

Análise do fluxo de ração avícola em silos verticais esbeltos com insert de cone invertido
Flow analysis of poultry feed in slender vertical silos with inverted cone insert
Análisis de flujo de alimento para aves de corral en silos verticales delgados con insert de cono invertido

Recebido: 18/11/2020 | Revisado: 19/11/2020 | Aceito: 23/11/2020 | Publicado: 28/11/2020

Diego José Araújo Bandeira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6245-9875>

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil

E-mail: diegoimperium8@gmail.com

José Jefferson da Silva Nascimento

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2620-6491>

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil

E-mail: jeffpesquisador@gmail.com

José Wallace Barbosa do Nascimento

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8376-0173>

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil

E-mail: wallacebosa@hotmail.com

Resumo

Para um projeto econômico e seguro de silos verticais, fatores como o padrão de fluxo que interferem na distribuição de cargas no silo, precisam ser criteriosamente avaliados. Desta forma, o objetivo principal desta pesquisa foi analisar a influência do *insert* de cone invertido, nas características do fluxo de ração avícola em silo vertical. O experimento de caracterização de fluxo foi conduzido no Laboratório de Beneficiamento de Sementes, 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, Campina Grande - PB. Foi utilizado um silo cilíndrico seccionado longitudinalmente de dimensões de 1,1m de altura e 0,45 m de diâmetro, representando um silo com relação H/D igual a 2,4, e uma tremonha com 0,5 m de altura e inclinação de 70° com a horizontal, com 0,06 m de orifício de descarga. A influência do *insert* foi avaliada em três diferentes posições em relação ao orifício de descarga: 0,35; 0,45 e 0,55 m. A ração apresentou dificuldade no fluxo, apresentando a formação de arco coesivo, desenvolvendo fluxo em funil, com várias quedas

durante seu descarregamento, provocando choques na estrutura do silo, com a utilização de *insert* de cone invertido, não foi observado a formação de arco coesivo, alterando o padrão de fluxo do produto armazenado para mássico.

Palavras-chave: Armazenamento; Velocidade; Descarregamento.

Abstract

For an economical and safe design of vertical silos, factors such as the flow pattern that interfere with the distribution of loads in the silo, need to be carefully evaluated. Thus, the main objective of this research was to analyze the influence of the inverted cone *insert*, on the characteristics of the poultry feed flow in a vertical silo. The flow characterization experiment was conducted at the Seed Processing Laboratory, the flow properties, granulometry and moisture content determined at the Rural Construction and Ambience Laboratory - LACRA, both from the Federal University of Campina Grande, Campina Grande - PB. A longitudinally sectioned cylindrical silo with dimensions of 1.1m in height and 0.45m in diameter was used, representing a silo with an H / D ratio of 2.4, and a hopper 0.5 m high and 70° inclined to the horizontal, with 0.06 m discharge hole. The influence of the insert was evaluated in three different positions in relation to the discharge orifice: 0.35; 0.45 and 0.55 m. The feed presented difficulty in the flow, presenting the formation of cohesive arc, developing funnel flow, with several falls during its unloading, causing shocks in the silo structure, with the use of inverted cone *insert*, the formation of cohesive arc was not observed, changing the flow pattern of the stored product to mass.

Keywords: Storage; Velocity; Unloading.

Resumen

Para un diseño económico y seguro de silos verticales, es necesario evaluar cuidadosamente factores como el patrón de flujo que interfieren con la distribución de cargas en el silo. Así, el objetivo principal de esta investigación fue analizar la influencia del *insert* de cono invertido, sobre las características del flujo de alimento de las aves en un silo vertical. El experimento de caracterización de flujo se realizó en el Laboratorio de Procesamiento de Semillas, las propiedades de flujo, granulometría y contenido de humedad se determinaron en el Laboratorio de Ambiente y Construcción Rural - LACRA, ambos de la Universidad Federal de Campina Grande, Campina Grande - PB. Se utilizó un silo cilíndrico seccionado longitudinalmente con dimensiones de 1,1 m de altura y 0,45 m de diámetro, lo que representa un silo con una relación H / D de 2,4 y una tolva 0,5 m de altura y 70° inclinado a la

horizontal, con orificio de descarga de 0,06 m. La influencia del inserto se evaluó en tres posiciones diferentes en relación al orificio de descarga: 0,35; 0,45 y 0,55 m. El alimento presentó dificultad en el flujo, presentando la formación de un arco cohesivo, desarrollando un flujo en embudo, con varias caídas durante su descarga, provocando choques en la estructura del silo, con el uso de un *insert* de cono invertido, no se observó la formación de un arco cohesivo. , cambiando el patrón de flujo del producto almacenado a masa.

Palabras clave: Almacenamiento; Velocidad; Descarga.

1. Introdução

O Brasil possui uma limitada capacidade de armazenamento, que não acompanha a produção agrícola do país, o que proporciona perdas econômicas para os produtores e, desta forma, a construção de silos verticais surge como uma alternativa para solução deste problema.

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, Zhou, Zou, Pinson, & Yu, 2014).

Os 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 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 coesivos e mecânicos, formação de *rathole* entre outros.

O chamado “*rathole*” no qual um ou mais canais de escoamento verticais estáveis se desenvolvem acima da abertura da tremonha, podendo atingir o topo da massa armazenada ou não (Carson, 2008).

Os *inserts* são estruturas utilizadas no interior de tremonhas para alterar o padrão de fluxo de produtos armazenáveis, evitar a formação de arcos coesivos, devido a redistribuição das partículas durante o carregamento e alteração do estado de tensão na zona de transição do corpo do silo e tremonha, modificando essa zona de transição física, para uma zona secundária influenciada pelo *insert*.

A dificuldade de armazenamento de ração avícola em silos verticais se deve aos problemas de fluxo que ela apresenta, provocado por sua composição com elevada percentagem de gordura.

Dependendo do padrão de fluxo no qual o produto tende a apresentar quando armazenado, a estrutura do silo será mais solicitada, evidenciando as possíveis intervenções que devam ser adotadas para minimizar estas ações. Os *inserts* surgem como opção para solução de problemas de fluxo, como a formação de canal de fluxo, de arcos mecânicos e coesivos, e *rathole*, por agir alterando os estados de tensão principalmente na zona de transição da tremonha, além de promover 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. Materiais e Métodos

2.1 Localização do Experimento

Os experimentos de caracterização de fluxo foram conduzidos 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 pertencentes à Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande – PB.

2.2 Produto Utilizado

Foi utilizada uma ração avícola, destinada à fase de postura, com sua composição detalhada na Tabela 1.

Tabela 1. Composição da ração avícola.

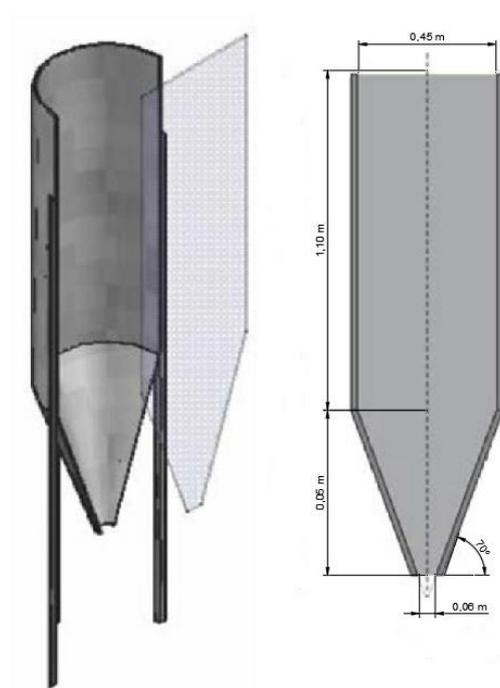
Ingrediente	(%)
Milho Triturado	57,37
Farelo de Soja	28,48
Óleo de Soja	4,54
Calcário	7,17
Fosfato Bicálcico	1,19
Sal Comum	0,32
DL-Metionina	0,41
L-Lisina	0,31
L-Treonina	0,07
Cloreto de Colina	0,07
Premix Mineral	0,05
Premix vitamínico Postura	0,02

Fonte: Autores.

2.3 Metodologia

Para analisar o comportamento do fluxo da ração avícola, adotou-se um silo cilíndrico seccionado longitudinalmente, e para vedar o semicírculo foi utilizada uma chapa de vidro transparente de 8 mm de espessura. As dimensões do corpo do silo são de 1,1 m de altura e 0,45 m de diâmetro, representando um silo com relação H/D igual a 2,4. Utilizando também uma tremonha com 0,50 m de altura e inclinação de aproximadamente 70° com a horizontal, com 0,06 m de orifício de descarga, totalizando uma capacidade de armazenamento de 0,1 m³ (Figura 1).

Figura 1. Modelo do silo analisado.

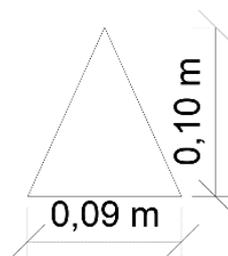


Fonte: Adaptado de Lopes Neto, Nascimento e Lopes. (2012).

Para o carregamento do silo foi utilizado um tronco de cone com orifício de descarga de 0,07 m de diâmetro, o qual foi acoplado a uma estrutura de madeira e posicionado 0,05 m acima do corpo do silo, de modo a se obter de um carregamento concêntrico e uniforme.

Para solucionar os problemas de fluxo da ração avícola, foi utilizado *insert* confeccionado em aço zincado, no formato de cone invertido (Figura 2).

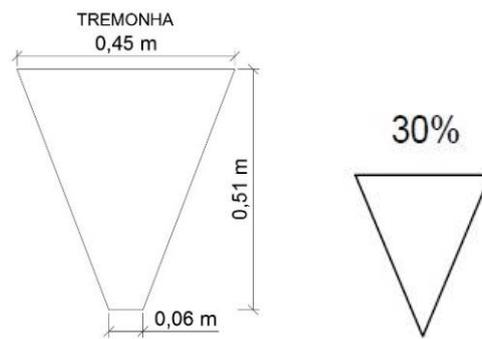
Figura 2. Detalhamento do *insert*.



Fonte: Autores.

A dimensão do *insert* foi relacionada com as dimensões da tremonha correspondendo a 30%, conforme mostrado na Figura 3.

Figura 3. Representação da proporcionalidade dos *inserts* com a tremonha.



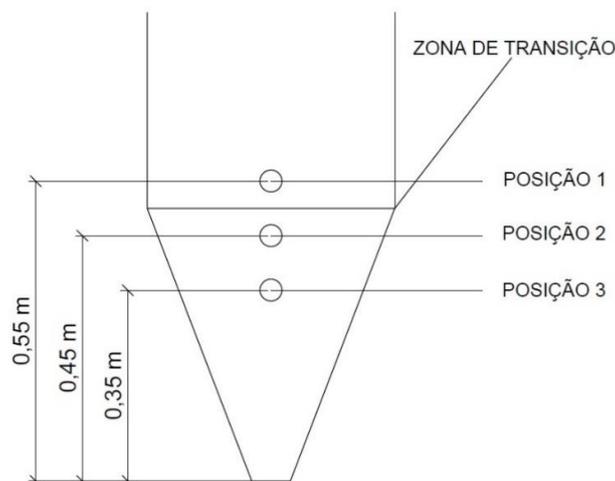
Fonte: Autores.

A relação de 30% com as dimensões da tremonha, é considerada a relação máxima a ser utilizada, ao ultrapassar desta relação, o *insert* provocará problemas de obstrução do fluxo.

Para seleção da geometria de *insert* analisado, foram considerados estudos realizados por Ding, Lib, Ooi e Rotter (2015), assim como Li, Gui, Yanga, Tua e Jianga (2016), nos quais os resultados obtidos demonstram que *inserts* de cone invertido, foram os mais promissores.

As três diferentes posições dos *inserts* utilizadas nesta pesquisa são: 0,35 ; 0,45 e 0,55 m em relação ao orifício de descarga (Figura 4), as mesmas foram adotadas tendo como base a zona de transição entre o corpo do silo e a tremonha, sendo a posição 1 de 0,55 m, (10% da altura da tremonha acima da zona de transição), a posição 2, 0,45 m (10% da altura da tremonha abaixo da zona de transição), e a posição 3 de 0,35 m (30% da altura da tremonha abaixo da zona de transição).

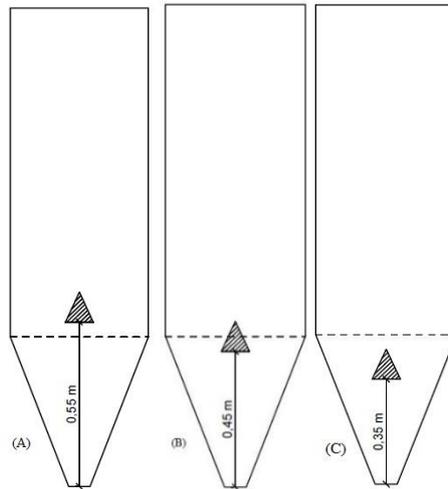
Figura 4. Detalhamento das posições analisadas.



Fonte: Autores.

Para as posições analisadas, também foram considerados os estudos realizados por Wójcik, Tejchman e Enstad (2012), os quais apontam a zona de transição entre o corpo do silo e a tremonha, como sendo o local ideal para o posicionamento dos *inserts*, alterando o estado de tensão na zona de transição física, consequentemente facilitando o fluxo. Todas as posições aplicadas podem ser visualizadas na Figura 5.

Figura 5. Posicionamento do *insert*, (A) Posição 1, (B) Posição 2 e (C) Posição 3.



Fonte: Autores.

Tendo a zona de transição entre o corpo do silo e a tremonha como local ideal para posicionamento dos *inserts*, devido ao pico de tensão nesta área, foram adotadas três posições: a primeira altura de 0,55 m, visou-se promover um pico de tensão acima da zona de transição, com o objetivo de suavizar a os esforços nesta área; da mesma forma foi adotada a segunda posição de 0,45 m, onde novamente foi objetivado a minimização das tensões horizontais provenientes da parede da tremonha; por fim, foi adotado a terceira posição de 0,35 m, nesta o *insert* está inserido totalmente na tremonha, pretendendo provocar um novo pico de tensão entre a zona de transição e o orifício de descarga, onde as tensões principais que são no sentido horizontal seriam reduzidas, facilitando assim o fluxo do produto armazenado.

2.4 Propriedades de Fluxo

Para determinação das propriedades de fluxo foi adotada a metodologia recomendada pela American Society for Testing and Materials [ASTM] (2013) utilizando o aparelho “*Jenike Shear Cell*” (Figura 6), 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 6. Jenike Shear Cell, utilizado para determinação das propriedades de fluxo.



Fonte: Autores.

Foram feitos dois ensaios: cisalhamento do produto e cisalhamento do produto com o material da parede (aço liso), determinando o ângulo de atrito interno, efetivo ângulo de atrito interno, o ângulo de atrito com a parede e a coesão do produto. As cargas (famílias) que foram utilizadas no experimento foram, encontra-se detalhada na Tabela 2:

Tabela 2. Família de cargas utilizada.

Pré-cisalhamento (Kg)	Cisalhamento (Kg)
7	5,0 – 3,5 – 2,0
5	3,5 – 2,0 – 1,0
3,5	2,0 – 1,0 – 0,7

Fonte: Autores.

É necessário serem calculadas, em cada ponto de medida, a tensão normal (σ) e a tensão de cisalhamento (τ), para o estado de consolidação (ponto de pré-cisalhamento) e início de ruptura, bem como o peso específico consolidado (γ).

As equações utilizadas para obtenção dos pontos para a construção dos círculos de Mohr onde serão mensuradas as tensões normais de consolidação e a resistência confinada estão representadas abaixo:

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

$$\tau_s = \tau \frac{\bar{\tau}_p}{\tau_p} \quad (\text{E2})$$

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

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

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

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_1^n \tau_p}{n} \quad (\text{Eq.6})$$

$$\sigma_s = \left(\frac{H + W_s + W_r + W_L + \gamma W_r}{A} \right) g \quad (\text{Eq.7})$$

$$\bar{\sigma}_p = \frac{\sum_1^n \sigma_p}{n} \quad (\text{Eq.8})$$

Onde,

P	Subscrito, indica a tensão no pré-cisalhamento	
S	Subscrito, indica a tensão no cisalhamento	
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	[m/s ²]
H	Peso do Pendural	[Kg]
S_p	Força durante o pré-cisalhamento/estado de consolidação	[Kg]
S_s	Força de cisalhamento/início de consolidação	[Kg]
N	Número de testes com uma carga de pré-cisalhamento	

Os estados das tensões na parede são calculados com as equações (9) e (10) e, quando plotadas em um sistema Tensão Normal a Parede (σ_w) x Tensão de Cisalhamento à Parede (τ_w), permitem determinar o IWYL (lugar geométrico instantâneo de deslizamento com a parede).

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

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

Onde,

\varnothing_w	Ângulo de atrito com a parede	[°]
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	

Com a união dos pontos (\varnothing_w , τ_w) obtém-se o lugar geométrico de deslizamento do produto com a parede. Quando este lugar for uma reta, o ângulo de atrito com a parede (\varnothing_w) é constante. Assim, o ângulo de atrito com a parede pode ser obtido pela equação (11).

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

2.5 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, segundo recomendações do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (2009).

2.6 Granulometria

A granulometria foi determinada por um agitador mecânico de peneiras, utilizando 500 gramas de produto com uma frequência de vibração 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-se ao final o material que permaneceu em cada peneira determinando, assim, sua percentagem.

3. Resultados e Discussão

3.1 Propriedades Físicas e de Fluxo

Na Tabela 3 encontram-se os resultados das propriedades de fluxo do produto analisado. Durante toda a fase experimental foi registrado um teor de umidade médio de

9,2%. O peso específico consolidado da ração avícola foi de 8121,34 e 8429,79 N/m³, para os limites inferior e superior, respectivamente, valores estes próximos aos encontrados em estudo realizado por Nóbrega (2003) utilizando dois tipos de ração, obteve valores de peso específico consolidado instantâneo variando de 8100,00 à 8200,00 N/m³. Entretanto, Nascimento (1996) encontrou em ensaios realizados com dois diferentes tipos de rações avícolas, valores de peso específico consolidado instantâneo variando de 7100,00 a 8300,00 N/m³. A metodologia utilizada para determinação do peso específico consolidado foi a mesma nas três situações, no entanto, fatores como granulometria, teor de gordura, teor de umidade e carga de consolidação que variam dentro do mesmo produto, possibilitam uma variação no peso específico consolidado.

Para os limites inferior e superior do ângulo de atrito interno, os valores encontrados foram de 25 e 30°, respectivamente. Nóbrega (2003) determinou o ângulo de atrito interno para dois tipos de ração avícola, no qual, encontrou valores entre 33 e 46°. Nascimento (1996) em ensaios realizados para a determinação do ângulo de atrito interno, encontrou 43 e 45°, para o limite inferior e superior, respectivamente. Já Bandeira (1997) em estudos realizados para determinação do ângulo de atrito interno com rações avícolas, obteve resultados variando entre 40 e 44°.

Os limites inferior e superior do efetivo ângulo de atrito interno obtido nesta pesquisa, foi de 29 e 34°, respectivamente. Bandeira (1997) determinou o efetivo ângulo de atrito interno para dois tipos de ração avícola, no qual, encontrou valores entre 36 e 48°. Nascimento (1996) em ensaios realizados para a determinação do efetivo ângulo de atrito interno, encontrou este sendo 48 e 53°, para limite inferior e superior, respectivamente. Estudos realizados por Nóbrega (2003) para determinação do ângulo de atrito interno com rações avícolas, obteve resultados variando entre 43 e 49°.

Os valores obtidos por Bandeira (1997); Nascimento (1996) e Nóbrega (2003) para ângulo de atrito interno e efetivo ângulo de atrito interno, foram superiores aos encontrados nesta pesquisa, isto aconteceu porque o teor de gordura da ração analisada nesta pesquisa é inferior as demais rações analisadas, o mesmo foi observado por Nóbrega (2003) e Bandeira (1997), onde a ração com menor teor de gordura apresentou menores valores para ângulo de atrito interno e efetivo ângulo de atrito interno.

Analisando os resultados do ângulo de atrito do produto com a parede, os valores inferior e superior foram de 21 e 23°, respectivamente. Em análises realizadas por Nóbrega (2003) e Bandeira (1997), utilizando acrílico para determinar a variação do ângulo de atrito do

produto com a parede de 17° à 20° e 13° a 16°, respectivamente. Valores inferiores aos obtidos nesta pesquisa, justificados pela rugosidade da parede de aço liso em relação ao acrílico.

Tabela 3. Caracterização das propriedades de fluxo.

Produto	γ		\emptyset		δ		\emptyset_w		ff _c
	inf	sup	inf	sup	inf	Sup	inf	sup	
Ração Avícola	8121,34	8429,79	25	30	29	34	21	23	1,92

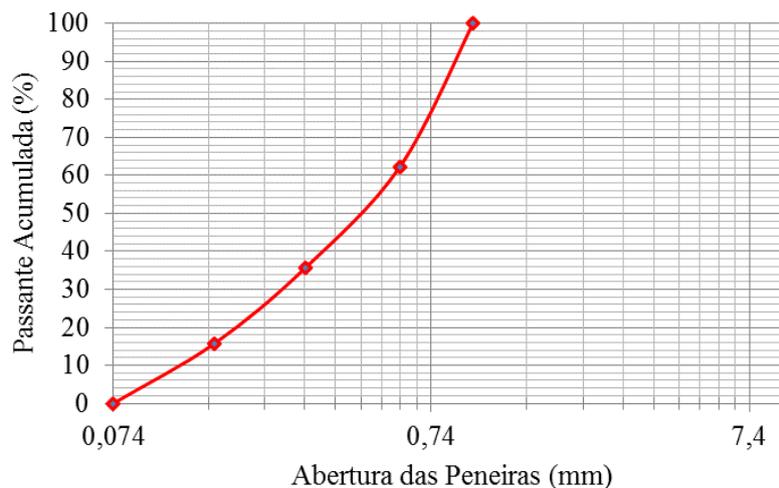
γ = peso específico consolidado (N/m³); \emptyset = ângulo de atrito interno (°); δ = efetivo ângulo de atrito interno (°); \emptyset_w = ângulo de atrito interno com parede de aço rugoso (°); C = coesão (Pa); ff_c = Índice de fluxo de Jenike; inf; sup = limite inferior e superior, respectivamente. Fonte: Autores (2020).

Utilizando o índice de fluxo idealizado por Jenike (1964) como parâmetro para classificação do produto avaliado nesta pesquisa, foi classificado como muito coesivo, apresentando o ff_c de 1,92.

Na Figura 7 se encontra a curva granulométrica do produto analisado, percebendo que a ração avícola apresenta distribuição granulométrica desuniforme, onde porções de partículas são retidas em todas as peneiras da série utilizada. Com 37,69% do produto retido na peneira com abertura de 1,0 mm, para as peneiras de 0,59 mm; 0,297 mm e, 0,149 mm, o percentual retido foi de 26,65%; 19,9% e 15,76%, respectivamente, utilizando a metodologia proposta por Calil Júnior (1990), o produto foi classificado como pulverulento e/ou pulverulento coesivo.

Nóbrega (2003), Nascimento (1996) e Bandeira (1997), em ensaios realizados com rações avícolas, também classificaram suas rações como sendo pulverulentas e/ou pulverulentas coesivas.

Figura 7. Comportamento granulométrico da ração avícola.



Fonte: Autores.

Deve-se salientar que a “desuniformidade” das partículas apresentada pode provocar problemas durante a descarga, onde as partículas maiores que se acumulam perto das paredes do silo, seriam descarregadas apenas no fim, enquanto que as partículas menores se acumulam próximas ao centro do silo seriam descarregadas primeiro, produzindo um fluxo de funil. Da mesma forma, essas partículas menores acumuladas no centro do silo, contribuem para a formação do arco coesivo.

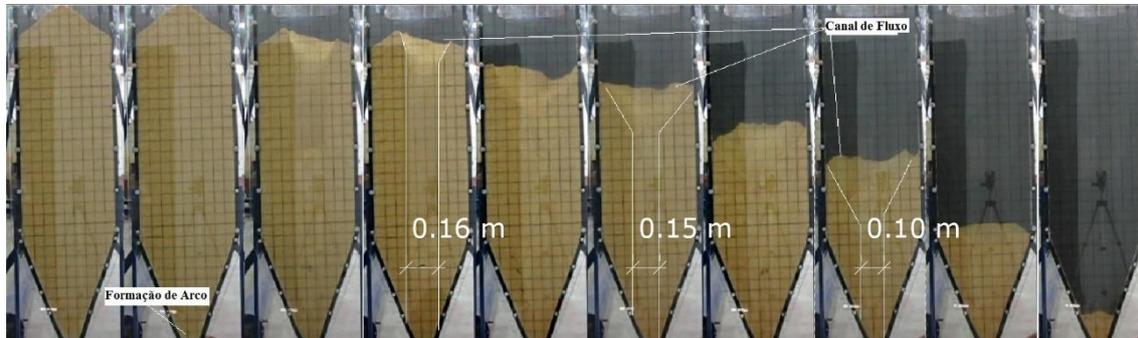
3.2 Análise de Fluxo

3.2.1 Sem *insert*

Na Figura 8 pode-se notar que no início do descarregamento do produto houve a formação de um arco coesivo estável, detalhado na Figura 9. O fluxo do produto armazenado foi possível após ruptura do arco, onde foi necessário a aplicação de choques externos à tremonha do silo de forma manual, para ruptura do arco e consequente descarga da ração avícola. O descarregamento apresentou a formação de canais de fluxo vertical central propagando-se no sentido ascendente, até atingir o talude superior do produto, que foram seguidos por desmoronamentos deste canal, até atingir a zona de transição corpo do silo-tremonha, caracterizando assim um descarregamento do tipo funil. Observou-se ondas de choque na parede do silo, sempre que haviam quedas bruscas de uma porção do produto. O

mesmo foi observado por Medeiros (2012) em estudo realizado, apontou que tal fenômeno pode provocar perda de instabilidade da estrutura.

Figura 8. Descarregamento sem *insert*.



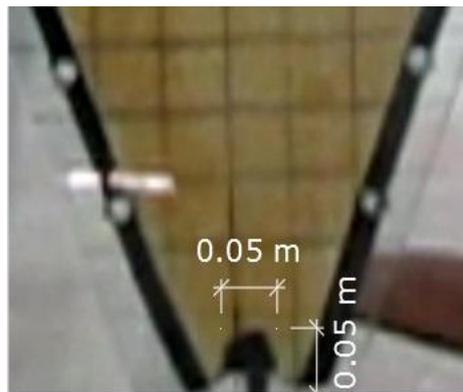
Fonte: Autores.

Observa-se ainda, que durante todo o descarregamento da ração avícola, foram formados três canais de fluxo distintos, sendo eles desfeitos pela queda da massa estagnada. O primeiro canal de fluxo observado possui diâmetro de 0,16m, e fora observada a tendência de formação do efeito tubo; no momento em que o produto que está no canal de fluxo atingiu a zona de transição, houve o tombamento do produto no talude, provocando ondas de choques no silo, levando a vibrações da estrutura.

O segundo canal formado com 0,15m de diâmetro foi completamente instável, onde logo foi desfeito pela queda do produto estagnado. Por fim, o terceiro canal com 0,10m novamente instável, foi desfeito no momento que a massa armazenada atingiu a zona de transição do corpo do silo e tremonha, em seguida o canal de fluxo continuou a fluir, desta vez com padrão de fluxo de massa.

O fluxo em funil no descarregamento de ração avícola apresenta desvantagens pelo fato de provocar a segregação das partículas, o que não é desejável, onde pode ocorrer o desbalanceamento da formulação desenvolvida para a dieta das aves.

Figura 9. Detalhamento do arco coesivo.



Fonte: Autores.

Alguns motivos para a formação de arcos coesivos durante o descarregamento da ração avícola podem ser as dimensões do orifício de descarga, o teor de gordura e umidade, fatores também observados em estudos por Nóbrega (2003).

Ao trabalhar com ração avícola o principal fator que contribui para a formação do arco coesivo é seu teor de gordura. 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 e conseqüentemente na formação de arco, fato este também observado nesta pesquisa.

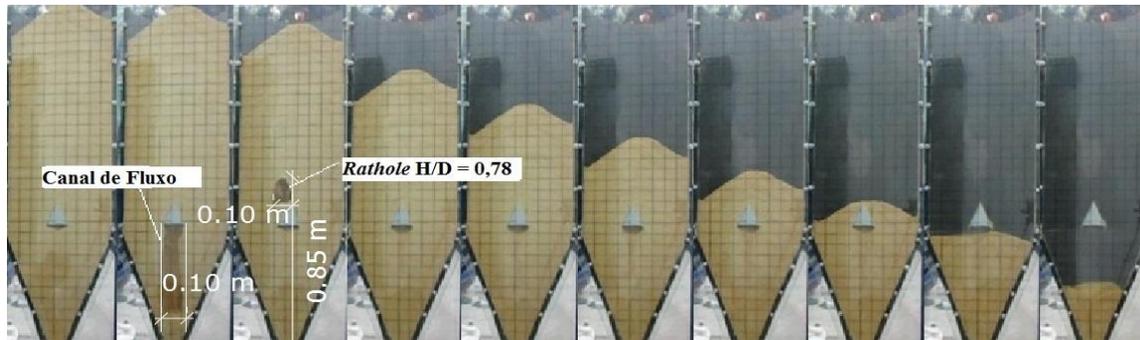
A variação nas dimensões das partículas, a composição da ração e a altura de queda do produto no carregamento contribuíram para problemas de heterogeneidade na descarga, onde as partículas maiores acumulam-se perto das paredes do silo, enquanto que as partículas menores se acumulam próximas ao centro do silo, dessa forma as partículas menores (localizadas no centro) seriam descarregadas primeiras, enquanto que as maiores somente no final, produzindo um fluxo de funil. A influência da variação das dimensões das partículas no padrão de fluxo de produtos armazenados, também foi observada em estudos realizados por Palma (2005)

3.2.2 *Insert de cone invertido*

Na Figura 10 é apresentada a sequência fotográfica do fluxo da ração avícola com a utilização do *insert* 1 na posição 1. Foi observada a formação de canal de fluxo até a base do *insert* com 0,10m de diâmetro, o *insert* impediu a ascensão deste canal, atingindo uma altura máxima com relação $H/D = 0,78$, neste ponto o canal permaneceu estável caracterizando

assim a formação de *rathole*, com 0,10m de diâmetro. Este perdurou estável até determinado momento em que o mesmo ultrapassa o *insert*, sendo desfeito. Percebe-se ainda que durante o descarregamento ocorreu fluxo de massa.

Figura 10. Características de fluxo da ração avícola para o *insert* 1 na posição 1.

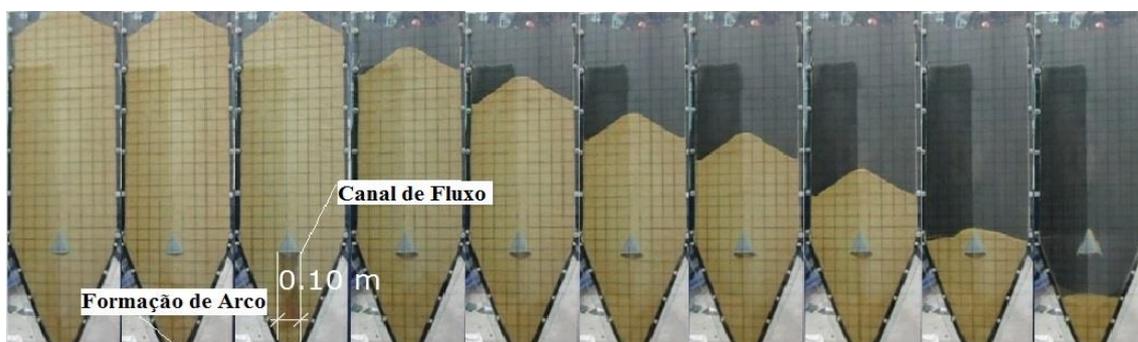


Fonte: Autores (2020).

Carson (2008), afirma que a formação de *rathole* pode ser provocada pela segregação do produto armazenado, pela desuniformidade das partículas ou pelo tempo de armazenamento, em silos sem *inserts*.

Na Figura 11 estão detalhadas as características do fluxo da ração avícola com a utilização do *insert* 1 na posição 2. Ocorreu a formação de arco coesivo que, após a sua ruptura foi observado o desenvolvimento do canal de fluxo até a base do *insert*, impedindo sua ascensão ao topo da massa armazenada. Todo descarregamento ocorreu em fluxo de massa.

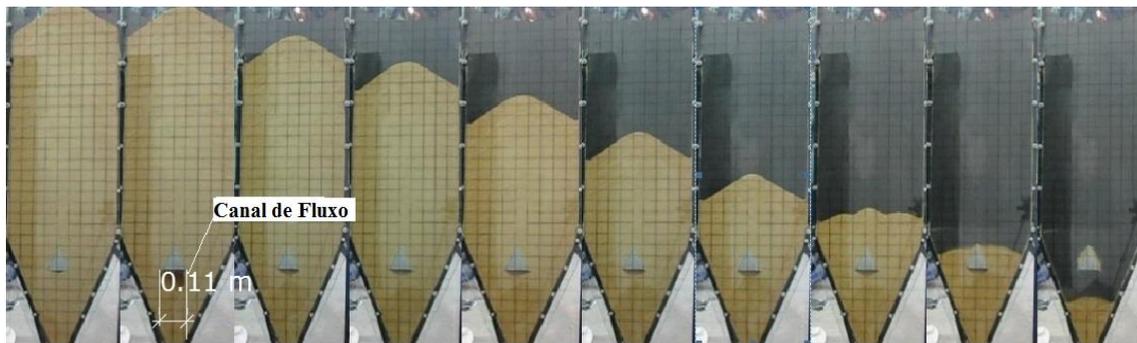
Figura 11. Características de fluxo da ração avícola para o *insert* 1 na posição 2.



Fonte: Autores (2020).

Para o *insert* 1 na posição 3, as características do fluxo da ração avícola estão detalhadas na Figura 12. Percebe-se nesta situação que não ocorreu a formação do arco coesivo, foi formado um canal de fluxo de 0,11m de diâmetro até a base do *insert*, e a partir desse momento prevaleceu fluxo de massa.

Figura 12. Características de fluxo da ração avícola para o *insert* 1 na posição 3.



Fonte: Autores (2020).

Pelos testes realizados, observou-se que a posição 3 para este tipo de *insert* foi a que melhor se comportou para fluxo de ração avícola, não ocorrendo segregação de partículas, o que provocaria alteração no balanceamento nutricional da ração avícola. Portanto, o fluxo de massa é o tipo mais adequado para as exigências supracitadas.

Foi observado durante os testes realizados para este *insert*, que conforme modificou o seu posicionamento, foram minimizados os problemas de fluxo tais como *rathole* e formação de arco, e conseqüentemente a mudança do tipo de fluxo provocado pela alteração do estado de tensões, à medida que o *insert* se aproximava do orifício de descarga, fato este também observado em estudos realizados por Hsiau, Smida, Chyou, Liu, Huang e Hsu (2013), que destacam os mesmos efeitos notados nesta pesquisa, onde concluem que a altura na qual o *insert* é posicionado influencia diretamente em sua eficiência na solução de problemas de fluxo.

Foi observado ainda que para o primeiro e terceiro posicionamento estudado, não foi registrada a formação de arco coesivo, entretanto este fenômeno ocorreu para a segunda posição. O mesmo foi notado por pesquisas conduzidas por Strusch (1996), que comenta sobre a influência da localização do *insert* na redistribuição das partículas, evitando assim a formação de arco.

4. Considerações Finais

A ração avícola foi classificada como produto pulverulento em análise granulométrica e muito coesivo quanto ao índice de fluxo.

Silos cilíndricos com relação $H/D = 2,4$ apresentam problemas de fluxo para a ração avícola, onde o descarregamento foi em fluxo de funil com tendência a formação de arco coesivo.

Foi observado que o *insert* analisado influenciou no padrão de fluxo da ração avícola, alterando o fluxo de funil para mássico, em relação à altura, todas as posições impediram a formação do arco coesivo, e proporcionaram a alteração de fluxo, sendo o *insert* posicionado a 0,45m em relação ao orifício de descarga, o melhor resultado apresentado.

Novas pesquisas devem ser realizadas acerca do tema, uma sugestão para novos estudos seria a análise da alteração do estado de tensão na zona de transição da tremonha, com a utilização de *inserts*.

Referências

American Society for Testing and Materials. (2013). Standard Test Method for Shear Testing of Bulk Solids Using the Jenike Shear Cell.

Bandeira, I. S. A. (1997). Análise de Fluxo de Ração e Farelo de Trigo em Silos Prismáticos Industriais. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, PB, Brasil.

Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. (2009). Regras para análise de sementes. Secretaria de Defesa Agropecuária. Brasília: Mapa/ACS.

Calil Júnior, C. (1990). Recomendações de fluxo e de cargas para o projeto de silos verticais. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil.

Carson, J. W. (2008). Hopper/Bin Design. In Bulk Solids Handling: Equipment Selection and Operation. New Jersey: Blackwell Publishing Ltd.

Costa, C. A. (2013). Propriedades físicas, mecânicas e de fluxo de produtos agroindustriais. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, Brasil.

Ding S., Lib H. LI., Ooi J. Y., Rotter J.M. (2015). Prediction of flow patterns during silo discharges using a finiteelement approach and its preliminary experimental verification. *Particuology*, 18 (1), 42–49.

Hsiau. S. S., Smida, J., Chyou, Y. P., Liu, T. C., Huang, T. C., Hsu, C. J. (2013). Impact of flow-corrective insert on flow patterns in two-dimensional moving bed. *Chemical Engineering and Processing*. 73 (1), 7-15.

Jenike, A. W. (1964). *Storage and Flow of Solids*. Utah Engineering Experiment Station. 123 (1), 101-197.

Li, Y., Gui, N., Yanga, X., Tua, J.; Jianga, S. (2016). Effect of a flow-corrective insert on the flow pattern in a pebble bed reactor. *Nuclear Engineering and Design*. 300 (1), 495-505.

Liu, S. D., Zhou, Z. Y., Zou, R. P., Pinson, D., Yu, A. B. (2014). Flow characteristics and discharge rate of ellipsoidal particles in a flat bottom hopper. *Powder Technology*. 253 (1), 70-79.

Lopes Neto, J. P., Nascimento, J. W. B., Lopes, F. F. M. (2012). Modelos De Previsão do Fluxo e Vazão De Descarga De Produtos Agrícolas. *Revista Educação Agrícola Superior*. 27 (1), 54-58.

Medeiros, I. F. (2012). Características de fluxo e vazão de descarga em silos verticais. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, Brasil.

Nascimento, J. W. B. (1996). Estudos dos silos metálicos prismáticos para fábricas de ração. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil.

Nóbrega, M. V. (2003). Análise de vazão e fluxo de ração avícola em silos prismáticos com descarga excêntrica. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, Brasil.

Palma, G. (2005). Pressões e Fluxo em Silos Esbeltos ($H/D \geq 1,5$). Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil.

Strusch, J. (1996). Wandnormalspannungen in einem Silo mit Einbau und Kräfte auf Einbauten. Tese de Doutorado. Technische Universität Braunschweig, Alemanha.

Wójcik, M., Tejchman, J., Enstad, G. G. (2012). Confined granular flow in silos with inserts Full-scale experiments. Powder Technology. 220 (1), 15 – 36.

Porcentagem de contribuição de cada autor no manuscrito

Diego José Araújo Bandeira – 80%

José Jefferson da Silva Nascimento – 10%

José Wallace Barbosa do Nascimento – 10%