



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



**Efeito de inserts no fluxo e vazão mássica de ração avícola em silos
verticais**

Aluno: Diego José Araújo Bandeira

Campina Grande – Paraíba

Fevereiro de 2017

DIEGO JOSÉ ARAÚJO BANDEIRA

**Efeito de inserts no fluxo e vazão mássica de ração avícola em silos
verticais**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Campina Grande/PB, como parte das exigências para obtenção do grau de mestre em Engenharia Agrícola.

Orientador: Prof. Dr. José Wallace Barbosa do Nascimento

Campina Grande - Paraíba

Fevereiro de 2017

*“Que o teu trabalho seja
perfeito para que, mesmo
depois da tua morte, ele
permaneça.”*

Leonardo da Vinci

Sumário

| | |
|--|------|
| LISTA DE FIGURAS | VI |
| LISTA DE TABELAS..... | VIII |
| LISTA DE ABREVIATURAS/SÍMBOLOS/UNIDADES | IX |
| RESUMO | XI |
| ABSTRACT | XI |
| 1.INTRODUÇÃO..... | 11 |
| 1.1.JUSTIFICATIVA | 12 |
| 2.OBJETIVOS..... | 13 |
| 2.2.GERAL | 13 |
| 2.2.ESPECÍFICOS..... | 13 |
| 3.REVISÃO DE LITERATURA | 14 |
| 3.1.SILO..... | 14 |
| 3.2.CLASSIFICAÇÃO DOS SILOS | 14 |
| 3.3.FLUXO | 15 |
| 3.4.ARQUEAMENTO E ESTADO DE TENSÃO EM SILOS | 18 |
| 3.5.PROPRIEDADES FÍSICAS..... | 21 |
| 3.5.1. TEOR DE UMIDADE | 21 |
| 3.5.2. GRANULOMETRIA..... | 22 |
| 3.6.PROPRIEDADES DE FLUXO | 22 |
| 3.6.1 PESO ESPECÍFICO CONSOLIDADO (γ) | 24 |
| 3.6.2 .ÂNGULO DE ATRITO INTERNO (Φ) E EFETIVO ÂNGULO DE ATRITO INTERNO (δ)..... | 24 |
| 3.6.3 .ÂNGULO DE ATRITO DO PRODUTO COM A PAREDE (Φ_w)..... | 25 |
| 3.6.4. COESÃO (C) | 25 |
| 3.6.5. FUNÇÃO FLUXO (FF)..... | 26 |
| 3.7.INSERTS | 27 |

| | |
|---|----|
| 4. MATERIAL E MÉTODOS..... | 32 |
| 4.1. LOCALIZAÇÃO DO EXPERIMENTO | 32 |
| 4.2. PRODUTO UTILIZADO | 32 |
| 4.3. METODOLOGIA..... | 33 |
| 4.3.1 DETERMINAÇÃO DA VAZÃO MÁSSICA | 37 |
| 4.4. PROPRIEDADES DE FLUXO | 39 |
| 4.5. TEOR DE UMIDADE..... | 40 |
| 4.6. GRANULOMETRIA..... | 40 |
| 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 41 |
| 5.1. PROPRIEDADES FÍSICAS E DE FLUXO..... | 41 |
| 5.2. ANÁLISE DA VAZÃO MÁSSICA..... | 42 |
| 5.3 ANÁLISE DOS INSERTS NO FLUXO..... | 45 |
| 5.3.1 SEM UTILIZAÇÃO DE INSERT | 45 |
| 5.3.2 INSERT 1..... | 47 |
| 5.3.3 INSERT 2..... | 49 |
| 5.3.4. INSERT 3..... | 51 |
| 5.3.5 INSERT 4..... | 53 |
| 5.3.6 ANÁLISE ENTRE ALTURAS | 54 |
| 6. CONCLUSÕES..... | 55 |
| 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 56 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Fluxo de Massa | 15 |
| Figura 2. Fluxo de Funil | 15 |
| Figura 3. Formas de Fluxo de Tubo. | 16 |
| Figura 4. Formas de fluxo misto..... | 17 |
| Figura 5. Rathole | 17 |
| Figura 6. Arco coesivo..... | 18 |
| Figura 7. Estado de tensão no silo. | 20 |
| Figura 8. Tensões principais na zona de transição da tremonha..... | 20 |
| Figura 9. Tipos de obstruções de fluxo..... | 21 |
| Figura 10. Esquema ilustrativo do aparelho de cisalhamento direto de Jenike. | 23 |
| Figura 11. Esquema ilustrativo da célula de cisalhamento de Jenike..... | 23 |
| Figura 12. Determinação do atrito com a parede na célula de Jenike. | 24 |
| Figura 13. Lugares Geométricos. | 25 |
| Figura 14. Função Fluxo: “Fluxo Livre” versus “Sem Fluxo”..... | 26 |
| Figura 15. Insert cone invertido..... | 29 |
| Figura 16. Principais tipos de inserts..... | 30 |
| Figura 17. Detalhamento das dimensões do silo. | 33 |
| Figura 18. Modelo do Silo..... | 33 |
| Figura 19. Sistema de carregamento do silo..... | 34 |
| Figura 20. Detalhamento dos inserts. | 34 |
| Figura 21. Representação da proporcionalidade dos inserts com a tremonha. | 35 |
| Figura 22. Detalhamento das alturas. | 35 |
| Figura 23. Posicionamento dos inserts, (A) Altura 1 – 55cm, (B) Altura 2 – 45cm, (C) Altura 3 – 35cm. | 36 |
| Figura 24. Balança | 37 |
| Figura 25. Detalhamento do posicionamento das células de carga | 37 |
| Figura 26. Equipamento de aquisição de dados Spider 8. | 38 |
| Figura 27. Nível de bolha utilizado para nivelar o silo..... | 38 |
| Figura 28. Jenike Shear Cell, utilizado para determinação das propriedades de fluxo. . | 39 |
| Figura 29. Agitador mecânico de peneiras. | 40 |
| Figura 30. Análise granulométrica da ração avícola | 41 |
| Figura 31. Vazão de descarregamento..... | 43 |

| | |
|---|----|
| Figura 32. Velocidade de Descarregamento..... | 44 |
| Figura 33. Descarregamento sem insert. | 45 |
| Figura 34. Descarregamento com insert 1: (A) altura 1, (B) altura 2, (C) altura 3. | 47 |
| Figura 35. Descarregamento com insert 2: (A) altura 1, (B) altura 2, (C) altura 3..... | 49 |
| Figura 36. Descarregamento com insert 3: (A) altura 1, (B) altura 2, (C) altura 3..... | 51 |
| Figura 37. Descarregamento com insert 4: (A) altura 1, (B) altura 2, (C) altura 3..... | 53 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1. Classificação dos silos quanto à esbeltez..... | 14 |
| Tabela 2. Classificação dos produtos de acordo com a granulometria..... | 22 |
| Tabela 3. Classificação da capacidade de fluxo dos produtos armazenáveis segundo Jenike (1964) | 27 |
| Tabela 4. Composição da ração avícola | 32 |
| Tabela 5. Caracterização das propriedades de fluxo. | 41 |
| Tabela 6. Determinação do fluxo experimental..... | 42 |

LISTA DE ABREVIATURAS/SÍMBOLOS/UNIDADES

| | | |
|--------------------|--|----------------------|
| γ | Peso específico consolidado | Kg/m ³ |
| ϕ | Ângulo de atrito interno | (°) |
| δ | Efetivo ângulo de atrito interno | (°) |
| ϕ_w | Ângulo de atrito do produto com a parede | (°) |
| YL | Lugar geométrico de deslizamento do produto | |
| EYL | Lugar geométrico efetivo de deslizamento | |
| C | Coesão | (Pa) |
| FF | Função fluxo | |
| σ_M | Pressão de consolidação | (Pa) |
| σ_c | Resistência inconfínada | (Pa) |
| ν | Coefficiente de Poisson | |
| ϵ_{long} | Deformação longitudinal | (m.m ⁻¹) |
| ϵ_{lat} | Deformação lateral | (m.m ⁻¹) |
| δ | Comprimento longitudinal final | (m) |
| δ' | Comprimento radial final | (m) |
| L | Comprimento inicial | (m) |
| ϵ_ψ | Deformação elástica transversal | (Pa) |
| ϵ_ζ | Deformação elástica longitudinal | (Pa) |
| U | Perímetro da seção transversal da parede | (m) |
| ph | Pressão horizontal a parede do silo | (Pa) |
| pV | Pressão Vertical a parede do silo | (Pa) |
| pW | Pressão Tangencial a parede do silo | (Pa) |
| dz | Camada elementar de altura | (m) |
| A | Área da sessão transversal do silo | (m ²) |
| μ_w | Coefficiente de atrito característico da parede vertical | |
| σ_x | Tensão horizontal | (Pa) |
| σ_y | Tensão vertical | (Pa) |
| k_0 | Coefficiente de dependência linear | |
| $\epsilon_{y'}$ | Deformação total | (mm) |
| $\epsilon_{y'}^p$ | Deformação plástica | (mm) |
| $\epsilon_{y'}^e$ | Deformação elástica | (mm) |
| E' | Módulo de elasticidade | (KPa) |
| $\Delta\epsilon_y$ | Variação na deformação vertical ao longo do tempo | (m) |
| $\Delta\epsilon_x$ | Variação na deformação horizontal ao longo do tempo | (m) |
| h_0 | Altura inicial da amostra | (m) |
| ϵ_x | Deformação vertical | (Pa) |
| W _t | Peso total da célula com o produto | (Kg) |
| W _b | Peso da base do anel | (Kg) |

| | | |
|----------|--|---------------------|
| W_r | Peso do anel de cisalhamento | (Kg) |
| W_L | Peso da tampa | (Kg) |
| V_t | Volume total da célula de cisalhamento | (cm ³) |
| V_r | Volume correspondente ao anel de cisalhamento | (cm ³) |
| A | Área da seção transversal do anel de cisalhamento | (m ²) |
| G | Aceleração da gravidade, 9,81 m/s ² | (m/s ²) |
| H | Peso do Pêndulo | (Kg) |
| S_p | Força de cisalhamento no pré-cisalhamento/estado de consolidação | (Kg) |
| S_s | Força de cisalhamento/início de consolidação | (Kg) |
| W_p | Peso no pendural durante o pré-cisalhamento | (Kg) |
| W_s | Peso no pendural durante o cisalhamento | (Kg) |
| W_{wt} | Peso total da célula, inclusive anel, tampa e o produto | (Kg) |
| W_m | Peso da chapa do material da parede | (Kg) |
| W_w | Peso no pendural para o teste de atrito na parede | (Kg) |
| S_w | Força de cisalhamento | (Kg) |

RESUMO

O experimento foi conduzido no Laboratório de Beneficiamento de Sementes, tendo as propriedades de fluxo, a granulometria e o teor de umidade determinadas no Laboratório de Construções Rurais e Ambiente- LACRA, ambos da Universidade Federal de Campina Grande, no município de Campina Grande - PB, no período de junho a novembro de 2016. Foi utilizado um modelo reduzido de silo de seção semicircular vertical de dimensões de 1,1m de altura e 0,45m de diâmetro, representando um silo com relação H/D igual a 2,4, e uma tremonha com 0,5m de altura e inclinação de 69° com a horizontal, com 0,07m de orifício de descarga. Foram utilizados quatro tipos de inserts: dois cones simples e dois cones duplos. Os inserts foram instalados em três diferentes alturas em relação ao orifício de descarga: 35, 45 e 55cm. A ração avícola apresentou dificuldade em seu fluxo, pelo fato deste produto apresentar fluxo em funil, com várias quedas durante seu descarregamento, concluiu-se que a utilização de diversos modelos de inserts em determinadas alturas, promovem a mudança do fluxo do produto armazenado para um padrão mássico.

Palavras Chave: armazenamento; insert; descarregamento.

ABSTRACT

The experiment was conducted in the laboratory of Seed processing, the flow properties, particle size and moisture content determined in the laboratory of Rural Constructions and Ambience - LaCRA, both from the Federal University of Campina Grande, in the municipality of Campina Grande - PB, in the period from June to November 2016. We used a scale model of vertical semicircular section of silo dimensions of 1,1 m high and 0,45 m in diameter, depicting a silo with H/D ratio equal to 2.4, and a hopper with 0,5 m of height and inclination of 69° with horizontal, with 0,07 m of outlet. We used four types of inserts: two single and two double cones. The inserts were installed in three different heights in relation to the outlet: 35, 45 and 55 cm. Poultry rations presented difficulty in your discharging, because this product presents funnel flow, with several crashes during your discharge, it was concluded that the use of different models of inserts, promote flow change of the stored product to a mass standard.

Keywords: storage; insert; discharging

1.INTRODUÇÃO

A produção de grãos cresce anualmente de forma acentuada devido ao aumento da produtividade das culturas, a produção de grãos no Brasil na safra 2014/15 foi de 208,54 milhões toneladas, quando comparada a estimativa da safra 2015/16 houve um acréscimo de 2,06%, sendo a mesma de 212,92 milhões toneladas (CONAB, 2015).

A capacidade de armazenagem do Brasil, segundo levantamento realizado pela Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB, em janeiro de 2016 foi de aproximadamente 151,763, sendo a maior parte destinada a armazenamento de grãos (CONAB, 2016).

Silo vertical é um grande depósito para armazenar e conservar produto sólido, granular ou pulverulento, a granel, seja ele industrial ou agrícola, visando a qualidade final do produto. Os silos verticais são amplamente utilizados no Brasil e possibilitam recursos mecanizados que otimizam os processos realizados nas unidades armazenadoras, como a movimentação de carga e descarga, limpeza, secagem e aeração do produto.

Os principais tipos de fluxo em silos verticais são: fluxo de massa (todo o produto armazenado está em movimento em direção ao orifício de descarga), fluxo de funil (parte do produto armazenado permanece estagnado durante o descarregamento) e de fluxo misto (neste caso, parte do descarregamento ocorre em padrão de fluxo de massa e outra parte em fluxo de funil).

Alguns problemas podem ocorrer durante o descarregamento do produto armazenado dificultando seu fluxo, como a formação de canal de fluxo, arcos coesivo e mecânico, formação de rathole entre outros.

Os inserts são colocados dentro de tremonhas com o objetivo de quando bem efetuados, modificar o tipo de fluxo, tornando-o mais próximo possível do fluxo de massa. Esta modificação é resultante de uma maior distribuição do produto armazenado em seu carregamento, e também, pela quebra dos arcos coesivos formados durante o descarregamento.

1.1. JUSTIFICATIVA

A limitada capacidade de armazenamento da produção agrícola brasileira, proporciona a prática de construção de silos verticais como atenuante a este problema, entretanto, o tipo de fluxo do produto armazenado durante o descarregamento influencia diretamente nas forças que o corpo do silo é submetido, podendo ocorrer tombamentos do silo vertical.

Os silos são estruturas com elevado número de desastres tendo uma frequência que é muito maior do que quase qualquer outro equipamento industrial. Por vezes, o excesso de carga nas paredes do silo leva a falhas que envolve apenas distorção ou deformação que, embora desagradável, não representa um perigo para a segurança, ou o torne inoperável. Em outros casos, a insuficiência envolve colapso total da estrutura, com perda de uso e até mesmo perda de vida que o acompanha (Carson & Craig, 2015).

Os inserts surgem como opção para solução de problemas de fluxo, como a formação de canal de fluxo, de arcos mecânicos e coesivos, rathole. Por agir alterando os estados de tensão principalmente na zona de transição da tremonha, e também, promovendo uma redistribuição das partículas antes de atingirem o orifício de descarga. Diante do exposto, a necessidade de realização de uma análise minuciosa da influência de diferentes tipos de inserts, em diferentes alturas, no fluxo do produto armazenado, é de fundamental importância para estudo de projetos de silos.

2.OBJETIVOS

2.2.GERAL

O objetivo desta dissertação é analisar a influência de diferentes inserts, em diferentes alturas, nas características de vazão e fluxo de ração avícola em silo vertical.

2.2.ESPECÍFICOS

- Analisar as propriedades físicas e de fluxo do produto armazenado através do aparelho de cisalhamento direto, Jenike Shear Cell;
- Analisar o fluxo do material armazenado sem introdução de inserts;
- Avaliar o efeito dos inserts no fluxo e na vazão do produto armazenado, considerando o efeito de suas localizações;
- Analisar a vazão experimental, com e sem utilização de inserções;
- Analisar a velocidade de deslocamento das partículas durante o processo de descarregamento do produto armazenado;

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. SILO

Silos são estruturas construídas de vários materiais e tamanhos com a finalidade de armazenar produtos granulares e pulverulentos visando à qualidade final do produto, os quais possuem ou não mecanismos de carga e descarga, assim como sistemas de aeração e termometria (Costa, 2013). Silos verticais são amplamente utilizados em muitas indústrias, tais como mineração, metalurgia, e indústrias de alimentos (Liu et al., 2014).

Com a expansão da agricultura e de outros setores da economia, os silos se tornaram estruturas fundamentais para conservação do produto e, sobretudo, exercem a função de regulador de estoques e preços (Costa et al., 2014). Outra vantagem dos silos é poder armazenar grande quantidade em espaço horizontal reduzido (Lopes Neto et al., 2012), (Colonnello et al., 2014), (Ding et al., 2013).

Silos metálicos são frequentemente construídas com chapas de aço com ondulação horizontal reforçadas por elementos verticais (colunas) distribuídas uniformemente ao redor da circunferência silo e conectados com parafusos, as chapas onduladas horizontais suportam forças de tração circunferenciais causadas pelas pressões horizontais do produto armazenado, as colunas suportam a compressão vertical do produto armazenado e a parede do silo (Iwiki et al., 2015), (Hotała & Skotny, 2014).

3.2. CLASSIFICAÇÃO DOS SILOS

Os silos são classificados quanto a geometria, ao material empregado na estrutura e também em relação ao solo. Calil Junior & Cheung (2007), apresentam uma relação de normas quanto à classificação dos silos em relação à esbeltez (Tabela 1).

Tabela 1. Classificação dos silos quanto à esbeltez.

| Norma | Classificação | | |
|------------------|-------------------------|-------------------------|-------------|
| | Baixos | Mediamente Esbelto | Esbeltos |
| AS3774:1996 | $H/D < 1,0$ | $1,0 \leq H/D \leq 3,0$ | $H/D > 3,0$ |
| DIN 1055-03:2005 | $0,4 \leq H/D \leq 1,0$ | $1,0 \leq H/D \leq 2,0$ | $H/D > 2,0$ |

Fonte: Adaptado de Calil Junior & Cheung (2007)

3.3. FLUXO

O fluxo em silos pode ocorrer de duas formas: por fluxo de funil em que, durante a descarga, o material tende a formar um canal de fluxo até o orifício de descarga, com zonas de estagnação, e o fluxo de massa, no qual o produto fluirá e não existirão zonas de estagnação (Figura 1 e 2), (Nascimento & Calil Júnior, 2009).

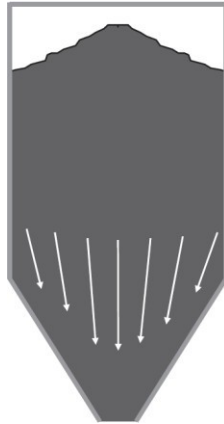


Figura 1. Fluxo de Massa.

Fonte: Adaptado de Carson, 2008.

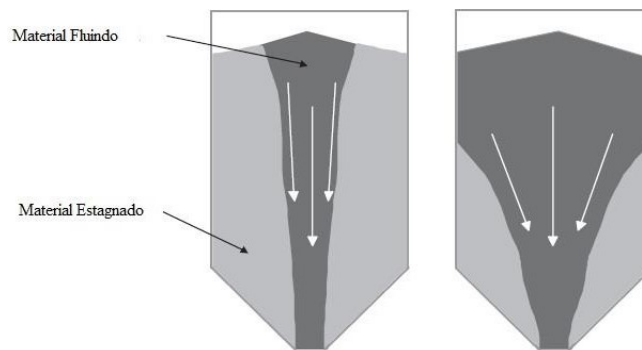


Figura 2. Fluxo de Funil.

Fonte: Adaptado de Carson, 2008.

O Fluxo de massa é mais vantajoso visto que elimina a possibilidade de obstrução do fluxo, é uniforme e fácil de controlar, a densidade durante a descarga é praticamente constante e toda a capacidade de armazenamento é aproveitada. Uma das poucas vantagens do fluxo de funil é o menor desgaste nas paredes do silo, uma vez que o atrito

entre a parede e o produto durante o descarregamento é desprezível, as pressões as quais as paredes são submetidas são menores, reduzindo a redução do custo de construção (Amóros et. al., 2002).

Rotter (2005) refinou ainda mais a definição em: fluxo de funil, fluxo de tubo e de fluxo misto. A distinção entre os dois principais tipos de fluxo é: se o canal de fluxo intercepta qualquer parte das paredes do silo (geralmente na secção do corpo); se e não houver interseção (fluxo tubo), a parede do canal de fluxo pode ser vertical (fluxo de tubo paralelo), convergindo de cima para baixo (fluxo de tubo cônico), vertical ao longo da parede lateral do silo (fluxo de tubo paralelo excêntrico) ou convergentes ao longo as paredes laterais do silo (fluxo de tubo cone excêntrico) (ver Figura 3). Se ocorrer em partes a formação de canal de fluxo e também fluxo em massa (fluxo misto), o canal de escoamento convergente pode ser simétrico em relação ao eixo central do recipiente (fluxo misto concêntrico), totalmente excêntrico se a abertura da tremonha é para um lado do silo (fluxo misto totalmente excêntrico), ou interage com a parede do silo em diferentes elevações por causa de uma tomada parcialmente excêntrico (fluxo misto parcialmente excêntrico) (ver figura 4).

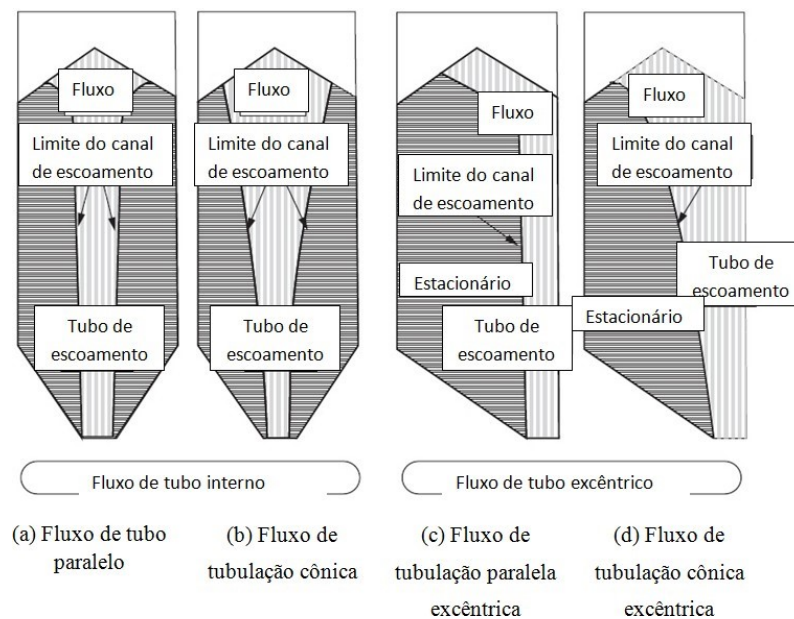


Figura 3. Formas de Fluxo de Tubo.

Fonte: Adaptado de Rotter, 2005.

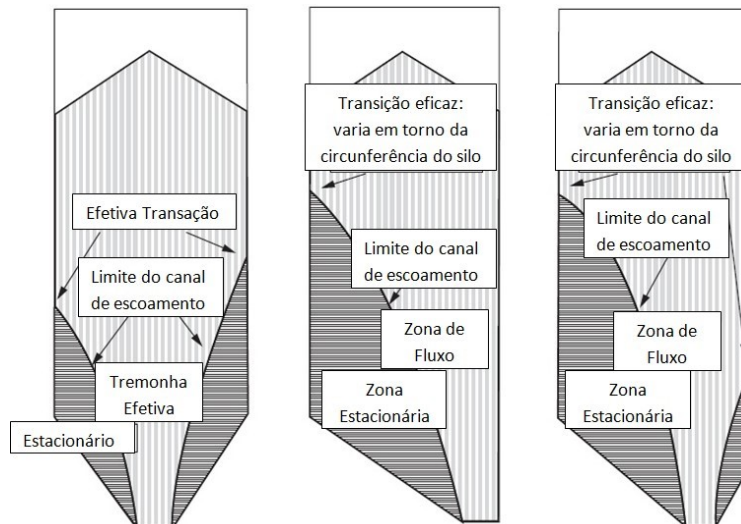


Figura 4. Formas de fluxo misto.

Fonte: Adaptado de Rotter, 2005.

Outro fenômeno que ocorre no descarregamento de silos é o chamado “rathole” no qual um ou mais canais de escoamento verticais se desenvolvem acima da abertura da tremonha e, uma vez esvaziado, mantém-se estável (Figura 5).



Figura 5. Rathole.

Fonte: Adaptado de Carson, 2008.

Algumas técnicas de análise de imagens podem ser empregadas para o estudo do fluxo em silos verticais, por exemplo, PIV (Particle Image Velocimetry) onde é possível determinar a velocidade das partículas através de imagens de alta resolução (Ostendorf & Schwedes, 2005).

3.4. ARQUEAMENTO E ESTADO DE TENSÃO EM SILOS

Materiais coesivos podem formar arcos estáveis acima do orifício de descarga que leva a interrupção do fluxo. Além disso, o fluxo particulado é muitas vezes descontínuo o que ocasiona os chamados canais de fluxo, onde grande volume do produto armazenado permanece estagnado (Zheng, 2016).

Durante o descarregamento do produto armazenado, vários tipos de obstrução podem ocorrer, como arcos ou formação de um tubo no centro do silo. O arco é um fenômeno que pode interromper completamente a saída do produto do silo. É um tipo de estrutura que bloqueia totalmente o orifício de descarga de silos verticais, prejudicando o escoamento do produto, este fenômeno é denominado arco coesivo ou arco mecânico (Camargo, 2011).

Admite-se que, se durante a descarga do produto, nenhuma dessas duas obstruções ocorrerem, um fluxo satisfatório acontecerá. Essas obstruções causam sérios danos aos silos e, principalmente, à tremonha, pois quando rompem, atua como um pistão, comprimindo o ar existente na tremonha, levando a danos na boca de descarga e paredes laterais (Deckers, 2014).

Se um arco coesivo figura 6 for formado em uma tremonha, uma força resultante decorrente do peso do produto armazenado é transferida para as paredes da tremonha, ao romper toda esta força é direcionada ao corpo do silo (Lobato, 2016).

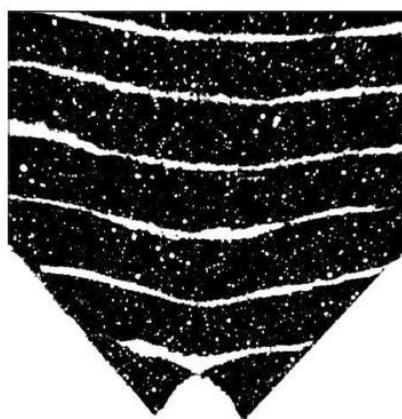


Figura 6. Arco coesivo.

Fonte: Adaptado de Carson, 2008.

A obstrução do tipo arco é, normalmente, formada logo acima da boca de descarga, fazendo com que o fluxo seja interrompido. Este tipo de obstrução ocorre por causa da força de coesão existente entre as partículas do produto armazenado. A formação em tubos é comum em silos com fluxo funil contendo produtos coesivos. Se a consolidação do produto aumenta com o tempo de armazenamento, aumenta o risco de formação deste tipo de obstrução de fluxo (Calil Júnior & Cheung, 2007).

Segundo Lopes Neto et. al. (2009) quando o produto é submetido a um estado de tensão de compressão durante determinado tempo, pode adquirir resistência e formar arcos coesivos. Porém, quando o orifício de descarga não é adequadamente projetado e o produto é submetido a longo tempo de armazenamento, esses arcos coesivos podem ocasionar a parada do escoamento do produto acarretando problemas estruturais, como deformações e flambagens locais nas paredes dos silos.

Lopes Neto et.al. (2009) ainda afirmam que dentre os principais obstáculos enfrentados pelas indústrias que manuseiam produtos pulverulentos, a formação de arcos coesivos capazes de interromper, parcial ou completamente, o descarregamento é um dos mais comuns.

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 a ação da gravidade em todas as camadas do produto armazenado, com isso maior será o nível de compactação de suas partículas, o que pode proporcionar a formação de arcos (Batista, 2009).

Geralmente, os testes de fluxo ou interrupção de fluxo são realizados em escala reduzida que, não gerando adversidade, a situação é convertida para prática. Os modelos reduzidos são muito utilizados devido ao baixo custo e permitem que se multipliquem todos os parâmetros que influenciam na descarga do silo, na situação real (Garnier, 1998).

Durante o período que o produto permanece armazenado no interior do silo, a ação atuante é devido ao seu peso próprio e a força gravitacional, de forma que o peso das camadas superpostas dividido pela área do silo fornece a tensão vertical atuante em cada camada (σ_v). Esta tensão aumenta com a profundidade do silo, conforme ilustrado na Figura 7. Também uma tensão horizontal (σ_h) atua no produto devido ao confinamento lateral ou restrição de deslocamento imposto pela parede do silo (Cheung & Calil, 2005).

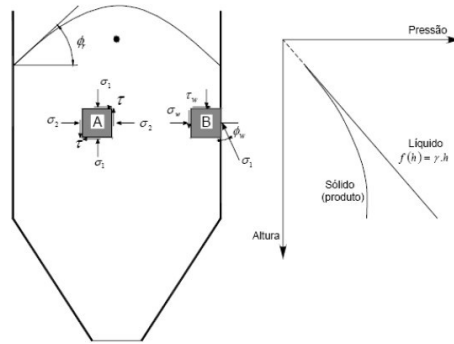


Figura 7. Estado de tensão no silo.

Fonte: Adaptado de Cheung & Calil (2005).

O produto granular dentro do silo está submetido a dois estados principais de tensões: o estado ativo (durante o carregamento e permanece até o momento anterior ao início da descarga, caracterizado pelo fato de que a tensão principal máxima, no eixo que passa pelo centro do silo, possui direção vertical, enquanto a tensão mínima é horizontal) e o estado passivo (a partir do momento em que o produto granular começa a fluir em direção ao orifício de descarga, nesta situação o produto se deforma plasticamente, se expande verticalmente e se comprime horizontalmente) (Madrona, 2008).

No descarregamento de silos, a tensão principal máxima σ_1 , acima da zona de transição é orientada na vertical, abaixo da zona de transição a tensão principal máxima σ_1 é orientada na horizontal (Figura 8). Iniciando o fluxo do produto armazenado na tremonha, este é comprimido na direção horizontal, mas pode dilatar verticalmente. Assim, na tremonha a tensão horizontal é maior do que a tensão vertical durante o descarregamento (Schulze, 2008).

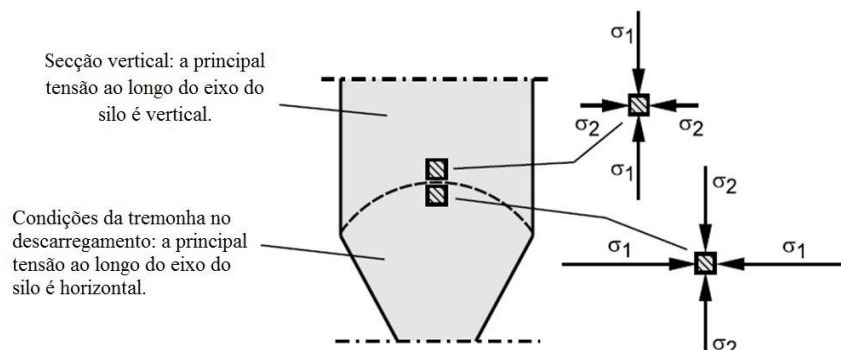
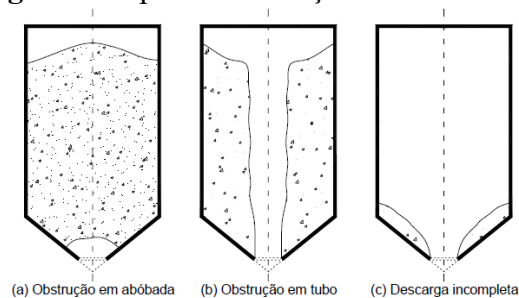


Figura 8. Tensões principais na zona de transição da tremonha.

Fonte: Adaptado de Schulze, 2008.

Para que o produto armazenado inicie seu fluxo no instante da abertura do orifício de descarga, a intensidade das tensões deve ser elevada o suficiente para atingir a superfície de deslizamento do produto. Caso contrário existirá problemas de obstrução do fluxo (Figura 9) que podem ser: formação de um arco estável próximo à saída da tremonha também conhecido como efeito arco, formação de um tubo de descarga (efeito tubo) com grande parte do produto estagnado ao redor desde e descarga incompleta do produto. (a) Obstrução em abóbada (b) Obstrução em tubo (c) Descarga incompleta (Madrona, 2008).

Figura 9. Tipos de obstruções de fluxo.



Fonte: Adaptado de Madrona (2008).

3.5. PROPRIEDADES FÍSICAS

3.5.1. TEOR DE UMIDADE

Teor de Umidade é a quantidade de água presente no grão o qual, por sua vez e em sua constituição, é composto por substâncias sólidas e água retida sob várias formas, geralmente expressa em porcentagem, em base úmida (b.u.) ou base seca (b.s.) (Silva, 2008). Influenciando diretamente operações de pós-colheita realizadas com o produto, por exemplo, secagem, transporte, armazenamento, assim como a qualidade final do produto. A maioria das propriedades físicas dos grãos se altera de acordo com a variação do seu teor de umidade (Silva et al., 2011).

3.5.2. GRANULOMETRIA

O estudo granulométrico dos produtos armazenáveis torna-se indispensável a várias atividades no armazenamento, como ao cálculo da potência de equipamentos para aeração, equipamentos transportadores e, principalmente, predizendo o tipo de fluxo que o produto apresenta (Costa, 2013). Produtos granulares são, via de regra, não coesivos, de fluxo livre e geralmente sem apresentar coesão (Calil Junior & Cheung, 2007).

De acordo com Calil Júnior (1984) os produtos podem ser classificados, conforme a dimensão do diâmetro de suas partículas conforme Tabela 2.

Tabela 2. Classificação dos produtos de acordo com a granulometria.

| D (mm) | Classificação |
|----------------------|-----------------------------------|
| $dp > 0,42$ | Granulares |
| $0,42 < dp < 0,149$ | Pulverulentos coesivos |
| $0,149 < dp < 0,079$ | Pulverulentos coesivos finos |
| $dp < 0,079$ | Pulverulentos coesivos extrafinos |

Fonte: Calil Júnior (1984)

3.6. PROPRIEDADES DE FLUXO

A principal dificuldade enfrentada pelas indústrias que trabalham com grãos e pulverulentos destaca-se a formação de arcos coesivos que impedem, parcial ou completamente, a descarga, que está intrinsecamente relacionada às geometrias dos silos e tremonhas bem como as propriedades físicas e de fluxo dos produtos sólidos e condições ambientais como: pressão atmosférica, temperatura e umidade relativa (Lopes Neto & Nascimento, 2013).

O conhecimento das propriedades de fluxo de materiais a granel é uma base fundamental para os processos de planejamento e dimensionamento de máquinas e equipamentos para manuseio de materiais a granel em quase todas as áreas da indústria (Mellmann et al., 2014).

Por meio do aparelho Jenike, pode-se fazer a determinação das propriedades de fluxo de produtos coesivos ou não. Com este equipamento pode ser determinada a tensão à qual o produto estará sujeito durante o armazenamento, como as condições de fluxo previstas para ocorrer no silo e determinar os seguintes parâmetros: peso específico

consolidado (γ), ângulo de atrito interno (ϕ), efetivo ângulo de atrito interno (δ) e ângulo de atrito do produto com a parede (ϕ_w), (Batista, 2009).

O aparelho de Jenike (Figura 10) é composto basicamente por uma base cilíndrica fixa em uma bancada, um anel de cisalhamento, uma tampa e um pendural com pesos para a aplicação de uma força normal de compressão na tampa da célula de cisalhamento, detalhada na Figura 11.

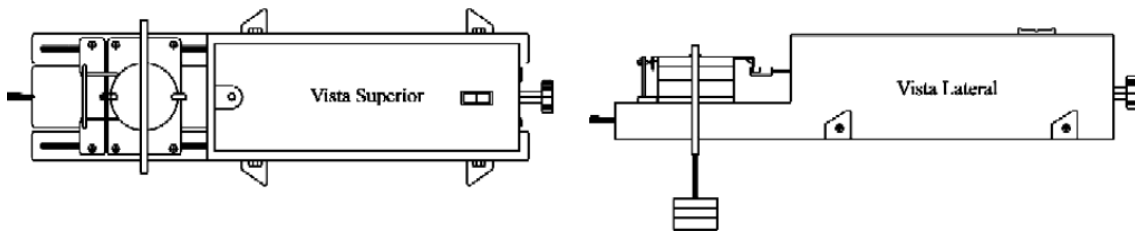


Figura 10. Esquema ilustrativo do aparelho de cisalhamento direto de Jenike.

Fonte: (Madrona, 2008)

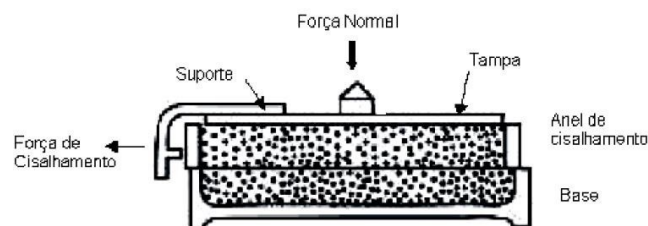


Figura 11. Esquema ilustrativo da célula de cisalhamento de Jenike.

Fonte: (Madrona, 2008)

Para a obtenção do estado de homogeneização e compactação da amostra se dá por meio de um procedimento denominado twist que consiste em aplicar uma tensão previamente conhecida na amostra com movimentos iterativos de vai e vem. Antes do cisalhamento propriamente dito, a amostra é pré-cisalhada com o mesmo valor de tensão na qual ela foi homogeneizada.

A determinação do ângulo de atrito do produto armazenado com a parede também pode ser obtida com o aparelho de Jenike. Neste caso, a base da célula de cisalhamento é substituída por uma amostra do material da parede que será avaliada (Figura 12).

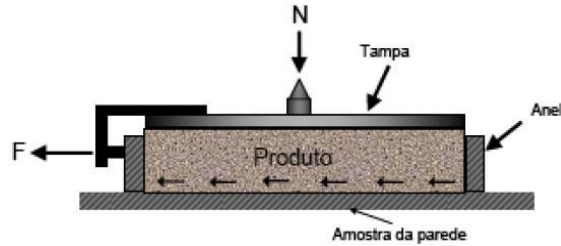


Figura 12. Determinação do atrito com a parede na célula de Jenike.

Fonte: Lopes Neto et al. (2007).

3.6.1 PESO ESPECÍFICO CONSOLIDADO (γ)

Peso Específico Consolidado é a quantidade de massa de partículas sólidas divididas pelo seu volume total e multiplicado pela aceleração da gravidade ($g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$) (Garbazza, 2011). Peso Específico Consolidado é um parâmetro utilizado na determinação do fluxo em silos, não havendo relação linear direta entre fluxo e densidade (Batista, 2009).

3.6.2 .ÂNGULO DE ATRITO INTERNO (Φ) E EFETIVO ÂNGULO DE ATRITO INTERNO (δ)

Em vários produtos, após certa tensão de consolidação ocorre uma força intensa entre suas partículas (Freire, 2004). O círculo de Mohr é uma representação geométrica de uma transformação de coordenadas para identificar as tensões principais, sendo utilizados dois círculos (Koynov et al., 2015).

Com a construção de círculos de Mohr, plotam-se retas que tangenciam todos os círculos chamados lugar geométrico de deslizamento do produto (YL). O ângulo de inclinação dessa reta para produtos de fluxo livre passa pela origem, e é então chamado ângulo de atrito interno do produto (ϕ) mas, não sendo o produto de fluxo livre, a reta construída na forma descrita não passa pela origem. Neste caso, a ordenada na qual essa reta corta o eixo vertical (eixo das ordenadas) é denominada coesão (C). O ângulo de inclinação dessa reta é, ainda, o ângulo de atrito interno, mas a reta que passa pela origem e tangencia o círculo de Mohr definido pela maior e menor tensão principal é denominada, lugar geométrico efetivo de deslizamento (EYL) e o respectivo ângulo de inclinação é denominado efetivo ângulo de atrito interno (δ), como é observado na (Figura 13), (Batista, 2009).

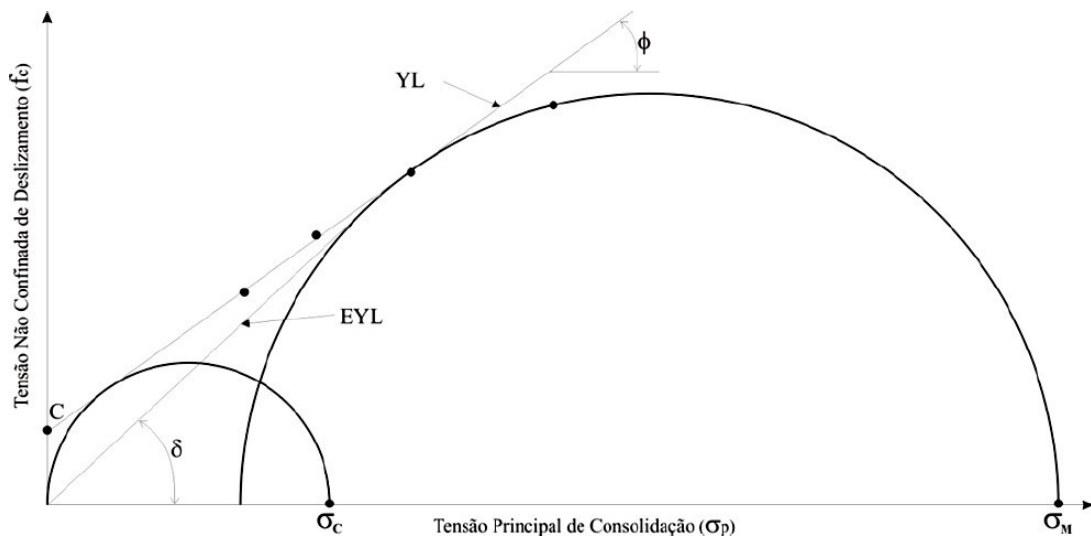


Figura 13. Lugares Geométricos.

Fonte: Adaptado de Lopes Neto (2009)

3.6.3 .ÂNGULO DE ATRITO DO PRODUTO COM A PAREDE (Φ_w)

Ângulo de atrito do produto com a parede é a capacidade do produto, previamente em repouso, fluir em relação ao material da parede do recipiente (Bian et al., 2015).

Benink (1989) apud Freire (2004), afirma que o atrito entre o produto e a parede do silo ocorre quando este desliza ao longo da parede. A relação entre a tensão de cisalhamento e a tensão normal a parede formará uma reta que definirá o lugar geométrico de deslizamento com a parede. Sua inclinação será o ângulo de atrito do produto com o material da parede do silo.

Para determinação das características geométricas de silos, tremonhas e dimensões do orifício de descarga, deve-se direcionar especial atenção ao ângulo de atrito com a parede que representa o esforço de adesão entre o produto armazenado e a superfície do material da parede (Costa, 2013).

3.6.4. COESÃO (C)

A coesão é a tensão de cisalhamento sob a tensão normal nula (Garbazza, 2011). Fatores que contribuem para a coesão é a presença de pó, que é definida pelo ensaio granulométrico (Calil Junior & Cheung, 2007).

3.6.5. FUNÇÃO FLUXO (FF)

Esta propriedade determina o comportamento reológico do material armazenado para diferentes pressões de compactação sendo, assim, considerada medida de fluidez (Amorós et al., 2002).

Para determinação da função fluxo (FF) é feita uma relação direta entre pressão de consolidação (σ_M) e a resistência inconfinaada (σ_c), como expressão a (Equação 1) e a (Figura 14).

$$FF = \frac{\sigma_M}{\sigma_c} \quad \text{Eq. 1}$$

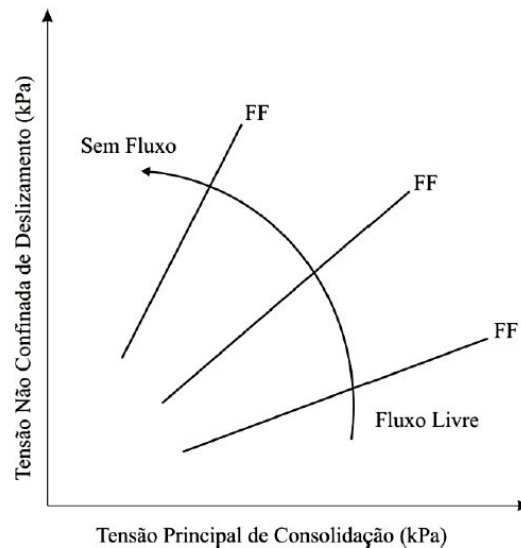


Figura 14. Função Fluxo: “Fluxo Livre” versus “Sem Fluxo”.

Fonte: Adaptado de Lopes Neto et al. (2007)

Observa-se que a escoabilidade do produto é inversamente proporcional ao ângulo que a reta FF forma com a horizontal. Outro parâmetro importante é o Índice de fluxo (ff) o qual é definido como o inverso da inclinação de FF (JENIKE, 1964) e pode variar de uma condição de ausência de fluxo até outra caracterizada como de fluxo livre. Jenike usou o ff para classificar os produtos armazenáveis quanto à sua escoabilidade com altos valores representando uma condição de fluxo fácil. Tabela 3.

Tabela 3. Classificação da capacidade de fluxo dos produtos armazenáveis segundo Jenike (1964).

| ff | Tipo de Fluxo |
|---------------|----------------|
| $ff < 1$ | Sem fluxo |
| $1 < ff < 2$ | Muito coesivos |
| $2 < ff < 4$ | Coesivos |
| $4 < ff < 10$ | Fácil |
| $ff > 10$ | Livre |

Fonte: Jenike (1964).

3.7.INSERTS

Estudos de inserts em silos verticais têm sido descritos na literatura há mais de 30 anos, o insert de cone invertido pode ser usado para minimizar a influência de mecanismos de segregação, que podem dificultar o fluxo do produto armazenado (Arnold, 2013)

Os inserts estão entre os meios utilizados para influenciar benéficamente o padrão de fluxo em silos verticais, alterando este padrão de fluxo alteram também as forças atuantes ao longo do corpo do silo e principalmente na tremonha (Schweddes & Strusch, 1998).

A utilização de inserts para alterar o padrão de fluxo em silos verticais, devido à modificação do estado de tensão em um silo, mudando o estado de tensão do produto armazenado conseqüentemente seu padrão de fluxo, vem se tornando comum nas práticas atuais (Wojcik et. al., 2012).

Johanson & Kleysteuber (1996), foram os primeiros a proporem a utilização de inserts para melhorar os padrões de fluxo do produto armazenado durante o descarregamento, os estudos com inserts geralmente tratavam de cargas atuantes na tremonha, provocadas por suas utilizações, seus estudos mostraram que ao utilizar um cone invertido localizado entre o orifício de descarga e a zona de transição da tremonha, reduziram significativamente as zonas de estagnação durante o fluxo do produto armazenado.

A aplicação de inserts do tipo cone invertido e cone duplo, não influenciam apenas o fluxo do produto armazenado em um silo, mas também eliminam resultados desvantajosos do impacto dinâmico de sobrepressão em seu interior, diminui o efeito de segregação de partículas, e durante o carregamento muda a direção do fluxo de partículas por um processo semelhante ao de “mistura”, onde a direção das partículas são alteradas ao bater na superfície superior do insert utilizado (Matuszek & Tukiendorf, 2008).

Resultados mostram que a colocação de um cone duplo em um silo vertical altera os padrões de fluxo do produto armazenado, convertendo um fluxo de funil em um fluxo de massa, este efeito está relacionado com a inclinação da tremonha, quanto menor o ângulo de inclinação da tremonha com a horizontal, menor será o efeito deste tipo de insert na alteração do tipo de fluxo do sólido armazenado, quando esta inclinação é menor o efeito do insert se restringe a apenas aumentar a zona de movimentação de partículas durante o descarregamento, ou seja, diminui as zonas de estagnação (Ding et.al.,2015).

Segundo Carson (2008), uma possibilidade para evitar problemas relacionados com o fluxo de funil é promover o fluxo de massa por meio do retorno da tremonha com inserts específicos. Um invólucro, quando corretamente projetado e posicionado, pode reduzir as zonas estagnadas em um silo com uma tremonha relativamente rasa, levando a um patamar de fluxo próximo ao fluxo de massa.

Uma das configurações de insert mais comum é um cone invertido ou pirâmide como mostrado na Figura 15. Infelizmente, estudos têm demonstrado que tais inserts possuem eficácia limitada e as cargas que atuam sobre eles são geralmente extremamente elevadas. Os suportes necessários para resistir a estas cargas frequentemente proporcionam um maior impedimento do fluxo do que o efeito benéfico (Carson, 2008).

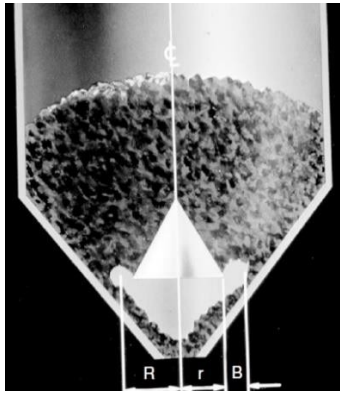


Figura 15. Insert cone invertido.

Fonte: Adaptado (Carson, 2008).

A utilização de inserts altera a distribuição de pressão nas paredes dos silos em sua proximidade, estas cargas extremamente elevadas na estrutura do silo, advindas das inserções, podem provocar diversos problemas em sua estrutura, podendo acarretar no tombamento de silos verticais (Carson, 2014).

Ao utilizar inserts em silos verticais problemas de fluxo podem ser solucionados, casos demonstram a conversão de tipos de fluxo, entre funil e mássico, entretanto, a aplicação desta ferramenta altera as cargas atuantes na zona de transição da tremonha, direcionando-as a parede do silo, desta forma melhorando o fluxo (Ding et.al., 2003)

As inserções em silos são geralmente colocadas dentro da tremonha para melhorar o padrão de fluxo do produto armazenado, se for bem escolhida e posicionada, pode reduzir significativamente as zonas estagnadas em toda a massa de sólido armazenado, levando a um padrão de fluxo que se aproxima do fluxo de massa. (Hartl et al., 2008).

Os tipos comuns de insert utilizados incluem: cone duplo (a), cone em cone (b), cone em cone duplo (c) e cone invertido (d) (Figura 16), (Wójcik et. al., 2012).

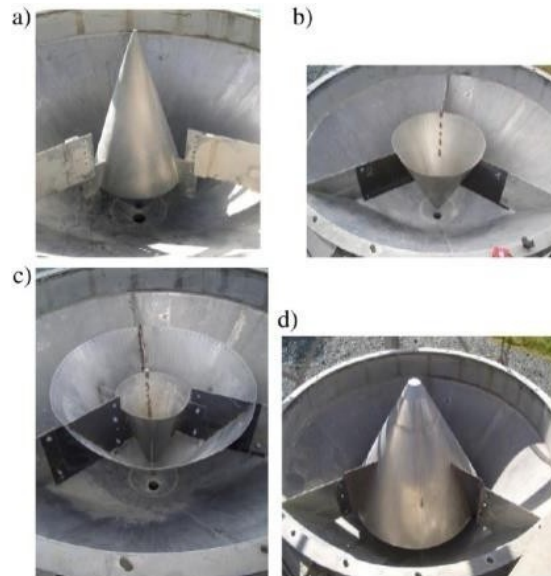


Figura 16. Principais tipos de inserts.

Fonte: Adaptado (Wójcik et. al., 2012).

Aplicação de inserts em silos verticais proporciona, entre outras, duas ações no produto armazenado: o rompimento do estado de tensão na zona de transição da tremonha, facilitando o fluxo do produto e distribuição uniforme das partículas no carregamento, uma vez que o insert atua como um amortecedor e distribuidor das partículas antes de chegarem ao orifício de descarga, podendo evitar a formação de arcos coesivos e mecânicos (Strusch, 1996).

Vários estudos relacionados à inserts vêm sendo desenvolvidos ao longo do tempo, estas pesquisas geralmente são realizadas em modelos reduzidos, em silos protótipos, os resultados obtidos podem ser aplicados em situações reais, com silos em dimensões reais (Johanson and Kleysteuber, 1966).

O posicionamento do insert influencia diretamente em sua funcionalidade, a teoria de Johanson é a mais utilizada para estabelecer a localização ideal do insert de cone duplo no silo, localizado na zona de transição do silo-tremonha. Ao posicionar o insert acima e abaixo do posicionamento ideal mudanças no fluxo podem ocorrer, como a total ineficiência do insert, não alterando o tipo de fluxo, e a obstrução do orifício de descarga (Hsiau et. al., 2013).

A influência de inserts no fluxo de sólidos armazenados tem sido tratada como um problema, que seria responsável pela obstrução do orifício de descarga dificultando assim o fluxo, entretanto, pelo contrário, em aplicações experimentais eles se transformam em facilitadores, promovendo resultados positivos quanto a modificação de padrão de fluxo, estes resultados podem parecer um tanto quanto contra intuitivo. (López et.al., 2014).

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. LOCALIZAÇÃO DO EXPERIMENTO

O experimento foi conduzido no Laboratório de Beneficiamento de Sementes, as propriedades de fluxo, a granulometria e o teor de umidade foram determinados no Laboratório de Construções Rurais e Ambiente- LACRA, ambos na Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Campina Grande, campus de Campina Grande - PB, no período de junho a novembro de 2016.

4.2. PRODUTO UTILIZADO

Foi utilizada durante o experimento uma ração avícola, destinada a fase de postura, com sua composição detalhada na Tabela 4.

Tabela 4. Composição da ração avícola.

| Igrediente | (%) |
|---------------------------|-------|
| Milho Triturado | 57,4 |
| Farelo de Soja | 28,5 |
| Óleo de Soja | 4,542 |
| Calcario | 7,202 |
| Fosfato Bicálcico | 1,19 |
| Sal Comum | 0,327 |
| DI-Metionina | 0,411 |
| L-Lisina | 0,319 |
| L-Treonina | 0,072 |
| Cloreto De Colina | 0,07 |
| Premix Mineral | 0,05 |
| Premix Vitaminico Postura | 0,025 |

4.3. METODOLOGIA

Para analisar o comportamento do fluxo de ração, adotou-se a metade de um silo cilíndrico, ou seja, no semicírculo indicado na Figura 18. Para fechar o semicírculo foi utilizada uma chapa de vidro transparente de 8mm de espessura. As dimensões do corpo do silo são de 1,1m de altura e 0,45m de diâmetro, representando um silo com relação H/D igual a 2,4. Utilizando também uma tremonha com 0,5m de altura e inclinação de 69° com a horizontal, com 0,07m de orifício de descarga, totalizando uma capacidade de armazenamento de 0,1m³ (Figura 17).

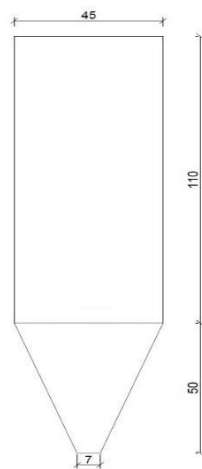


Figura 17. Detalhamento das dimensões do silo.

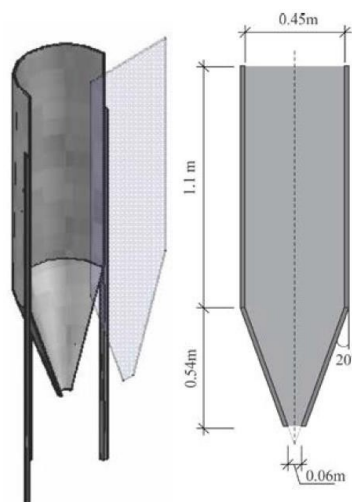


Figura 18. Modelo do Silo.

Fonte: Adaptado de Lopes Neto et.al. (2013).

Para o carregamento do silo foi utilizado um tronco de cone com orifício de descarga de 19 cm, que foi adaptado a uma tábua de madeira, 5 cm acima do corpo do silo, desta forma o carregamento era concêntrico e uniforme (Figura 12).



Figura 19. Sistema de carregamento do silo.

Para solucionar os problemas de fluxo na ração avícola, foram utilizados quatro tipos de inserts, dois cones invertidos e dois cones duplo. O dimensionamento está detalhado na Tabela 6, e ilustrado na Figura 20.

Tabela 6. Dimensões dos inserts utilizados.

| | Cone Superior | | Cone Inferior | |
|----------|---------------|----------|---------------|----------|
| | RT (%) | hxb (cm) | RT (%) | hxb (cm) |
| Insert 1 | 20 | 10x9 | - | - |
| Insert 2 | 30 | 15x13,5 | - | - |
| Insert 3 | 20 | 10x9 | - | 15x9 |
| Insert 4 | 30 | 15x13,5 | - | 10x13,5 |

RT – Relação coma Tremonha; h – altura; b – base.

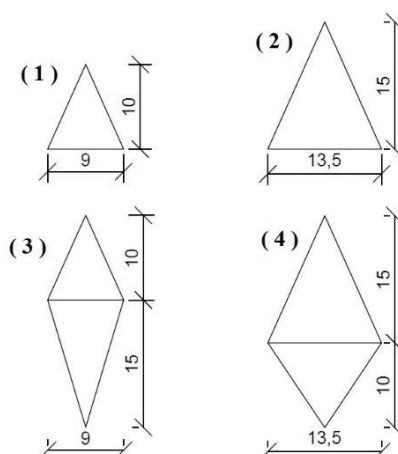


Figura 20. Detalhamento dos inserts.

Todas as dimensões dos inserts foram relacionadas com as dimensões da tremonha (Figura 21), 20 e 30%, para o insert 1 e 2, respectivamente.

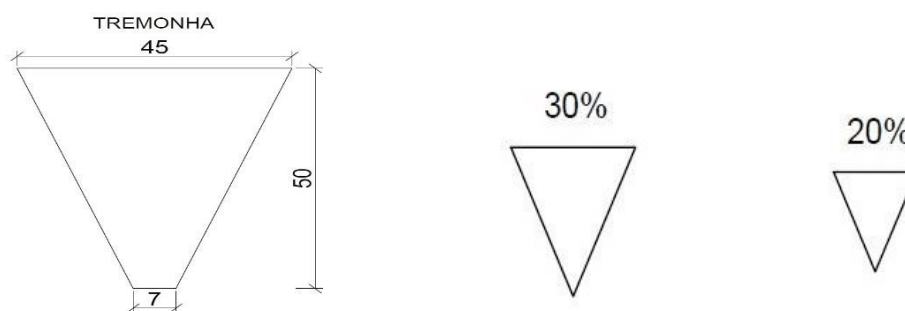


Figura 21. Representação da proporcionalidade dos inserts com a tremonha.

As três diferentes alturas utilizadas nesta pesquisa são: 35, 45 e 55 cm em relação ao orifício de descarga (Figura 22), foram adotados tendo como base a zona de transição entre o corpo do silo e a tremonha, sendo a Altura 1 de 55cm, (10% da altura da tremonha acima da zona de transição); Altura 2, 45cm (10% da altura da tremonha abaixo da zona de transição); Altura 3 de 35cm (30% da altura da tremonha abaixo da zona de transição), todas as alturas aplicadas podem ser visualizadas na Figura 23.

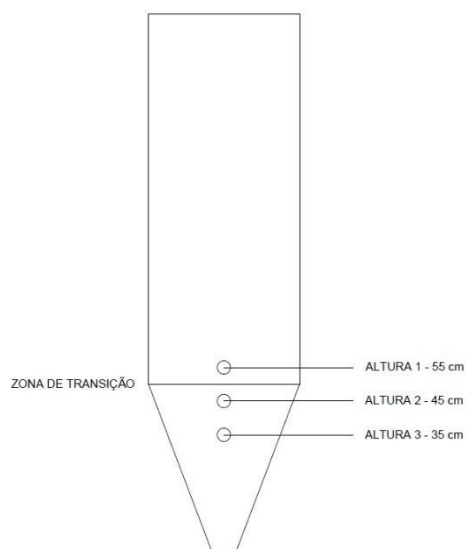


Figura 22. Detalhamento das alturas.

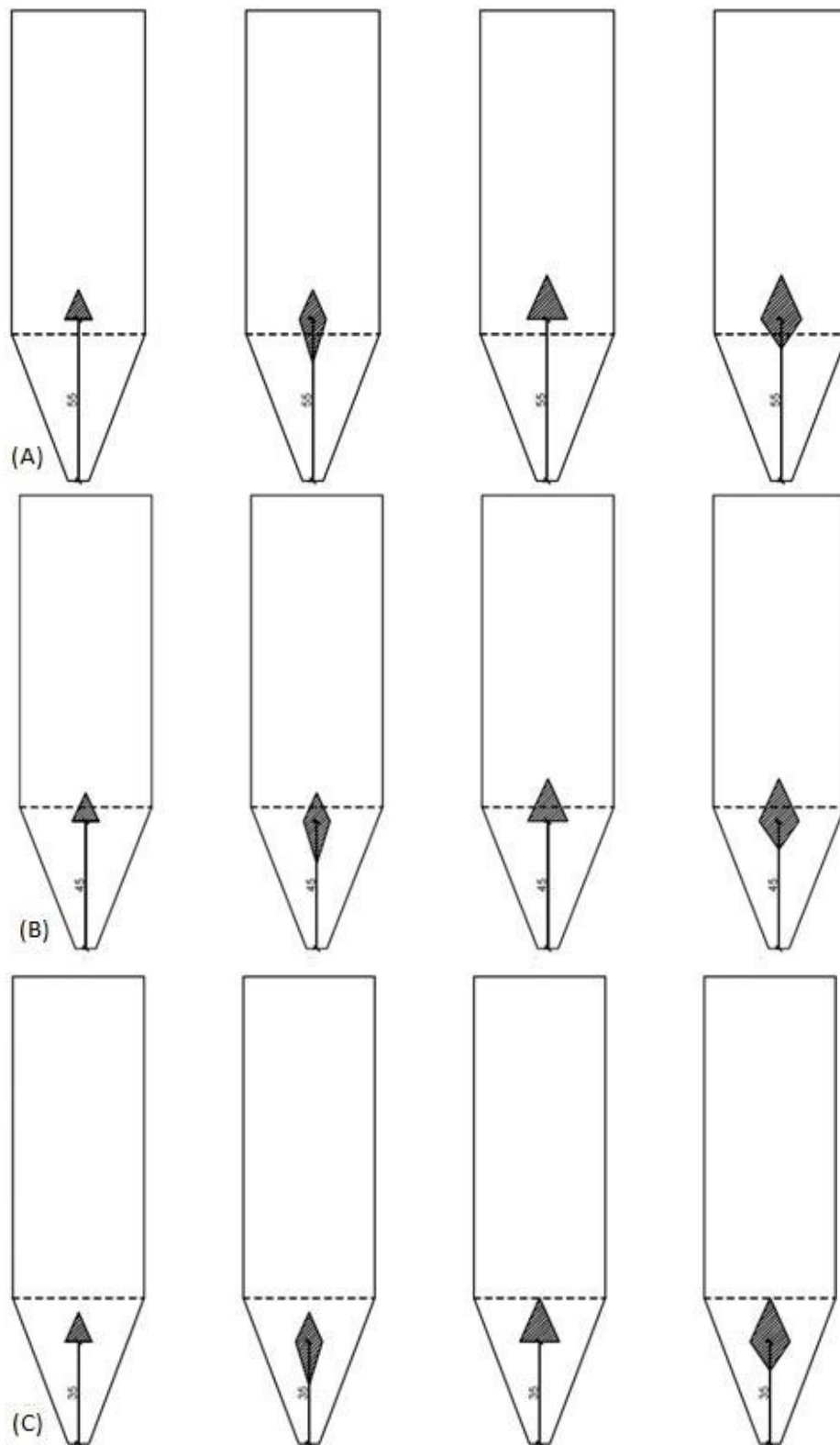


Figura 23. Posicionamento dos inserts, (A) Altura 1 – 55cm, (B) Altura 2 – 45cm, (C) Altura 3 – 35cm.

4.3.1 DETERMINAÇÃO DA VAZÃO MÁSSICA

Todos os ensaios foram realizados em triplicata, onde após o carregamento foi estabelecido um tempo de consolidação de 30 minutos, para todos os ensaios realizados. A vazão, por sua vez, foi determinada levando-se em consideração o volume do produto descarregado por unidade de tempo.

Para obtenção da vazão experimental foi utilizada uma balança confeccionada no LaCRA (Laboratório de Construções Rurais e Ambientação). Esta foi modificada para que sua capacidade fosse dobrada chegando a suportar uma carga máxima de 200,00 Kg. Esta apresenta dimensões de 75,0 x 75,0 cm (Figura 24), acoplada a um sistema de aquisição de dados, para leitura instantânea da vazão mássica.

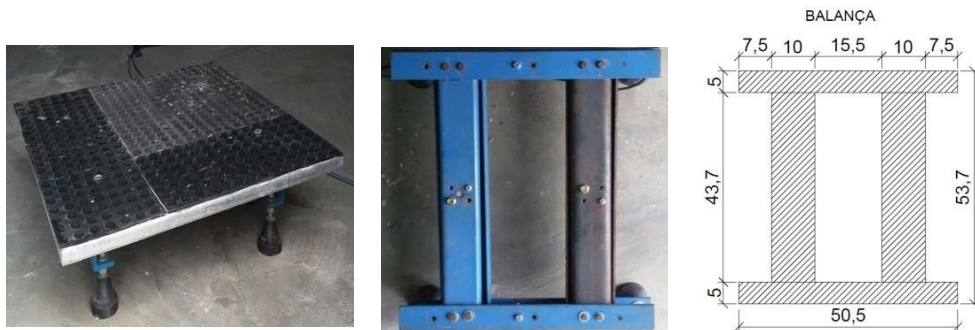


Figura 24. Balança.

A balança possui configuração em II onde foram instaladas duas células de carga com capacidade de 100 Kg equidistantes de modo que o peso do silo carregado fosse igualmente distribuído entre elas, em esquema estão todas as dimensões da balança utilizada (Figura 25).

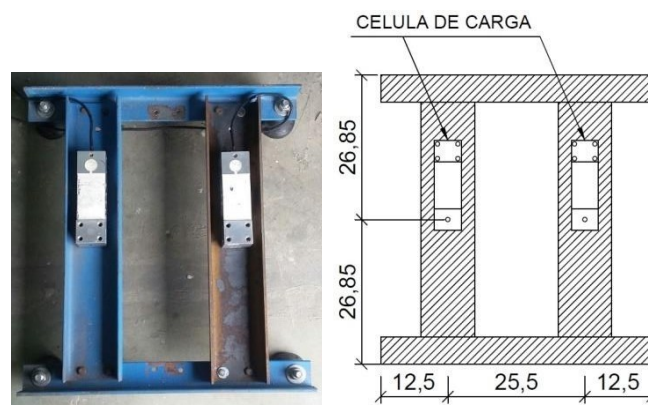


Figura 25. Detalhamento do posicionamento das células de carga.

Para aquisição de dados foi utilizado o Spider 8 do fabricante HBM (Figura 26), sendo programado utilizando o Catman versão 4.5, a qual foi configurada para salvar dados numa frequência de 2 Hz, e com os dados coletados foram gerados gráficos utilizando o Excel 2007.



Figura 26. Equipamento de aquisição de dados Spider 8.

Durante todos os ensaios foi verificado o posicionamento do silo para exata distribuição de cargas entre as células, assim como se o mesmo encontrava-se em nível adequado (Figura 27), o que poderia interferir diretamente o fluxo do produto armazenado.



Figura 27. Nível de bolha utilizado para nivelar o silo.

4.4. PROPRIEDADES DE FLUXO

Para determinação das propriedades de fluxo foi adotada a metodologia recomendada pela ASTM (2013) utilizando o aparelho “Jenike Shear Cell” (Figura 28), determinando as propriedades de fluxo através dos seguintes parâmetros: peso específico consolidado (γ), ângulo de atrito interno (ϕ), efetivo ângulo de atrito interno (δ) e ângulo de atrito do produto com a parede (ϕ_w).



Figura 28. Jenike Shear Cell, utilizado para determinação das propriedades de fluxo.

As equações utilizadas para obtenção dos pontos para a construção dos círculos de Mohr onde serão mensuradas as tensões normal de consolidação e inconfina, estão representadas abaixo:

$$\gamma = \frac{W_t - (W_b + W_r + W_L)}{V_t} \quad \text{Eq. (1)}$$

$$\xi = \frac{\tau_p}{\tau_p} \quad \text{Eq. (2)}$$

$$\tau_p = \frac{S_p}{A} g \quad \text{Eq. (3)}$$

$$\tau = \frac{S_s}{A} g \quad \text{Eq. (4)}$$

$$\sigma_p = \left(\frac{H + W + W + W + \gamma V}{A} \right) g \quad \text{Eq. (5)}$$

$$\tau = \frac{\sum \tau_p}{n} \quad \text{Eq. (6)}$$

$$\sigma = \left(\frac{H + W + W + W + \rho V}{s \quad r \quad L} \right) g \quad \text{Eq. (7)}$$

$$\sigma = \frac{\sum \sigma_p}{A}$$

br)

E
q.
(
7
)

p
 $\frac{1}{-}$
E
q.
(8
)

n

Para a determinação do ângulo de atrito com a parede foram utilizadas as seguintes equações:

$$O = \frac{(W_{wt} + W_w - W_m + H)}{A} g \quad \text{Eq. (9)}$$

$$\tau = \frac{S_w}{A} g \quad \text{Eq. (10)}$$

$$\varphi = \arctan \frac{\tau_w}{\sigma_w} \quad \text{Eq. (11)}$$

4.5. TEOR DE UMIDADE

O teor de umidade foi determinado através do método padrão de estufa, com circulação de ar à 105 ± 3 °C, durante 24 horas (Brasil, 2009).

4.6. GRANULOMETRIA

A granulometria foi determinada por um agitador mecânico de peneiras (Figura 29), utilizando 500 gramas de produto com uma frequência do aparelho de 10 Hz, durante 5 minutos e peneiras de padrão ABNT (2,8; 1,00; 0,59; 0,297; 0,149 mm) em ordem decrescente de malha, pesando ao final o material que permaneceu em cada peneira determinando, assim, sua percentagem.



Figura 29. Agitador mecânico de peneiras.

5.RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. PROPRIEDADES FÍSICAS E DE FLUXO

Na Tabela 4 encontram-se os resultados das propriedades de fluxo do produto analisado. O peso específico consolidado da ração avícola foi de 8121,34 e 8429,79N/m³, para os limites inferior e superior, respectivamente. Para os limites inferior e superior do ângulo de atrito interno, os valores encontrados foram de 25,0 e 30,0 respectivamente, enquanto o efetivo ângulo de atrito interno ficou entre 29,0 e 34,00. A coesão média do produto foi de 710 Pa,

Tabela 5. Caracterização das propriedades de fluxo.

| Produto | γ | | Φ_e | | Φ_i | | Φ_w | | C | ff |
|---------------|----------|---------|----------|-----|----------|-----|----------|-----|-----|------|
| | inf | sup | inf | sup | inf | sup | inf | sup | | |
| Ração Avícola | 8121,34 | 8429,79 | 29 | 34 | 25 | 30 | 21 | 23 | 710 | 1,92 |

γ = peso específico consolidado (N/m³); Φ_i = ângulo de atrito interno (°); Φ_e = efetivo ângulo de atrito interno (°); Φ_w = ângulo de atrito interno com parede de aço rugoso (°); C = coesão (Pa); ff = Índice de fluxo de Jenike; inf; sup = limite inferior e superior, respectivamente.

Na Figura 30 se encontra a curva granulométrica do produto analisado sendo possível perceber que a ração avícola apresenta distribuição granulométrica desuniforme, partículas são retidas em todas as peneiras da série utilizada, o produto é classificado segundo Jenike (1964), como pulverulento coesivo, durante toda a fase experimental foi registrado um teor de umidade de 9,2%.

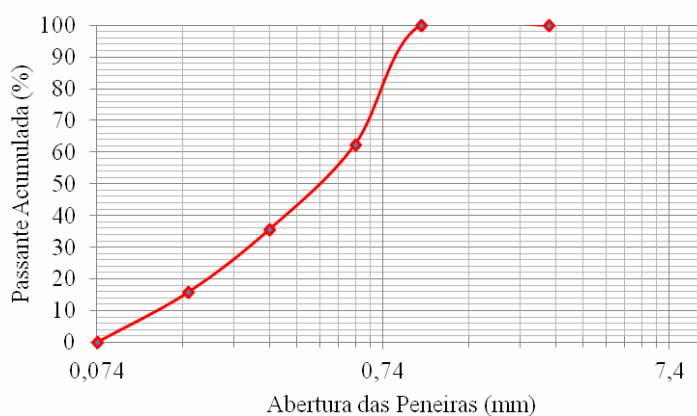


Figura 30. Análise granulométrica da ração avícola.

5.2. ANALISE DA VAZÃO MÁSSICA

Na tabela 5 encontram-se os resultados obtidos para vazão experimental de todos os ensaios realizados, é possível notar uma vazão média de 0,692 Kg/s, observando que a introdução dos inserts estudados, e suas respectivas alturas influenciaram na vazão experimental.

Tabela 6. Determinação do fluxo experimental.

| | | Tempo de Descarregamento (s) | Produto Armazenado (Kg) | Vazão experimental (Kg/s) |
|---------|----------|------------------------------|-------------------------|---------------------------|
| SI | - | 121 | 79,342 | 0,656±0,073 |
| | Altura 1 | 116 | 79,265 | 0,683±0,027 |
| I 20% | Altura 2 | 112 | 78,754 | 0,703±0,018 |
| | Altura 3 | 113 | 80,418 | 0,712±0,036 |
| | Altura 1 | 111 | 78,875 | 0,711±0,021 |
| I 30% | Altura 2 | 110 | 79,845 | 0,726±0,014 |
| | Altura 3 | 111 | 76,584 | 0,690±0,023 |
| | Altura 1 | 115 | 78,652 | 0,684±0,042 |
| ICD 20% | Altura 2 | 116 | 77,658 | 0,669±0,037 |
| | Altura 3 | 110 | 76,328 | 0,694±0,041 |
| | Altura 1 | 109 | 79,631 | 0,731±0,034 |
| ICD 30% | Altura 2 | 115 | 79,248 | 0,689±0,022 |
| | Altura 3 | 112 | 77,189 | 0,689±0,018 |
| | Média | 113,769 | 78,599 | 0,695±0,041 |

SI – Sem Insert; I 20% - Insert cone invertido de 20%; I 30% - Insert cone invertido de 30%; ICD 20% - Insert cone duplo de 20%; ICD 30% - Insert cone duplo de 30%.

Observando o tempo de descarregamento, com a aplicação dos inserts este tempo foi reduzido em todas as situações estudadas, justificado pela modificação do tipo de fluxo durante grande parte do descarregamento, onde as zonas de estagnação foram alteradas, para um fluxo total da massa de produto armazenado em direção ao orifício de descarga.

O descarregamento do silo sem utilização de insert foi dificultado pela presença de um fluxo misto, momentos de fluxo de massa e de funil, provocado pela desuniformidade das partículas da ração avícola, o que provoca o fenômeno da segregação. Palma (2005) em estudo afirma que este tipo de problema no fluxo do produto armazenado normalmente ocorre quando existe grande variação nas dimensões das partículas, onde as partículas maiores acumulam-se perto das paredes do silo,

enquanto que as partículas menores acumulam-se próximas ao centro do silo. No caso as partículas menores (localizadas no centro) seriam descarregadas primeiras, enquanto que as maiores somente no final, causando problemas de heterogeneidade na descarga.

Na figura 31 observam-se os perfis da vazão de descarregamento médio para todos os testes realizados, sendo Tempo de Descarregamento (s) x Produto Armazenado (Kg).

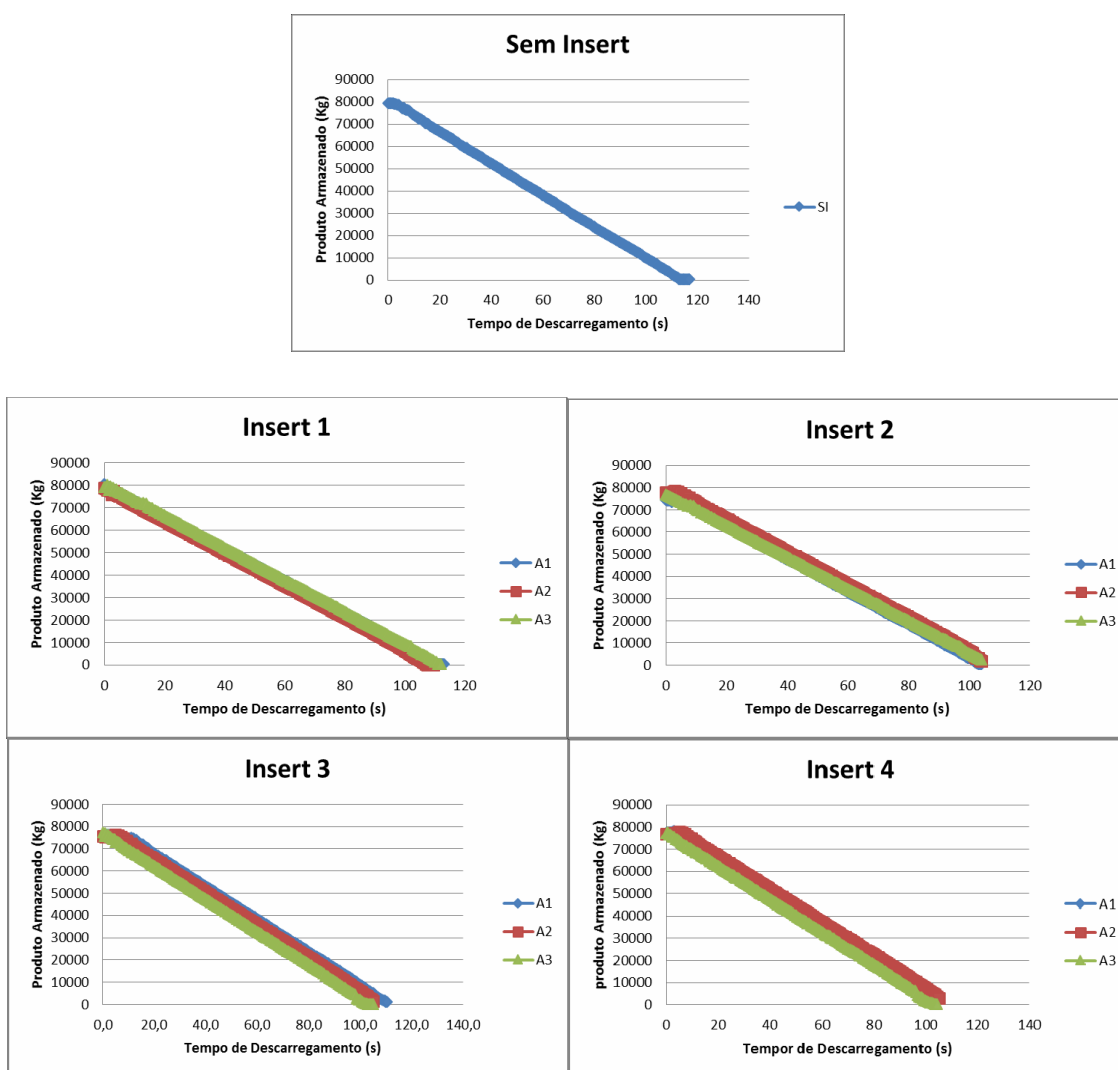


Figura 31. Vazão de descarregamento.

Observa-se que para a vazão mássica, os resultados obtidos foram semelhantes a estudos realizados por López et. al. (2014), que concluíram que a geometria do insert estudo não influencia tanto na vazão mássica, quanto a altura que estes são dispostos.

A utilização de inserts não modificou o perfil linear de descarregamento, o que já se era esperado, afinal, o descarregamento do produto armazenado sem insert foi dado por um padrão de fluxo misto sem interrupções, alternando apenas o tipo de fluxo entre massa e funil. Com os inserts o padrão de fluxo em todas as alturas foi mássico, com pequenas tendências a formação de um canal de fluxo até a base dos inserts, sempre com uma vazão de descarregamento constante.

Na figura 32, encontram-se a velocidade de descarregamento para todas as situações ensaiadas, sendo 0 cm o ponto localizado no orifício de descarga .

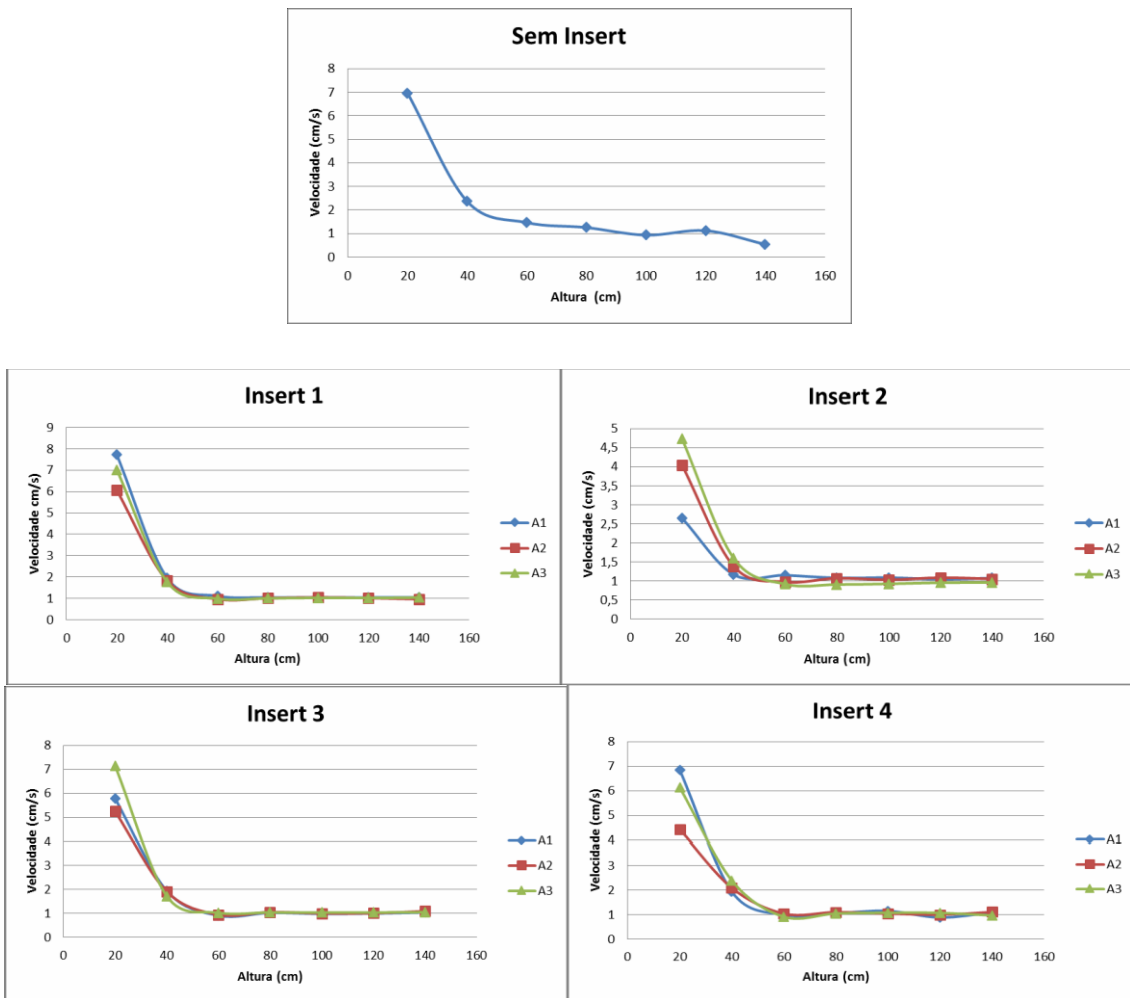


Figura 32. Velocidade de Descarregamento.

A variação da velocidade no início do descarregamento do silo sem insert, ocorreu devido a constante mudança no tipo de fluxo, sendo alternado entre fluxo de funil e fluxo de massa. Para as repetições com os inserts, a altura de posicionamento

influenciou na velocidade de descarregamento para os inserts 2 e 4. Sendo o comportamento semelhante para todas situações com inserts estudadas, onde a velocidade permaneceu constante no início do descarregamento havendo um acréscimo de velocidade pelo alívio de carga no final do descarregamento.

5.3 ANÁLISE DOS INSERTS NO FLUXO

5.3.1 SEM UTILIZAÇÃO DE INSERT

A figura 33 representa o fluxo do produto armazenado sem utilização de insert.

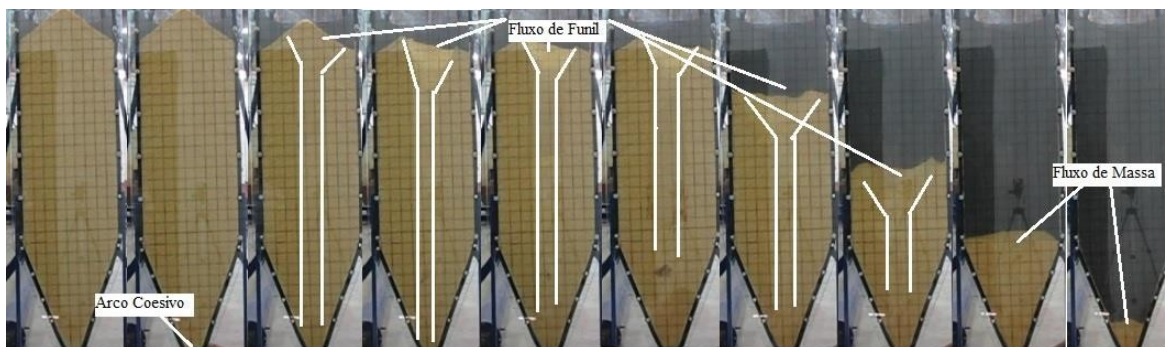


Figura 33. Descarregamento sem insert.

Observa-se, na Figura 24, que no início do descarregamento do produto houve a formação de um arco coesivo. Após ruptura do arco, o descarregamento apresentou a formação de um canal de fluxo vertical central propagando-se no sentido ascendente, até atingir o talude. Foi observado durante os testes, que no decorrer do descarregamento ocorreu à predominância da formação do efeito tubo, que foram seguidas por desmoronamentos do canal de fluxo, até atingir a zona de transição corpo do silo-tremonha, caracterizando assim, um descarregamento do tipo funil. Deve-se atentar a força de empuxo exercida na parede do silo, sempre que os desmoronamentos aconteciam.

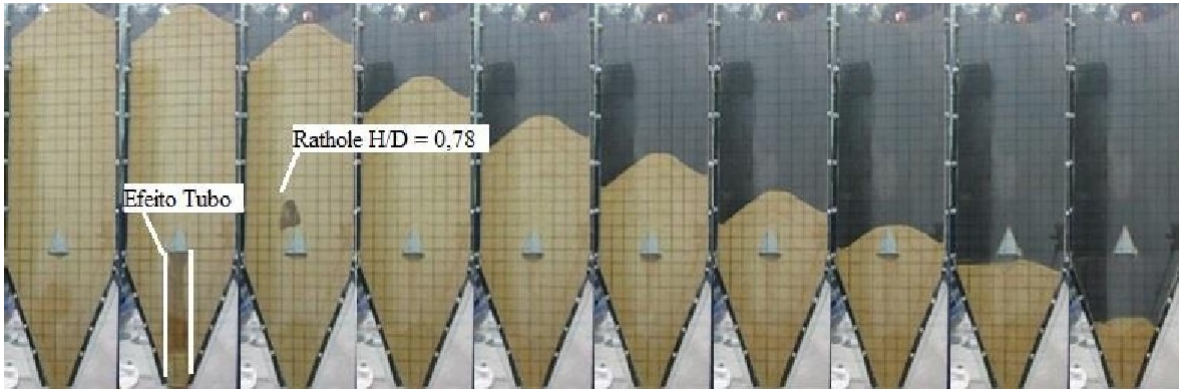
Bandeira (1997) em trabalho realizado para análise de fluxo, utilizando dois tipos de ração avícola constatou a formação inicial de arco coesivo em todas as situações estudadas. Enfatizando que o teor de gordura da ração influenciou diretamente no fluxo da ração e conseqüentemente na formação de arco.

Durante a fase pré-experimental foram realizados testes lavando o silo para repetição do ensaio, foi constatado que a gordura presente na ração avícola que poderia diminuir a rugosidade do corpo do silo e conseqüentemente facilitar o fluxo, não proporcionou tal efeito, sendo mantido o tipo de fluxo e vazão idênticos.

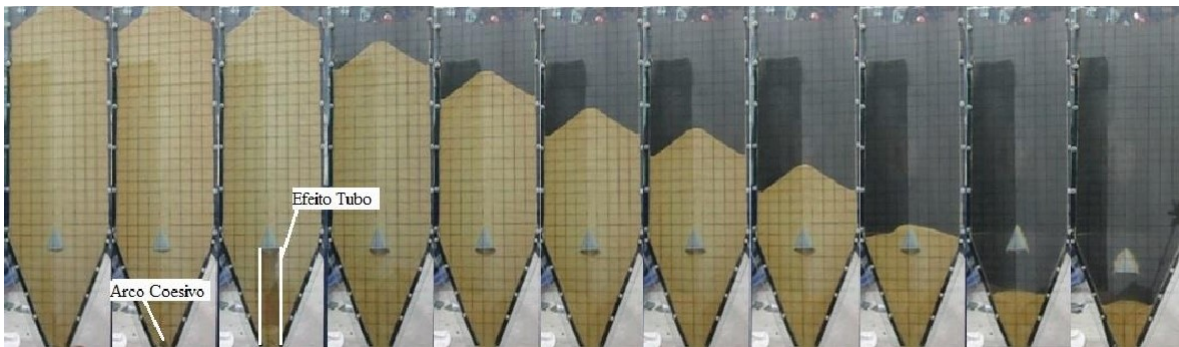
5.3.2 INSERT 1

Observa-se na figura 34 o comportamento do fluxo da ração avícola com a utilização do Insert 1, em todas as respectivas alturas analisadas.

(A)



(B)



(C)

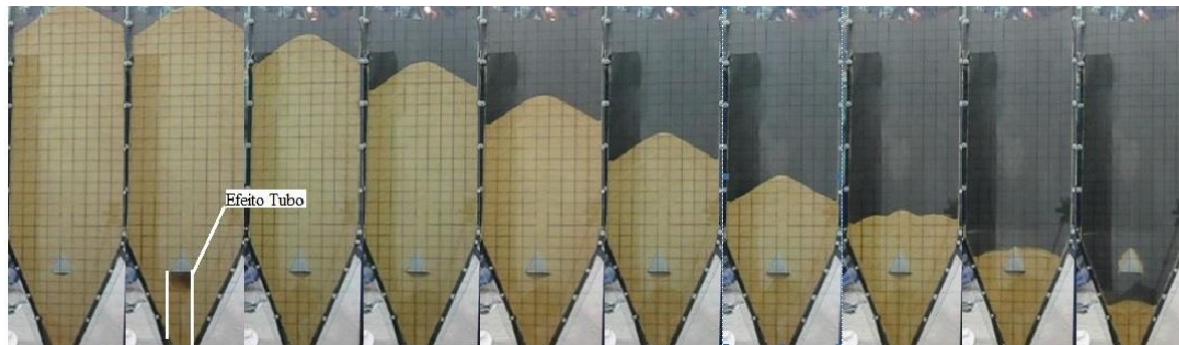


Figura 34. Descarregamento com insert 1: (A) altura 1, (B) altura 2, (C) altura 3.

A Formação do arco coesivo foi minimizado pelo insert nas alturas 1 e 3, entretanto, observa-se que durante o início do descarregamento, na altura 2, ocorreu a formação do arco, demonstrando que a altura na qual os inserts são posicionados influencia diretamente na formação do arco.

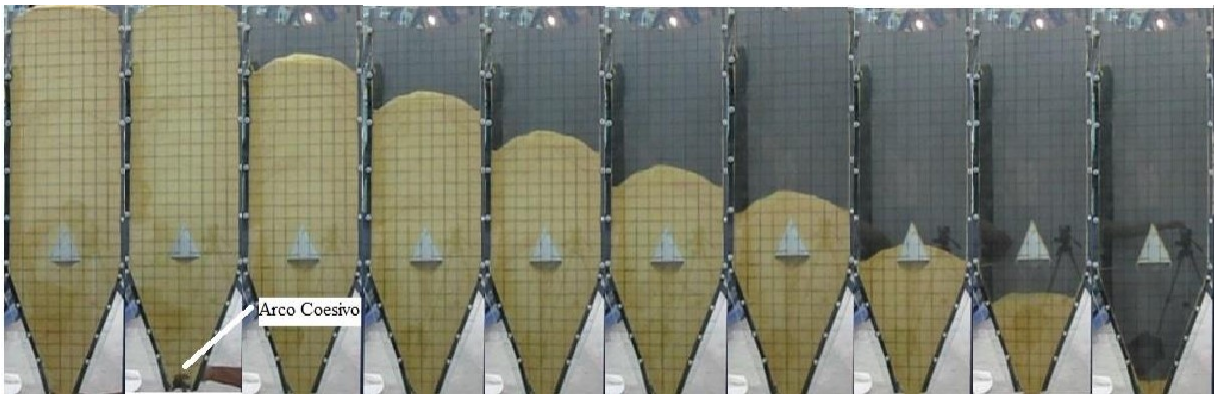
No descarregamento, um canal de fluxo foi formado entre o orifício de descarga e a base dos inserts em todas as alturas analisadas, para o insert 1, canal este minimizado pelo uso de insert, mudando imediatamente o padrão de fluxo de descarregamento, observando durante todo o processo seguinte a predominância do fluxo de massa com todas as partículas em movimento simultâneo em direção ao orifício de descarga. Ressalta-se a formação do fenômeno conhecido como “rathole” durante o descarregamento na altura 2 (Figura 34(B)), onde o canal de fluxo ascendeu até uma relação $H/D = 0,7$. Ao atingir esta altura, o canal de fluxo permaneceu vazio enquanto toda a massa se movimentava em um fluxo mássico.

Carson (2008), afirma que a formação de rathole é provocado pela segregação do produto armazenado, pela desuniformidade das partículas ou pelo tempo de armazenamento.

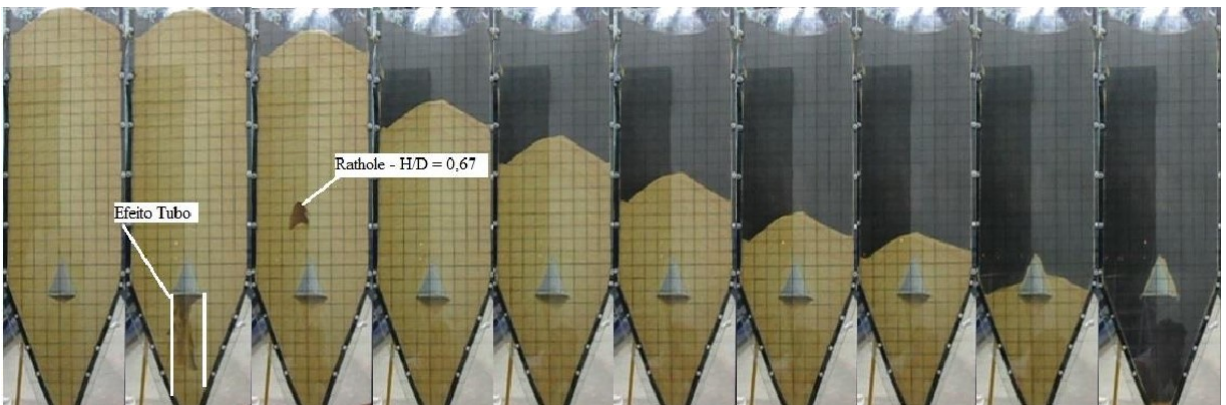
5.3.3 INSERT 2

As imagens do descarregamento da ração para o Insert 2 estão organizadas na figura 35.

(A)



(B)



(C)

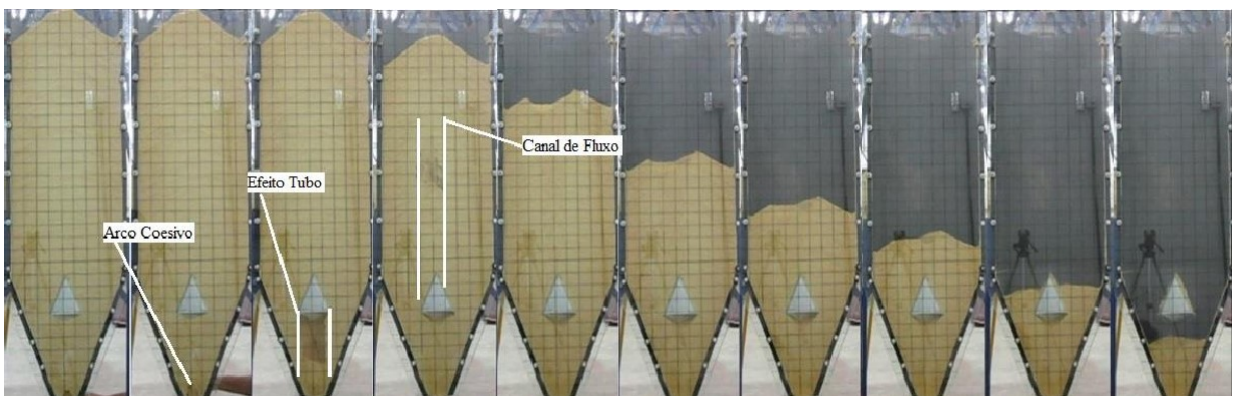


Figura 35. Descarregamento com insert 2: (A) altura 1, (B) altura 2, (C) altura 3.

Apenas a altura 2 se mostrou eficiente quanto ao impedimento da formação de arco coesivo, onde a localização do insert foi válida promovendo a distribuição uniforme das partículas, evitando assim a formação de arco, em situação descrita por Strusch (1996).

Seguinte a ruptura do arco coesivo na altura 1, todo o descarregamento foi em padrão mássico, desta forma, esta altura se mostrou eficiente quanto a quebra do estado de tensão na zona de transição de tremonha durante o carregamento do silo.

Nas Figuras 35, (B) e (C) observa-se que se formou um canal de fluxo no início do descarregamento, que ao atingir a base dos inserts foi modificado para um padrão mássico, que seguiu até o fim do descarregamento. Com isso, é confirmada a ação do insert para que aconteça a modificação do tipo de fluxo.

5.3.4. INSERT 3

O descarregamento da ração avícola para o Insert 3, em suas respectivas alturas estão demonstrados na Figura 36.

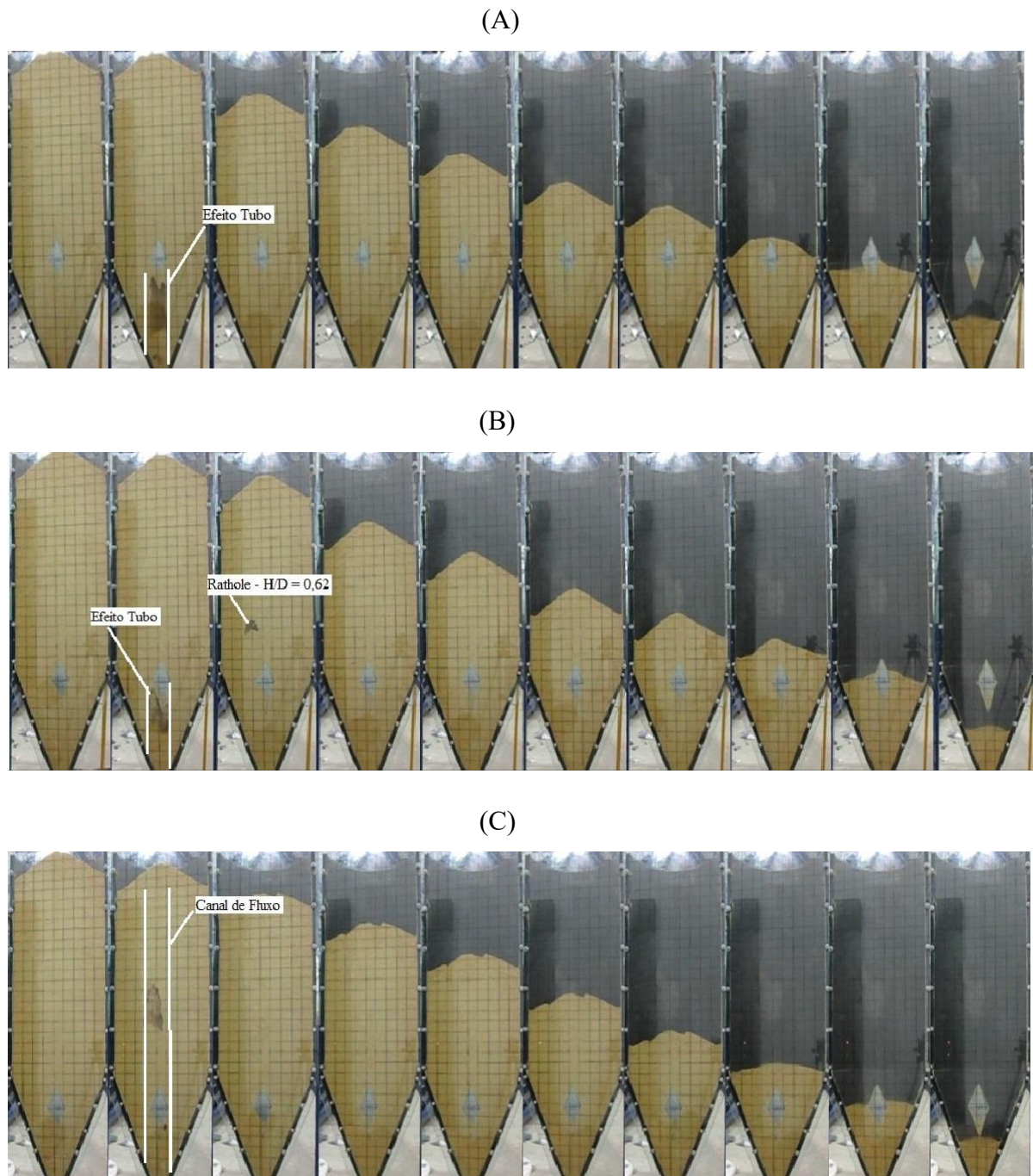


Figura 36. Descarregamento com insert 3: (A) altura 1, (B) altura 2, (C) altura 3.

O insert 3 foi totalmente eficaz no combate a formação de arcos em todas as alturas estudadas, por possuir configuração com dois cones, o que facilitou a intervenção da formação do arco, por fenômeno discutido por (Wójcik et. al., 2012), onde a ação do cone inferior para a quebra do estado de tensão é facilitada, diminuindo assim a formação de arco coesivo, além da ação do cone superior ao distribuir as partículas no carregamento.

Na Figura 36 (A) e (B) percebe-se uma formação inicial de um canal de fluxo, que é alterado para o fluxo de massa ao atingir a base do insert, todo o descarregamento seguinte é realizado por padrão de massa. Observa-se também que na Figura 36 (C) ocorreu à ascensão de um canal de fluxo até o talude do produto armazenado, o que provoca um único desmoronamento, todo o fluxo posterior é dado no padrão de fluxo de massa.

5.3.5 INSERT 4

Na figura 37 observa-se o comportamento do fluxo da ração avícola com a utilização do Insert 4, em todas as respectivas alturas estudadas.

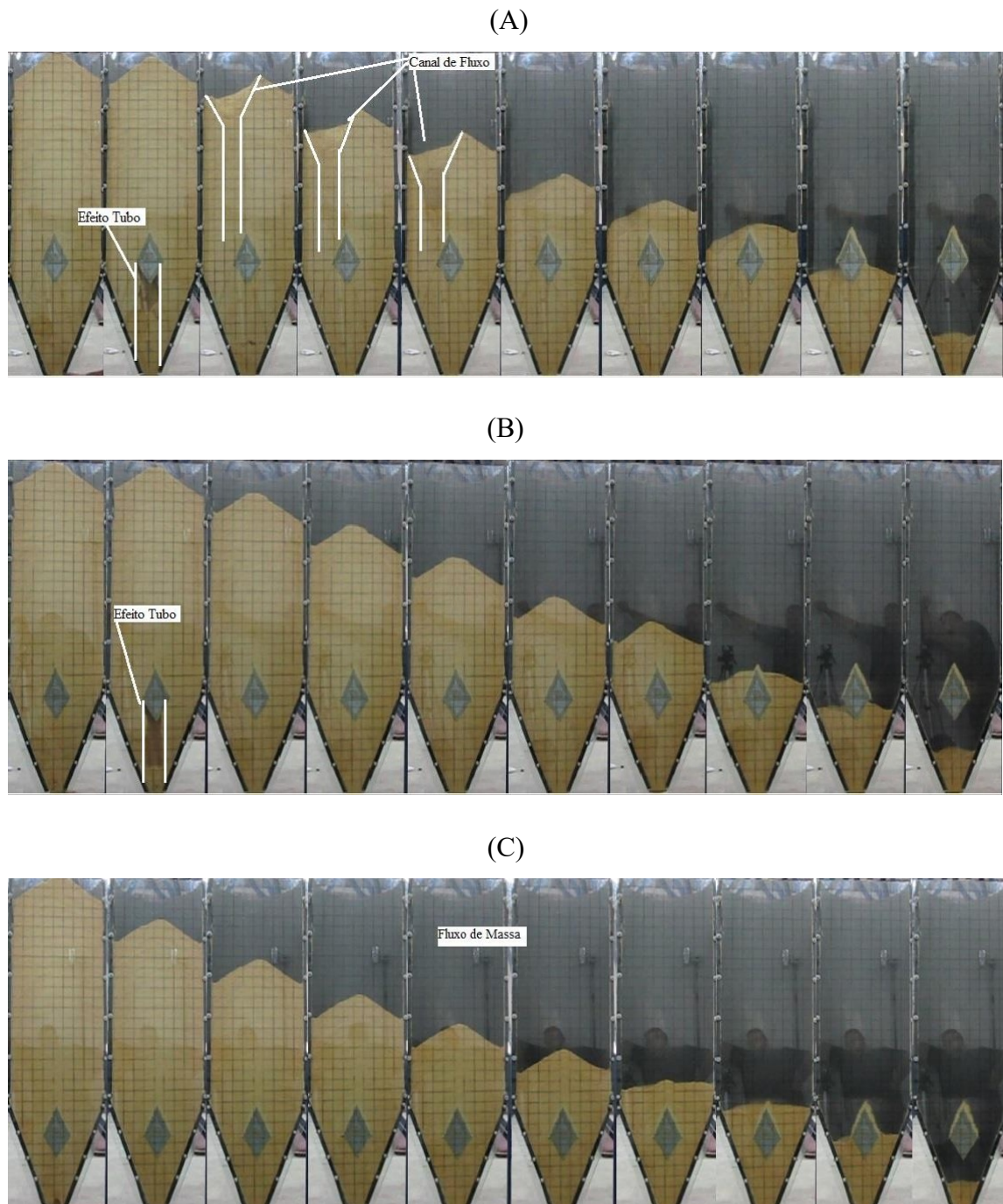


Figura 37. Descarregamento com insert 4: (A) altura 1, (B) altura 2, (C) altura 3.

Por motivos semelhantes ao do Insert 3, com o Insert 4 não houve a formação de arco coesivo em nenhuma altura analisada.

Nota-se na figura 37 (A) o descarregamento inicial em funil devido a formação de um canal de fluxo, ao atingir a zona de transição da tremonha este padrão é modificado para fluxo de massa. Na figura 37 (B) a formação do canal de fluxo inicial é alterada, proporcionando um padrão mássico de fluxo ao atingir a base do insert. Observa-se também que na Figura 37 (C) um descarregamento totalmente em fluxo de massa, sem qualquer formação de arco coesivo, canal de fluxo ou rathole. Neste caso todas as tensões descritas por Schulze (2008), foram contrapostas, alterando assim o padrão de fluxo.

Lopes Neto & Nascimento (2012), destacam uma provável interferência da parede frontal de vidro durante o descarregamento do produto armazenado, em razão da sua superfície mais lisa; acredita-se, contudo, que esta interferência tenha ocorrido apenas nos vetores de velocidade de descarregamento e não no tipo de fluxo.

5.3.6 ANALISE ENTRE ALTURAS

Para a primeira altura estudada, de 55 cm, observa-se o insert 2 como o mais eficaz, para solucionar problemas de fluxo, onde apresentou apenas a formação inicial de arco no orifício de descarga, que após o rompimento, todo o descarregamento se deu por fluxo de massa.

Na segunda altura analisada, de 45 cm, o insert 4 foi o mais eficaz na tentativa de evitar problemas de fluxo, tendo o canal de fluxo inicial impedido ao tocar a base do insert, seguindo o descarregamento em fluxo de massa. Deve-se ressaltar que esta altura, foi a mais propensa a formação de rathole.

Por fim, a terceira altura, de 35 cm, observa-se o insert 4 como o mais eficiente, promovendo solução aos problemas de fluxo apresentados durante todos os ensaios realizados.

Estudos realizados por Hsiau et. al. (2013), demonstram que a altura na qual o insert é posicionado influencia diretamente em sua eficiência na solução de problemas de fluxo, sendo a altura do insert tão importante quanto sua geometria.

6. CONCLUSÕES

O fluxo da ração avícola é problemático, sendo predominante o fluxo de funil, com consequentes quedas da massa armazenada, o que é justificado por suas dimensões de partículas, e por ser um produto bastante coesivo, ressaltando a presença de gordura em sua composição.

Tanto a vazão mássica quanto a velocidade de descarregamento foram tanto influenciadas pelos inserts utilizados quanto pelas alturas estudadas.

Os inserts utilizados no silo promoveram mudanças em seu fluxo, alterando-o para fluxo de massa.

A altura na qual os inserts são dispostos no corpo do silo é um fator determinante no tipo de fluxo do material armazenado.

O insert 4 se mostrou o mais eficiente para solucionar problemas de fluxo, nas situações analisadas, onde nenhum problema de fluxo foi registrado, tendo o descarregamento do produto armazenado todo em fluxo de massa.

7.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amóros, J. L.; Mallol, G.; Sánches, E.; Garcia, J. Projeto de silos para o armazenamento de materiais na forma de pó. Problema associados à etapa de descarga. **Cerâmica Industrial**, v.7, p. 12-23, 2002.
- Arnold, P. **Determining the Geometry of Mass-Flow Bins Some Important Considerations**. 11th International Congress on Bulk Materials Storage, Handling and Transportation, The University of Newcastle, 2013.
- ASTM. **Standard Test Method for Shear Testing of Bulk Solids Using the Jenike Shear Cell**. 2013.
- Batista, C. S. **Estudo teórico e experimental do fluxo de sólidos particulados em silos verticais**. Campina Grande: UFCG. 81p. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos), 2009.
- Bandeira, I. S. A. **Análise de fluxo de ração e farelo de trigo em silos prismáticos industriais**. Campina Grande: UFPB, 71p. Dissertação de Mestrado, 1997.
- BRASIL. **Regras para análise de sementes**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. Brasília: Mapa/ACS, 2009, p. 399.
- Bian, Q.; Sittipod, S.; Garg, A.; Kingsly, A. R. P. Bulk flow properties of hard and soft wheat flours. **Journal of Cereal Science**. V.63, p. 88-94, 2015.
- Calil, C. J. **Sobrepresiones en las paredes de los silos para almacenamiento de productos pulverulentos cohesivos**. Escola Politècnica de Barcelona, Espanha. Publicação do Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos: USP, 184 p. Tese Doutorado, 1984.

- Calil Junior, C.; Cheung, A.B. Silos: pressões, fluxo, recomendações para projetos e exemplos de cálculo. **Editora Escola de Engenharia de São Carlos: USP**. v. 21 P.212-225, 2007.
- Camargo, F. L; Sanchez, C. G. Novo Alimentador de Bagaço de Cana. **Bioenergia em revista: Diálogos**. 2011.
- Carson, J. W.; Craig, D. Silo design codes: Their limits and inconsistencies. **Procedia Engineering**, v.102, p. 647 – 656, 2015.
- Carson, J. W. Limits of Silo Design Codes. **American Society of Civil Engineers**, v.2, 2014.
- Carson, J. W. **Hopper/Bin Design**. In Bulk Solids Handling: Equipment Selection and Operation. Blackwell Publishing Ltd. ISBN: 978-1-405-15825-1, cap.2, 458p ,2008.
- CONAB. **Capacidade de Armazenagem**. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/>
Acesso em: 30/01/2016.
- CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira Grãos**. Disponível em: http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/16_02_04_11_21_34_boletim_graos_fevereiro_2016_ok.pdf Acesso em: 03/02/2016.
- Colonnello, C.; Reyes, L. I.; Clément, E.; Gutiérrez, G. Behavior of grains in contact with the wall of a silo during the initial instants of a discharge-driven collapse. **Physica A**, v. 398, p. 35-42, 2014.
- Costa, C. A. Da. **Propriedades físicas, mecânicas e de fluxo de produtos agroindustriais**. Campina Grande: UFCG. 140p. Dissertação de Mestrado, 2013.
- Costa, C. Da.; Lopes Neto, j. P.; Nascimento, J. W. B. Propriedades mecânicas e de fluxo de produtos agroindustriais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. V.18, n.7, p.774–780, 2014.

- Deckers, H. P. F. **Estudo teórico de pressões em silos esbeltos prismáticos com descarga excêntrica.** Lavras : UFLA. 146 p. Tese de Doutorado, 2014.
- Ding, S.; Rotter, J. M.; Ooi, J. Y.; Enstad, G.; Xub, D. Normal pressures and frictional tractions on shallow conical hopper walls after concentric filling Predictions and experiments. **Chemical Engineering Science**, v.89, p. 264-272, 2013.
- Ding S.; Lib H. Li.; Ooi J. Y.; Rotter J.M. Prediction of flow patterns during silo discharges using a finiteelement approach and its preliminary experimental verification. **Particuology**, v.18, p. 42–49, 2015.
- Freire, I. M. **Propriedades de fluxo do feijão macassar (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) para o dimensionamento de silos.** Campina Grande: UFCG, 66p. Dissertação de Mestrado, 2004.
- Garbazza, I. E. **Programa computacional para cálculo de pressões em silos verticais de acordo com a norma australiana.** Lavras: UFLA. 77p. Dissertação de Mestrado, 2011.
- Hartl, J.; Ooi, J. Y.; Rotter, J. M.; Wojcik, M.; Ding, S.; Enstad, G. G. The influence of a cone-in-cone insert on flow pattern and wall pressure in a full-scale silo. **Science Direct**, v. 86, p. 370 - 378, 2008.
- Hibbeler, R. C. **Resistência dos Materiais.** 5.ed. São Paulo: Pearson, 2004. 670p.
- Hotała, E.; Skotny, L. Experimental investigations on the stability of stiffened cylindrical shells of steel silos. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 96, p. 81-94, 2014.
- Hsiaua. S. S.; Smida, J.; Chyou, Y. P.; Liu, T. C.; Huang, T. C.; Hsu, C. J. Impact of flow-corrective insert on flow patterns in two-dimensional moving bed. **Chemical Engineering and Processing.** v.73, p. 7-15, 2013.

- Iwki, P.; Rejowski, K.; Tejchman, J. Stability of cylindrical steel silos composed of corrugated sheets and columns based on FE analyses versus Eurocode 3 approach. **Engineering Failure Analysis**. V.57, p. 444 – 469, 2015.
- Jenike, A. W. Storage and Flow of Solids. **Utah Engineering Experiment Station**. v.123, p.197, 1964.
- Johanson, J. R; Kleysteuber, W. K. Flow corrective inserts in bins. **Chemical Engineering Progress**. v.62, p. 79–83, 1996.
- Koynov, S.; Glasser, B.; Muzzio, F. Comparison of three rotational shear cell testers: Powder flowability and bulk density. **Powder Technology**. V.283, p. 103-112, 2015.
- Lobato, J. C. M.; F. Mascarenhas. F. P.; Mesquita. A. L. A.; Mesquita. A. L. A. Conical Hopper Design for Mass Flow – Case of red mud. **HOLOS**. Vol. 2, p. 120 -131, 2016.
- López, J.; Pastorello, I. M.; Arce, A. I. C. Vazão facilitada de grãos de arroz de um silo cilíndrico usando “obstruções” esféricas e cônicas. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 36, n. 1, 2014.
- Lopes Neto, J. P. **Análise teórico-experimental das forças verticais e de atrito em silos cilíndricos**. Campina Grande: UFCG. 116p. Tese de Doutorado em Engenharia de Processos, 2009.
- Lopes Neto, J. P.; Nascimento, J. W. B.; Lopes, F. F. M. Modelos De Previsão Do Fluxo E Vazão De Descarga De Produtos Agrícolas. **Revista Educação Agrícola Superior**, v.27, p. 54-58, 2012.
- Lopes Neto, J. P.; Nascimento, J. W. B. Características de fluxo e projeto de tremonhas cônicas em silos verticais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, n.3, p. 339-345, 2013.

- Liu, S. D.; Zhou, Z. Y.; Zou, R. P.; Pinson, D.; Yu, A. B. Flow characteristics and discharge rate of ellipsoidal particles in a flat bottom hopper. **Powder Technology**, v. 253, p. 70-79, 2014.
- Madrona, F. S. **Pressões em silos esbeltos com descarga excêntrica**. São Carlos: EESC/USP, 196p. Dissertação de Mestrado, 2008.
- Matuszek, D. & Tukiendorf, M. Application of roof shaped and double cone inserts in mixing of granular elements in the flow process. **International Agrophysics**. v.22, p. 147-150, 2008.
- Mellmann, J.; Hoffmann, T.; Füll, C. Mass flow during unloading of agricultural bulk materials from silos depending on particle form, flow properties and geometry of the discharge opening. **Powder Technology**, v.253, p. 46 – 52, 2014.
- Nascimento, F. C. & Calil Junior, C. A relação entre as paredes horizontais e verticais em silos elevados: o parâmetro K. **Caderno de Engenharia de Estruturas**, v.11, n.52, p. 17-37, 2009.
- Ostendorf, M. & Schwedes, J. Application of particle image velocimetry for velocity measurements during silo discharge. **Powder Technology**, n. 158, p. 69- 75, 2005.
- Palma, G. **Pressões e Fluxo em Silos Esbeltos ($H/D \geq 1,5$)**. São Carlos: EESC/USP, 121p. Dissertação de Mestrado, 2005.
- Silva, F. S.; Corrêa, P. C.; Calil Junior, C.; Gomes, F. C. Análise dos coeficientes de atrito estático e dinâmico de grãos de café com pergaminho, determinados em diferentes equipamentos, teores de água e materiais de parede. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 13, n.2, p. 143-156, 2011.
- Silva, J. S. **Secagem e Armazenagem de Produtos Agrícolas**. 2. ed. Editora Aprenda Fácil, Viçosa – MG, p. 19-36, 2008.

- Strusch, J. **Wandnormalspannungen in einem Silo mit Einbau und Kräfte auf Einbauten**. PhD Thesis, Technische Universität Braunschweig, Germany, 1996.
- Schulze, D. **Hopper/Bin Design**. In Bulk Solids Handling: Equipment Selection and Operation. Blackwell Publishing Ltd. ISBN: 978-1-405-15825-1, cap.9, 458p,2008.
- Schwedes, J. Strusch, J. Silos: Fundamentals of Theory, Behaviour and Design. Editora Roulledge, Nova York. ISBN 0 419 21580 8, v.1, pg 118-122, 1998,
- Wójcik,M.; Tejchman, J.; Enstad, G. G.; Confined granular flow in silos with inserts — Full-scale experiments. **Powder Technology**, v.220, p. 15 – 36, 2012.