CHEUNG (2007)

Além da configuração da descarga do silo, outro fator que contribui para a variação do fluxo no interior dos silos é sua esbeltez, relação definida entre a razão da altura do corpo do silo e seu diâmetro interno (Relação H_c/D_c). Quanto maior for esta relação, mais esbelto será considerado o silo. Na Figura 9 são apresentadas as possíveis configurações do canal de fluxo em função da esbeltez do silo.

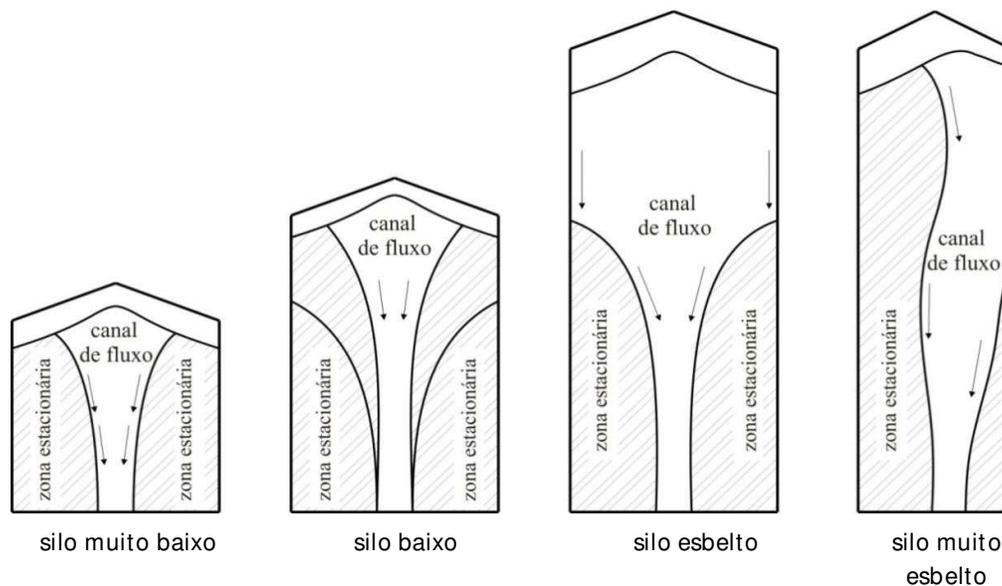


Figura 9 - Variações do fluxo em função da esbeltez dos silos. Fonte: CALIL JÚNIOR & CHEUNG (2007)

Conforme ROBERTS (1987), o padrão de fluxo de um silo com fluxo de massa é razoavelmente fácil de ser obtido, enquanto que o fluxo de funil é mais difícil de ser predito, especialmente se o silo tem vários orifícios de descarga, se o carregamento possui excentricidade ou se o produto a ser armazenado é susceptível à segregação. Portanto, a menos que haja razão para o contrário, os silos devem projetados com formas geométricas simples e carregamento simétrico.

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 somente entre as medidas 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.

Sabe-se, ainda, que o processo de enchimento do silo, a distribuição das partículas, o padrão de tensão no silo que afeta o desenvolvimento de coesão, os parâmetros de rigidez e resistência do produto e as relações de altura e superfície das paredes do silo afetam consideravelmente o padrão de fluxo desenvolvido.

Para os dois tipos básicos de fluxo, CALIL JÚNIOR & CHEUNG (2007) listaram na Tabela 1 as principais vantagens e desvantagens de forma a permitir uma escolha coerente do sistema desejado de armazenamento e processo.

ROBERTS (1987) acrescenta que os limites do fluxo de massa e fluxo de funil depende do ângulo de atrito interno, do ângulo de inclinação da tremonha e do ângulo efetivo de atrito interno do produto a ser armazenado (Figura 10).

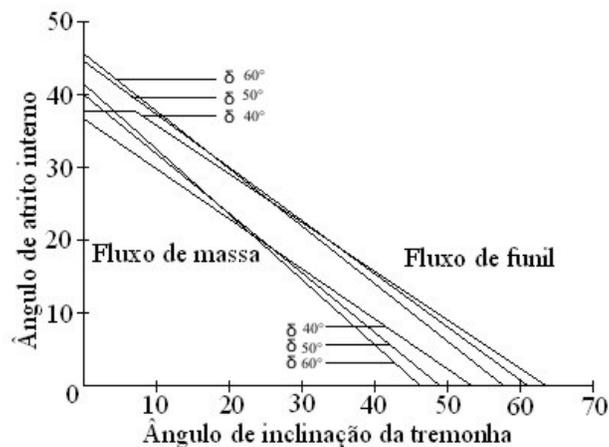


Figura 10 - Limites para o fluxo de massa e funil. Fonte: ROBERTS (1987)

Tabela1 - Principais vantagens e desvantagens dos fluxos de massa e funil (CALIL JÚNIOR & CHEUNG, 2007)

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
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
	As partículas devem resistir à queda de alturas maiores		Formação de tubos
	Maior capacidade de armazenagem, não possui regiões com produto estagnado		Picos de pressões na região da transição efetiva

2.4 - Problemas relacionados ao projeto de silos

ROTTER (2001) apresenta quatro problemas que regularmente aparecem no projeto e funcionamento dos silos:

- ✓ A integridade estrutural do silo pode ser comprometida pelas pressões as quais podem ser muito alta, muito baixa ou muito assimétrica;
- ✓ 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 indesejadas.

Todos os quatro problemas acima são inerentes à geometria do silo, às propriedades do produto armazenado, ao modo o qual o produto é depositado no silo, o tipo de fluxo desenvolvido durante a descarga, e outros fatores que afetam o estado das partículas armazenadas.

Freqüentemente, o comprometimento da integridade estrutural dos silos cilíndricos é associado ao surgimento de elevadas pressões, no entanto, estas não são necessariamente as principais causadoras de danos à estrutura dos silos devendo ser vistas em função de como a estrutura está preparada para suportar cargas.

Os principais problemas funcionais, segundo ROTTER (2001), são os fenômenos conhecidos como: arqueamento sobre o orifício de descarga da tremonha, efeito tubo e a descarga incompleta, sendo estes os mais observados e geralmente responsáveis por irregularidades no fluxo.

2.4.1 - Arqueamento

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

DRESCHER *et al.* (1995) afirmam que normalmente, este fenômeno está associado ao desenvolvimento de esforços de coesão nos sólidos, às geometrias dos silos e tremonhas e à dimensão do orifício de descarga. Já TEUNOU *et al.* (1999) referem-se também às propriedades físicas e de fluxo dos produtos sólidos e condições ambientais como pressão, temperatura e umidade como fatores que influem neste fenômeno.

O tempo de armazenagem é outro fator que pode afetar consideravelmente o tipo de fluxo e favorecer a formação de arcos coesivos. Quanto maior for o período do produto no interior do silo, maior será o nível de compactação de suas partículas uma vez que todas as camadas estarão submetidas à ação da gravidade.

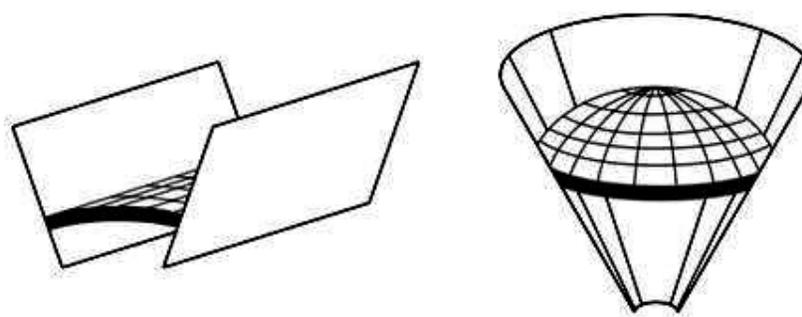
O efeito de arqueamento pode ser dividido em arcos mecânicos e coesivos. RAVENET (1983) cita que os arcos mecânicos são geralmente formados por partículas

grossas que, quando iniciado o fluxo, são impedidas de se movimentar no sentido axial e de rotação entre si, principalmente quando os espaços vazios entre essas partículas são preenchidas por partículas de tamanhos menores (Figura 11).



Figura 11 - Arco mecânico. Fonte: CALIL JÚNIOR & CHEUNG (2007)

No que se refere aos arcos coesivos, estes serão substancialmente formados por partículas finas que, sob ação de forças de coesão, se agrupam e adquirem resistência suficiente para prejudicar 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 de “ponte” em tremonhas na forma de cunha (Figura 12a) e de arcos conhecidos como abóboda ou domo em tremonhas de eixo simétrico (Figura 12b).



a) arco tipo “ponte”

b) arco abóboda ou domo

Figura 12 - 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, quando ocorre o desprendimento do produto que ficou estagnado durante a descarga do silo, há tendência a gerar o 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.

2.4.2 - 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 do silo (Figura 13).

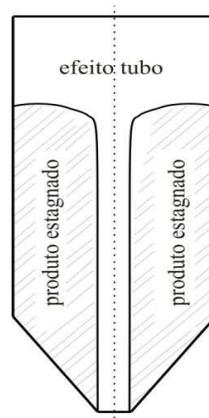


Figura 13 - Formação do efeito tubo. Fonte: CALIL JÚNIOR & CHEUNG (2007)

Semelhante ao que ocorre na formação de arcos, o efeito tubo pode ser extremamente danoso à estrutura do silo se o produto, a princípio na condição estagnada, começar a se mover no sentido axial. Dessa forma, as primeiras camadas movidas provocarão uma sucção do ar na parte superior do corpo do silo e uma abrupta expulsão 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.

ROTTER (2001) afirma que os processos de carregamento do silo e tipo de fluxo são largamente responsáveis pela segregação dos sólidos. As características do silo e do sólido armazenável também contribuem para o efeito de segregação e, conseqüentemente, para a formação de arcos ou efeito tubo.

2.4.3 - Descarga incompleta

Ocorre devido à permanência de parte da massa armazenada no interior do silo. Suas conseqüências, assim como no efeito tubo, vão desde a perda de capacidade efetiva de armazenagem o que resulta em perdas econômicas 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 (Figura 14).



Figura 14 - Silo com descarga incompleta. Fonte: CALIL JÚNIOR & CHEUNG (2007)

2.5 – “Slip - stick”

Alguns pós finos apresentam características de escorrega - para (“slip - stick”), isto é, um movimento brusco para-inicia, que aparece durante consolidações ou testes. O comportamento “slip - stick” aparece também em partículas de dimensões relativamente uniformes em superfícies rugosas. Nestes casos, a força cisalhante não se estabiliza após a ruptura BMHB (1985).

SCHWAB *et al.* (1991) observaram o comportamento “slip-stick” durante seus estudos de ações em cabos de temperaturas imersos em fluxo de grãos. MOLENDA *et al.* (1994) observaram o comportamento “slip-stick” durante seus estudos de efeitos de desgaste em ações nas paredes. Foi creditado a BOWDEN & LEBEN (1939) o primeiro uso do termo “slip- stick”. BOWDEN & TABOR (1950, 1964) forneceram a explicação de que o comportamento “slip-stick” ocorre por causa da fricção estática entre as

superfícies enquanto que o “stick” é maior que a fricção cinética durante o “slip”. O comportamento “slip-stick” também pode ocorrer se a força friccional entre as superfícies decresce enquanto a velocidade cresce.

A vibração no silo e o fenômeno relacionado conhecido como ruído de silo (ou som do silo) (TEJCHMAN, 1999; TEJCHMAN & GUDEHUS, 1993) são problemas significativos apresentados por alguns silos industriais. Durante o tremor de silo, o material no silo move-se em eventos transientes discretos que podem causar enormes cargas dinâmicas. A consequência de um tremor de silo pode variar de um pequeno incômodo, para uma total falha catastrófica.

Essencialmente, a vibração no silo é um fenômeno “slip-stick” que envolve ambas as propriedades do material friccional ou coesional, assim como os sistemas dinâmicos do silo/material. O comportamento da vibração pode ser encontrado em uma variedade de silos de várias geometrias e regimes de fluxo. Geralmente, a vibração ocorre predominantemente em dois tipos de silo: em silos altos com fluxo de massa, e silos baixos, com fluxo funil ou intermediário. No entanto, ambos os sistemas são dominados pelo slip-stick; os mecanismos atrás do tremor nestes dois casos separados são imensamente diferentes. Em silos altos, cada tremor consiste de duas largas ondas: uma onda de rarefação ou descarga que inicia o movimento do material e uma onda de compressão que trás o material de volta ao repouso. A onda de rarefação é formada pelo processo slip-stick em uma tremonha ou em uma baixa seção do silo, e é imaginado que ela viaja sem interrupções pela onda de compressão. (WENSRICH, 2003).

A literatura em vibração de silo origina-se de uma variedade de fontes incluindo: estudo de casos industriais (WENSRICH, 2003; ROBERTS, 1996), trabalhos experimentais (TEJCHMAN & GUDEHUS, 1993; ROBERTS, 1996; HARDOW *et al.*, 1998), tratamentos analíticos (ROBERTS & WENSRICH, 2002; WENSRICH, 2001) e estudos numéricos (TEJCHMAN, 1999; WENSRICH, 2001). Investigações experimentais de vibração em silos altos mostram a tendência da magnitude da vibração para ser fortemente dependente da altura do silo, e de fato há evidências significativas de que a vibração cresce exponencialmente com a altura (WENSRICH, 2002).

Os efeitos dinâmicos durante as descargas dos silos têm sido estudados extensamente e vários termos descritivos tais como a vibração do silo, oscilação dos silos, sons do silo ou batimentos do silo têm sido utilizados (TEJCHMAN & GUDEHUS, 1993; ROBERTS, 1993). Diversas fontes de agitação dinâmica nos silos

têm sido propostas (GUDEHUS & TEJCHMAN, 1992; ROBERTS, 1993; SCHULZE, 1998). Estes incluem o comportamento slip-stick entre os sólidos estocados e as paredes do silo, o comportamento slip-stick interno juntamente com sólidos estocados, alternando padrões de vazão durante o escoamento, colapso de arcos e dilatação sólida durante o escoamento.

MUITE *et al.* (2004), estudaram dois fenômenos distintos, o ruído e vibrações em silos em escala industrial e mostraram que silos podem vibrar e ter ruído, podem vibrar, mas não ter ruído ou podem ter ruído, mas não vibrar. O ruído do silo é um som de alta frequência, similar ao ruído de um trator muito alto, que emana intermitentemente do silo durante a descarga. O ruído do silo proporciona elevada poluição sonora, e pode causar problemas de integridade estrutural, problemas estruturais esses também ocorrem devido às vibrações no silo. O mecanismo de excitação não é totalmente entendido tanto para vibração como para o ruído; no entanto foi sugerido (ROBERTS, 1993; WENSRICH, 2002) que o movimento slip-stick de partículas contra as paredes do silo tem um importante papel nestes fenômenos dinâmicos.

2.6 - Propriedades de fluxo dos sólidos

No Brasil, o conceito de armazenagem resume-se a simples ação da permanência do produto na unidade armazenadora levando-se em consideração apenas variáveis como teor de umidade, volume da massa armazenada, temperatura interna, aeração e tempo de armazenagem. Pouca importância é reservada ao fato de que seu conceito torna-se mais abrangente no momento em que o produto a ser armazenado, diferentemente dos grãos, possui característica pulverulenta, como no caso de rações animais, cimentos, metais pulverizados, produtos químicos e farmacêuticos, leites, farinhas, floculados, etc. Nesse caso, as ações de carga, armazenagem propriamente dita e descarga passam a ser governadas pela inter-relação entre as propriedades físicas e de fluxo dos sólidos e entre as características geométricas das unidades armazenadoras. JULIANO *et al.* (2006) citam que as propriedades de fluxo são responsáveis por determinar o comportamento dos produtos armazenáveis em silos, tremonhas e transportadores. Assim, é possível maximizar operações como descargas, transilagem, dosagem e empacotamento (KNOWLTON *et al.*,1994) e evitar inseguranças no tipo de fluxo e surgimento de obstrutores de saída.

As características dos sólidos apresentam grande influência nas pressões exercidas nas paredes e fundo de um silo, assim como no tipo de fluxo que ocorre, entretanto, pouco se conhece sobre as reais propriedades influentes e seus valores.

Dentre os fatores que influenciam o fluxo de produtos sólidos em condição de armazenagem, destacam-se a dimensão das partículas, a temperatura, o teor de umidade do produto e o tempo de armazenamento (CALIL JÚNIOR, 1984).

Conforme CALIL JÚNIOR (1990), o fluxo de um sólido decresce com o aumento do teor de umidade, que alcança um valor máximo de aproximadamente 80 a 90% de saturação; acima deste teor de umidade, o sólido adquire propriedades viscosas, e testes de cisalhamento não podem ser aplicáveis.

A determinação das propriedades de fluxo é importante por afetar intrinsecamente o comportamento do sólido durante a armazenagem, movimentação e processamento (FITZPATRICK *et al.*, 2004).

Erroneamente, associa-se o comportamento dos sólidos nos silos aos de líquidos cujos mecanismos de fluxo diferem-se grandemente entre si. ROBERTS (1987) descreve que sólidos podem transferir esforços de cisalhamento quando em condição estática; que quando comprimidos, desenvolvem coesão conservando sua forma e que os esforços de cisalhamento são dependentes das pressões atuantes no sólido. Para líquidos, os esforços são dependentes da razão de cisalhamento e não das pressões.

A caracterização do produto a armazenar consiste em determinar suas propriedades físicas. É o primeiro passo para o projeto de fluxo do produto e cálculo estrutural dos silos, devendo ser realizado em condições mais severas daquelas que podem ocorrer no silo (FREITAS, 2001).

- Com o aparelho de Jenike, a determinação das propriedades de fluxo, de produtos coesivos ou não, e o desenvolvimento dos critérios de projeto dependem do conhecimento do lugar geométrico da tensão de cisalhamento versus a tensão normal para o produto deslizando sobre si mesmo e sobre a parede do silo. Por meio deste equipamento pode ser determinada a tensão sob as quais o produto estará sujeito durante o armazenamento e as condições de fluxo previstas para acontecer no silo (CALIL JÚNIOR, 1990). Desta forma, podem-se determinar os seguintes parâmetros: peso

específico consolidado (γ); ângulo de atrito interno (\emptyset); efetivo ângulo de atrito interno (δ); e ângulo de atrito do produto com a parede (\emptyset_w)

Peso específico consolidado (γ)

O peso específico de um produto é afetado pelo nível de tensão atuante no ponto considerado. Ele depende se o produto possui alto grau de compactação, pois se a dependência existir, provavelmente, teremos um peso específico em função do grau de compressibilidade do produto.

Conforme CALIL JÚNIOR (1990), não existe relação direta entre a razão peso e volume de uma amostra do produto com a predição do fluxo. Entretanto, essa variável precisa ser calculada, uma vez que é um parâmetro importante para determinação das pressões em silos; no entanto, sabe-se que produtos pulverulentos de baixo peso específico têm a vantagem de fluir com menor resistência à compactação na tremonha, mas tem a desvantagem da inércia em repouso e uma alta resistência ao ar. Um produto pulverulento de alto peso específico pode compactar para uma maior resistência na tremonha, mas terá uma baixa inércia em repouso. O produto granular não é tão compressível e então não desenvolve muita resistência no orifício de descarga do silo.

Ângulo de atrito interno (\emptyset) e efetivo ângulo de atrito interno (δ)

O lugar geométrico de deslizamento de produtos granulares de fluxo livre sobre si mesmo, para uma dada condição de consolidação, é a reta obtida pelo cisalhamento de uma amostra do produto sob várias cargas normais. Com as tensões principais σ_1 e σ_2 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 de lugar geométrico de deslizamento do produto (YL). O ângulo de inclinação dessa reta que, para produtos de fluxo livre passa pela origem, é então chamado de ângulo de atrito interno do produto (\emptyset) (FREITAS, 2001).

O produto não sendo de fluxo livre, a reta construída da forma indicada anteriormente não passa pela origem. Nesse caso, a ordenada na qual essa reta corta o eixo vertical (eixo das ordenadas) é denominada de 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 de lugar geométrico efetivo de deslizamento (EYL) e o respectivo ângulo de inclinação é denominado ângulo efetivo de atrito interno (δ).

Quando as tangentes às curvas do YL ao círculo de Mohr tendam a ser incertas, o ângulo efetivo de atrito interno é na prática sempre construído com uma linha entre a origem e o ponto final do lugar efetivo de deslizamento (EYL), como mostra a Figura 15 (NASCIMENTO & CALIL JÚNIOR, 1998).

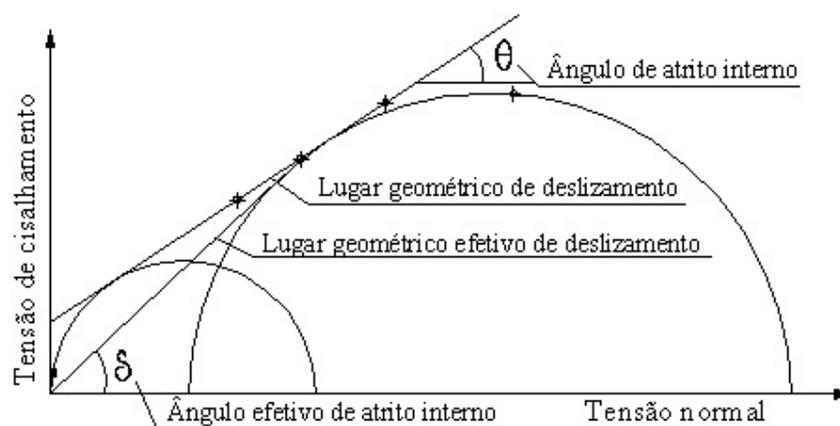


Figura 15 - Lugares geométricos e ângulos de atrito interno. Fonte: CALIL JÚNIOR (1990)

Ângulo de atrito 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 e a tensão normal à parede, chamada de lugar geométrico de deslizamento na parede (WYL).

BENINK (1989) afirma que 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

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 16. 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 um pouco curvado 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 (θ_w).

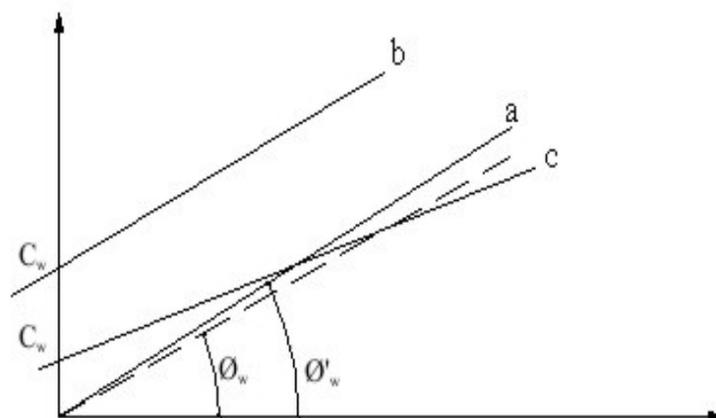


Figura 16 - Lugar geométrico de deslizamento do produto com a parede. Fonte: ROBERTS (1987).

Na Tabela 2 encontra-se a classificação de GAYLORD & GAYLORD (1984) da fluabilidade (escoabilidade) do produto pela análise do ângulo de repouso. Apesar de que a utilização do ângulo de repouso para a classificação do tipo de fluxo não é recomendada atualmente, este é apenas utilizado para o cálculo da formação do cone da cobertura superior formado pelo produto.

Tabela 2 - Fluxo dos produtos armazenáveis (GAYLORD & GAYLORD, 1984).

Ângulo de repouso (θ_r °)	Produto/Tipo de fluxo
25 a 30	Produto granular/Fluxo livre
30 a 38	Produto granular/Fluxo fácil
38 a 45	Produto pulverulento/Instabilidade no tipo de fluxo
45 a 55	Pós coesivos/Podem requerer equipamentos especiais
55 a 70	Pós muito coesivos/Requerem equipamentos especiais

2.7 - Orifício de descarga

2.7.1 - Dimensão mínima da boca de descarga

a) Silos com fluxo de massa

A dimensão mínima da boca de descarga é dada por:

$$b_{\min} = \frac{H(\theta)\sigma_{crit}}{\gamma} \quad (1)$$

onde:

b_{\min} – diâmetro do orifício de saída (m)

H – função do ângulo da tremonha

θ - ângulo da tremonha (°)

σ_{crit} – tensão crítica (Pa)

γ – peso específico (kg/m³)

Com o intuito de evitar instabilidades que alterem o tipo de fluxo, JENIKE (1964) recomenda que a dimensão mínima da boca de descarga dada pela Equação (1) seja majorada em 20%.

Com boa aproximação, JENIKE & JOHANSON (1995) sugerem a Equação 2, para o cálculo de bocas de descarga circulares, e a Equação 3, para o cálculo de bocas de descarga retangulares.

$$b_{\min} \geq \frac{2,2 \sigma_{crit}}{\gamma} \quad (2)$$

$$b_{\min} \geq \frac{1,3 \sigma_{crit}}{\gamma} \quad (3)$$

b) Silos com fluxo de funil

Para garantir que um fluxo satisfatório ocorrerá em um silo com fluxo de funil, é necessário que a dimensão da boca de descarga seja grande o suficiente para que não ocorram obstruções de fluxo em arco e tubo.

A dimensão mínima da boca de descarga é dada por:

$$b_{f \min} = \frac{G(\phi)\sigma_{crit}}{\gamma} \quad (4)$$

A função $G(\theta)$ é denominada fator de tubo e pode ser determinada pelo gráfico (Figura 17) proposto por JENIKE (1964). O valor desta função depende do ângulo de atrito interno (θ).

McLEAN apud CALIL JÚNIOR (1990) propõe a seguinte expressão empírica para $G(\theta)$.

(5)

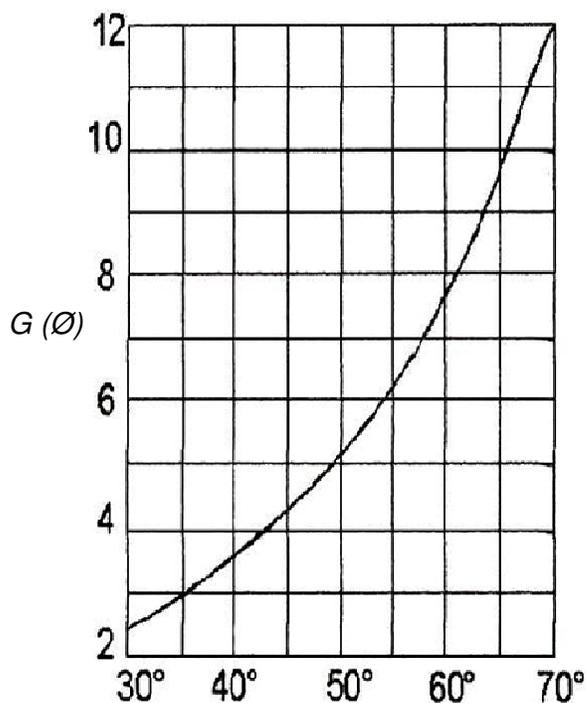


Figura 17 – Determinação da função $G(\theta)$. Fonte: JENIKE (1964)

2.8 - Rugosidade das paredes

A resistência ao deslizamento entre duas superfícies sólidas é causada pela rugosidade das superfícies. A teoria de fricção assume que o contato entre superfícies ocorrem apenas em poucos pontos isolados referidos como aspereza (BUCKLIN *et al.*, 1996). A fricção é causada pela adesão interfacial da aspereza, e pela energia dispendida em superfícies deformantes (BOWDEN & TABOR, 1964; WILLIAMS, 1994). TABOR (1981) afirmou que os elementos básicos envolvidos na fricção de sólidos não-lubrificadas são: a área verdadeira de contato entre as superfícies deslizantes; o tipo de

ligação que é formada na interface onde ocorre o contato; e o modo no qual o material ao redor da região de contato é cisalhado e rompido durante o deslizamento. IBRAHIM (1994) resumiu o entendimento de vibração induzida pela fricção. Este pesquisador afirmou que a natureza da vibração induzida pela fricção depende de vários parâmetros, incluindo a velocidade de deslizamento, tempo, temperatura, umidade, formato global da superfície de contato, textura da superfície, se o modo de deformação é elástico ou plástico, presença de partículas de desgaste, membrana de superfície e carregamento normal.

ROBERTS (1993) também comenta sobre o efeito da rugosidade em termos de quanto a parede rugosa afeta as medidas de atrito com a parede; ilustra também a possibilidade de “entrelaçamento” de partículas com a superfície rugosa quando o diâmetro médio das partículas é menor do que a escala de rugosidade. Onde tais “entrelaçamentos” ocorrem, as partículas que estão em contato com a parede ficam retidas de tal forma que há uma significativa diminuição do movimento das partículas. Isto leva a um acréscimo do atrito com a parede, ressaltando que o atrito entre as partículas é geralmente muito maior do que o atrito entre partículas e material da parede. Quando o valor da rugosidade é muito menor do que o diâmetro das partículas, o efeito desta pode ser insignificante.

SLOMINSKI *et al.* (2007) estudando o fluxo de sólidos em silo com paredes lisas e rugosas mostraram que a distribuição de deformações sobre superfícies, no fluxo de areia, não é uniforme devido a ocorrência de zonas dilatantes e a fricção na parede. A distribuição de deformações em silos de fluxo mássico é assimétrica e não-uniforme, para areia grossa e para paredes muito rugosas. Em um silo de fluxo funil, a distribuição de deformações é independente da rugosidade da parede. Em geral, o formato de zonas dilatantes é bastante irregular. Em um silo de fluxo mássico com areia grossa e paredes muito rugosas, as zonas dilatantes se tornam mais regulares.

A norma AS 3774 (1996) reuniu os valores característicos de diversos produtos armazenáveis de acordo com a rugosidade das paredes (Tabela 3), que devem ser utilizados para produzir as máximas cargas calculadas em silos, que constam na Tabela 4.

Tabela 3 - Designação da rugosidade da parede (AS 3774, 1996)

Tipo	Descrição da superfície	Rugosidade (μm)	Produtos típicos
1	Polido	0,01 a 1	Aço inoxidável polido, plástico de polietileno extrusado de alto peso específico, aço-carbono galvanizado, alumínio.
2	Liso	1 a 10	Aço inoxidável decapado, plástico de polietileno moldado no local de alto peso específico, aço carbono pintado, aço carbono com leve ferrugem de superfície, azulejos cerâmicos lisos, concreto liso.
3	Rugoso	10 a 1000	Concreto aparente áspero, aço-carbono corroído, azulejos cerâmicos grosseiros.
4	Corrugado	> 1000	Paredes com corrugação horizontal, chapas com nervuras horizontais, paredes não-padronizadas com grandes saliências.

Tabela 4. Valores característicos das propriedades de fluxo de produtos sólido (AS 3774, 1996)

Produto	γ (kN/m ³)		Θ_r (°)	δ (°)		Θ_w (°)						Fator K
						Rugosidade						
			Tipo 1		Tipo 2		Tipo 3					
	Mínimo	Superior	Mínimo	Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior	
Alumina	10,0	12,0	27	25	40	20	25	25	30	30	35	1,2
Cimento	13,0	16,0	28	40	50	20	25	23	28	28	33	1,2
Clínquer	15,0	18,0	33	42	52	20	25	25	30	30	35	1,2
Carvão negro	8,5	11,0	35	40	60	15	25	25	35	25	40	1,4
Carvão marrom	7,0	9,0	33	45	65	18	25	25	35	35	45	1,4
Carvão em pó	6,0	9,0	38	40	50	20	24	24	28	27	32	1,2
Agreg. 0 a 28mm	17,0	19,0	34	30	40	15	25	18	30	25	35	1,3
Farinha de trigo	6,5	7,5	40	23	30	15	23	25	28	25	35	1,4
Cinza volante	8,0	11,5	11,5	30	35	18	25	25	35	30	40	1,2
Min. de ferro, pellet	19,0	22,0	35	35	45	20	25	26	33	28	35	1,3
Cal hidratada	6,0	8,0	40	35	45	18	25	25	33	30	40	1,2
Pedra calcária (pó)	11,0	13,0	30	40	60	15	25	23	30	28	40	1,3
Milho	7,0	8,5	30	28	33	15	25	20	30	25	32	1,6
Rocha fosfática	16,0	19,0	27	35	55	19	25	22	30	25	32	1,3
Areia grossa seca	14,0	17,0	30	30	40	15	25	22	28	25	35	1,3
Areia fina	15,0	17,0	30	35	40	15	22	15	22	20	26	1,4
Esc. de alto-forno	10,5	12,0	40	35	38	16	22	20	25	24	28	1,4
Soja	7,0	8,0	23	25	32	10	15	12	18	14	20	1,4
Açúcar	8,0	10,0	29	33	38	15	25	20	35	25	40	1,2
Trigo	7,5	9,0	20	26	32	15	25	18	30	25	32	1,4

γ = peso específico consolidado; Θ_r = ângulo de repouso; δ = ângulo efetivo de atrito interno; Θ_w = ângulo de atrito do produto com a parede; e K = relação entre pressão vertical e horizontal. Para rugosidade do Tipo 4, consultar Apêndice B da norma AS 3774 (1996).

2.9 – Forma e tamanho das partículas

Materiais granulares são geralmente não coesivos e de fluxo livre, o que ocorre de forma distinta para os pós.

CALIL JÚNIOR (1984) classifica os produtos em função do diâmetro médio das partículas conforme Tabela 5.

Tabela 5 - Classificação dos produtos em função do diâmetro das partículas.

Diâmetro das partículas (mm)	Classificação
$d > 0,42$ mm	Granulares
$0,42$ mm $< d < 0,149$ mm	Pulverulentos coesivos
$0,149$ mm $< d < 0,079$	Pulverulentos coesivo finos
$d < 0,079$ mm	Pulverulentos coesivos extrafinos

Fonte: CALIL JÚNIOR (1984)

A descarga em silos equipados com tremonha tem sido modelada usando Elementos Discretos (DEM) para uma ampla seleção de formato de partículas, a fim de verificar o efeito que o formato tem sobre o fluxo (CLEARY, 1999). A inclusão do formato da partícula permite usar modelos DEM para repetir vários recursos do fluxo real na tremonha que não são possíveis quando se usa partículas circulares. Partículas alongadas podem produzir uma vazão de até 30% menor do que as que se obtêm com partículas circulares, e os padrões de fluxo são completamente diferentes. O rendimento da microestrutura da partícula assemelha-se mais com um rompimento de um sólido contínuo, com larga escala de vazios quase-estável sendo formado, e grandes grupos de partículas movendo-se juntos. O fluxo se torna cada vez mais concentrado em um relativamente estreito funil acima da abertura da tremonha.

Dois aspectos essenciais que têm sido negligenciados em modelos DEM são: o efeito do formato da partícula e a coesão inter-partículas. Ambos contribuem significativamente na força de cisalhamento para a montagem granular e determina onde o material irá falhar e quando o fluxo irá permanecer estacionário. O aumento da relação de aspecto das partículas tem um grande efeito sobre a vazão. As mudanças comportamentais são similares para partículas elípticas e para partículas retangulares. Mudando-se de partículas circulares para

elípticas com uma relação de aspecto de 5:1 conduz-se não apenas para 29% de redução na vazão, mas também mudanças substanciais na estrutura do fluxo de partículas. Essas partículas não se comportam como partículas independentes de fluxo livre. O formato das partículas é extremamente importante no fluxo em tremonhas. Esta extensão de DEM para usar partículas não circulares representa um entre outros passos importantes que são requeridos antes do DEM poder prever confiavelmente todo o fenômeno que ocorre em tremonhas.

2.10 – Modelos empíricos de vazão mássica em silos

O fluxo gravitacional de sólidos granulares é recomendado para silos, no processamento de produtos sólidos. Este movimento descendente de um conjunto de partículas sob influência da gravidade depende das propriedades físicas e de fluxo do sólido, forma de carregamento e descarregamento, e rugosidade das paredes do silo.

O fluxo gravitacional de sólidos granulares é provavelmente o, mais encontrado em atividades de operação e estocagem. Ele corresponde a um movimento descendente de um conjunto de partículas sob influência da gravidade. O movimento de produtos para dentro e para fora de um silo de armazenamento é sempre uma preocupação do operador de alimentação do moinho. Alguns fatores importantes que afetam o fluxo de sólidos em um silo de estocagem incluem condições ambientais, propriedades dos produtos, configuração do silo de estocagem e o tempo de repouso.

WANG *et al.* (1995) estudaram as características do fluxo gravitacional do farelo de soja. Eles mostraram que as propriedades do material (teor de umidade, eo tamanho das partículas) e as configurações do silo (ângulo da tremonha e tamanho do orifício) têm efeitos significativos na vazão do farelo de soja. Amostras com um baixo teor de umidade têm uma alta vazão. Amostras com tamanhos de partículas não-uniformes têm uma vazão maior que aquelas partículas de tamanhos relativamente uniformes. Diversos modelos de fluxo foram testados para predizerem o fluxo gravitacional de produtos em pó através da tremonha. Um novo modelo de fluxo foi desenvolvido com base na análise dimensional para estimar o fluxo gravitacional do farelo de soja e os resultados obtidos com esse modelo estão de acordo com os dados experimentais.

O desenvolvimento de um modelo matemático para a descrição do processo do fluxo granular começou no início do século XX. NEDDERMAN *et al.* (1982) mostraram uma revisão extensa de vazão de descarga a partir de tremonhas.

A análise dimensional proposta por BEVERLOO *et al.* (1961) sugere que a vazão mássica (W) é proporcional a $\rho_B g^{1/2} d^{5/2}$, onde ρ_B e g são a densidade volumétrica e aceleração devido a gravidade, respectivamente.

BEVERLOO *et al.* (1961) correlacionaram os seus resultados na seguinte fórmula:

$$W = C \rho_B \sqrt{g} (d - j d_p)^{2,5} \quad (6)$$

onde:

W – vazão mássica

ρ_B – massa específica do produto

C e j são constantes;

d_p – diâmetro da partícula;

d – diâmetro de saída.

g – aceleração da gravidade

A partir do gráfico de d em função de $W^{2/5}$, BEVERLOO *et al.* (1961) obtiveram o valor médio de j igual 1,4 para sementes de: nabo, espinafre e couve. Para as sementes de linhaça valor igual a 1,5. Sementes de agrião apresentaram valor igual a 1,3, e para a areia o valor foi igual a 2,9.

FOWLER & GLASTONBURY (1959) propuseram o seguinte modelo (Equação 7) para predizer a vazão mássica:

$$W = CA \rho_B \sqrt{2g d_h} \left(\frac{d_h}{d_p} \right)^{0,185} \quad (7)$$

onde:

A - a área do orifício

d_h - diâmetro hidráulico médio do orifício.

CHANG *et al.* (1984) e CHANG & CONVERSE (1988) mediram a vazão do milho, trigo e sorgo através de um orifício horizontal circular e quadrado. As relações entre a vazão

volumétrica do milho, trigo e sorgo, e o orifício de saída foram apresentados de acordo com a Equação 8:

$$Q = C_1 C_2 d \quad (8)$$

onde :

Q - vazão volumétrico

d - tamanho do orifício (diâmetro ou comprimento do lado quadrado)

C_1 e C_2 - coeficientes

CHANG & CONVERSE (1988) encontraram que a vazão do sorgo aumentou com o aumento do teor de umidade dentro da faixa testada (11 a 18% base úmida), mas a vazão de descarga do trigo não foi significativamente afetada dentro da faixa de 12 a 15%, base úmida. O efeito do teor de umidade do milho, dentro da faixa de 13 a 23% base úmida foi pequeno para orifícios menores que 20 cm. Para orifícios maiores que 20 cm, a vazão aumentou junto com a diminuição na umidade.

WANG *et al.* (1995) utilizaram o método Ralveight (JANNA, 1987) para derivar o modelo empírico (Equação 9) que considera a vazão mássica como uma função da densidade da partícula (ρ_T), densidade volumétrica (ρ_B), diâmetro do silo (D), tamanho do orifício de saída (d), ângulo da tremonha (α), ângulo de repouso (\emptyset_r), e aceleração devido à gravidade (g), ou seja:

$$W = W(\rho_T, \rho_B, D, d, \alpha, \emptyset_r, g) \quad (9)$$

A partir dos dados experimentais WANG *et al.* (1995) propuseram a Equação 10:

$$W = C \rho_B d^{2,5} g^{0,5} \left(\frac{d}{D}\right)^{a_3} \left(\frac{\emptyset_r}{\alpha}\right)^{a_5} \quad (10)$$

SIELAMOWICZ (2007) analisou o processo de descarga de grãos de milheto, tendo como base os dados experimentais. Relacionou a vazão de descarga com a altura do material armazenado, o teor de umidade dos grãos, o ângulo da tremonha, o comprimento da tremonha e orifício de saída, concluindo que: o comprimento da tremonha e orifício de saída tem uma forte influência na vazão de descarga; que a umidade dos grãos tem influência duas vezes menor, e que a altura do material armazenado e o ângulo da tremonha tiveram menor influência.

2.11 - Relação H/D (altura/diâmetro)

Dentre os diversos parâmetros de classificação dos silos, é aceito pela grande maioria das normas existentes sua diferenciação conforme geometria espacial, sendo observada a relação entre a altura efetiva do produto armazenado (H) e o maior diâmetro (D) inscrito em uma circunferência do silo. Entretanto, notam-se grandes variações em seus valores conforme Tabela 6.

Tabela 6- Classificação geométrica dos silos de acordo com a relação H/D (GOMES, 2000).

Norma	Classificação		
	Baixo	Intermediário	Alto
Australiana AS3774 (1990)	$H/D < 1$	$1 \leq H/D \leq 3$	$H/D > 3$
Eurocode (1995)	$H/D < 1,5$	-	$H/D \geq 1,5$
ISO (1997)			
Americana ACI (1991)*	$H/D \leq 2$	-	$H/D > 2$
ANSI/ASAE EP433*(2000)	-	-	----
Alemã DIN 1055 (1987)*	$H/D < 2,5\mu$	$2,5\mu \leq H/D \leq 5\mu$	$H/D > 5\mu$
Inglesa BMHB (1985)	$H/D \leq 1,5$	-	$H/D > 1,5$
Canadense CFBC (1983)	$H/D \leq 0,75$	-	$H/D > 0,75$
Francesa SNABTI (1975)	$H/D < 2,5$	-	$H/D \geq 2,5$

*Não possui esta classificação. No cálculo teórico das pressões há diferenciação quando o silo tem a relação geométrica indicada.

CALIL JÚNIOR & CHEUNG (2007) subdividiram os silos verticais, esbeltos e baixos, em função da relação das dimensões altura e diâmetro resultando em uma classificação da forma:

a) Silos verticais

- Silos esbeltos: aqueles que possuem uma relação entre a altura e o diâmetro $\left(\frac{H_p}{D_p}\right) \geq 1,5$;
- Silos baixos: aqueles que possuem uma relação entre a altura e o diâmetro $\left(\frac{H_p}{D_p}\right) < 1,5$.

b) Silos horizontais: aqueles cuja dimensão longitudinal é preponderante sobre as outras dimensões.

NASCIMENTO (2007) estudou as pressões horizontais em silo com cinco diferentes relações (H/D), para o trigo da variedade “soft red”, e observou durante os testes, que a partir da relação altura/diâmetro igual a 1,2, logo após o início da descarga ocorre fluxo de massa e quando a superfície de grãos aproximar-se desta relação muda para fluxo de funil. Esta mudança de direção dos grãos provoca um pique de pressão em torno do ponto. Esta ocorrência de fluxo de massa e de funil em silos de fundo plano durante a descarga é denominada por alguns autores e normas como fluxo misto.

Descarga de grãos em silos de fundo plano com H/D entre 1,5 e 2,0 geralmente ocorrerá fluxo misto próximo ao fundo do silo onde terá o ponto de transição entre os grãos estáticos e os que estão com fluxo de massa, o qual forma um cone invertido que é estendido do orifício de descarga até a parede do silo (MOLENDAS, 1997).

BUCKLIN *et al.* (1989) observaram o descarregamento em quatro modelos de silos, para milho e trigo. O descarregamento dos grãos se deu de forma que os locais de altura e saída foram variados. Eles concluíram que para H/D menor que 1,25, o trigo e o milho apresentaram sempre descarga em fluxo de funil. Para valores de H/D maior que 1,25, e menor que 2,5 o trigo apresenta descarga em fluxo misto. Para valores de H/D entre 2,5 e 3,5,

o trigo apresenta descarga em fluxo misto dependendo do local de saída. A partir H/D de 3,5 sempre há descarga em fluxo misto. Para valores de H/D entre 1,25 e 3,5, o milho apresenta descarga em fluxo de funil, ou fluxo misto dependendo do local de saída.

3 - MATERIAL E MÉTODOS

3.1 - Local dos ensaios

Os experimentos foram realizados no Laboratório de Construções Rurais e Ambiente (LACRA) do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), campus de Campina Grande – PB, Brasil.

3.2 - Produtos utilizados

Foram utilizados os seguintes produtos nessa pesquisa: painço (Figura 18), adquirido no comércio local, areia fina (Figura 19) de origem do rio Paraíba, e farelo de milho, denominados neste estudo por M1, M2 e M3, devido às diferentes granulometrias que apresentam (Figuras 20 a 22), fornecido pela ASA Indústria e Comércio Ltda., com sede em Campina Grande - PB.



Figura 18 - Amostra do painço



Figura 19 - Amostra da areia



Figura 20 – Farelo de milho (amostra M1)



Figura 21 - Farelo de milho (amostra M2)



Figura 22 - Farelo de milho (amostra M3)

3.3 – Silo em modelo reduzido

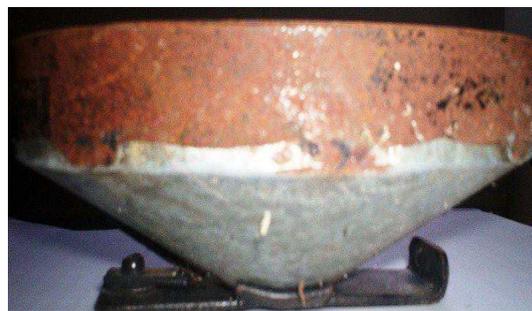
Utilizou-se um modelo reduzido de um silo cilíndrico em acrílico, Figura 23, para melhor visualização dos fenômenos que ocorrem com o material durante o carregamento e a descarga. O silo tem paredes de espessura 0,0015 m, altura de 1 m e diâmetro interno de 0,145 m. Em sua base foram conectadas tremonhas (seção cônica confeccionada em aço zincado), com um orifício de descarga de 3,5cm e 5 cm e com ângulos de inclinações de 30° e 45°, com relação a horizontal, (Figura 24), e colocado fundo plano com os mesmos orifícios de saída, concêntricos e excêntricos (Figura 25). Conforme pode ser observado na Figura 23, o silo, com parede de acrílico é sustentado por uma estrutura de aço, a qual esta sobre a balança digital que registrava uma variação de massa, durante a carga e descarga dos produtos, estando a mesma conectada ao sistema de aquisição de dados, permitindo obter assim a variação da massa de sólido no interior do silo ao longo do tempo.



Figura 23 - Silo utilizado



a)



b)

Figura 24 – Tremonhas de a) 45° e b) 30°



Figura 25 – Fundos planos concêntrico e excêntrico

O carregamento do silo foi feito por meio de um silo alimentador, com orifício de saída de 5 cm. O ângulo de 45° usado para a inclinação das tremonhas foi adotado por propiciar fluxo sem interrupção para produtos granulares. A tremonha com inclinação de 30° foi usada com a intenção de diminuir o tempo de descarga, e dessa forma observar melhor o comportamento do fluxo durante o descarregamento. O orifício mínimo de descarga foi calculado conforme a Equação (5), proposta para boca de descarga circular de silos com fluxo de funil.

3.4 - Rugosidade das paredes

A rugosidade das paredes do silo foram alteradas, desde que a parede de acrílico, denominada de ϵ_1 , com valor de rugosidade igual a 0,06 μm ; para as paredes revestidas com uma superfície rugosa (lixa) fabricada pela 3M: lixa 400, denominada ϵ_2 , com valor de rugosidade igual a 6,56 μm e a lixa 220, denominada ϵ_3 , com valor de rugosidade de 11,95 μm . Na Figura 26 tem-se uma imagem do silo com as paredes revestidas com as lixas.

Os testes de rugosidade foram realizados pelo Núcleo de Metrologia do SENAI – CIMATEC com sede em Piatã, Salvador – BA. O aparelho utilizado para a determinação dos valores de rugosidade foi o rugosímetro modelo SJ 201P com faixa de leitura de até 500 microns.



Figura 26 - Silo revestido com a lixa

3.5 – Sistema de aquisição de dados

Foi construída uma balança com capacidade de 100 kg, especificamente para a pesquisa (Figura 27). A mesma foi calibrada antes dos experimentos e foi conectada ao sistema de aquisição de dados, Modelo Spider8 600Hz de fabricação da HBM (Hottinger Baldwin Messtechnik).



Figura 27 – Balança utilizada

A célula de carga (Figura 28) usada foi do tipo viga dupla em balanço com capacidade de carga de 100 kg, voltagem de excitação de 3 mV/V. Esta célula foi conectada ao sistema de aquisição de dados SPIDER 8 com uma frequência de medição de 1 Hz.



Figura 28. Célula de carga utilizada

3.6 – Obtenção dos dados

O silo foi inicialmente colocado sobre a balança, para em seguida ligar o sistema de aquisição de dados. O silo foi carregado concentricamente; após um período de espera de 10 min, para permitir acomodação da massa ensilada, efetuou-se o descarregamento. Os ensaios de carregamento e descarregamento do silo foram repetidamente executados. A frequência de aquisição foi de 2 Hz.

Estes procedimentos foram realizados seguidamente para o carregamento excêntrico e para o carregamento concêntrico com velocidade reduzida em 7,4 vezes para o produto painço, 1,7 vezes para a areia, 2,7 vezes para o farelo de milho M1, 2,4 vezes para o farelo de milho M2 e 2,5 vezes para o farelo de milho M3. Essa redução de velocidade deu-se na medida em que o orifício de descarga do silo alimentador foi reduzido em 50%, ou seja, com diâmetro de 2,5cm.

Os orifícios de saída foram de 3,5 e 5cm para as tremonhas com inclinação de 45° e para os fundos planos, sendo que para estes últimos utilizou-se também, saídas excêntricas, a 50% de excentricidade, para ambos os orifícios. Para a tremonha de 30° utilizou-se apenas a saída de 3,5 cm. Todos os ensaios foram realizados com quatro repetições.

Após esta etapa, os mesmos procedimentos foram realizados para as rugosidades ϵ_2 e ϵ_3 , ou seja, para as paredes revestidas com as lixas utilizadas.

3.7 - Propriedades de fluxo

A metodologia adotada para a determinação das propriedades de fluxo foi a recomendada pela BRITISH MATERIALS HANDLING BOARD (1985) combinada com a de MILANI (1993). Utilizou-se a máquina de cisalhamento direto por translação modelo TSG 70-140. Com o aparelho de cisalhamento de Jenike pode-se construir gráficos de tensão normal versus cisalhamento (Figura 29) que possibilita traçar semi-círculos de tensões de Mohr responsáveis por determinar a Tensão principal de consolidação (σ_M) e a Tensão não confinada de deslizamento (σ_C).

A partir dos resultados obtidos com os ensaios utilizou-se o programa gráfico AutoCAD, para traçar os gráficos de tensão normal versus tensão de cisalhamento (semicírculo de Mohr) e com este determinou-se as seguintes propriedades de fluxo:

γ - peso específico em função da consolidação;

\emptyset – ângulo de atrito interno;

δ – efetivo ângulo de atrito interno;

\emptyset_w – ângulo de atrito do produto com a parede;

Ainda com o auxílio da Figura 29, foi possível determinar o ângulo efetivo de atrito interno (δ) e a Coesão (C) dos produtos utilizados para os diferentes níveis de carga adotados.

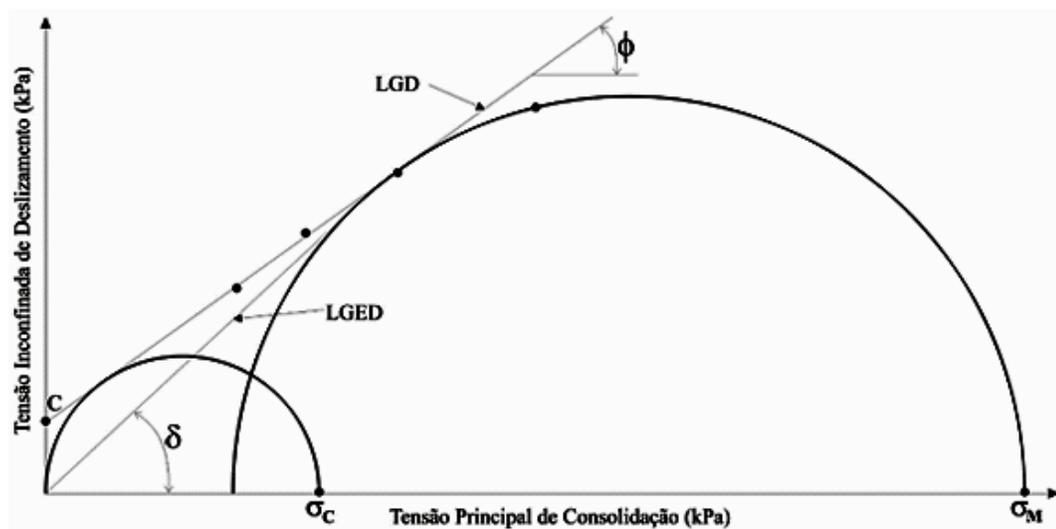


Figura 29 - Lugares geométricos e ângulos de atrito interno.

Para a determinação das propriedades de fluxo de produtos armazenados, é importante que se conheça os lugares geométricos de deslizamento obtidos pela relação entre a tensão de cisalhamento (τ) e a tensão normal (σ) para o sólido armazenado predizendo, desta forma, como será seu deslizamento frente a si próprio e ao material da parede do silo. A determinação do lugar geométrico de deslizamento (YL) e do lugar geométrico de deslizamento da parede (WYL) auxilia, também, na determinação da forma da tremonha e nas dimensões da boca de descarga.

Para o conhecimento destas informações, faz-se necessário a realização de testes em laboratório usando testes de cisalhamento direto. Em testes instantâneos, o sólido é conduzido a uma condição de deformação estável sobre uma pressão normal pré-definida em um plano de cisalhamento em dois estágios de ação. O primeiro estágio conhecido como rotador (twist), o sólido é rotado em uma célula de cisalhamento sob pressão, com o objetivo de preparar uma amostra uniforme. No segundo estágio, conhecido como “*pré-shear*”, uma camada do sólido através da área total do sólido é forçada a deformar sob pressão e tensão cisalhante até que uma força de cisalhamento estável seja alcançada. A resistência do sólido ao cisalhamento é medida, também, para determinar sua capacidade de formar obstruções para o fluxo, como arcos, abóbadas e condutos (tubo).

No Apêndice encontram-se as etapas para a obtenção do ângulo de atrito e efetivo ângulo de atrito interno para o painço.

3.8 - Determinação das propriedades físicas dos produtos

3.8.1 - Teor de umidade

A determinação da umidade foi efetuada em triplicata, utilizando-se 10 g do produto para cada repetição. As amostras foram colocadas em recipientes de alumínio, em seguida foram pesadas em balança com precisão de 0,001 g para se obter a massa total do produto e levado a estufa com circulação forçada de ar a temperatura de $105 \pm 3^\circ \text{C}$, com uma tolerância por 24 h. Em seguida, os recipientes foram resfriados em dessecador, novamente pesados obtendo-se a massa seca. A umidade foi calculada usando-se a Equação 11:

$$U = \frac{m_{\text{água}}}{m_T} 100 \quad (11)$$

onde: U – umidade (% base úmida);

$m_{\text{água}}$ – massa de água da amostra (g);

m_T – massa total da amostra (g).

3.8.2 - Granulometria

Para a determinação granulométrica, utilizou-se um conjunto de peneiras padrão ABNT / ASTM as quais foram montadas em ordem decrescente, em função da malha, e agitadas em um vibrador elétrico por um período de 15 minutos. Após esse processo, as peneiras foram retiradas e pesadas em balança eletrônica de precisão de 0,01g. Pela diferença de massa em cada peneira, determinaram-se as frações granulométricas dos produtos.

Os diâmetros médios das partículas foram determinados, pelo diâmetro médio de Sauter, Equação (13), o qual descreve a razão do volume pela superfície média para toda distribuição.

$$\frac{\sum_{i=1}^n x_i d_{pi}^3}{\sum_{i=1}^n x_i d_{pi}^2} \quad (12)$$

onde: d_{pm} é o diâmetro médio de Sauter; x_i é a fração mássica retida e d_{pi} é o diâmetro médio para cada partícula, que foi tomado igual ao diâmetro de abertura das peneiras utilizadas.

3.8.3 - Ângulo de repouso (θ_r)

O ângulo de repouso (θ_r) foi determinado através da queda livre de uma determinada porção do produto em uma superfície rugosa. Com sua queda, um volume foi formado. Dessa forma, mediu-se o ângulo que as paredes deste volume formavam com o plano horizontal (Figura 30).

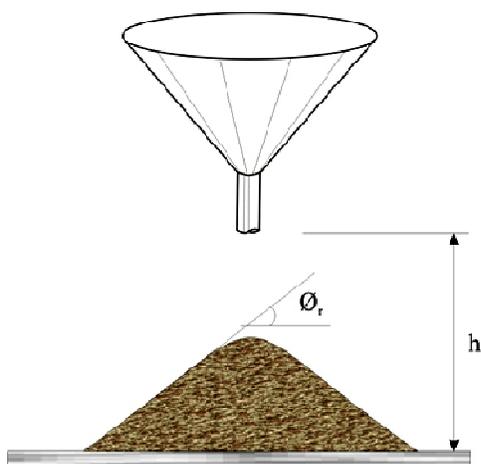


Figura 30. Representação do ângulo de repouso

3.8.4 - Porosidade, massa específica real e aparente

A porosidade da massa do produto foi determinada, em triplicata, utilizando-se um picnômetro de comparação a ar, segundo o processo descrito por MOHSEIN (1986).

O picnômetro de comparação à ar (Figura 31) é constituído de dois cilindros semelhantes, medindo 200 mm de altura por 103 mm de diâmetro interno e 114 mm de diâmetro externo. Em um dos cilindros, foi incorporado um manômetro, de 1 kg/cm² com precisão de 0,1 kg/cm² e uma válvula de admissão de ar. Entre os dois cilindros existe um

duto de comunicação de ar que pode ser feito por meio da abertura da válvula de conexão que está colocada na metade do duto de comunicação de 5 mm de diâmetro.

O compressor é acionado por meio de uma mangueira plástica que está acoplada a uma válvula de admissão de ar, onde o ar é injetado no interior do cilindro, sem produto, até a pressão desejada. Para determinação da porosidade, preenche-se o outro cilindro, com produto e retira-se o excesso com uma régua. Depois, recoloca-se o cilindro no seu local de origem com a válvula fechada. No cilindro vazio, injeta-se ar por meio do compressor até uma determinada pressão (P_1) inferior a capacidade do manômetro.

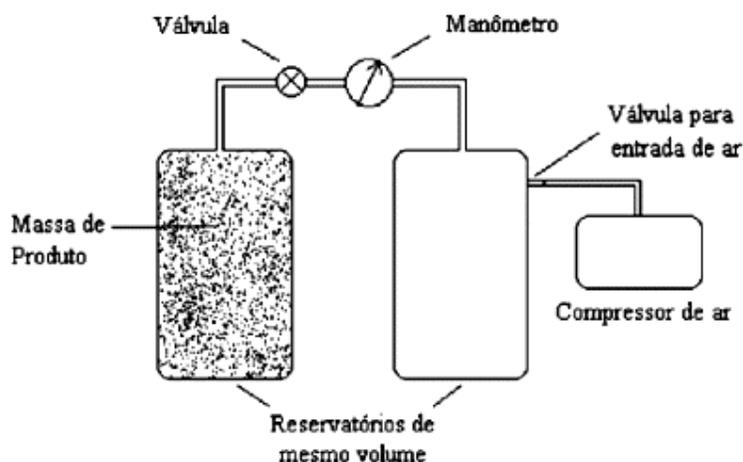


Figura 31 – Desenho esquemático do picnômetro. Fonte: CORRÊA *et al.*(2005)

Posteriormente abre-se a válvula, e o ar passa para o cilindro que contem o produto, sendo esperados três minutos, para que o sistema entre em equilíbrio, e anota-se o valor da pressão registrado pelo manômetro (P_2). Usa-se a Equação 13 para a determinação da porosidade.

$$P = \frac{P_1 - P_2}{P_2} 100 \quad (13)$$

A massa específica aparente (ρ_{ap}) foi mensurada através de uma balança de peso hectolitro, com capacidade de um litro, com três repetições para cada tratamento. Colocou-se uma quantidade de produto em um recipiente de volume conhecido. Após pesar o material, e fazendo a relação da massa registrada pelo volume, obteve-se a massa específica aparente.

Obteve-se a massa específica real (ρ) em função da porosidade (P) e da massa específica aparente (ρ_{ap}) de acordo com a equação descrita por MOHSENIN (1986):

$$\rho = \frac{\rho_{ap}}{(1-P)} \quad (14)$$

3.9 – Modelo empírico para descarga no silo

O método Ralyleight (JANNA, 1987) foi utilizado para derivar o modelo de fluxo dimensionalmente, onde foi considerado que a vazão é uma função da densidade da partícula (ρ), densidade do produto mais o ar (ρ_B), diâmetro do silo (D), diâmetro do orifício de saída (d), ângulo da tremonha (α), ângulo de repouso (\emptyset_r), aceleração devido à gravidade (g), e a rugosidade da parede (ε). Deste modo, a vazão mássica média pode ser relacionada:

$$W = W(\rho, \rho_{ap}, D, d, \alpha, \emptyset_r, g, \varepsilon) \quad (15)$$

Em seguida foi assumido que a dependência funcional pode ser escrita como um produto separando as variáveis com a Equação 16:

$$W_{med} = \frac{1}{t} \int_0^t W dt = \bar{W} = C \rho^{a_1} \rho_{ap}^{a_2} D^{a_3} d^{a_4} \alpha^{a_5} \emptyset_r^{a_6} g^{a_7} \varepsilon^{a_8} \quad (16)$$

onde os expoentes a_i e a constante C são desconhecidos. Aplicando a análise dimensional do teorema do π ou Buckingham é possível escrever a Equação 16 como segue:

$$\frac{\bar{W}}{\rho_{ap} d^{2.5} g^{0.5}} = C \left(\frac{\rho}{\rho_{ap}} \right)^{a_1} \left(\frac{D}{d} \right)^{a_3} \left(\frac{\alpha}{\emptyset_r} \right)^{a_5} \left(\frac{\varepsilon}{d} \right)^{a_8} \quad (17)$$

As constantes C_1 , a_1 , a_3 , a_5 e a_8 foram determinadas com o auxílio do software STATISTICA 5, resultando na seguinte relação semi-empírica:

$$W = C \rho_{ap} d^{2.5} g^{0.5} \left(\frac{\rho}{\rho_{ap}} \right)^{a_1} \left(\frac{D}{d} \right)^{a_3} \left(\frac{\alpha}{\emptyset_r} \right)^{a_5} \left(\frac{\varepsilon}{d} \right)^{a_8} \quad (18)$$

4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 - Propriedades físicas dos produtos

Na Tabela 7 são apresentadas as propriedades físicas dos produtos estudados (areia, painço e farelo de milho), que foram utilizadas no modelo matemático proposto e na análise de fluxo.

Tabela 7 – Valores médios das propriedades físicas dos produtos avaliados.

PRODUTO	$\rho_{ap}(\text{kg/m}^3)$	\emptyset_r (°)	$d_p(\text{mm})$	γ (kN/m ³)
Areia	1390	29,4	0,45	16,80
Painço	730	16,3	1,6	7,80
M1	590	32,6	0,76	6,90
M2	690	30	1,42	7,40
M3	716	29,3	1,87	7,60

De acordo com a Tabela 2 onde encontra-se a classificação de GAYLORD & GAYLORD (1984) da fluabilidade (escoabilidade) do produto pela análise do ângulo de repouso (\emptyset_r), o que indica que os produtos areia, painço e o farelo de milho (M3) apresentam um fluxo do tipo livre, e para o farelo de milho (M1) o fluxo é do tipo fácil. Pode-se observar que para o farelo de milho (M2) a uma tendência aos dois tipos de fluxo, livre e fácil. Apesar de que a utilização do ângulo de repouso para a classificação do tipo de fluxo não é recomendada atualmente, este é apenas um parâmetro utilizado para o cálculo da formação do cone da cobertura superior formado pelo produto.

Para classificação dos produtos estudados utilizou-se a proposta de CALIL JÚNIOR (1984) que classifica os produtos em função do diâmetro médio das partículas (d_p) conforme Tabela 5. Desta forma, todos os produtos utilizados são considerados produtos granulares sem característica coesiva.

De acordo com a Tabela 4 onde encontram-se a classificação da AS 3774 (1996) para o peso específico (γ) dos produtos, pode-se observar que os valores encontrados para os produtos utilizados encontram-se dentro dos limites inferior e superior adotados por esta norma, exceção feita ao produto painço. PALMA (2005) encontrou o valor de $6,2 \text{ KN/m}^3$ para o painço.

No descarregamento do farelo de milho M1, e utilizados o fundo plano e a tremonha de 30° , com abertura de saída de 3,5 cm, há formação de arco coesivo sobre o orifício de descarga, sendo necessária uma agitação para romper o mesmo, e assim iniciar o descarregamento. Esse comportamento não foi observado para a descarga excêntrica, 50% de excentricidade no fundo plano, e com tremonha de 45° , com essa mesma abertura de saída.

A fluabilidade de sólidos, com granulometria variada, é governada pelas propriedades de fluxo das partículas finas, porque durante a descarga inicialmente há cisalhamento inicial destas partículas. As partículas grossas afetam a tendência de obstrução do orifício de descarga, devido à interlocação das mesmas, e o impacto destas no interior do silo pode causar compactação do produto ao longo da profundidade do sólido.

Produtos com compressibilidade relativamente baixa, tais como pós fluidizados e pós granulares podem formar arcos coesivos ou momentâneos sobre o orifício de descarga durante o descarregamento. Somente uma quantidade pequena de energia, ou seja, uma pequena agitação é requerida para causar a quebra do arco e iniciar a descarga. Esse fenômeno foi denominado de “*hanging up*” por GAYLORD & GAYLORD (1984).

4.2 - Propriedades de fluxo

Os valores da areia e do M3 podem ser comparados aos valores encontrados na Tabela 4, referenciados na norma AS 3774 (1996), para a areia fina e o milho; verifica-se que os valores encontrados nesse estudo estão aproximados aos encontrados na norma.

O estudo do comportamento do fluxo de um sólido é essencial para identificar problemas durante a descarga, como por exemplo: descarga incompleta, efeito tubo e formação de arco coesivo. Como também é de fundamental importância para subsidiar o projeto estrutural e o tipo de fluxo em silos. Torna-se então necessário caracterizar as

propriedades de fluxo para se evitar problema de interrupção durante o descarregamento dos sólidos.

Na Tabela 8 encontram-se os valores das propriedades de fluxo dos produtos analisados. Observou-se que o maior ângulo de atrito interno (\emptyset) é apresentado pelo produto areia, em consequência do menor diâmetro médio da partícula (d_p). Sabe-se que quanto menor a dimensão das partículas, maior será a sua superfície específica, o que resulta em maior área de contato entre as partículas do produto; outro fator está relacionado à alta massa específica da areia. Apesar do farelo de milho M3 apresentar maior diâmetro médio da partícula (d_p) em comparação aos demais produtos estudados, esta análise não se aplica, pois para esse produto outras variáveis devem ser levadas em consideração, tais como forma, área e rugosidade superficial das partículas.

Tabela 8 - Propriedades de fluxo dos produtos estudados

Produtos	$\emptyset_{\text{inferior}}(^{\circ})$	$\emptyset_{\text{superior}}(^{\circ})$	$\delta_{\text{inferior}}(^{\circ})$	$\delta_{\text{superior}}(^{\circ})$
Areia	38,8	39,2	42,2	42,7
Painço	24,3	24,69	24,9	25,45
M1	23,0	28,5	31,5	34,2
M2	32,4	33,9	36,3	37,6
M3	29,3	33,6	29,9	36,6

Para o produto painço PALMA (2005) encontrou valores de ângulo de atrito interno $\emptyset_{\text{inferior}}$ de 24° , e $\emptyset_{\text{superior}}$ de 25° , o que está de acordo com os resultados desta pesquisa. O que ocorreu de forma semelhante para o efetivo ângulo de atrito interno (δ), onde os valores encontrados por PALMA (2005) foram de 23° e 25° , limite inferior e superior, respectivamente.

4.3 - Vazão mássica

4.3.1 – Efeito da rugosidade das paredes

Na Figura 32 verifica-se a vazão mássica instantânea ao longo do tempo para o produto areia, para as diferentes rugosidades na tremonha com fundo plano, diâmetro de saída de 3,5 cm e excentricidade de 50% na saída.

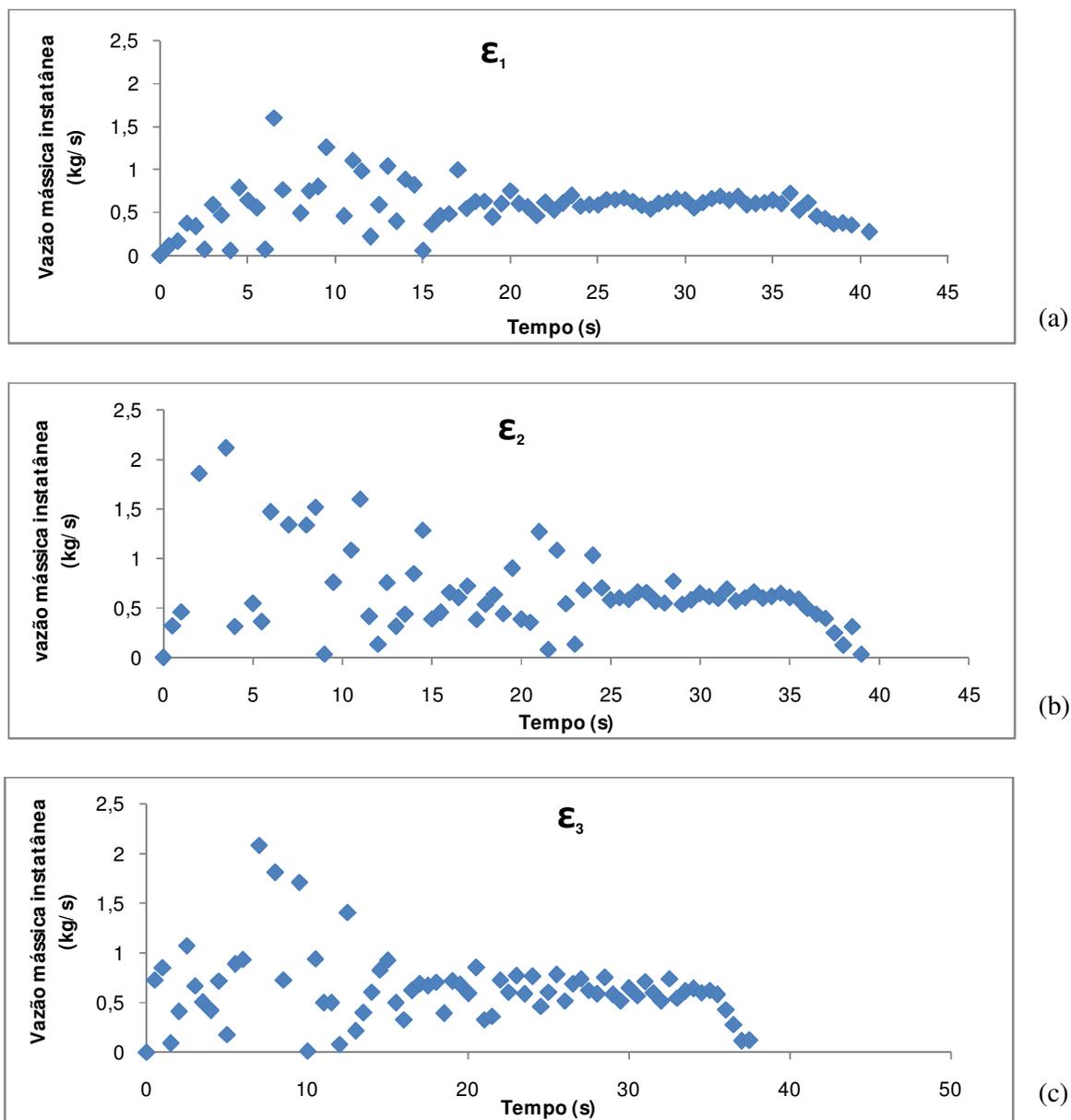


Figura 32 - Vazão mássica instantânea em função do tempo para o produto areia, considerando as rugosidades das paredes (ϵ), (a) $0,06\mu\text{m}$, (b) $6,56\mu\text{m}$, e (c) $11,95\mu\text{m}$.

Observa-se da Figura 32 (a), (b) e (c) que o comportamento da vazão de descarga é bastante semelhante independente da rugosidade usada nas paredes do silo. Nota-se,

entretanto que para a parede lisa, rugosidade ε_1 , ocorreu menor variação da vazão até do que para as outras rugosidades. No que refere-se ao tempo de descarga observa-se que, este manteve-se praticamente o mesmo para todas as rugosidades. Este fato pode ser explicado pela relação entre a dimensão da partícula e ao valor da rugosidade da parede, corroborando com o estudo de BRADLEY *et al.* (2000) que afirma, que quando o diâmetro das partículas for muito superior à rugosidade da parede, o efeito desta pode ser desconsiderado. O produto areia com menor diâmetro de partícula, 0,45 mm, e o maior valor de rugosidade da parede utilizado nessa pesquisa foi de 11,95 μm , lixa 220, ou seja, a razão entre o menor diâmetro de partícula e o maior valor de rugosidade da parede foi bastante elevada, o que justifica os resultados obtidos.

Verifica-se na Tabela 9 que a variação entre as vazões não chegaram a valores acima de 10%, para a grande maioria das situações estudadas, o que pode ser perfeitamente atribuído, esta diferença, aos erros experimentais ocorridos durante os ensaios, o que estaria dentro do aceitável. Observou-se que a saída excêntrica de 5 cm, apresentou a maior disparidade entre as vazões para as diferentes rugosidades, no que se refere aos produtos com maiores vazões: areia, painço e M1. Outro dado relevante é a identificação de que as maiores vazões ocorreram para as paredes rugosas, este fato pode ser explicado pela redução do diâmetro interno do silo, quando foi revestido com as lixas. Neste caso foi considerada a espessura da lixa e da fita adesiva utilizada para fixar a lixa no silo, além do espaçamento entre a lixa e a parede do silo. Estes pontos que não foram considerados podem ter proporcionado uma maior velocidade de descarregamento. Este fato aliado ao tamanho das partículas em relação às rugosidades utilizadas podem ter ocasionado esta variação nas vazões. Constatou-se que as maiores vazões correspondem as paredes rugosas em relação a parede lisa (parede de acrílico).

Os valores da vazão (kg/s) para as rugosidades das paredes, e variação destas vazões entre as rugosidades das paredes são apresentados, no Apêndice, na Tabela 12.

Tabela 9 - Variação das vazões mássicas médias entre as rugosidades das paredes (%)

Produto	Descarga	Diâmetro de Saída (d)	Ângulo da tremonha	Variação das vazões entre as rugosidades (%)		
				$\varepsilon_1/\varepsilon_2$	$\varepsilon_1/\varepsilon_3$	$\varepsilon_2/\varepsilon_3$
Areia	Concêntrico	3,5	45°	3,1	1,8	1,4
			30°	1,0	3,2	4,1
			0°	2,1	5,0	7,1
		5,0	45°	4,2	2,5	1,7
			0°	6,7	0,0	6,7
			0°	1,4	6,5	5,1
Excêntrico	3,5	0°	10,3	3,0	7,6	
	5,0	0°				
Painço	Concêntrico	3,5	45°	0,3	6,5	6,8
			30°	2,4	4,3	1,9
			0°	1,8	5,3	3,5
		5,0	45°	1,0	10,9	10,1
			0°	1,4	4,7	3,4
			0°	5,2	1,0	4,2
Excêntrico	3,5	0°	15,7	12,5	3,7	
	5,0	0°				
M1	Concêntrico	3,5	45°	3,9	3,1	0,9
			30°	4,5	3,4	1,1
			0°	4,3	1,7	6,0
		5,0	45°	6,1	9,8	4,0
			0°	0,8	1,0	0,2
			0°	0,0	4,0	4,0
Excêntrico	3,5	0°	12,4	20,0	8,8	
	5,0	0°				
M 2	Concêntrico	3,5	45°	2,9	1,3	1,7
			30°	1,8	0,0	1,8
			0°	6,1	1,2	5,0
		5,0	45°	0,0	4,0	4,0
			0°	3,5	6,1	2,7
			0°	4,4	12,7	8,8
Excêntrico	3,5	0°	6,2	7,7	1,6	
	5,0	0°				
M 3	Concêntrico	3,5	45°	0,0	3,8	3,8
			30°	2,4	5,3	3,0
			0°	4,0	3,2	0,8
		5,0	45°	6,0	5,0	1,0
			0°	5,8	4,1	1,7
			0°	1,6	7,0	5,4
Excêntrico	3,5	0°	6,7	1,8	8,4	
	5,0	0°				

4.3.2 – Efeito da inclinação da tremonha

Nota-se da Figura 33 que as menores vazões, ocorreram para a tremonha com inclinação de 30°. Deve-se observar que no descarregamento com inclinação de 0°, ou seja, fundo plano, parte do produto ficou retido no fundo do silo, ou seja, não houve descarregado total da massa ensilada, o que ocorreu de forma diferenciada quando a inclinação de saída foi de 30 ou 45°, onde todo o produto foi descarregado. Então pode-se afirmar que se todo o produto fosse descarregado totalmente, o tempo de descarga seria superior para os ensaios com fundo plano, pois deve-se fazer a subtração do volume do produto que fica estagnado no fundo do silo, do volume total do mesmo.

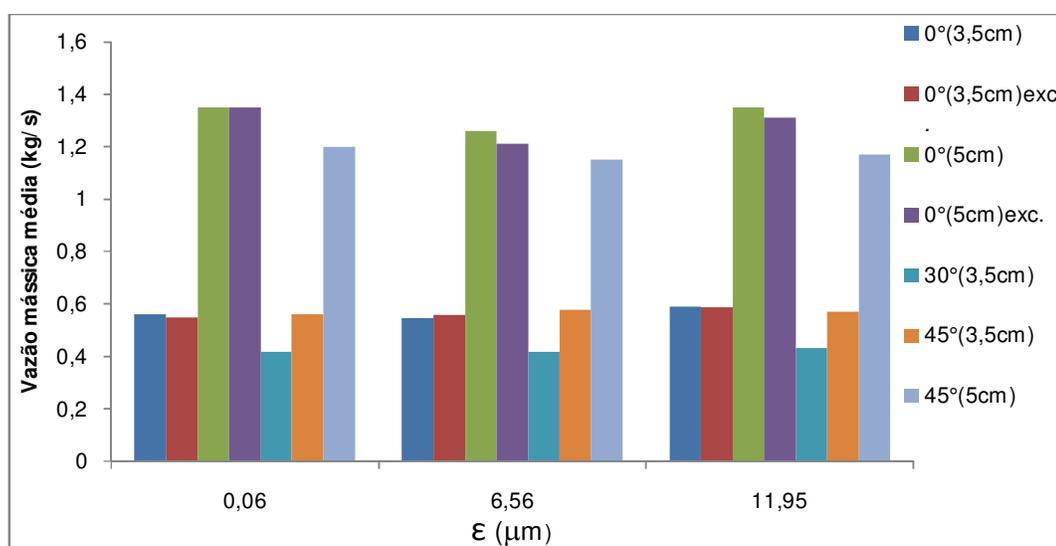


Figura 33 - Vazão mássica média para o produto areia para as diferentes formas de descarregamento em função da rugosidade da parede.

Da Figura 34 observa-se que a vazão mássica durante o descarregamento apresentou uma tendência a manter-se constante, e com valores próximos, entre as diferentes inclinações de saída. Sendo perceptível o maior tempo de descarga para a inclinação de saída de 30°, fato este explicado anteriormente, devido ao produto não ser totalmente descarregado quando a inclinação de saída foi de 0°.

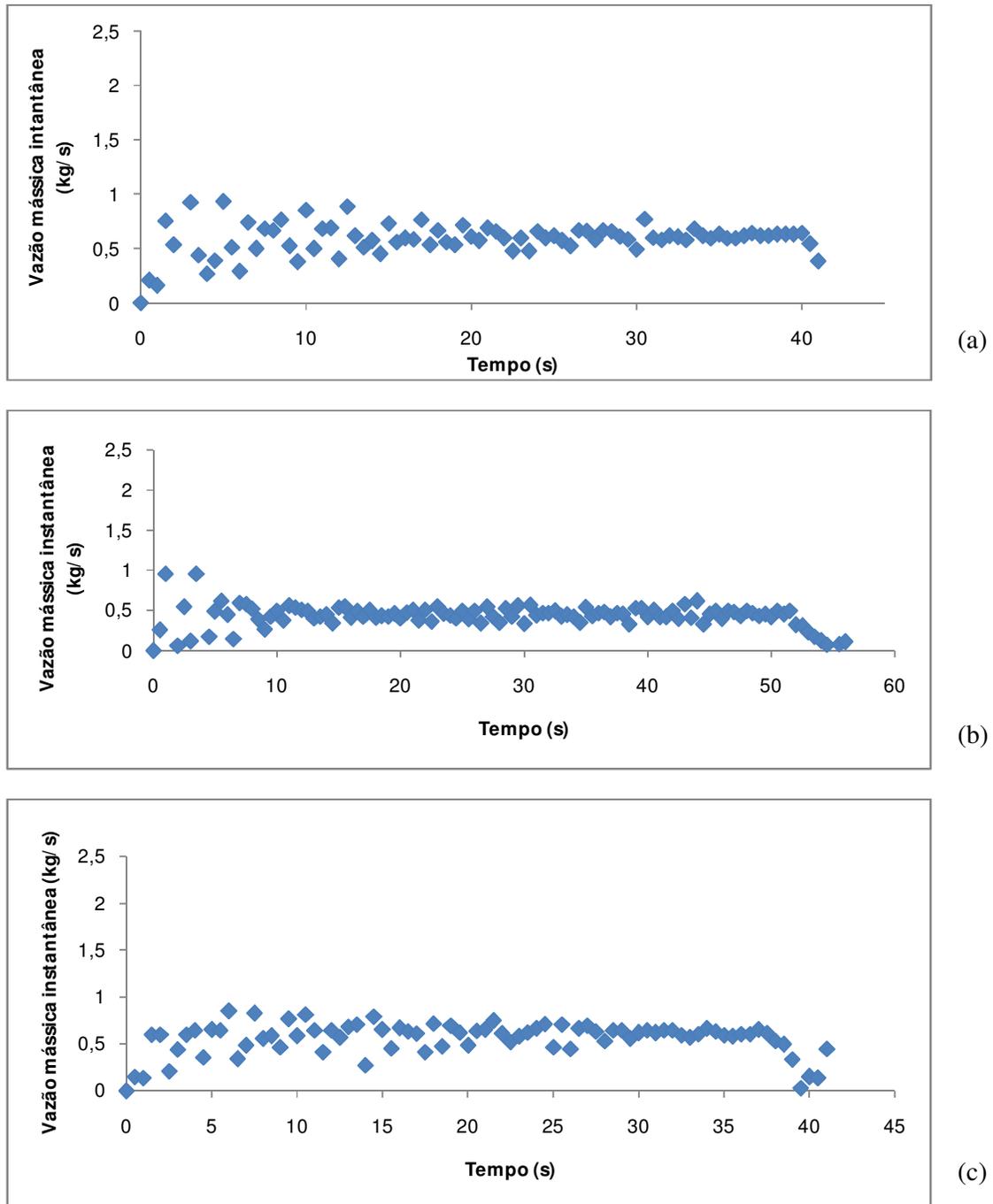


Figura 34 - Vazão mássica instantânea em função do tempo para o produto areia, considerando as diferentes inclinações da tremonha (α), (a) 45° , (b) 30° , e (c) 0° .

4.3.3 – Efeito da excentricidade de descarregamento

Na Figura 35 apresenta as vazões do produto painço para as saídas concêntricas e excêntricas de 3,5 e 5 cm. CALIL JÚNIOR & CHEUNG (2007) afirmam que saídas de descarga excêntricas, em silos com fluxo misto e em tubo geram assimetrias na distribuição das pressões normais no silo, o que pode acarretar problemas tanto na estrutura como na descarga do mesmo. Contudo, observou-se nesta pesquisa que não foram registradas diferenças significativas nas vazões para as situações de excentricidade de descarregamento estudadas. Isso pode ser decorrente do fato de que os produtos apresentaram fluxo livre (GAYLORD & GAYLORD, 1984), ou seja, alta capacidade de entrar em movimento logo após a abertura dos orifícios de descarga, o que diminuiria as pressões no interior do silo.

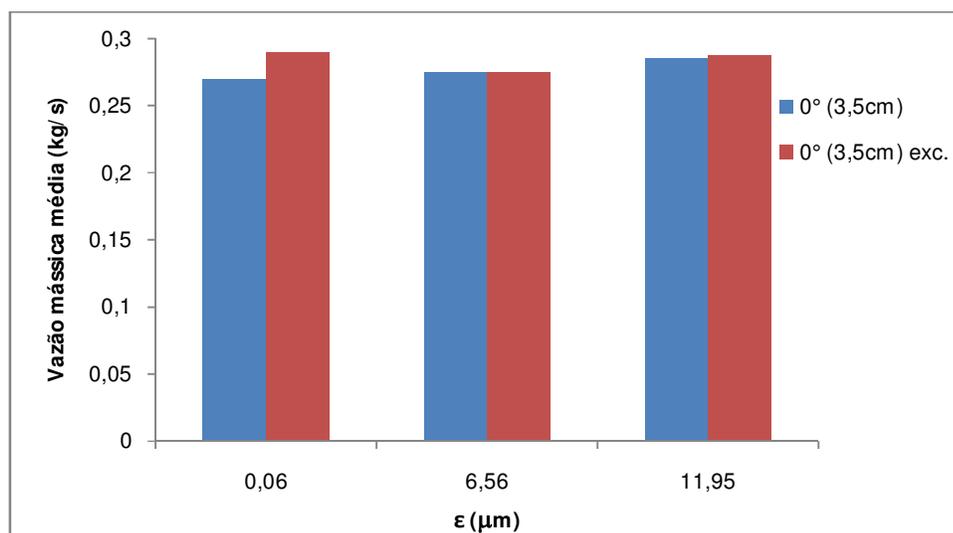
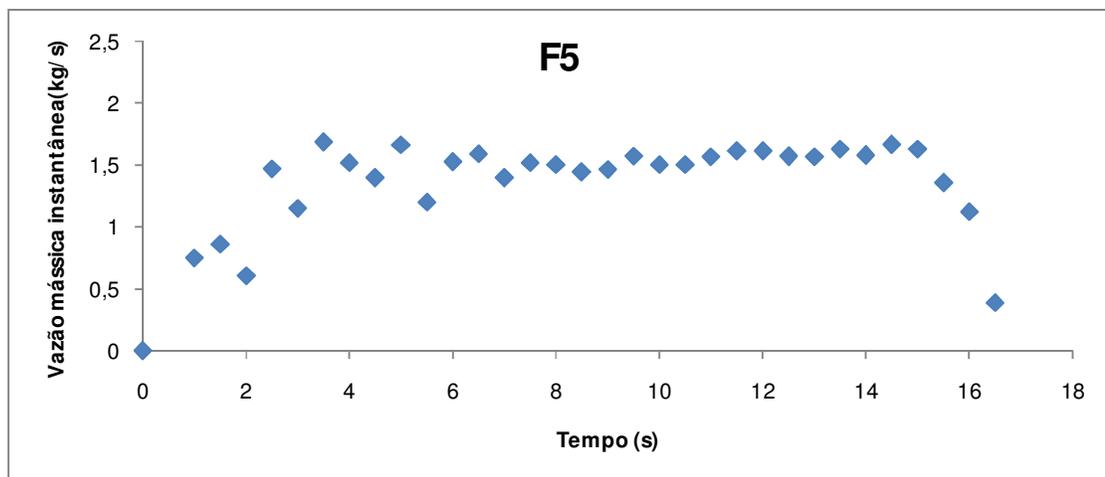
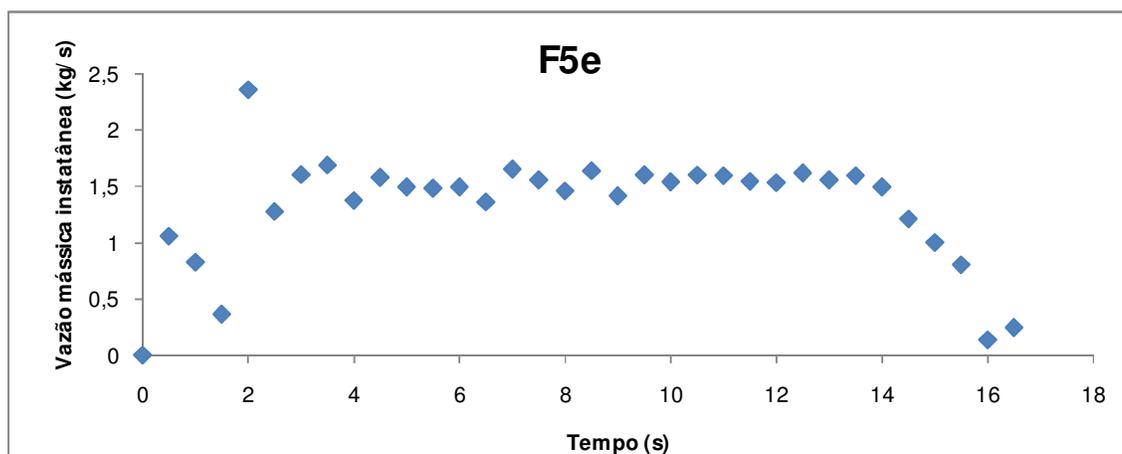


Figura 35 - Vazão mássica média do produto painço para descarregamentos concêntrico e excêntrico

Na Figura 36 nota-se que o comportamento pontual da vazão mássica mantém o comportamento equivalente para as duas formas de descarregamento, concêntrico e excêntrico, o que corrobora com o fato de que para essa pesquisa, a excentricidade de descarregamento não interferiu na vazão mássica ao longo do tempo.



(a)



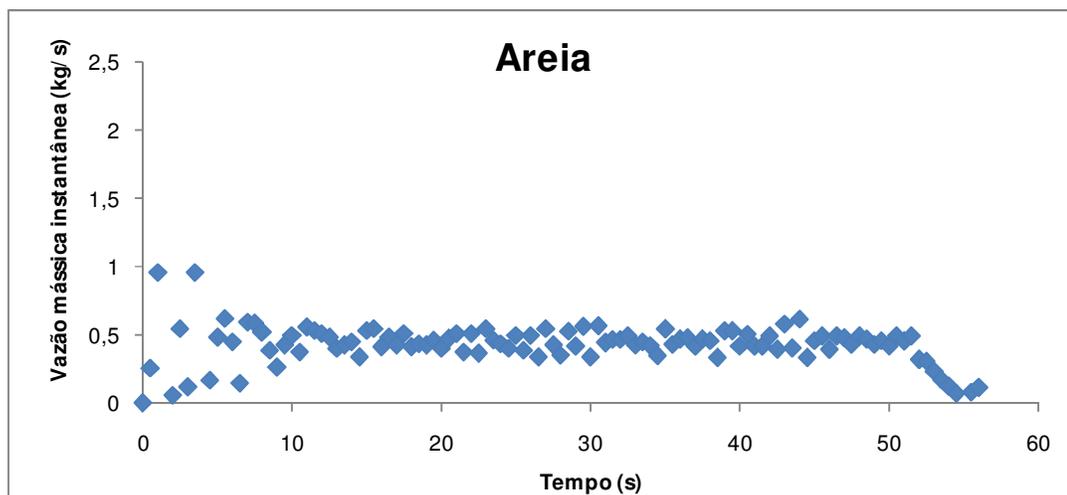
(b)

Figura 36 - Vazão mássica instantânea em função do tempo para o produto areia, considerando as diferentes excentricidades de saída, (a) saída concêntrica, com d igual a 5cm, e (b) saída excêntrica, com d igual a 5cm.

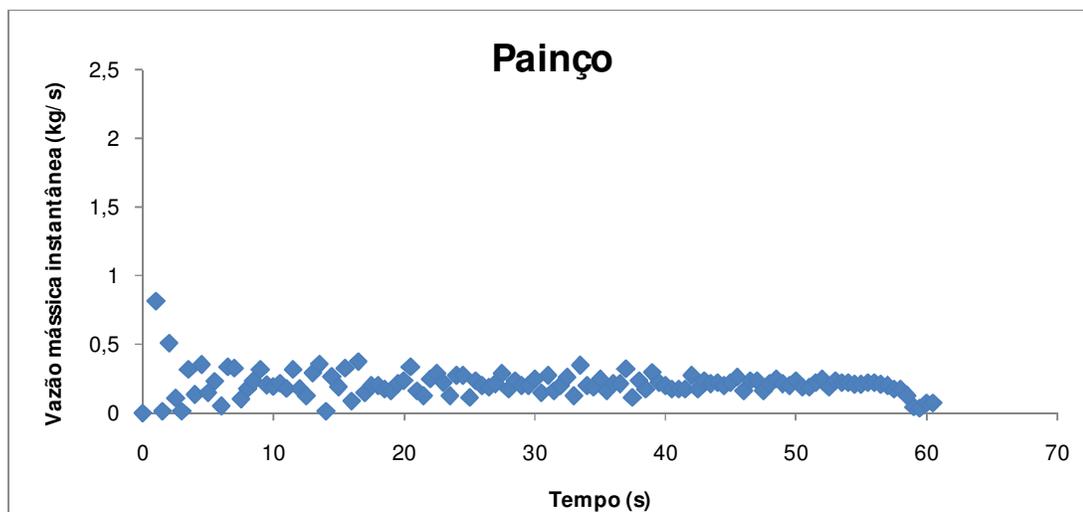
4.3.4 – Efeito do tamanho e forma das partículas

Observa-se na Figura 37 que os produtos que apresentaram partículas de formas mais regulares, ou seja, mais esféricas, ou com mais uniformidade entre estas, tiveram um comportamento uniforme da vazão mássica durante a descarga. Os produtos, areia e painço e, não apresentaram grandes oscilações na vazão durante todo o tempo de descarregamento. O

farelo de milho M1, como um produto que apresentou uma variação maior na forma e no tamanho das partículas, notou-se uma variação mais evidente do que para o painço e a areia. As maiores variações na vazão durante a descarga foram detectadas para os farelos de milho M2 e M3, produtos estes que apresentaram maior desuniformidade entre as partículas, sendo estes produtos os que maiores tempos de descarregamento apresentaram.



(a)



(b)

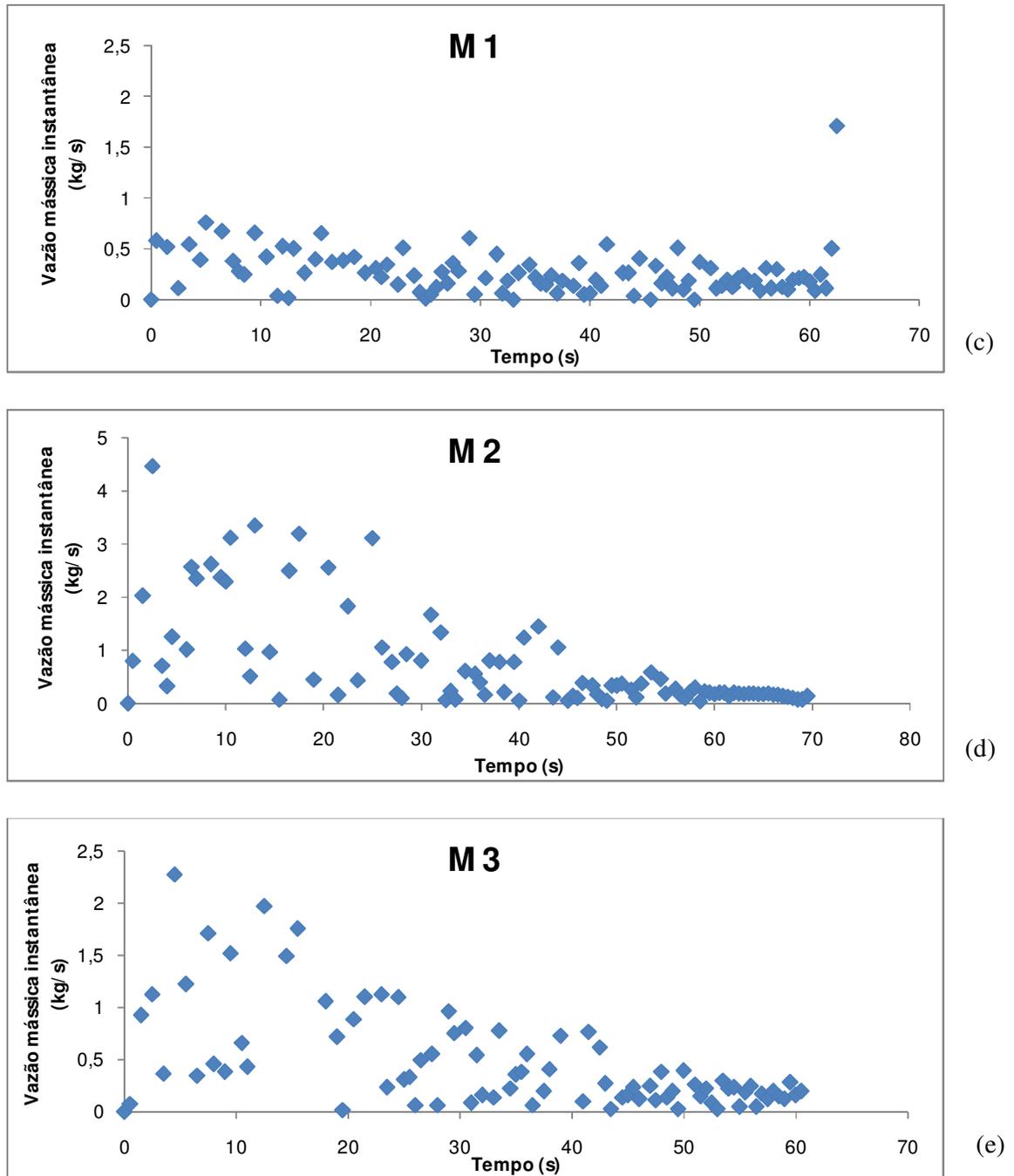


Figura 37 - Vazão mássica instantânea em função do tempo para os produtos (a) areia, (b) painço, (c) farelo de milho M1, (d) farelo de milho M2, (e) farelo de milho M3.

4.3.5 – Efeito da velocidade de carregamento

Os resultados da descarga do produto areia são mostrados na Figura 38 ilustra que a velocidade de carregamento não influenciou na vazão de descarga. Observou-se também que essa variação entre as vazões, sob estas condições de carregamento, e tomando por base os resultados apresentados na figura, com exceção da saída excêntrica e diâmetro de 5 cm, não atingiu 10%.

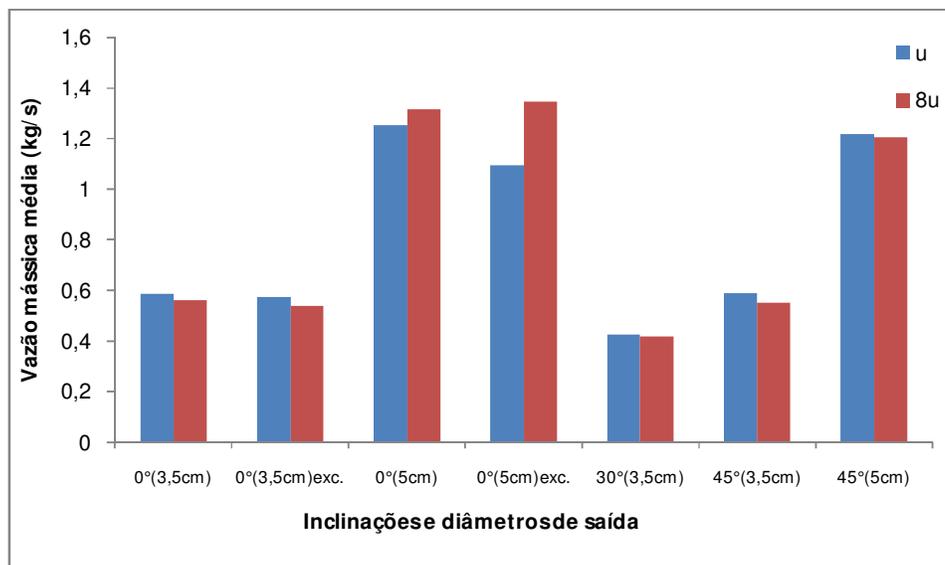


Figura 38 – Vazão mássica média de descarga, para a areia, em função do diâmetro de saída e ângulo da tremonha para diferentes velocidades de carregamento.

4.3.6 – Efeito da excentricidade de carregamento

A Figura 39 mostra que a excentricidade de carregamento não influenciou de forma significativa na vazão de descarga. Este fato pode ser devido às dimensões do silo estudado. O silo cilíndrico tinha um diâmetro interno de 14,5 cm, enquanto que o diâmetro de saída do silo alimentador, silo este que serviu para fazer o processo de carregamento, era igual a 5 cm. Uma vez que a excentricidade adotada no carregamento foi igual a 50%, pode-se supor que esta não teve o efeito desejado ficando muito perto do carregamento concêntrico.

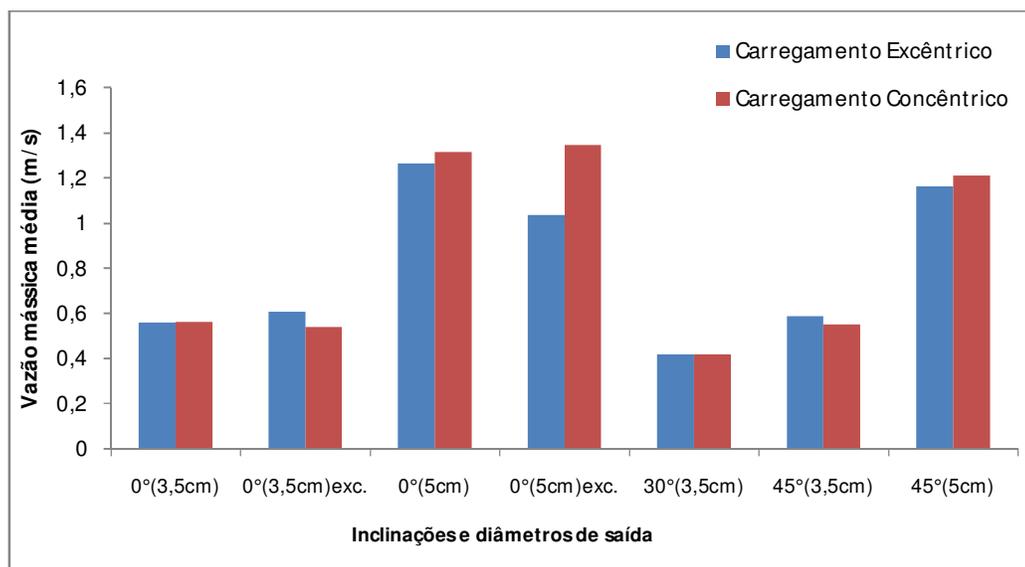


Figura 39 – Vazão mássica média do painço em função da excentricidade de carregamento, considerando as diversas formas de descarga

4.3.7 – Efeito da relação H/D

Na Figura 40 estão representadas as relações H/D em função da rugosidade das paredes do silo, para o descarregamento do farelo de milho M3; para diferentes ângulos da tremonha e diâmetro de saída. Neste trabalho, definiu-se a relação H/D como sendo a razão entre a altura efetiva do produto armazenado (H) e o diâmetro da seção cilíndrica do silo. Esta relação permite caracterizar em que posição ocorre a mudança do fluxo de massa para o fluxo de funil durante o descarregamento do produto.

Os resultados da Figura 40 permitem constatar que à medida que a rugosidade das paredes aumenta, diminui a profundidade em que ocorre a mudança do fluxo, esse fato é decorrente da menor velocidade de descarregamento em consequência do atrito dos produtos com a parede. Observou-se que para as descargas excêntricas estas relações são maiores do que as demais formas de descarregamento. As menores relações ocorrem para as saídas inclinadas, onde ocorrem as maiores velocidades de descarregamento.

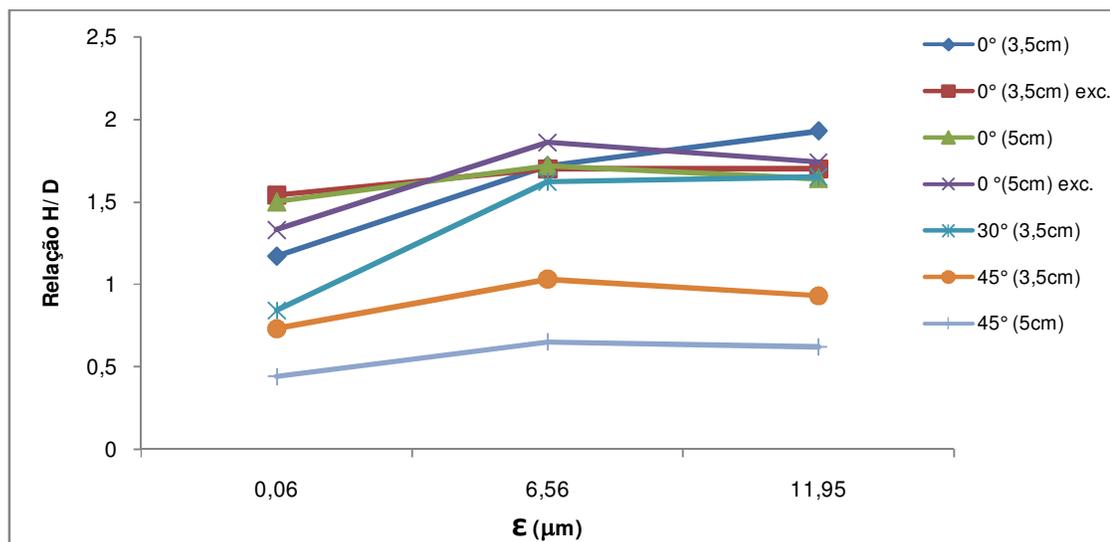


Figura 40 - Relações H/D em função das rugosidades das paredes do silo para o descarregamento do farelo de milho M3.

4.4 – “Slip stick”

Como pode ser observado da Figura 41, as maiores velocidades de descarga foram registradas para o produto M1, onde o fenômeno “slip stick” ocorreu em menor intensidade.

Observa-se na Figura 41 que as maiores velocidades de descargas foram registradas para o produto M1, produto este em que o fenômeno do slip-stick ocorreu em menor intensidade, isto afetou não somente a velocidade de descarga, como também o tempo de descarregamento (Figura 42).

Na Figura 42 está representada a evolução da massa de descarregamento dos farelos de milho (M1, M2 e M3) em função do tempo, para diferentes ângulos da tremonha, diâmetros de saída do silo igual a 3,5cm, e rugosidade das paredes de 6,56 μm . Os resultados mostrados na Figura 42 evidenciam o fenômeno conhecido por “slip stick” durante o descarregamento do farelo de milho. Verificou-se que o comportamento “slip stick” foi mais intenso para o farelo de milho M2, este produto apresentou menor uniformidade das partículas, maiores ângulos de atrito com a parede e elevado ângulo de atrito interno, ou seja, a correlação desses fatores pode explicar tal comportamento.

O fenômeno “slip stick” proporcionou uma vibração em toda a estrutura do silo, o que pode ter afetado de forma considerável a vazão de descarregamento.

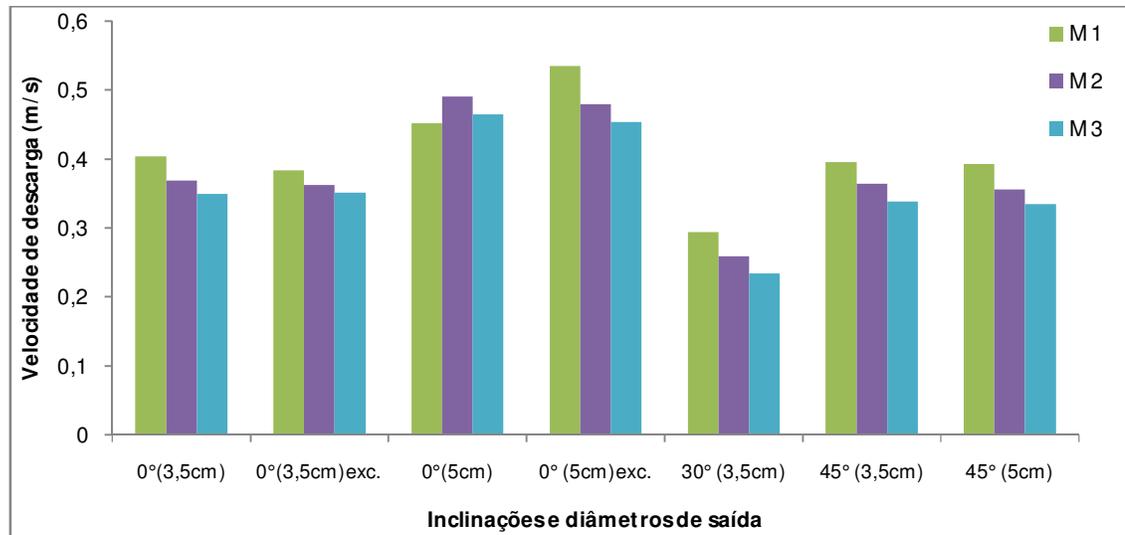


Figura 41 – Velocidade de descarga dos farelos de milho (M1, M2 e M3) em relação às diversas formas de descarga

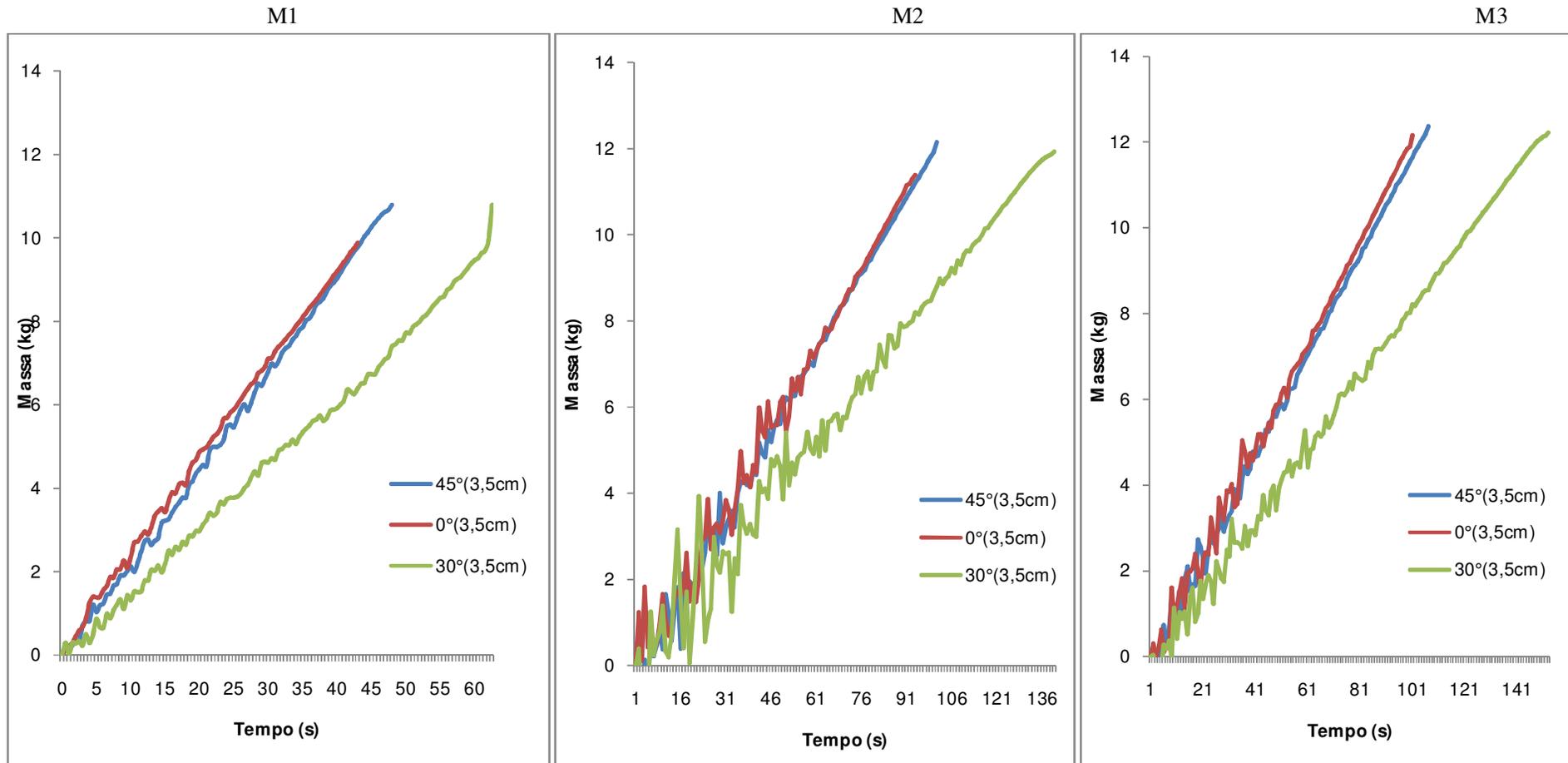


Figura 42 – Erro de leitura da balança em função da vibração do sistema devido ao efeito “slip-stick” para (a) farelo de milho M1, (b) farelo de milho M2 e (c) farelo de milho M3.

4.5 - Modelo matemático proposto

Com o objetivo de comparar os resultados da Equação (18) com os obtidos com a equação onde é substituído o ângulo de repouso (\emptyset_r) pelo ângulo de atrito interno (\emptyset) e o efetivo ângulo de atrito interno (δ) estão representadas as constantes C, a_1 , a_3 , a_5 , a_8 da Equação (18), na Tabela 10. Nesta tabela é igualmente ilustrado o erro residual entre o valor predito pelo modelo e valor experimental.

Tabela 10 – Índices da equação do modelo matemático proposto

Ângulos (°)	C	a_1	a_3	a_5	a_8	R^2	Erro
\emptyset_r	0,404834	1,064132	-0,075411	0,188492	0,000255	0,60	0,3
\emptyset	0,431957	0,830781	-0,075503	0,182991	0,000295	0,53	0,34
δ	0,434720	0,874215	-0,074381	0,195142	0,000284	0,54	0,33

Os erros ilustram uma razoável aproximação dos resultados do modelo proposto com os valores experimentais. Estas diferenças são atribuídas as várias variáveis adotadas no modelo e a pouca quantidade de parâmetros utilizados, como por exemplo, diâmetro de saída do silo e ângulo de inclinação o que seria estatisticamente significativo.

Nota-se, ainda, a partir das informações da Tabela 10, que apesar de que o ângulo de atrito interno (\emptyset) e o efetivo ângulo de atrito interno (δ), serem determinados considerando as diferentes tensões a que o produto é submetido durante o carregamento e descarregamento do silo, o que fornece informações mais precisas sobre o comportamento do fluxo de sólidos em silos; quando da substituição do ângulo de repouso por estes valores, observou-se que o ajuste em relação aos dados experimentais diminuiu, apesar do erro residual permanecer praticamente o mesmo.

4.5.1 - Comparação entre os modelos

Modelos empíricos de vazão mássica propostos por BEVERLOO *et al.* (1961) , FOWLER & GLASTONBURY (1959);e WANG *et al.* (1995) mostrados nas equações (6), (7) e (10), respectivamente, foram plotados e comparados com o modelo proposto no presente trabalho diferentes produtos. Na Tabela 11 encontra-se o erro relativo entre os valores experimentais e os valores preditos pelos modelos.

Os resultados apresentados na Tabela 11 ilustram de uma maneira geral que os modelos de WANG *et al.*(1995) e do presente trabalho apresentam uma melhor aproximação dos resultados preditos com os experimentais levando-se em consideração todos os parâmetros avaliados. Ao se comparar os resultados destes modelos observou-se que a introdução do parâmetro rugosidade não afetou de forma considerável os resultados da vazão de descarga do silo.

Verifica-se ainda da Tabela 11 que apesar de que o modelo proposto apresentar um menor erro para a maioria das situações estudadas, o modelo de BEVERLOO *et al.* (1961) apresenta boa aproximação para grande parte dos dados experimentais, sendo este ineficiente para a saídas com inclinação diferente de 0°, principalmente para a inclinação de saída 30°, sendo que para essa situação os menores erros foram encontrados para o modelo proposto. O modelo de BEVERLOO *et al.* (1961) é amplamente utilizado para descrever a descarga de sólidos em silos (MANKOC, 2007; HUANG *et al.*, 2009), o que justificaria de certa forma o sua boa aproximação aos resultados experimentais, apesar deste modelo não considerar, entre seus parâmetros, todas as variáveis do modelo proposto.

Os valores da vazão mássica (kg/s) calculados com os diferentes modelos são apresentados, no Apêndice, na Tabela 13.

Tabela 11 - Erro relativo entre os valores experimentais e os valores dos modelos preditos

PRODUTO	DESCARGA	DIAMETRO DE SAÍDA (d)	ÂNGULO DA TREMONHA	Erro relativo (%)			
				BEVERLOO <i>et al.</i> (1961)	FOWLER & GLASTONNBURY (1959)	WANG <i>et al.</i> (1995)	PRES. TRABALHO
AREIA	CONCÊNTRICO	3,5	45°	1,25	6,98	14,98	15,05
			30°	31,67	24,03	19,68	19,58
			0°	1,25	6,98	3,11	3,19
	EXCÊNTRICO	5,0	45°	13,96	44,58	0,59	13,19
			0°	1,30	50,73	0,70	0,61
			0°	0,55	5,29	1,35	1,43
PAINÇO	CONCÊNTRICO	3,5	45°	11,17	1,94	14,70	14,78
			30°	28,80	42,18	31,04	30,93
			0°	4,59	5,32	4,40	4,31
	EXCÊNTRICO	5,0	45°	6,62	41,44	0,04	0,12
			0°	10,67	50,94	4,56	4,64
			0°	9,30	0,13	0,74	0,83
M 1	CONCÊNTRICO	3,5	45°	3,36	3,57	12,30	12,38
			30°	33,76	24,80	19,81	19,71
			0°	1,14	7,76	4,41	4,49
	EXCÊNTRICO	5,0	45°	26,17	39,81	7,42	7,33
			0°	9,19	47,91	5,94	5,85
			0°	4,31	2,68	0,85	0,77
M 2	CONCÊNTRICO	3,5	45°	3,41	0,80	13,16	13,23
			30°	46,00	40,05	29,43	29,32
			0°	1,72	2,43	2,66	2,74
	EXCÊNTRICO	5,0	45°	31,90	36,67	8,79	8,70
			0°	4,07	53,94	9,84	9,91
			0°	3,85	0,39	0,62	0,71
M 3	CONCÊNTRICO	3,5	45°	6,71	1,73	6,56	6,63
			30°	53,40	46,24	41,81	41,69
			0°	2,26	2,51	2,11	2,03
	EXCÊNTRICO	5,0	45°	36,99	35,62	16,05	15,96
			0°	0,68	53,32	4,06	4,14
			0°	1,83	6,41	1,97	2,05
			0°	4,20	51,03	0,66	0,58

5 – CONCLUSÕES

- A rugosidade das paredes, na faixa estudada, não teve influência no processo de vazão de descarregamento, para todos os produtos estudados.
- As maiores vazões de descarregamento no silo foram registradas para a areia e as menores foram observadas para o farelo de milho M1, cuja razão aproximada foi de 2,5 para as diversas formas de descarregamento.
- As maiores vazões de descarga foram observadas quando o diâmetro do orifício de saída foi de 5 cm chegando a um valor de 1,35 kg/s.
- As menores vazões de descarregamento dos produtos foram registradas quando se utilizou a tremonha com inclinação de 30° com o valor de 0,16 kg/s para o produto que apresentou as menores vazões, farelo de milho M1.
- O fenômeno “slip stick” foi verificado para as diferentes granulometrias do farelo de milho, sendo mais intenso para o M2.
- Na descarga do farelo de milho M1, foi observada a formação de arco coesivo acima da saída da tremonha quando o orifício de saída foi de 3,5 cm. Esse fato foi observado para a saída com tremonha de 30° , e silo com fundo plano com saída concêntrica.
- O modelo matemático proposto prevê de forma satisfatória o comportamento da vazão determinada experimentalmente.

6 – Sugestões

- Utilizar o modelo matemático em escala real.
- Aumentar a faixa dos parâmetros do modelo matemático, por exemplo, os diâmetros do orifício de saída, para verificar o melhor ajuste do modelo aos dados experimentais.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACI 313. AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Recommended practice for design and construction of concrete bins, silos and bunkers for storing granular materials.** EUA: 1991.

AS 3774 - AUSTRALIAN STANDARD. **Loads on bulk containers.** Sydney: 1996.

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

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

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

BRADLEY, M.A.S.; BINGLEY, M.S.; PITTMAN, N.A. **Abrasive wear of steels in handling of bulk particulates: an appraisal of wall friction as and indicator of wear rate.** Tribology Internacional, v.33, p.845-853, 2000.

BROWN, C. J.; NIELSEN, J. **Silos: fundamentals of theory, behaviour and design.** London: E & FN SPON, 1998. 836p.

BOWDEN, F.P.; LEBEN, L. **The nature of sliding and the analysis of friction.** In; Proc. of the Royal Society. Series A, n.169, p.371-391, 1939.

BOWDEN, F.P.; TABOR, D. **The friction and lubrication of solids, Part I.** London, England: Oxford Clarendon Press. 1950.

BOWDEN, F.P.; TABOR D. **The Friction and lubrication of solids, Part II.** London, England: Oxford Clarendon Press. 1964

BUCKLIN, R. A.; MOLEND, M.; BRIDGES, T.C.; ROSS I.J., **Slip-stick frictional behavior of wheat on galvanized steel**. Transactions of the ASAE, v.39, n.2, p.649-653, 1996.

BUCKLIN, R.A.; THOMPSON, S.A.; ROSS, I.J.; BIGGS, R.H. **Apparent coefficient of wheat on bin wall material**. Transactions of the ASAE, v.35, n.5, p.1769-1773, 1989.

CALIL JUNIOR, C. **Sobrepeções em las paredes de los silos para almacenamiento de productos pulverulentos cohesivos**. Tese (Livre Docência) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1984.

CALIL JUNIOR, C. **Recomendações de fluxo e de cargas para o projeto de silos verticais**. São Carlos: USP, 1990. 197p.

CALIL JUNIOR, C., CHEUNG, A. B. **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.

CHANG, C. S.; CONVERSE, H. H.; LAI, F. S. **Flow rate of corn through orifices as affected by moisture content**. Transactions of the ASAE, v.27, n.5, p.1585-1589, 1984.

CHANG, C. S.; CONVERSE, H. H. **Flow rates of wheat and sorghum through horizontal orifices**. Transactions of the ASAE, v.31, n.1, p.300-304, 1988.

CLEARY, P. W. **The effect of particle shape on hopper discharge**. In: Second International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries CSIRO, Melbourne, Australia, December 1999.

CORRÊA, P. C.; GUIMARÃES, W. T.; AFONSO JÚNIOR, P. C. **Efeito do nível e do tamanho de impurezas nas propriedades físicas da massa granular de feijão.**

Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.5, n.1, Campina Grande Jan./Apr. 2001.

DIN 1055 - DEUTSCHE NORM.: **Design loads for buildings: loads in silo bins.** Berlin: 1987.

DRESCHER, A.; WATERS, A. J.; RHOADES, C. A. **Arching in hoppers: II. Arching theories and critical outlet size.** Powder Technology, Elsevier Science, n. 84, p. 177-183, 1995.

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

FITZPATRICK, J. J.; BARRINGER, S.A.; IQBAL, T. **Flow property measurement of food powders and sensitivity of Jenike's hopper design methodology to the measured values.** Journal of Food Engineering, Elsevier Science, n.61, p.399-405, 2004.

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

FOWLER, R. T.; GLASTONBURY, J. R. **The flow of granular solids through orifices.** Chemical Engineering Science, n.10, p. 150-156, 1959.

GAYLORD, E. H.; GAYLORD, C. N. **Design of steel bins for storage of bulk solids.** New Jersey: Prentice-Hall, 359p. 1984.

GOMES, F. C. **Estudo teórico e experimental das ações em silos horizontais.** Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos 2000.

GUDEHUS, G.; TEJCHMAN, J. **Silo music and silo quake**. Silos-Forschung und Praxis Tagung '92 (Karlsruhe, October) pp 103–110, 1992.

HARDOW, B.; SCHULZE, D.; SCHWEDES, J. **An experimental analysis of the 'silo quaking' phenomenon**. In: Proceedings of the World Congress on Particle Technology 3, Brighton, England, 1998.

HUANG, W.; GONG, X.; GUO, X.; DAI, Z.; LIU, H.; ZHENG, L.; ZHAO, J.; XIONG, Y. **Discharge characteristics of cohesive fine coal from aerated hopper**. Power Technology, n.194, p.126-131, 2009.

IBRAHIN, R. A. **Friction-induced vibration, chatter, squeal, and chaos. Part I: Mechanics and friction**. Applied Mechanics Review: v.47,n.7, p 209-226, 1994.

JANNA W. S. 1987. **Dimensional analysis and dynamic similitude**. In Introduction to Fluid Mechanics, 2nd Ed. Boston, Mass.: PWS Publishers.

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

JENIKE, A. W.; JOHANSON, J.R. Bulk Solids Handling Survey. **Flow of solids newsletter**. East Coast, USA: v. XV, n°.1, aug.1995.

JULIANO, P.; MUHUNTHAN, B.; CÁNOVAS, G. V. B. **Flow and shear descriptors of preconsolidated food powders**. Journal of Food Engineering, v.72, n.2, p.157-166, 2006.

KNOWTON, T. M.; CARSON, J. W.; KLINZING et al. **The importance of storage, transfer and collection**. Chemical Engineering Progress, Elsevier Science, n.90, p.44-54, 1994.

MANKOC, C. P. **Flujo de medios granulares en la descarga de silos bajo la acción de la gravedad**. “Memoria de investigacion”, Pamplona. 34p, 2007.

MUITE, B. K.; QUINN; S.F. SUNDARESAN, S.; RAO, K.K. **Silo music and silo quake: granular flow induced vibration**. Powder Technology, n.145, p.190–20, 2004

MILANI, A. P. **Determinação das propriedades de produtos armazenados para o projeto de pressões e fluxo em silos**. 272p. Tese (Doutorado). EESC – USP, São Carlos 1993.

MOHSENIN, N.N. **Physical properties of plant and animal materials**. New York: Gordon and Breach Science Publishers, 2^a edição, 1986. 742p.

MOLEND, M., J HORABIK and I.J. ROSS. **Wear-in effects on loads and flow characteristics in a smooth-wall bin**. Transactions of the ASAE. St. Joseph, Michigan., Paper n. 94-4515, 1994.

MOLEND, M.; HORABIK, J.; BUCKLIN, R. A. ROSS, I. J. **Wear-in effects on loads and flow in a conical grain bin**. Transactions of the ASAE. St. Joseph, Michigan: v.40, n.3, p.783-788, 1997

NASCIMENTO J. W. B.; CALIL JÚNIOR, C. **Painéis estruturais para paredes de silos verticais prismáticos**. Caderno de Engenharia da Estruturas, São Carlos, n.6, p.1-21, 1998.

NASCIMENTO, J. W. B. **Estudo de pressões em silos verticais metálicos com diferentes relações altura/diâmetro**. Relatório técnico. CNPq - Processo: 201051/2005-2 – CNPq - 2007

NEDDERMAN, R. M.; TUZUN, U.; SAVAGE, S. B.; HOULSBY, G. T. **The flow of granular materials – 1**. Chemical Engineering Science, n.37, v.11, p. 1597, 1982

OOI, J. Y.; ZHONG, Z.; HARDY, M. S. H. **Measurement of a solids flow patterns in a gypsum silo**. Powder Technology, Elsevier Science, n.99, p.272-284, 1998

PALMA G. (2005). **Pressões e fluxo em silos esbeltos ($h/d \geq 1,5$)**. Exame de Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos – PARTEC 2004 (Nuremberg, Germany, March 2004)

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

ROBERTS, A. W. **Storage, flow and handling of bulk solids**. Newcastle: Department of Mechanical Engineering, University of Newcastle, 1987. 612p.

ROBERTS , A.W. **Mechanics of self excited dynamic loads in bins and silos**. In: Proc. Int. Symp. Reliable Flow of Particulate Solids II, Oslo, p. 983-1004, (1993).

ROBERTS, A. W. **Shock loads in silos, the silo quaking problem**. Bulk Solids Handling, v.16, n.1, p.59–73, 1996.

ROBERTS, A. W.; WENSRICH, C. **Flow dynamics or ‘quaking’ in gravity discharge from silos**. Chemical Engineering Science n.57, p.295–305, 2002.

ROTTER, J. M. **Properties of the stored granular material**. In: BROWN C. J. & NELSEN J. Silos - Fundamentals of theory behaviour and design, p. 650-664, 1998.

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

SAFARIAN, S. S. & HARRIS, E. C. **Design and construction of silos and bunkers**. Van Nostrand Reinhold Company Inc. New York, 468p. 1985.

SCHULZE, D. **Silo Quaking**, In: Silos – Fundamentals of theory, behaviour and design, eds C.J. Brown and J. Nielsen, E & FN Spon, London, p.171-182, 1998.

SIELAMOWICZ, I. **Statistical modeling of discharge process of granular materials from silos**. PARTEC 2007 (Nuremberg, Germany, March, 2007).

SLOMINSKI, C.; NIEDOSTATKIEWICZ, M.; TEJCHMAN, J. **Application of particle image velocimetry (PIV) for deformation measurement durin granular silo flow**. Powder Technology, n 173, p.1-18, 2007.

SCHWAB, C. V.; CURTIS, R.A.; THOMPSON, S. A. and ROSS, I. J. **Vertical loading of temperature cables**. Transactions of the ASAE, v.34, n.1, p.269-274, 1991.

SCHWEDES, J. **Measurement of flow properties of bulk solids**, In: Proc. Int. Symp. Powder Technology, Kyoto (Japan), p. 89-98, 1981.

TABOR, D. **Friction – The present state of our understanding**. J. of Lubrication Technology. 103: p. 169-179, 1981.

TEJCHMAN, J. **Technical concept to prevent the silo honking**. Powder Technology, n.106, p.7–22, 1999.

TEJCHMAN J.; GUDEHUS G., **Silo-music and silo-quake experiments and a numerical Cosserat approach**, Powder Technology. n.76 p. 201–212, 1993

TEUNOU, E.; FITZPATRICK, J. J.; SYNNOTT, E. C. **Characterisation of food powder flowability**. Journal of Food Engineering, n. 39, p. 31-37, 1999.

WANG, Y.J.; CHUNG, D.S.; SPPILLMAN, C.K. **Gravity flow characteristics of soybean meal**. Transactions of the ASAE, St. Joseph, n.38, v.4, p. 1179-1186. 1995.

WENSRICH, C. **Numerical modeling of quaking in tall silos.** International Journal of Mechanical Sciences, n.45, p.541–551, 2003.

WENSRICH, C., **Experimental behaviour of quaking in tall silos.** Powder Technology, n.127, p.87–94, 2002.

WENSRICH C. **Silo quake modelling and lateral pressure predictions for a hypoplastic granular material.** In: Proceedings of the Sixth World Congress of Chemical Engineers, Melbourne, Australia, 2001.

WILLIAMS, J. A. **Engineering Tribology.** Oxford, England: Oxford Univ. Press. 1994.

APÊNDICE

- Determinação do ângulo de atrito interno (\emptyset) e do efetivo ângulo de atrito interno (δ).

Os pontos de cisalhamento obtidos no pré-cisalhamento e no cisalhamento são plotados no diagrama de coordenadas σ e τ . Uma linha reta é desenhada através destes pontos, excluindo o ponto de pré-cisalhamento. Pode-se utilizar uma regressão. E o lugar geométrico é extrapolado para o mais alto e baixo valores da tensão normal σ . Através do lugar geométrico, definido pela linha reta, desenha-se dois círculos de Mohr. O primeiro passa pela origem e tangencia a reta do lugar geométrico. O ponto máximo de interseção do círculo de Mohr com o eixo σ determina a resistência não confinada f_c do produto. O segundo passa através do ponto P do pré-cisalhamento e tangencia ao lugar geométrico instantâneo. A tensão principal máxima σ_1 foi definida pelo ponto entre o lugar geométrico e o eixo σ . O ângulo entre geométrico e o eixo σ é o ângulo de atrito interno \emptyset . A linha reta desenhada passando através da origem e do ponto de tangência (B) do círculo de Mohr da tensão principal máxima σ_1 , define o efetivo lugar geométrico (EYL). O ângulo de atrito entre o eixo e o efetivo lugar geométrico é o efetivo ângulo de atrito δ (Figura 43).

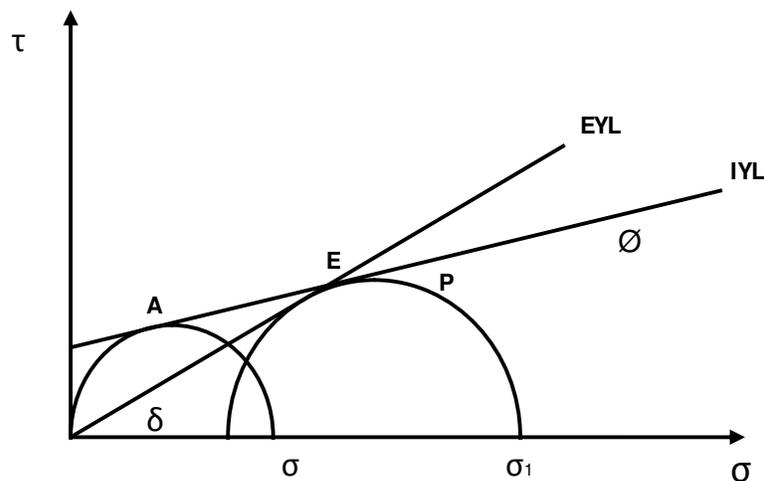


Figura 43 - Semicírculo de Mohr

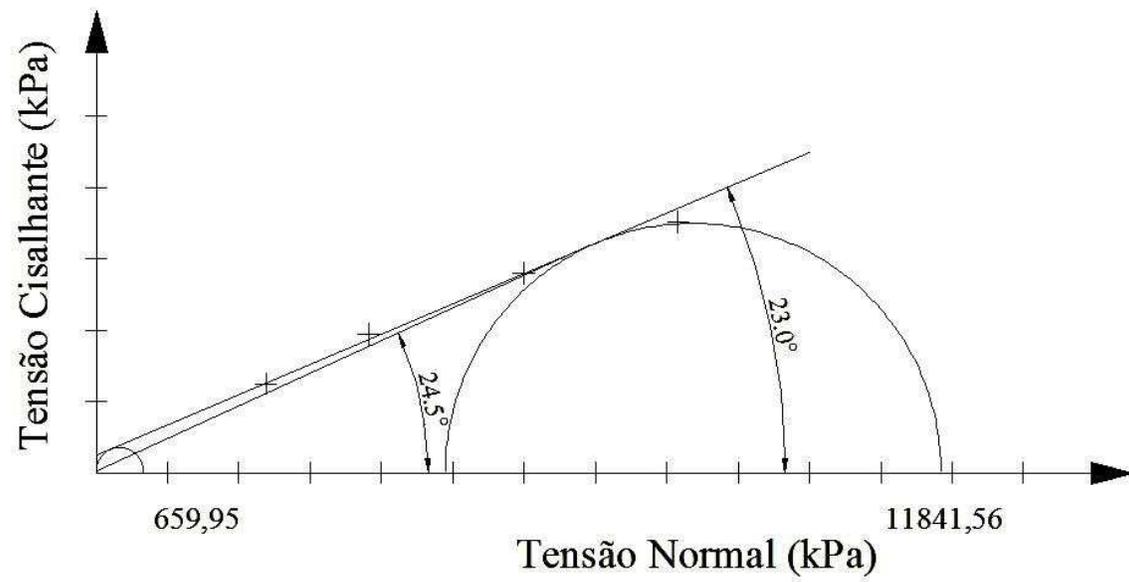


Figura 44 - Círculos de tensões de Mohr e ângulos de atrito (pré-carga 5 kg) para o produto paíño

Tabela 12 – Valores da vazão mássica média (kg/s) para as rugosidades das paredes e variação das vazões entre as rugosidades das paredes (%)

Produto	Descarga	Diâmetro de Saída (d)	Ângulo da Tremonha	Vazão mássica (kg/s)			Variação da vazão entre as rugosidades (%)		
				ϵ_1 (0,06 □m)	ϵ_2 (6,56 □m)	ϵ_3 (11,95 □m)	ϵ_1/ϵ_2	ϵ_1/ϵ_3	ϵ_2/ϵ_3
Areia	Concêntrico	3,5	45°	0,56	0,578	0,57	3,1	1,8	1,4
			30°	0,42	0,416	0,434	1,0	3,2	4,1
			0°	0,56	0,548	0,59	2,1	5,0	7,1
		5,0	45°	1,2	1,15	1,17	4,2	2,5	1,7
			0°	1,35	1,26	1,35	6,7	0,0	6,7
			Excêntrico	3,5	0°	0,55	0,558	0,588	1,4
		5,0	0°	1,35	1,21	1,31	10,3	3,0	7,6
Painço	Concêntrico	3,5	45°	0,29	0,289	0,31	0,3	6,5	6,8
			30°	0,2	0,205	0,209	2,4	4,3	1,9
			0°	0,27	0,275	0,285	1,8	5,3	3,5
		5,0	45°	0,62	0,626	0,696	1,0	10,9	10,1
			0°	0,74	0,73	0,705	1,4	4,7	3,4
			Excêntrico	3,5	0°	0,284	0,275	0,287	5,2
		5,0	0°	0,676	0,657	0,682	15,7	12,5	3,7
M1	Concêntrico	3,5	45°	0,22	0,229	0,227	3,9	3,1	0,9
			30°	0,17	0,178	0,176	4,5	3,4	1,1
			0°	0,23	0,22	0,234	4,3	1,7	6,0
		5,0	45°	0,45	0,479	0,499	6,1	9,8	4,0
			0°	0,52	0,524	0,525	0,8	1,0	0,2
			Excêntrico	3,5	0°	0,218	0,218	0,227	0,0
		5,0	0°	0,62	0,543	0,495	12,4	20,0	8,8
M2	Concêntrico	3,5	45°	0,24	0,233	0,237	2,9	1,3	1,7
			30°	0,17	0,167	0,17	1,8	0,0	1,8
			0°	0,244	0,26	0,247	6,1	1,2	5,0
		5,0	45°	0,48	0,48	0,5	0,0	4,0	4,0
			0°	0,66	0,637	0,62	3,5	6,1	2,7
			Excêntrico	3,5	0°	0,239	0,25	0,274	4,4
		5,0	0°	0,65	0,61	0,6	6,2	7,7	1,6
M3	Concêntrico	3,5	45°	0,23	0,23	0,239	0,0	3,8	3,8
			30°	0,16	0,164	0,169	2,4	5,3	3,0
			0°	0,24	0,25	0,248	4,0	3,2	0,8
		5,0	45°	0,464	0,5	0,495	6,0	5,0	1,0
			0°	0,64	0,69	0,678	5,8	4,1	1,7
			Excêntrico	3,5	0°	0,25	0,244	0,258	1,6
		5,0	0°	0,61	0,597	0,652	6,7	1,8	8,4

Tabela 13 - Vazões mássicas médias (kg/s) para os modelos teóricos considerando todos os produtos

PRODUTO	DESCARGA	DIAMETRO DE SAÍDA (d)	ÂNGULO DA TREMONHA	VALORES PREDITOS			PRES. TRABALH O
				BEVERLOO <i>et al.</i> (1961)	FOWLER & GLASTONNBURY (1959)	WANG <i>et al.</i> (1995)	
AREIA	CONCÊNTRICO	3,5	45°	0,553001269	0,520915243	0,476115666	0,475717613
			30°	0,553001269	0,520915243	0,502648391	0,502225983
			0°	0,553001269	0,520915243	0,54257369	0,542114425
	EXCÊNTRICO	5,0	45°	1,3675245	0,665081562	1,192932405	1,358275049
			0°	1,3675245	0,665081562	1,359446419	1,358275049
			0°	0,553001269	0,520915243	0,54257369	0,542114425
PAINÇO	CONCÊNTRICO	3,5	45°	0,257599544	0,284361561	0,247357688	0,24715031
			30°	0,257599544	0,284361561	0,262071549	0,261850629
			0°	0,257599544	0,284361561	0,281884809	0,281645549
	EXCÊNTRICO	5,0	45°	0,661068027	0,363060275	0,61976747	0,619238457
			0°	0,661068027	0,363060275	0,706276956	0,705666746
			0°	0,257599544	0,284361561	0,281884809	0,281645549
M 1	CONCÊNTRICO	3,5	45°	0,227387264	0,212152498	0,192930581	0,19276986
			30°	0,227387264	0,212152498	0,203682115	0,203511558
			0°	0,227387264	0,212152498	0,21986056	0,219675116
	EXCÊNTRICO	5,0	45°	0,567787304	0,270866934	0,48339754	0,4829875
			0°	0,567787304	0,270866934	0,550871996	0,550398984
			0°	0,227387264	0,212152498	0,21986056	0,219675116
M 2	CONCÊNTRICO	3,5	45°	0,248193943	0,238079379	0,208416276	0,208243456
			30°	0,248193943	0,238079379	0,22003079	0,219847387
			0°	0,248193943	0,238079379	0,237507808	0,237308391
	EXCÊNTRICO	5,0	45°	0,633120071	0,30396923	0,522197751	0,521756804
			0°	0,633120071	0,30396923	0,595088087	0,594579393
			0°	0,248193943	0,238079379	0,237507808	0,237308391
M 3	CONCÊNTRICO	3,5	45°	0,24543398	0,233977936	0,214920125	0,214741963
			30°	0,24543398	0,233977936	0,226897082	0,22670801
			0°	0,24543398	0,233977936	0,245070168	0,244864448
	EXCÊNTRICO	5,0	45°	0,635636738	0,298732689	0,538493481	0,538038902
			0°	0,635636738	0,298732689	0,614035972	0,613511197
			0°	0,24543398	0,233977936	0,245070168	0,244864448
		5,0	0°	0,635636738	0,298732689	0,614035972	0,613511197