



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



DIEGO JOSÉ ARAÚJO BANDEIRA

**ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DA VAZÃO MÁSSICA DE
RAÇÃO AVÍCOLA EM SILOS VERTICAIS COM INSERTS**

CAMPINA GRANDE – PB

2021

DIEGO JOSÉ ARAÚJO BANDEIRA

**ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DA VAZÃO MÁSSICA DE
RAÇÃO AVÍCOLA EM SILOS VERTICAIS COM INSERTS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina - Grande/PB, em cumprimento às exigências para obtenção da titulação como Doutor em Engenharia de Processos.

Orientador: Prof. Dr. José Jefferson da Silva Nascimento

CAMPINA GRANDE – PB

2021

B214a

Bandeira, Diego José Araújo.

Análise numérica e experimental da vazão mássica de ração avícola em silos verticais com inserts / Diego José Araújo Bandeira. – Campina Grande, 2022.

80 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2021.

"Orientação: Prof. Dr. José Jefferson da Silva Nascimento".

Referências.

1. Silos Verticais. 2. Construções Rurais. 3. Desenvolvimento e Tecnologia dos Materiais. 4. Método dos Volumes Finitos (FVM). I. Nascimento, José Jefferson da Silva. II. Título.

CDU 631.24:620.1(043)

DIEGO JOSÉ ARAÚJO BANDEIRA

**ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DA VAZÃO MÁSSICA DE
RAÇÃO AVÍCOLA EM SILOS VERTICAIS COM INSERTS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina - Grande/PB, em cumprimento às exigências para obtenção da titulação como Doutor em Engenharia de Processos.

Aprovada em: 19/11/2021.

BANCA EXAMINADORA



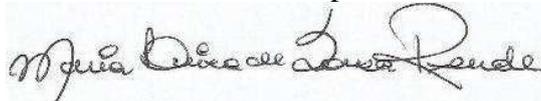
Prof. Dr. José Jefferson da Silva Nascimento (Orientador)
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG



Prof. Dra. Ariadne Soares Meira (Examinadora Externa)
Universidade Federal do Mato Grosso – UFMT



Prof. Dr. Marcos Antônio de Souza Simplício (Examinador Externo)
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG



Prof. Dra. Maria Luiza de Souza Rezende (Examinadora Externa)
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG



Prof. Dra. Marivone Zanella Fank (Examinadora Externa)
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR

AGRADECIMENTOS

A **DEUS** e a todos os seus anjos, em especial aqueles que me guardam e a todos os que, mesmo estando em outro plano espiritual, continuam torcendo por mim.

Aos meus pais, **Jaires Marcondes de Sousa Bandeira** e **Maria José Araújo Bandeira**, por serem para mim o primeiro e determinante exemplo de amor, seriedade, dedicação e honestidade.

Aos meus avós, em especial minha avó, **Maria Rita de Sousa Bandeira**, pelo amor, compreensão e tolerância, por nunca deixar de acreditar em mim.

À minha companheira **Amanda Maria Guimarães Barros**, que o destino cuidou para que eu a encontrasse, me encorajando e me ajudando sempre que foi necessário.

Ao Orientador, professor **José Jefferson da Silva Nascimento**, pelo acompanhamento e companheirismo neste trabalho e por disponibilizar o **LABSIM - Laboratório de Simulação** para realização desta pesquisa.

À **CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior)**, pela bolsa de estudos concedida, sem a qual nada disto seria possível.

Aos professores do **Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos** pelos conhecimentos compartilhados em suas disciplinas.

Ao meu professor de matemática **Alberto**, do Ensino Médio na **Escola Estadual de Ensino Fundamental e Médio Nenzinha Cunha Lima**, por incentivar e provocar meu interesse por matemática, me deixando resolver as equações de 2º grau por extenso, sou grato.

Aos meus amigos (as) de curso, os quais me auxiliaram em tantas dificuldades e que não me deixaram abater quando tudo parecia dar errado, sem eles toda execução seria mais árdua.

Aos funcionários da **Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos**, pela parceria e incentivo colaborando sempre que possível, em especial a **Fátima** por sua competência e disponibilidade sempre que solicitada.

E aos que direta e indiretamente colaboraram para o desenvolvimento deste trabalho.

OBRIGADO!

*“O insucesso é apenas uma
oportunidade para recomeçar com
mais inteligência.”*

Henry Ford

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tipos de Fluxo: Fluxo de Funil (A), Fluxo de Massa (B) e Fluxo Misto (C).	20
Figura 2 - <i>Rathole</i> .	21
Figura 3. Arco coesivo.	22
Figura 4 - Estado de tensão no silo.	23
Figura 5 - Tensões principais na zona de transição da tremonha.	23
Figura 6 - Tipos de obstruções de fluxo.	24
Figura 7 - Esquema ilustrativo do aparelho de cisalhamento direto de Jenike.	26
Figura 8 - Esquema ilustrativo da célula de cisalhamento de Jenike.	26
Figura 9 - Determinação do atrito com a parede na célula de Jenike.	26
Figura 10 - Lugares Geométricos de Deslizamento.	27
Figura 11 - <i>Insert</i> cone invertido.	30
Figura 12 - Principais tipos de <i>inserts</i> .	31
Figura 13 - Modelo do silo analisado.	35
Figura 14 - Detalhamento dos <i>inserts</i> .	36
Figura 15 - Representação da proporcionalidade dos <i>inserts</i> com a tremonha.	37
Figura 16 - Detalhamento das posições analisadas.	38
Figura 17 - Posicionamento dos <i>inserts</i> , (A) Posição 1, (B) Posição 2 e (C) Posição 3.	39
Figura 18 - Detalhamento da balança e posicionamento das células de carga com dimensões em cm.	40
Figura 19 - Conjunto distribuidor, silo e balança.	41
Figura 20 - Pontos Analisados na determinação da velocidade de descarregamento.	42
Figura 21 - Zonas analisadas na determinação da velocidade média de descarregamento.	42
Figura 22 - Jenike Shear Cell, utilizado para determinação das propriedades de fluxo.	45
Figura 23 - Agitador mecânico de peneiras.	48
Figura 24 - Comportamento granulométrico da ração avícola.	52
Figura 25 - Malhas computacionais analisadas.	52
Figura 26 - Descarregamento sem <i>insert</i> .	57
Figura 27 - Comparativo da curva de vazão mássica instantânea experimental e simulada para ração avícola sem <i>insert</i> .	57
Figura 28 - Curva de vazão mássica instantânea para ração avícola com <i>insert</i> 1 em três diferentes posições.	58
Figura 29 - Descarregamento <i>insert</i> 1 em três diferentes posições.	59
Figura 30 - Curva de vazão mássica instantânea para ração avícola com <i>insert</i> 2 em três diferentes posições. Fonte: Acervo do Autor (2021).	60
Figura 31 - Descarregamento <i>insert</i> 2 em três diferentes posições.	61
Figura 32 - Curva de vazão mássica instantânea para ração avícola com <i>insert</i> 3 em três diferentes posições.	62
Figura 33 - Descarregamento <i>insert</i> 3 em três diferentes posições.	63
Figura 34 - Curva de vazão mássica instantânea para ração avícola com <i>insert</i> 4 em três diferentes posições.	64

Figura 35 - Descarregamento <i>insert</i> 3 em três diferentes posições.	65
Figura 36 - Comparativa da curva de velocidade média de descarregamento sem <i>insert</i> experimental e simulado.	66
Figura 37 - Curva de velocidade média de descarregamento para ração avícola com <i>insert</i> 1 em três diferentes alturas.	67
Figura 38 - Curva de velocidade média de descarregamento para ração avícola com <i>insert</i> 2 em três diferentes alturas.	68
Figura 39 - Curva de velocidade média de descarregamento para ração avícola com <i>insert</i> 3 em três diferentes alturas.	69
Figura 40 - Curva de velocidade média de descarregamento para ração avícola com <i>insert</i> 4 em três diferentes alturas.	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Classificação dos produtos de acordo com a granulometria.....	25
Tabela 2. Classificação da capacidade de fluxo dos produtos armazenáveis segundo Jenike (1964).	29
Tabela 3. Dimensões dos inserts utilizados.	37
Tabela 4. Equações Governantes.....	44
Tabela 5. Regime de escoamento para número de Reynolds da partícula.	44
Tabela 6. Família de cargas utilizada.	46
Tabela 7. Caracterização das propriedades de fluxo.	51
Tabela 8. Número de nós e elementos das malhas analisadas.....	53
Tabela 9. Teste de malha para vazão mássica (Kg/s) sem utilização de insert.	53
Tabela 10. Determinação da vazão mássica experimental.	54
Tabela 11. Análise Estatística da Vazão mássica.	55
Tabela 12. Análise Estatística do Tempo de Descarregamento.....	55

LISTA DE ABREVIATURAS/SÍMBOLOS/UNIDADES

γ	Peso específico consolidado	Kg/m^3
ϕ	Ângulo de atrito interno	($^\circ$)
δ	Efetivo ângulo de atrito interno	($^\circ$)
ϕ_w	Ângulo de atrito do produto com a parede	($^\circ$)
YL	Lugar geométrico de deslizamento do produto	
EYL	Lugar geométrico efetivo de deslizamento	
WYL	Lugar geométrico de deslizamento com a parede	
C	Coesão	(Pa)
d_p	Diâmetro da partícula	(m)
FF	Função fluxo	
σ_M	Pressão de consolidação	(Pa)
σ_c	Resistência inconfina	(Pa)
ph	Pressão horizontal a parede do silo	(Pa)
pv	Pressão Vertical a parede do silo	(Pa)
pw	Pressão Tangencial a parede do silo	(Pa)
A	Área da seção transversal do silo	(m^2)
μ_w	Coefficiente de atrito característico da parede vertical	
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, $9,81 \text{ m/s}^2$	(m/s^2)
H	Peso do Pêndulo	(Kg)
Re_p	Número de Reynolds associado a partícula	
μ_f	Viscosidade dinâmica	(Pa.s)
v_f	Velocidade do fluxo	(m/s)
ρ_f	Massa específica do fluido	(Kg/m^3)
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)

Bandeira, Diego José Araújo. Análise numérica e experimental da vazão mássica de ração avícola em silos verticais com inserts. 2021. 80f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2021.

RESUMO

Os silos verticais são estruturas destinadas ao armazenamento de produtos pulverulentos ou granulares, a granel. Durante o descarregamento alguns problemas podem ocorrer, como a formação de arco coesivo e rathole. Os *inserts* são instrumentos utilizados para minimizar os problemas de fluxo em silos verticais. O objetivo principal desta pesquisa foi a análise numérica e experimental da vazão mássica e a velocidade de descarregamento do produto armazenado. Foi utilizado o *software* ANSYS 15.0, baseado no Método dos Volumes Finitos (FVM). Foi observado a influência dos *inserts* na solução de problemas de fluxo, sendo que o *insert 2* na segunda altura analisada., promoveu os melhores resultados para a melhoria do padrão de fluxo do produto armazenado. Tratando do modelo numérico todas as simulações realizadas apresentaram valores de erro médio inferiores a 15%, concluindo assim que o modelo proposto foi condizente com o modelo experimental.

Palavras Chave: Armazenagem. Construções Rurais. Volumes Finitos.

Bandeira, Diego José Araújo. Numerical and experimental analysis of the mass flow rate of poultry feed in vertical silos with inserts. 2021. 80f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2021.

ABSTRACT

One of the most necessary problems in the design of vertical silos is an accurate prediction of the load distribution in its body, with special attention to the pressure exerted on the walls due to the buoyancy of the stored product. The interaction of stored product and silo structure is extremely important to verify the loads acting on the body and hopper of the silo, as well as the product flow. The main objective of this research is a numerical and experimental analysis of the mass flow and the unloading speed of the stored product. From a numerical point of view, ANSYS 15.0 software was used, based on the Finite Volume Method (FVM). The influence of the inserts in the solution of flow problems was observed, with insert 2 in the second height analyzed. It promoted the best results for an improvement in the flow pattern of the stored product. Treating the numerical model all simulations dissipated mean error values lower than 15%, thus concluding that the proposed model was consistent with the experimental model.

Keywords: Storage. Rural Constructions. Finite Volumes.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 OBJETIVOS	18
2.1 Objetivo Geral	18
2.2 Objetivos Específicos.....	18
3 REVISÃO DE LITERATURA.....	19
3.1 Silo.....	19
3.2 Fluxo	19
3.3 Arqueamento e estado de tensão em silos.....	21
3.4 Propriedades Físicas.....	24
<i>3.4.1 Teor de umidade</i>	<i>24</i>
<i>3.4.2 Granulometria</i>	<i>25</i>
3.5 Propriedades de Fluxo	25
3.6 Inserts	29
3.7 Fluido Dinâmica Computacional	32
<i>3.7.1 Escoamento Multifásico</i>	<i>32</i>
<i>3.7.2 Método dos Volumes Finitos</i>	<i>33</i>
<i>3.7.3 Malha Computacional</i>	<i>33</i>
4 MATERIAL E MÉTODOS	35
4.1 Localização do Experimento.....	35
4.2 Metodologia.....	35
<i>4.2.1 Determinação da vazão mássica</i>	<i>39</i>
<i>4.2.2 Determinação da velocidade de descarregamento</i>	<i>41</i>
<i>4.2.3 Domínio Computacional: Malha</i>	<i>43</i>
<i>4.2.4 Modelagem matemática.....</i>	<i>43</i>
4.3 Propriedades de Fluxo	45

4.4 Teor de Umidade	48
4.5 Granulometria	48
4.6 Análise Estatística.....	48
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
5.1 Propriedades Físicas e de Fluxo	50
5.2 Malha Computacional.....	52
5.3 Análise da Vazão Mássica.....	54
5.4 Análise da Velocidade de Descarregamento	66
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	72
7 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	73
REFERÊNCIAS	74

1 INTRODUÇÃO

Silo vertical é um grande depósito para armazenar e conservar produto sólido, granular ou pulverulento, a granel, visando à qualidade final do produto. Os silos verticais são utilizados mundialmente 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 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).

A formação de canal de fluxo, arcos: coesivo ou mecânico e formação de *rathole* podem ocorrer durante o descarregamento do produto armazenado, dificultando seu fluxo e causando danos a sua estrutura onde, neste sentido, os *inserts* surgem como uma possível solução para mitigação destes problemas.

Assim, os *inserts* são alternativas construtivas, instaladas geralmente na zona de transição da tremonha de silos verticais, com objetivo de alterar o estado de tensão nesta zona, proporcionando a solução de problemas de fluxo das mais diversas naturezas e alteração do padrão de fluxo do produto armazenado.

Para a determinação das ações que ocorrem no interior do silo, a simulação é um método representativo com a aplicação de um modelo matemático, apresentando vantagens como permitir análise de fluxo e das pressões em silos com tremonhas de geometrias particulares, além da rapidez na obtenção dos resultados e da facilidade de acesso por meio de *softwares* prontos, motivos pelos quais foi disseminada a utilização dos métodos numéricos no estudo dos silos.

Dentre os modelos matemáticos utilizados na modelagem do padrão de fluxo, o método dos volumes finitos (FVM) é uma técnica numérica utilizada para simular o comportamento da mecânica dos fluidos, baseado em um esquema numérico explícito em que a interação partículas/partículas é relacionada com sua movimentação.

Diante do exposto, a necessidade da solução de problemas de fluxo em silos verticais, os quais provocam esforços extra nas paredes dos silos, seja no desmoronamento da massa estagnada ou da excentricidade do fluxo, assim, aplicações

alternativas construtivas, como o *insert*, para a solução de problemas de fluxo aliados a modelagem matemática junto ao avanço computacional, o que nos permite de forma rápida e eficaz a simulação do fenômeno, é de fundamental importância para futuro projetos de silos.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é analisar a vazão mássica e velocidade de descarregamento experimental de ração avícola em silo vertical com *inserts* e comparar os resultados com os obtidos utilizando o método dos volumes finitos simulados no *software* ANSYS 15.0.

2.2 Objetivos Específicos

- Verificar o efeito da utilização de *inserts* na vazão mássica da ração avícola e comparar os resultados experimentais com modelo numérico;
- Analisar a velocidade de descarregamento experimental e comparar com resultados obtidos no método numérico, com e sem *inserts*;
- Propor utilização do *insert* com geometria e posicionamento mais representativo, como solução para problemas de fluxo em silos verticais armazenando ração avícola.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Silo

Como a capacidade de armazenamento do Brasil é limitada, não acompanhando a produção agrícola do país o que proporciona perdas econômicas para os produtores, a construção de silos verticais surge como uma alternativa viável para solução deste problema (BANDEIRA; NASCIMENTO; NASCIMENTO, 2020), sendo estruturas fundamentais para conservação do produto e, sobretudo, exercem a função de regulador de estoques e preços (COSTA; LOPES NETO; NASCIMENTO, 2014). Outra vantagem dos silos é poder armazenar grande quantidade em espaço horizontal reduzido (DING *et al.*, 2013; COLONNELLO *et al.*, 2014).

Assim, os silos verticais podem ser conceituados como estruturas comumente utilizadas pelas indústrias, para armazenar e conservar a granel, produtos sólidos granulares ou pulverulentos (GALLEGO; AGUADO, 2015; YU *et al.*, 2017; ZHANG *et al.*, 2018; DORNELAS *et al.*, 2021), permitindo a implantação de recursos de movimentação de carga e descarga mecanizada (BARONI; BENEDETI; SEIDEL *et al.*, 2017), podendo ser classificados quanto ao material empregado, quanto à construção em relação ao solo e quanto a sua forma geométrica (ANJOS, 2018).

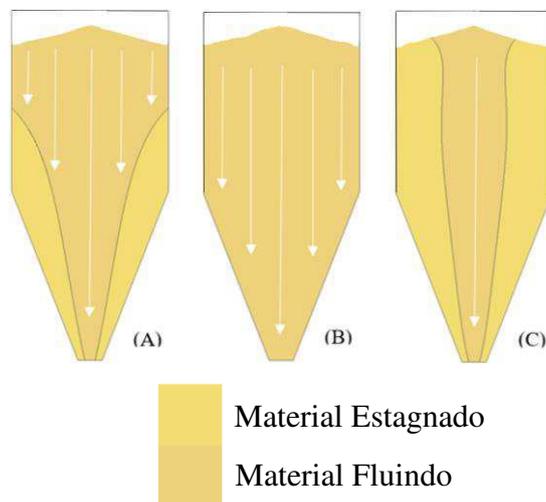
Um dos principais entraves para a determinação das pressões de carregamento e descarregamento de um silo armazenador é a atuação do produto armazenado sobre as paredes do silo, que é individualizada e específica para cada tipo de produto (MEIRA *et al.*, 2020). Sendo a exata predição da distribuição de cargas no corpo do silo, no carregamento e descarregamento, um dos principais problemas no seu dimensionamento (DING *et al.*, 2014; TASCÓN, 2017; FANK *et al.*, 2018; AYRES; NASCIMENTO; MASCARENHAS, 2020; BANDEIRA *et al.*, 2021).

3.2 Fluxo

Podemos observar em silos verticais basicamente três formas de padrão de fluxo, o fluxo de funil, fluxo de massa e o fluxo misto. No fluxo de funil durante o descarregamento, o material tende a formar um canal até o orifício de descarga, apresentando zonas de estagnação (Fig. 1A), no fluxo de massa o produto fluirá e não

existirão estas zonas de estagnação (Fig. 1B), já no fluxo misto (Fig. 1C), acontece a combinação entre fluxo de funil e fluxo de massa.

Figura 1 - Tipos de Fluxo: Fluxo de Funil (A), Fluxo de Massa (B) e Fluxo Misto (C).



Fonte: Acervo do Autor, 2021.

O padrão de fluxo no interior dos silos proporciona um efeito significativo na distribuição da pressão exercida em suas paredes, sendo que a alteração brusca do padrão de fluxo e o desmoronamento do produto armazenado causam um pico de tensão sobre a estrutura do silo (SALEH; GOLSHAN; ZARGHAMI, 2018; HAMMADEH *et al.*, 2019; XUE *et al.*, 2019).

O fluxo de massa apresenta vantagens quando comparado ao fluxo misto ou em funil por reduzir a possibilidade de zonas de estagnação, sendo mais uniforme que os demais e mantendo a vazão durante a descarga praticamente constante, com toda a capacidade de armazenamento 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 e as pressões as quais as paredes são submetidas são menores (KOCK, 2018; OGINNI; FASINA, 2018; OLIVARES *et al.*, 2018; FULLARD *et al.*, 2020).

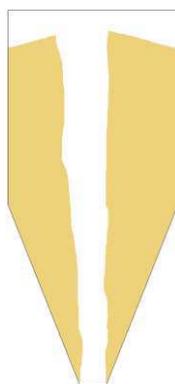
A rugosidade da parede do corpo do silo, que altera o ângulo de atrito do produto com a parede, além das propriedades de fluxo do produto, alterando o ângulo de atrito interno, interferem no fluxo do produto armazenado, sendo necessária utilização de ferramentas para amenizar os problemas de fluxo (KOYNOV; GLASSER; MUZZIO, 2015; MATHEWS; WU, 2016).

Alguns fenômenos característicos podem ser gerados durante o fluxo no descarregamento, como o aumento súbito e significativo das tensões de parede, diferentes padrões de fluxo, formação e propagação de zonas de cisalhamento no interior do silo e flutuação de pressões (WOJCIK *et al.*, 2017).

A massa estagnada pode manter-se estável em algumas situações mesmo quando os canais de fluxo são esvaziados, onde apenas algumas partículas se movimentam por ação da gravidade (Zheng; YU, 2015).

Outro fenômeno que ocorre no descarregamento de silos é 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) (Fig. 2).

Figura 2 - Rathole.



Fonte: Acervo do Autor, 2021.

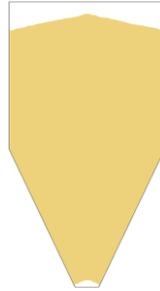
3.3 Arqueamento e estado de tensão em silos

Quando o produto armazenado, após consolidado, possui a resistência suficiente para suportar o seu próprio peso, ocorre a obstrução de fluxo (MARÍN, 2018; AYRES; NASCIMENTO; MASCARENHAS, 2020), podendo promover a parada total ou parcial do descarregamento (STARON; LAGRÉE; POPINET, 2014; SILVA; SANTOS, 2019), onde o fluxo pode ser obstruído pela formação de arcos (coesivo ou mecânico), prejudicando o escoamento do produto (CAMARGO; SANCHEZ, 2011), logo, o objetivo principal nos projetos de silos é garantir segurança, qualidade e eficiência do sistema onde o produto armazenado possa fluir sem obstruções (PAULA, 2020).

Admite-se que, se durante a descarga do produto nenhuma obstrução ocorra, um fluxo satisfatório acontecerá. Essas obstruções causam sérios danos aos silos e,

principalmente, à tremonha, pois quando rompem, intensificando as cargas, comprimindo o ar existente na tremonha, levando a danos no orifício de descarga e paredes laterais (DECKERS, 2014). Se um arco coesivo (Fig. 3) formar-se em uma tremonha, uma força resultante decorrente do peso do produto armazenado é transferida para as paredes da tremonha e, ao romper, toda esta força é direcionada ao corpo do silo (LOBATO *et al.*, 2016).

Figura 3. Arco coesivo.

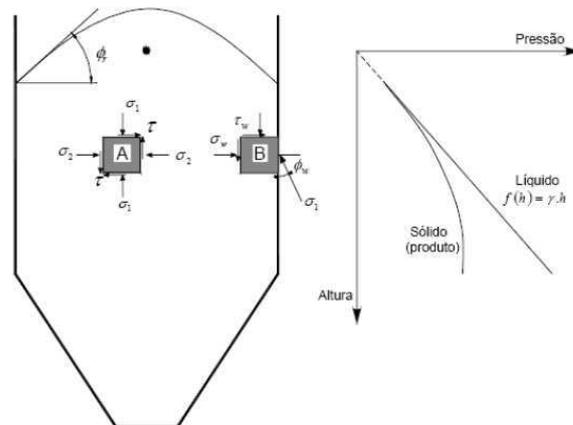


Fonte: Acervo do Autor, 2021.

Produtos de granulometria geralmente mais fina e mais coesivos apresentam a formação de arco, exigindo adaptações nas dimensões do orifício de descarga e maior inclinação da tremonha (PARK *et al.*, 2016).

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 coesão de suas partículas, o que pode proporcionar a formação de arcos (BATISTA, 2009).

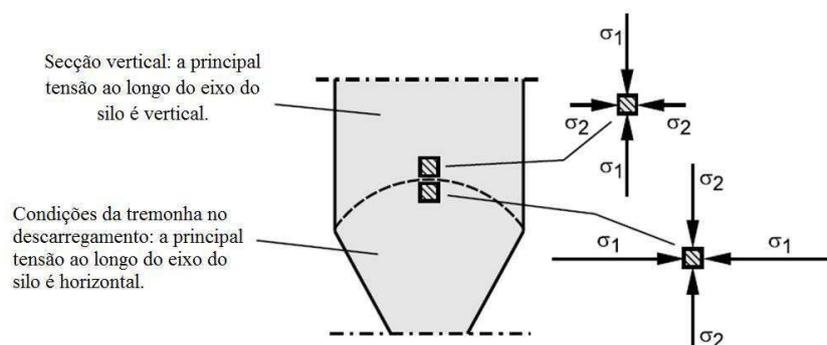
Durante o período em que o produto permanece armazenado no interior do silo, a ação atuante é devido ao seu peso próprio e a força gravitacional, de forma que o peso das camadas superpostas dividido pela área do silo fornece a tensão vertical atuante em cada camada (σ_v). Esta tensão aumenta com a profundidade do silo, conforme ilustrado na Figura 4. Também uma tensão horizontal (σ_h) atua no produto devido ao confinamento lateral ou restrição de deslocamento imposto pela parede do silo (CHEUNG, 2007).

Figura 4 - Estado de tensão no silo.

Fonte: Adaptado de Cheung (2007).

O produto granular dentro do silo está submetido a dois estados principais de tensões: o estado passivo 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 ativo 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).

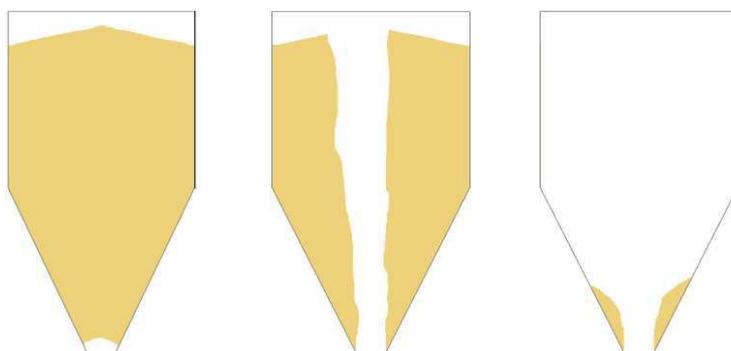
No descarregamento do produto armazenado, a tensão principal máxima σ_1 , acima da zona de transição é orientada na vertical, abaixo da zona de transição a tensão principal máxima σ_1 é orientada na horizontal (Fig. 5). Iniciando o fluxo do produto armazenado na tremonha, este é comprimido na direção horizontal, mas pode dilatar verticalmente. Assim, na tremonha a tensão horizontal é maior do que a tensão vertical durante o descarregamento (SCHULZE, 2008).

Figura 5 - 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 que podem ser: formação de um arco estável próximo à saída da tremonha (também conhecido como efeito arco (Fig. 6A), formação de um tubo de descarga (efeito tubo) (Fig. 6B) com grande parte do produto estagnado ao redor desse e descarga incompleta do produto (Fig. 6C), (MADRONA, 2008).

Figura 6 - Tipos de obstruções de fluxo.



(A) Obstrução em abóbada (B) Obstrução em tubo (C) Descarga incompleta

Fonte: Acervo do Autor, 2021.

3.4 Propriedades Físicas

3.4.1 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 produtos armazenáveis se altera de acordo com a variação do seu teor de umidade (SILVA *et al.*, 2011). Com acréscimo de umidade na ração avícola, torrões são formados, criando porções coesivas, dificultando assim o fluxo no silo armazenador.

3.4.2 Granulometria

O estudo granulométrico dos produtos armazenáveis torna-se indispensável a várias atividades no armazenamento, como o cálculo da potência de equipamentos para aeração, equipamentos transportadores e, principalmente, predizendo o tipo de fluxo que o produto apresenta (COSTA, 2013).

De acordo com Calil Júnior (1990) os produtos podem ser classificados, conforme a dimensão do diâmetro de suas partículas conforme Tabela 1.

Tabela 1 - Classificação dos produtos de acordo com a granulometria.

D (mm)	Classificação
$dp > 1,0$	Granulares
$0,297 \leq dp < 1,0$	Pulverulentos e/ ou pulverulentos coesivos
$0,079 \leq dp \leq 0,297$	Pulverulentos coesivos finos
$dp < 0,079$	Pulverulentos coesivos extrafinos

(dp) – diâmetro de partícula

Fonte: Adaptado de Calil Júnior (1990).

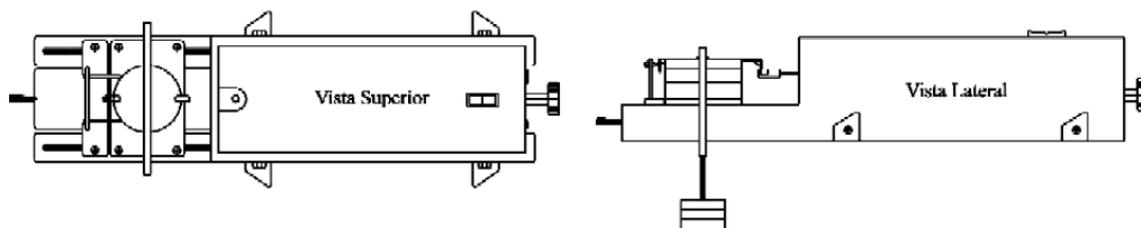
3.5 Propriedades de Fluxo

O conhecimento das propriedades de fluxo do produto armazenado é uma base fundamental para os processos de planejamento e dimensionamento de máquinas e equipamentos em quase todas as áreas da indústria (MELLMANN; HOFFMANN; FÜRLL, 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).

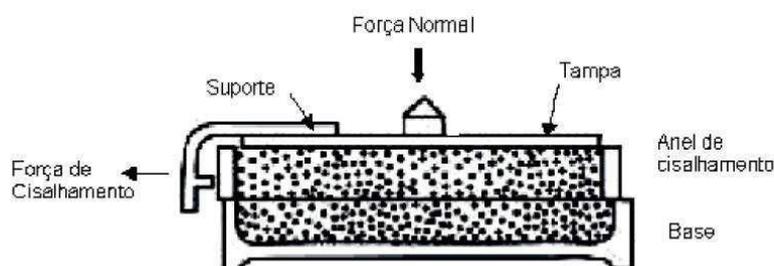
O aparelho de Jenike (Fig. 7) é composto basicamente por uma base cilíndrica fixa em uma bancada, um anel de cisalhamento, uma tampa e um pendural com pesos para a aplicação de uma força normal de compressão na tampa da célula de cisalhamento, detalhada na Figura 8.

Figura 7 - Esquema ilustrativo do aparelho de cisalhamento direto de Jenike.



Fonte: Adaptado de Jenike (1996).

Figura 8 - Esquema ilustrativo da célula de cisalhamento de Jenike.

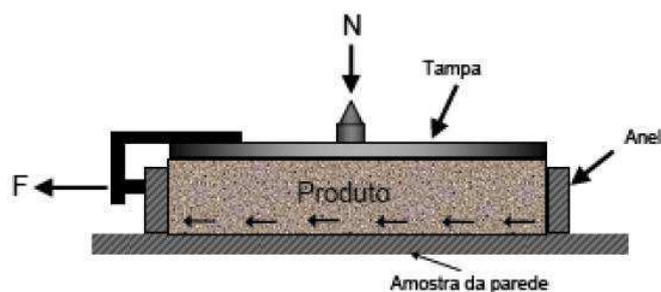


Fonte: Adaptado de Madrona (2008).

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 circulares em 90°. Antes do cisalhamento propriamente dito, a amostra é pré-cisalhada com o mesmo valor de tensão na qual ela foi homogeneizada (MADRONA, 2008).

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 (Fig. 9).

Figura 9 - Determinação do atrito com a parede na célula de Jenike.

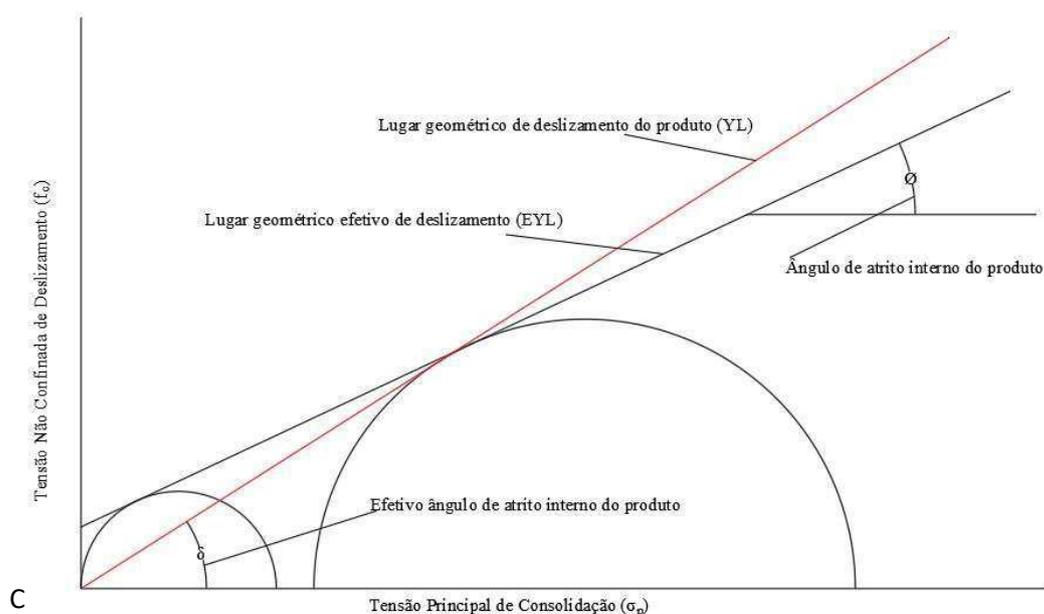


Fonte: Adaptado de Madrona (2008).

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; GLASSER; MUZZIO, 2015).

Considerando uma dada condição de consolidação, o lugar geométrico de deslizamento de produtos granulares de fluxo livre é a reta obtida pelo cisalhamento de uma amostra do produto sob várias cargas normais (famílias). Utilizando as tensões principais σ_M e σ_c atuantes em um elemento do produto armazenado para uma dada condição de consolidação é construído o respectivo círculo de Mohr. A reta que tangencia todos os círculos é então chamada de lugar geométrico de deslizamento do produto (YL) enquanto que seu ângulo de inclinação é chamado de ângulo de atrito interno do produto (ϕ) (MEDEIROS, 2012), conforme Figura 10.

Figura 10 - Lugares Geométricos de Deslizamento.



Fonte: Bandeira (2017).

Quando o produto não é de fluxo livre, a reta construída da forma acima indicada não passa pela origem. Nesse caso, a coordenada na qual essa reta corta o eixo é denominada de coesão (C). O ângulo de inclinação dessa reta é ainda o ângulo de atrito interno, mas a reta que passa pela origem e tangencia o círculo de Mohr definido pela maior e menor tensão principal é então denominada de lugar geométrico efetivo de deslizamento (EYL) e o respectivo ângulo de inclinação passa a ser denominado ângulo efetivo de atrito interno (δ), (MEDEIROS, 2012).

O ângulo de atrito do produto com a parede é a medida da capacidade do produto, previamente em repouso, resistir ao fluxo em relação ao material da parede do recipiente (BIAN *et al.*, 2015).

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

O atrito entre o produto e a parede do silo ocorre quando este desliza ao longo da parede. A relação entre a tensão de cisalhamento e a tensão normal à parede formará uma reta que definirá o lugar geométrico de deslizamento com a parede (WYL). A sua inclinação será o ângulo de atrito do produto com o material da parede do silo (BENINK, 1989).

Para determinação das características geométricas de silos como inclinação das 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).

A coesão é a tensão de cisalhamento sob a tensão normal nula (GARBAZZA, 2011). Um dos fatores que contribuem para a coesão é a presença de pó, que é definido pelo ensaio granulométrico (CALIL JUNIOR; CHEUNG, 2007).

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 tensão de consolidação (σ_M) e a resistência inconfina (σ_C).

Observa-se que a escoabilidade do produto é inversamente proporcional a inclinação da reta FF. Outro parâmetro importante para classificação do fluxo segundo Jenike (1964), é o Índice de fluxo (ff_c) o qual é definido como o inverso da inclinação de FF e pode variar de uma condição de ausência de fluxo até outra caracterizada como de fluxo livre. Jenike (1964) usou o ff para classificar os produtos armazenáveis quanto à sua escoabilidade, sendo que altos valores representam uma condição de fluxo fácil conforme mostrado na Tabela 2.

Tabela 2. Classificação da capacidade de fluxo dos produtos armazenáveis segundo Jenike (1964).

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

Fonte: Adaptado de Jenike (1964).

3.6 Inserts

O *insert* é um dos meios utilizados para influenciar benéficamente o padrão de fluxo em silos verticais, evitando a formação de obstruções e alterando seu padrão de fluxo, alteram também as forças atuantes ao longo do corpo do silo e principalmente na tremonha (KOBYLKA; MOLENDAS; HORABIK, 2019).

Soluções de equipamentos como sistemas de injeção de ar e vibradores, envolvem um custo adicional, o que não é atrativo para o setor industrial (GÓMEZ, 2016). Desta forma, a utilização de *inserts* para alterar o padrão de fluxo em silos verticais, devido à modificação do estado de tensão em um silo, conseqüentemente seu padrão de fluxo (WOJCIK *et al.*, 2012).

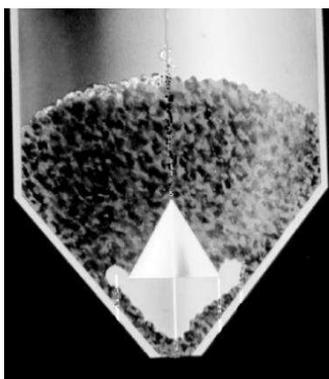
Johanson e Kleysteuber (1996) foram os primeiros a propor a utilização de *inserts* para melhorar os padrões de fluxo do produto armazenado durante o descarregamento, os estudos com *inserts* geralmente tratavam de cargas atuantes na tremonha, provocadas por suas utilizações e seus estudos mostraram 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 influencia apenas o fluxo do produto armazenado em um silo, 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 entrar em contato com a superfície superior do *insert* utilizado (MATUSZEK; TUKIENDORF, 2008).

Resultados mostram que a introdução 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. 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; LI *et al.*, 2016).

Uma das configurações de *insert* mais comum é um cone invertido ou pirâmide como mostrado na Figura 11. No entanto, 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 de facilitar o escoamento (CARSON, 2008).

Figura 11 - *Insert* cone invertido.



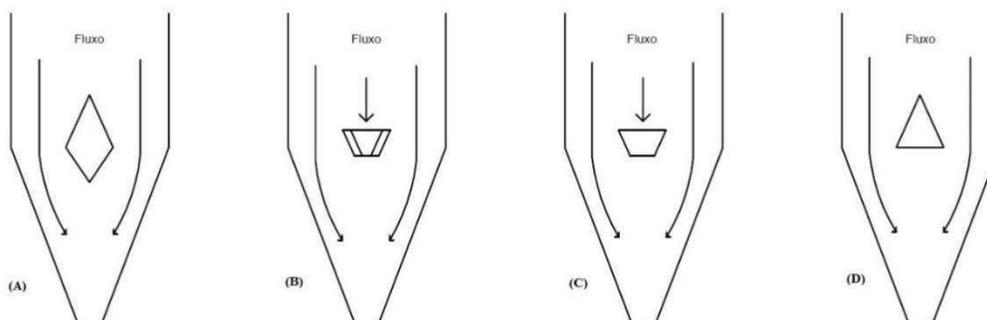
Fonte: Adaptado (CARSON, 2008).

A utilização inadequada de *inserts* pode provocar diversos problemas de fluxo, conforme o *insert* se aproxima do orifício de descarga, ele provoca a obstrução do fluxo e formação de arcos coesivos (CARSON, 2014).

As inserções em silos são geralmente colocadas dentro da tremonha para melhorar o padrão de fluxo do produto armazenado e, 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; DING *et al.*, 2013; GÓMEZ, 2020).

Os tipos comuns de *insert* utilizados incluem: cone duplo (Fig. 12A), cone em cone (Fig. 12B), cone em cone duplo (Fig. 12C) e cone invertido (Fig. 12D), (WÓJCIK; TEJCHMAN; ENSTAD, 2012).

Figura 12 - Principais tipos de *inserts*.



Fonte: Bandeira (2017).

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; DING *et al.*, 2011).

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; KLEYSTUEBER, 1966).

O posicionamento do *insert* influencia diretamente em sua funcionalidade e 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, com 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, responsável pela obstrução do orifício de descarga, dificultando assim o fluxo. Entretanto, em aplicações experimentais, eles se transformam em facilitadores, promovendo resultados positivos quanto a modificação de padrão de fluxo (LÓPEZ; PASTORELLO; ARCE, 2014).

Apesar do avanço das pesquisas, ainda não há recomendações detalhadas em normas de como calcular as cargas nos *inserts* e sua influência na distribuição de pressão ou no padrão de fluxo (HAMMADEH *et al.*, 2019).

3.7 Fluidodinâmica Computacional

Malalasekera e Versteeg (2007), definem a Fluidodinâmica computacional, do inglês *Computational Fluid Dynamics* (CFD), como a análise de escoamentos, transferência de calor e fenômenos associados a reações químicas através de simulações realizadas em computadores.

A CFD é uma ferramenta poderosa aplicada em projetos de engenharia, utilizada a partir da década de 1990, com o auxílio da evolução dos computadores, possibilitando resultados com maior acurácia para escoamentos complexos e onde a instrumentação de equipamentos industriais se torna difícil (OLIVERIA *et al.*, 2012).

Existem diversos pacotes abertos e comerciais de *softwares* que simulam os mais diversos tipos de escoamento (bi ou tridimensionais, monofásicos ou multifásicos, etc.), que se diferenciam em diversos fatores, tais como: Construção da geometria, geração da malha (estruturada ou não estruturada), modelos de turbulência interfacial, método de resolução de equações (diferenças finitas, elementos finitos ou volumes finitos) (FERREIRA, 2019).

3.7.1 Escoamento Multifásico

Estudos envolvendo escoamentos multifásicos podem ser definidos para qualquer sistema de escoamento de fluido que haja duas ou mais fases distintas presente simultaneamente, apresentando uma separação entre as fases acima em nível microscópico (FERREIRA, 2019). Combinando essas fases, Yeoh e Tu (2010) definem os escoamentos multifásicos como:

- Escoamento Gás-Líquido – Como exemplo temos o movimento de bolhas em um fluxo líquido, enquanto o outro é o movimento de gotículas líquidas em um gás.
- Escoamento Líquido-Sólido – Que consiste no transporte de partículas sólidas em um escoamento líquido.

- Escoamento Gás-Sólido – Onde existe o transporte de partículas sólidas em um fluxo gasoso, ou o escoamento de partículas sólidas em um meio gasoso.

3.7.2 Método dos Volumes Finitos

O método dos elementos finitos (FEM) tem tido importante avanço na última década, conseguindo resolver com sucesso os desafios da mecânica de fluidos e ainda para problemas mais complexos relacionados a fluxos multifásicos, reativos, fortemente turbulentos ou particulado.

Os métodos numéricos trazem vantagens como permitir análise das pressões em silos com geometrias particulares, como a descarga excêntrica ou silos com tremonhas, assim como a possibilidade de escolha de uma teoria de comportamento mais coerente com a realidade para o produto armazenado, incluindo comportamento plástico e não-linear (MADRONA, 2008).

O método dos volumes finitos tem como objetivo substituir a solução contínua das equações diferenciais parciais das equações de conservação por valores discretos, realizando resumidamente os seguintes passos (FERREIRA, 2019):

- Integração das equações de conservação sobre todos os volumes de controle;
- Aplicação do teorema da divergência nas integrais dos termos convectivos e difusivos;
- Substituição da integral de superfície sobre os volumes de controle pelo somatório dos termos de fluxo sobre a face dos elementos;
- Uso da quadratura gaussiana;
- Obtenção das equações algébricas;
- Resolução das equações algébricas por um método numérico.

3.7.3 Malha Computacional

Uma malha computacional nada mais é que uma representação ou a “discretização” do plano físico utilizado na simulação numérica. A solução de um sistema de equações diferenciais (modelo matemático) pode ser geralmente simples quando empregado uma malha bem construída.

A densidade da malha é um fator importante na simulação CFD, já que está diretamente envolvida no custo computacional da solução. O teste de malha consiste em realizar simulações refinando a malha até não encontrar diferenças significativas nos valores preditos das variáveis observadas. Este processo é muito importante, uma vez que o desempenho da simulação é dependente da qualidade e das características da malha gerada para uma determinada complexidade geométrica (ERDEMIR *et al.*, 2012).

A utilização simultânea de dois ou mais tipos de elementos na solução de problemas, também conhecidas como malhas híbridas, se mostra muito útil em situações de elevada complexidade da geometria e limitações na disponibilidade de recurso computacional.

4 MATERIAL E MÉTODOS

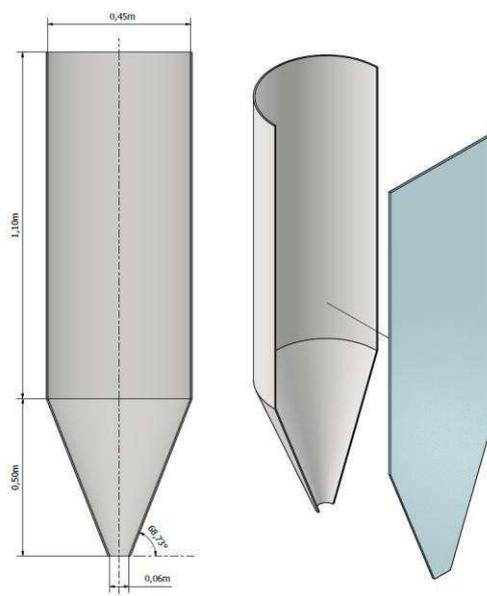
4.1 Localização do Experimento

As propriedades de fluxo, a granulometria e o teor de umidade, caracterização de fluxo foram determinados por Bandeira (2017), a análise de velocidade de descarregamento foi realizada Laboratório de Beneficiamento de Sementes, utilizando ração avícola destinada a fase de postura no período de junho a novembro de 2016. A modelagem numérica, testes de malha e a simulação computacional foram realizados no Laboratório de Simulação (LABSIM) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

4.2 Metodologia

Para analisar o comportamento do fluxo da ração avícola, adotou-se um silo cilíndrico seccionado verticalmente, com corpo de aço liso, e para vedar 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. Utilizando também uma tremonha com 0,50 m de altura e inclinação de $68,73^\circ$ com a horizontal, com 0,06m de orifício de descarga, totalizando uma capacidade de armazenamento de $0,1 \text{ m}^3$ (Fig. 13).

Figura 13 - Modelo do silo analisado.

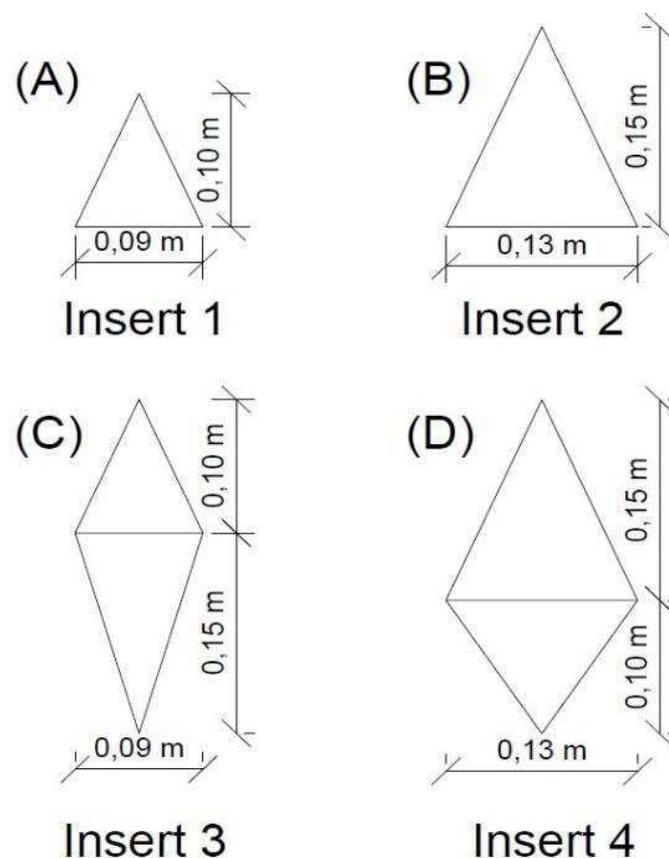


Fonte: Acervo do Autor, 2021.

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, foram utilizados quatro tipos de *inserts* confeccionados em aço zincado, sendo dois cones invertidos (Fig. 14A e 14B) e dois cones duplo (Fig. 14C e 14D).

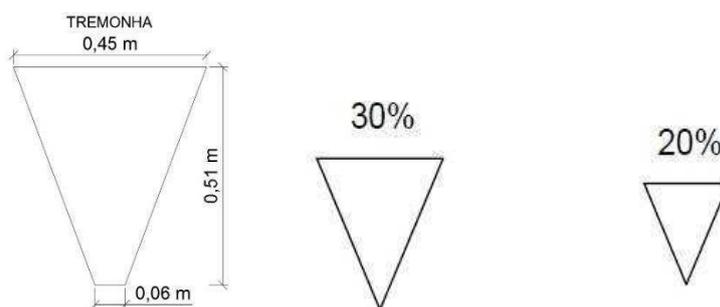
Figura 14 - Detalhamento dos *inserts*.



Fonte: Bandeira (2017).

As dimensões dos *inserts* foram relacionadas com as dimensões da tremonha correspondendo a 20 e 30%, para o *insert* 1 e 2 respectivamente, seguindo metodologia utilizada por Ding *et al.* (2015), conforme mostrado na Figura 15, as dimensões dos mesmos estão detalhadas na Tabela 3.

Figura 15 - Representação da proporcionalidade dos *inserts* com a tremonha.



Fonte: Bandeira (2017).

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

Tabela 3 - Dimensões dos *inserts* utilizados.

	Cone Superior		Cone Inferior	
	RT (%)	hxb (m)	RT (%)	hxb (m)
<i>Insert 1</i>	20	0,10 x 0,09	-	-
<i>Insert 2</i>	30	0,15 x 0,13	-	-
<i>Insert 3</i>	20	0,10 x 0,09	-	0,15 x 0,09
<i>Insert 4</i>	30	0,15 x 0,13	-	0,10 x 0,13

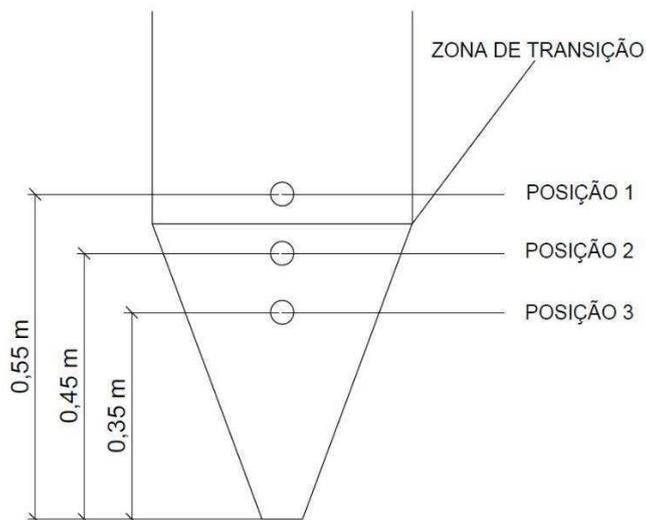
RT – Relação com a Tremonha; h – altura; b – base. **Fonte:** Bandeira (2017).

Para seleção das geometrias de *inserts* a serem analisadas, foram considerados estudos realizados por Ding *et al.* (2015) e Li *et al.* (2016), nos quais os resultados obtidos demonstram que *inserts* de cone invertido e cone duplo, foram os mais promissores. Segundos os autores, assim como a geometria, as dimensões também influenciam a eficiência dos *inserts*, sendo utilizadas tais recomendações para dimensionamento dos *inserts* na atual pesquisa.

As três diferentes posições dos *inserts* utilizadas nesta pesquisa são: 0,35; 0,45 e 0,55 m em relação ao orifício de descarga (Fig. 16), 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. Todas as posições aplicadas podem ser visualizadas na Figura 17.

Figura 16 - Detalhamento das posições analisadas.



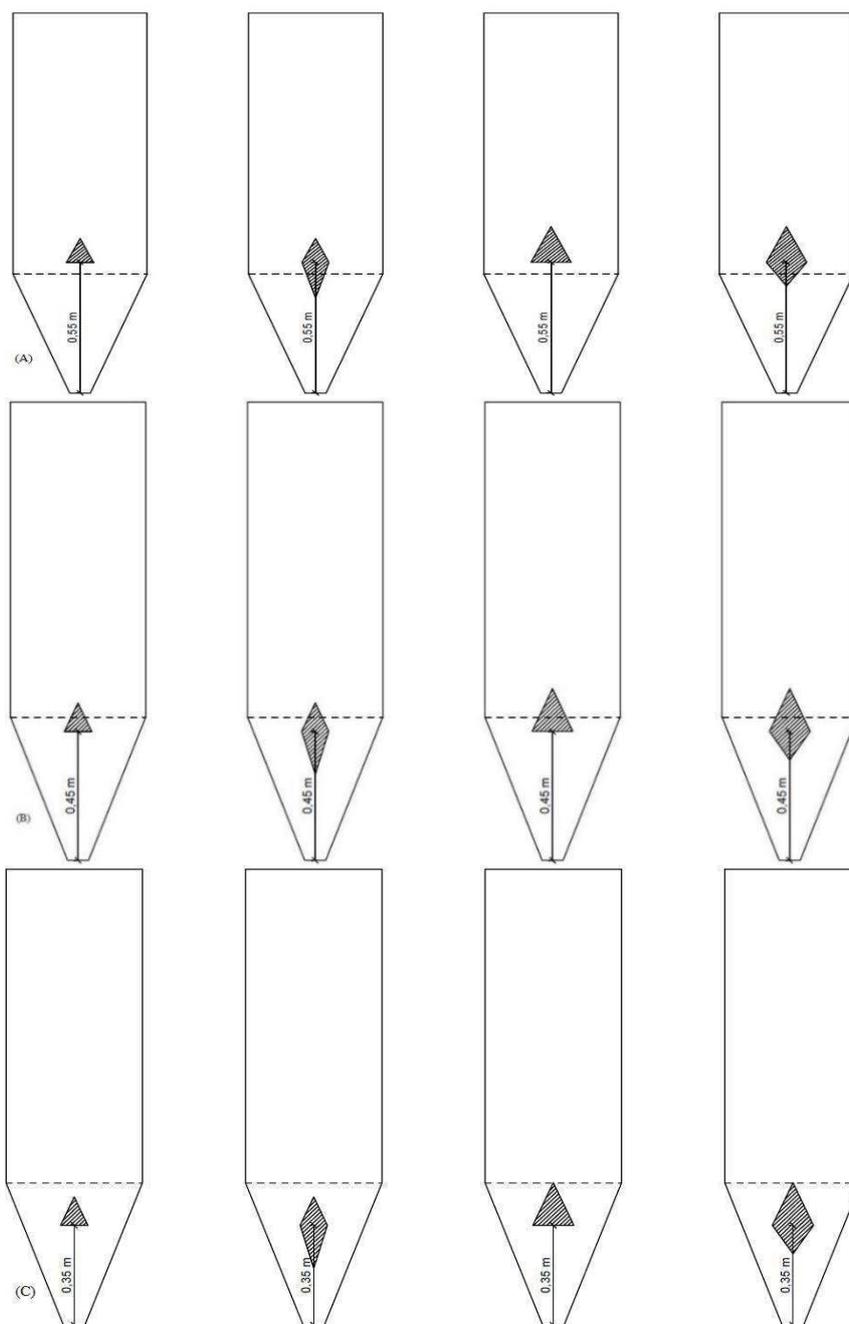
Fonte: Bandeira (2017).

Para as posições analisadas, também foram considerados os estudos realizados por Wojcik *et al.* (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, conseqüentemente facilitando o fluxo.

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 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.

Os *inserts* foram fixados na parede de vidro que compunha o silo com fita dupla face, haja vista que as dimensões do silo e dos *inserts* e as tensões sobre esses elementos não eram suficientes para provocar deslocamento destes.

Figura 17 - Posicionamento dos *inserts*, (A) Posição 1, (B) Posição 2 e (C) Posição 3.



Fonte: Bandeira (2017).

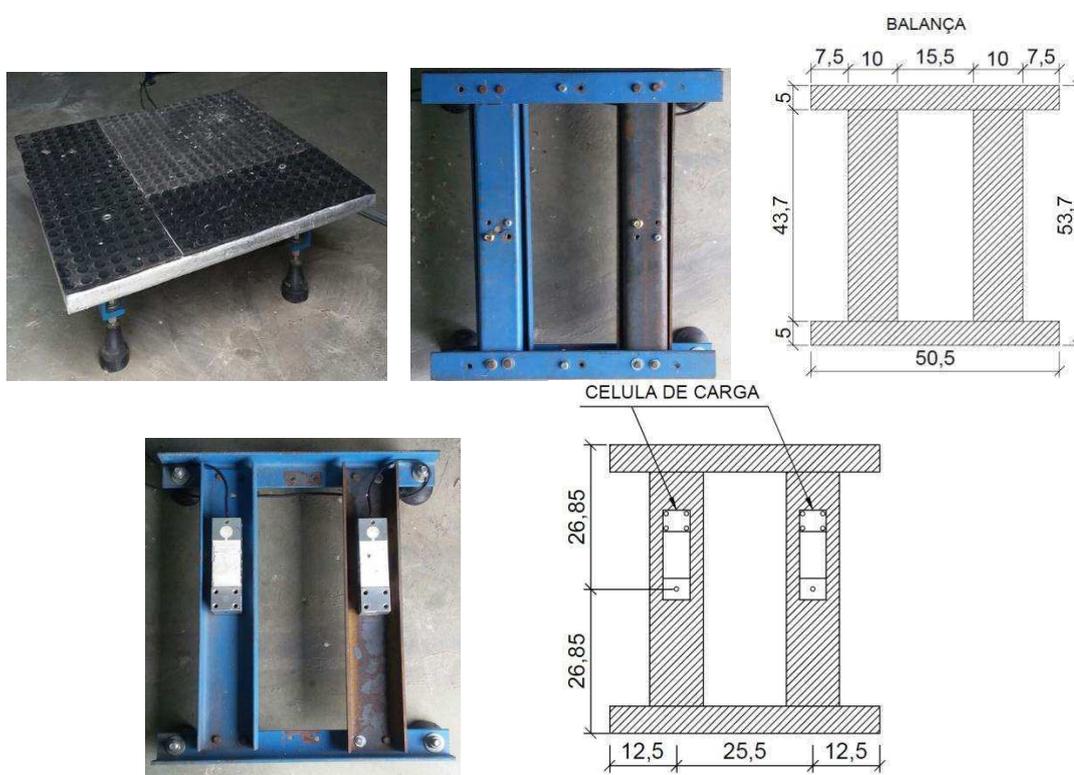
4.2.1 *Determinação da vazão mássica*

Todos os ensaios foram realizados em quintuplicata, onde após o carregamento foi realizado o descarregamento de forma instantânea, para todos os ensaios realizados. A vazão, por sua vez, foi determinada levando-se em consideração a massa do produto descarregada por unidade de tempo.

Para obtenção da vazão mássica experimental, foi utilizada uma balança confeccionada no LaCRA com capacidade máxima de 200,00 kg e de 75,0 x 75,0 cm, acoplada a um sistema de aquisição de dados, para leitura instantânea da vazão mássica.

A balança possui configuração em II onde foram instaladas duas células de carga com capacidade de 100,00 kg cada, posicionadas de forma equidistantes de modo que o peso do silo carregado fosse igualmente distribuído entre elas, conforme mostrado no esquema da Figura 18, onde também estão apresentadas todas as dimensões da balança.

Figura 18 - Detalhamento da balança e posicionamento das células de carga com dimensões em cm.



Fonte: Bandeira (2017).

Para coleta dos dados foi utilizado o sistema de aquisição de dados *Spider 8* do fabricante *HBM*, sendo programado utilizando-se o *software Catman* versão 4.5, o qual foi configurado para salvar os dados numa frequência de 2 Hz, e com os dados coletados foram gerados gráficos utilizando o *software Microsoft Office Excel*® 2007.

Durante todos os ensaios, foi verificado o posicionamento do silo para exata distribuição das cargas entre as células, assim como o seu nivelamento, o que poderia interferir diretamente no fluxo do produto armazenado. Todo o equipamento utilizado nesta fase experimental está ilustrado na Figura 19.

Figura 19 - Conjunto distribuidor, silo e balança.

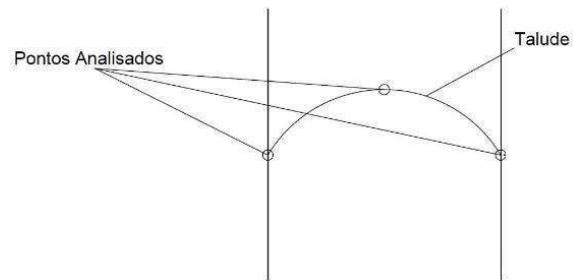


Fonte: Bandeira (2017).

4.2.2 Determinação da velocidade de descarregamento

Para determinação da velocidade média de descarregamento, considerando que as partículas possuem velocidade diferente ao longo do plano horizontal de descarregamento, foram analisados três pontos da massa armazenada conforme ilustrado na Figura 20, conseqüentemente foi determinada a média entre esses pontos, desta forma temos a velocidade média de descarregamento. Todas as análises foram feitas em quintuplicata para todas as situações estudadas nesta pesquisa.

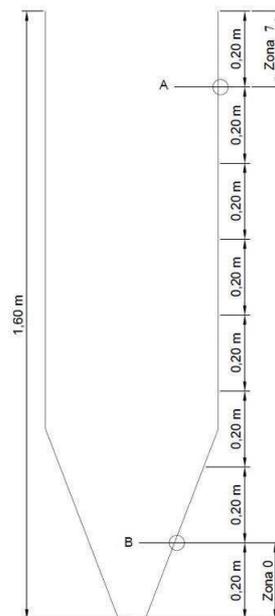
Figura 20 - Pontos Analisados na determinação da velocidade de descarregamento.



Fonte: Bandeira (2014).

Foi considerada a região entre o ponto A e o ponto B para determinação da velocidade de descarregamento, considerando zonas de 0,20m de distância, ilustrados na Figura 21. Desta forma, era analisado o tempo em que o ponto analisado se deslocava entre as zonas estabelecidas, ou seja, tempo em segundos da partícula no deslocamento de 0,20m, temos assim velocidade (m/s). A parte acima do ponto A foi descartada, por ser a região do talude do produto armazenado, a região entre o ponto B e o orifício de descarga foi descartado, pois sua velocidade de descarregamento seria igual para todas as situações analisadas, afinal, não teria mais influência alguma dos *inserts* que são objeto de estudo desta pesquisa.

Figura 21 - Zonas analisadas na determinação da velocidade média de descarregamento.



Fonte: Acervo do Autor, 2021.

4.2.3 Domínio Computacional: Malha

Para geração da geometria dos modelos a serem utilizados será utilizado o *software* Inventor da Autodesk, onde serão gerados todos os arquivos de importação. A malha será confeccionada com elementos tetraédricos, no ANSYS, sendo refinada nos locais críticos, utilizando como base para determinação dos locais de refinamento os dados dos ensaios experimentais, sendo aplicado testes de dependência de malha para sua otimização.

4.2.4 Modelagem matemática

Com base na abordagem Lagrangiana e nas características particulares de um escoamento particulado, considerando as equações governantes do sistema na Tabela 4, na modelagem do fluxo no silo serão adotadas as seguintes considerações:

- Regime transiente;
- Fluxo particulado;
- Escoamento multifásico (fase contínua e uma fase discreta);
- O ar será considerado um fluido incompressível;
- Escoamento turbulento (Modelo K - ϵ);
- Desconsiderar a temperatura;
- Não acontecerá reações químicas.

Tabela 4 - Equações Governantes.

Equações Governantes		
Translação da partícula	$\frac{d\vec{x}_p}{dt} = \vec{v}_p$	(Eq. 1)
Momento da partícula	$m_p \frac{d\vec{v}_p}{dt} = \sum \vec{F}$	(Eq. 2)
Conservação de massa		
Fase contínua	$\frac{\partial \rho_c}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_c \vec{v}_c) = S_m$	(Eq. 3)
Fase Dispersa	$M = \frac{\Delta m_p}{m_{p,0}} \dot{m}_{p,0}$	(Eq. 4)
Equações do momento		
Fase Contínua	$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_c \vec{v}_c) + \nabla \cdot (\rho_c \vec{v}_c \vec{v}_c) = -\nabla p + \nabla \cdot (\vec{\tau}) + \vec{F}$	(Eq. 5)
Fase Dispersa	$\frac{d\vec{v}_p}{dt} = F_D + \vec{F}$	(Eq. 6)
Coefficiente de Arraste	$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho_d (\vec{v}_c - \vec{v}_p)^2 A_p}$	(Eq. 7)
Força de empuxo	$\vec{F}_B = \frac{\pi}{6} d_p^3 (\rho_p - \rho_c) \vec{g}$	(Eq. 8)

Fonte: Acervo do Autor (2021).

Avelar (2012) enfatizou o número de Reynolds como um grupo adimensional conhecido baseado do diâmetro da partícula, definida pela equação 9:

$$Re_p = \frac{d_p v_r \rho_f}{\mu_f} \quad \text{Eq. (9)}$$

Com $Re_p = 835$, considerando a Tabela 5, consideramos o fluxo particulado como turbulento, mesma consideração realizada por outros pesquisadores (ARMENIO; FIOROTTO, 2001; DEVILLA; COUTO; QUEIROZ, 2004; ROCHA, 2012; AVELAR, 2013; FAORO, 2014; NASCIMENTO, 2014; BARBOSA, 2015; FERREIRA, 2019).

Tabela 5 - Regime de escoamento para número de Reynolds da partícula.

Regime	Re_p
Regime Laminar	$Re_p < 0,4$
Regime Intermediário	$0,4 < Re_p < 500$
Regime Turbulento	$500 < Re_p < 200000$
Regime de Alta Turbulência	$Re_p > 200000$

Fonte: Adaptado de Avelar (2013).

Utilizando assim o Modelo K - ϵ , comum em simulações de escoamento particulado corroborando com (BLOCKEN; CARMELIET; STATHOPOULOS, 2007a; BLOCKEN; CARMELIET; STATHOPOULOS, 2007b; BLOCKEN *et al.*, 2008; PONTIGGIA *et al.*, 2009; AVELAR, 2013; FERREIRA, 2019).

4.3 Propriedades de Fluxo

Para determinação das propriedades de fluxo foi adotada a metodologia recomendada pela ASTM (2013) utilizando o aparelho TSG 70/140 utilizando os anéis de cisalhamento “*Jenike Shear Cell*” (Fig. 22), 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 22 - Jenike Shear Cell, utilizado para determinação das propriedades de fluxo.



Fonte: Bandeira (2017).

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 6:

Tabela 6 - 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: Bandeira (2017).

É necessário calcular 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 foram mensuradas as tensões normais de consolidação e a resistência confinada estão representadas abaixo:

$$\gamma = \frac{W_t - (W_b + W_r + W_L)}{V_t} \quad (\text{Eq.10})$$

$$\tau_s = \tau \frac{\bar{\tau}_p}{\tau_p} \quad (\text{Eq.11})$$

$$\tau_p = \frac{S_p}{A} g \quad (\text{Eq.12})$$

$$\tau = \frac{S_s}{A} g \quad (\text{Eq.13})$$

$$\sigma_p = \left(\frac{H + W_b + W_r + W_L + \gamma W_r}{A} \right) g \quad (\text{Eq.14})$$

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_1^n \tau_p}{n} \quad (\text{Eq.15})$$

$$\sigma_s = \left(\frac{H + W_s + W_r + W_L + \gamma W_r}{A} \right) g \quad (\text{Eq.16})$$

$$\bar{\sigma}_p = \frac{\sum_1^n \sigma_p}{n} \quad (\text{Eq.17})$$

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 foram calculados com as equações (18) e (19) 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).

$$\sigma_w = \left(\frac{W_{wt} + W_w - W_m + H}{A} \right) g \quad (\text{Eq.18}) \quad \tau_w = \frac{S_w}{A} g \quad (\text{Eq.19})$$

Onde,

$\hat{\phi}_w$	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 ($\hat{\phi}_w$, τ_w) foi obtido o lugar geométrico de deslizamento do produto com a parede. Quando este lugar for uma reta, o ângulo de atrito com a parede ($\hat{\phi}_w$) é constante. Assim, o ângulo de atrito com a parede foi obtido pela equação (20).

$$\phi_w = \arctan \frac{\tau_w}{\sigma_w} \quad (\text{Eq.20})$$

4.4 Teor de Umidade

O teor de umidade foi determinado por meio do método padrão de estufa, com circulação de ar à 105 ± 3 °C, durante 24 horas, segundo recomendações do MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (BRASIL, 2009).

4.5 Granulometria

A granulometria foi determinada por um agitador mecânico de peneiras (Fig. 23), 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 passante em cada peneira determinando, assim, sua percentagem.

Figura 23 - Agitador mecânico de peneiras.



Fonte: Bandeira (2017).

4.6 Análise Estatística

O delineamento utilizado foi inteiramente casualizado em esquema fatorial 4x3 com cinco repetições por parcela experimental, totalizando 12 ensaios distintos, sendo o fator 1 o formato do *insert* este com 4 níveis (quatro diferentes geometrias), o segundo fator é o posicionamento do *insert* em relação ao orifício de descarga com 3 níveis (três diferentes alturas), verificando os efeitos dos ensaios realizados.

Os dados foram analisados através do teste F da análise de variância (ANOVA). Havendo diferença significativa ($P < 0,05$) entre as médias analisadas, os dados foram submetidos ao teste de Tukey com uma probabilidade de erro de 5%. A normalidade da distribuição dos resíduos dos dados foi testada através do teste de Shapiro-Wilk ($P >$

0,05). A homogeneidade das variâncias das amostras foi testada através do teste de Bartlett. Valores de probabilidade inferiores a 0,05 ($P < 0,05$) foram considerados significativos, para a análise estatística, foi utilizado o *software* Assistat 7.7 beta.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Propriedades Físicas e de Fluxo

Na Tabela 7 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. Contudo, 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, um dos fatores foi o teor de gordura da ração analisada nesta

pesquisa (4,8%) 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 como material de construção do silo, 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 7 - 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

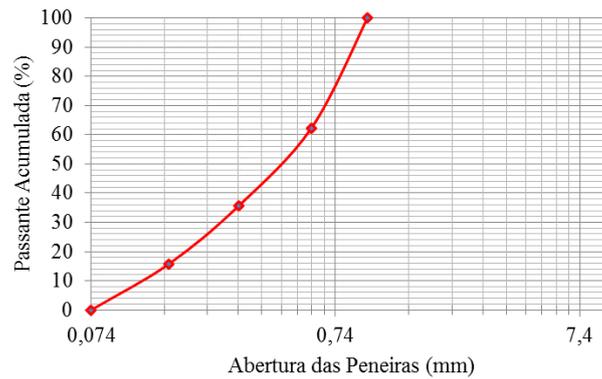
γ = peso específico consolidado (N/m³); \emptyset = ângulo de atrito interno (°); δ = efetivo ângulo de atrito interno (°); $\emptyset w$ = ângulo de atrito interno com parede de aço rugoso (°); C = coesão (Pa); ff_c = Índice de fluxo de Jenike; inf; sup = limite inferior e superior, respectivamente. **Fonte:** Bandeira (2017).

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 24 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 24 - Comportamento granulométrico da ração avícola.



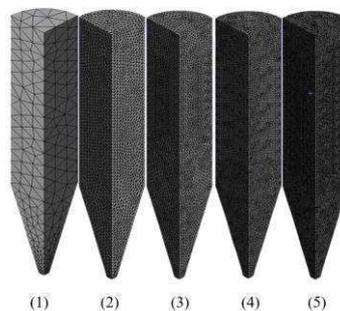
Fonte: Bandeira (2017).

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.

5.2 Malha Computacional

Foram testados cinco tipos de malhas Figura 25, aumentando seu refinamento para reduzir sua influência nos resultados obtidos, a quantidade de nós e elementos contidos em cada malha está disposto na tabela 8.

Figura 25 - Malhas computacionais analisadas.



Fonte: Acervo do Autor (2021).

Tabela 8 - Número de nós e elementos das malhas analisadas.

	Malha 1	Malha 2	Malha 3	Malha 4	Malha 5
Nós	539	10370	19092	30128	52102
Elementos	1869	50440	95795	153195	267759

Fonte: Acervo do Autor (2021).

Observamos na Tabela 9 o efeito do refinamento da malha sobre os resultados simulados, como a diferença entre a malha 4 e a malha 5 foi inferior a 3,5%, e a demanda computacional inferior, utilizamos a malha 4 para realização das simulações.

Tabela 9 - Teste de malha para vazão mássica (Kg/s) sem utilização de *insert*.

Tempo (s)	Malha 1	Malha 2	Malha 3	Malha 4	Malha 5
0	1,01	0,71	0,65	0,61	0,61
5	1,12	0,85	0,75	0,71	0,71
10	0,95	0,76	0,69	0,68	0,68
15	0,98	0,75	0,72	0,71	0,71
20	0,83	0,73	0,69	0,68	0,68
25	0,95	0,84	0,77	0,75	0,75
30	0,94	0,86	0,78	0,75	0,75
35	0,90	0,81	0,79	0,75	0,75
40	0,88	0,73	0,67	0,66	0,66
45	0,84	0,68	0,65	0,62	0,62
50	0,93	0,69	0,68	0,65	0,65
55	0,98	0,62	0,61	0,59	0,59
60	0,89	0,69	0,63	0,58	0,58
65	0,78	0,62	0,59	0,55	0,55
70	0,98	0,65	0,6	0,59	0,59
75	0,87	0,66	0,64	0,63	0,63
80	0,92	0,75	0,73	0,72	0,72
85	0,98	0,79	0,75	0,71	0,71
90	0,92	0,71	0,68	0,67	0,67
95	0,98	0,68	0,64	0,64	0,64
100	0,89	0,71	0,68	0,65	0,65
105	0,93	0,79	0,73	0,70	0,70
110	0,86	0,75	0,69	0,69	0,69
115	0,93	0,75	0,74	0,70	0,70
120	0,98	0,71	0,69	0,69	0,69

Fonte: Acervo do Autor (2021).

5.3 Análise da Vazão Mássica

Na tabela 10 encontram-se os resultados médios obtidos para vazão mássica experimental de todos os ensaios realizados, observando que a aplicação dos *inserts* estudados, em suas respectivas posições influenciaram na vazão mássica experimental.

Tabela 10 - Determinação da vazão mássica experimental.

		Tempo de Descarregamento (s)	Produto Armazenado (kg)	Vazão experimental (kg.s ⁻¹)
SI	-	121	79,142±0,592	0,654±0,010
I1	Posição 1	116	79,265±0,348	0,683±0,006
	Posição 2	112	78,754±0,452	0,703±0,012
	Posição 3	113	79,372±0,214	0,712±0,008
	Média	114	79,130±0,350	0,699±0,009
I2	Posição 1	111	78,875±0,379	0,711±0,007
	Posição 2	110	79,142±0,361	0,719±0,007
	Posição 3	111	78,852±0,287	0,710±0,005
	Média	111	78,956±0,342	0,713±0,006
I3	Posição 1	115	78,652±0,193	0,684±0,003
	Posição 2	116	77,857±0,423	0,671±0,007
	Posição 3	110	79,321±0,397	0,721±0,007
	Média	114	78,610±0,338	0,692±0,006
I4	Posição 1	119	79,631±0,321	0,669±0,005
	Posição 2	115	79,248±0,428	0,689±0,007
	Posição 3	112	78,759±0,365	0,703±0,007
	Média	115	79,212±0,371	0,687±0,006

SI – Sem *Insert*; I1 - *Insert* cone invertido de 20%; I2 - *Insert* cone invertido de 30%; I3 - *Insert* cone duplo de 20%; I4 - *Insert* cone duplo de 30%. **Fonte:** Acervo do Autor (2021).

Observa-se que o tempo de descarregamento médio, sem a aplicação dos *inserts* foi de 121 segundos, sendo este 6,4% maior que a média das situações com *inserts*, que foi de 113 segundos. O fluxo misto foi predominante durante o descarregamento sem a utilização de *inserts*, e o fluxo em massa predominante no descarregamento com *inserts*. Fato explicado pela redução das zonas de estagnação e alteração do estado de tensão que provocam a obstrução do fluxo pelas inserções.

Foi observado diferença estatística para a vazão tanto em relação a geometria do *insert* quanto ao seu posicionamento em relação ao orifício de descarga (Tabela 11). Sendo o *insert* 2, com os melhores resultados obtidos, quando comparado aos demais, em relação ao posicionamento do *insert*, todas as alturas apresentaram resultados semelhantes.

Tabela 11 - Análise Estatística da Vazão mássica.

Insert	Posição		
	1	2	3
I1	0,683 bB	0,703 aAB	0,712 aA
I2	0,711 aA	0,719 aA	0,710 aB
I3	0,684 abA	0,671 bA	0,721 aA
I4	0,669 abA	0,689 abA	0,703 aA

dms para colunas = 0,0371, classificado com letra minúsculas. dms para linhas = 0,036, classificado com letras maiúsculas. MG = 0,693. CV% = 2,35. **Fonte:** Acervo do Autor (2021).

O descarregamento para a situação sem *insert* foi preponderantemente misto, onde ocorreu uma alternância entre os padrões de fluxo mássico e fluxo de funil. Devido a ocorrência do fluxo misto, o tempo de descarregamento foi maior quando comparado com as situações com *inserts*, onde predominou o fluxo de massa pois existiram zonas de estagnação do produto já que a configuração do fluxo misto é uma junção entre fluxo de funil e mássico.

Em relação ao tempo de descarregamento, o segundo *insert* apresentou o melhor resultado estatístico, diferindo dos demais, quanto a posição do *insert*, houve diferença estatística entre todas as posições, sendo a posição 3 com melhores resultados (Tabela 12).

Tabela 12 - Análise Estatística do Tempo de Descarregamento.

Insert	Posição		
	1	2	3
I1	116 bA	112 bB	113 aB
I2	111 cA	110 bA	111 abA
I3	115 bA	116aA	110 bB
I4	119 aA	115 aB	112 abC

dms para colunas = 2,2517, classificado com letra minúsculas. dms para linhas = 2,0380, classificado com letras maiúsculas. MG = 0,693. CV% = 0,88. **Fonte:** Acervo do Autor (2021).

Para o *insert* 1, o tempo de descarregamento foi maior 2,6% na posição 1 com 116 segundos, em relação à posição 3 que teve um tempo de descarregamento de 113 segundos, que por sua vez não diferiu da posição 2 com 112 segundos.

Observa-se que para o *insert* 3 na posição 2 o tempo de descarregamento foi de 116 segundos, sendo 5,2% superior ao tempo da posição 3 com 110 segundos de descarregamento, que por sua vez foi 4,4% inferior ao tempo de descarregamento da

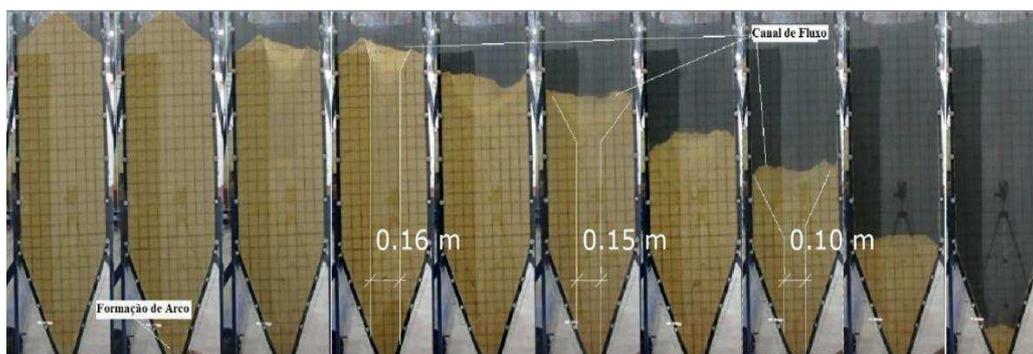
posição 1 com 115 segundos, entre a posição 1 e 2 com o *insert* analisado, este tempo diferiu menos que 1%.

Nota-se que o maior tempo de descarregamento do *insert* 4 foi na posição 2, sendo 115 s, ou seja, 2,6% superior em relação à posição 3 que foi 112 s de descarregamento, que por sua vez foi 2,7% superior ao tempo de descarregamento na posição 1, com 119 s, a posição 2 foi 5,2% superior à posição 3.

Foi observado nos testes realizados que o do tempo de descarregamento do silo com *inserts* foi influenciado pelo posicionamento destes com relação à tremonha, independentemente de sua configuração geométrica, pelo fato da alteração do estado de tensões na zona de transição entre o corpo do silo e a tremonha, provocando um rearranjo das tensões principais e diminuindo as zonas de estagnação, fenômeno observado também em estudos realizados por Ding *et al.* (2015).

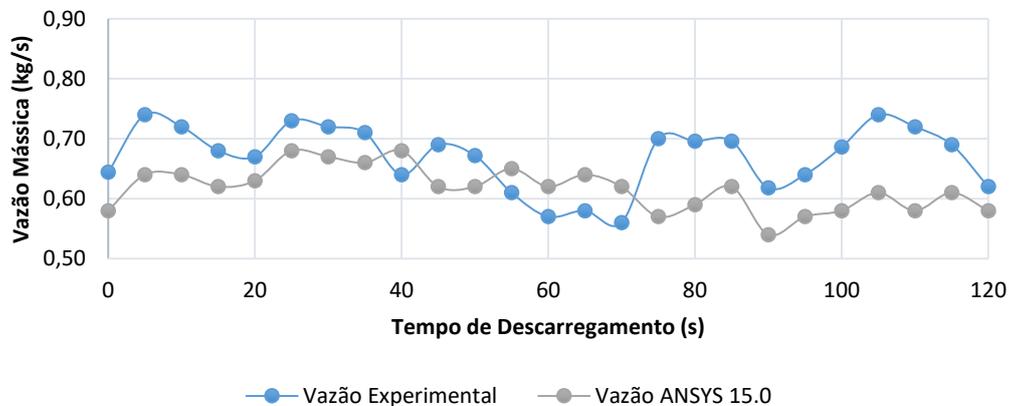
Aos compararmos os formatos de *inserts*, observamos que o *insert* 1, observa-se que o tempo de descarregamento foi maior com relação ao *insert* 2 em todas as alturas estudadas, o mesmo ocorreu com o *insert* 4 comparado ao *insert* 3, com exceção apenas da altura dois, onde o efeito foi contrário, sendo menor o tempo de descarregamento. Estas alterações foram ocasionadas pela dimensão dos *inserts*, sendo as situações com os *inserts* 2 e 4, uma relação de 30% com a tremonha, nos *inserts* 1 e 3 a relação é de 20%, desta forma, o aumento da dimensão da base do *insert*, provocou um acréscimo no tempo de descarregamento, provocado pela diminuição das zonas estagnadas.

Percebe-se a oscilação da vazão mássica nos primeiros 18 segundos provocado pelo fluxo de funil, onde havia apenas descarregamento da massa central pelo canal de fluxo formado e momentos de estagnação da massa. Este fenômeno foi observado novamente no período de 23 e 38 segundos de descarregamento e por fim, entre 43 e 57 segundos, onde nestes momentos do descarregamento foram formados novamente canais de fluxo (Fig. 26).

Figura 26 - Descarregamento sem *insert*.

Fonte: Bandeira (2017).

Observa-se na Figura 27 a curva de vazão mássica instantânea da ração avícola com tremonha cônica, sem utilização de *insert*, nota-se o perfil linear durante o descarregamento, apresentando uma vazão média de $0,656 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$. Valor próximo ao encontrado em estudos realizados por Medeiros (2012) com farelo de soja, classificou o produto como pulverulento, obtendo-se uma vazão de descarregamento média de $0,66 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$.

Figura 27 - Comparativo da curva de vazão mássica instantânea experimental e simulada para ração avícola sem *insert*.

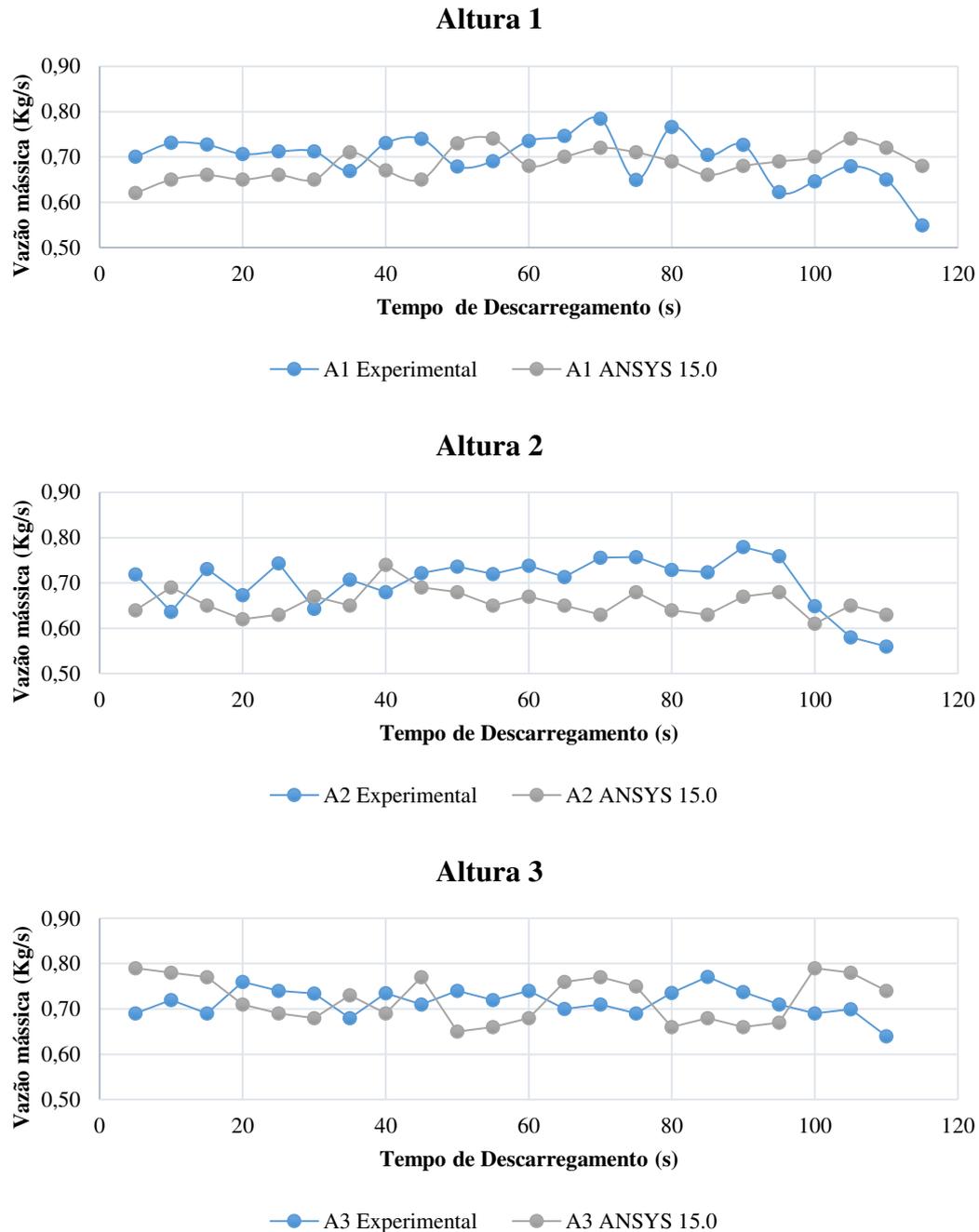
Fonte: Acervo do autor (2021).

Durante todos os ensaios realizados não ocorreu a interrupção do fluxo durante o período de descarga, desta forma o perfil linear de descarregamento foi mantido. Observamos ainda a adequação do modelo numérico ao experimental, onde tivemos um desvio médio de 10,96%, quando comparamos os resultados.

Na figura 28 são apresentadas as curvas de vazão média de descarregamento da ração avícola para o *insert* 1 em três posições distintas, ficando aparente que a maior vazão ocorreu na posição 3, sendo 4,1% superior que na posição 1 e igual à posição 2. A

menor vazão observada foi na posição 1, o que se deve ao elevado tempo de descarregamento provocado por problemas de fluxo que foram observados para esta situação, demonstrando assim a ineficiência desta posição para o *insert* analisado.

Figura 28 - Curva de vazão mássica instantânea para ração avícola com *insert* 1 em três diferentes posições.

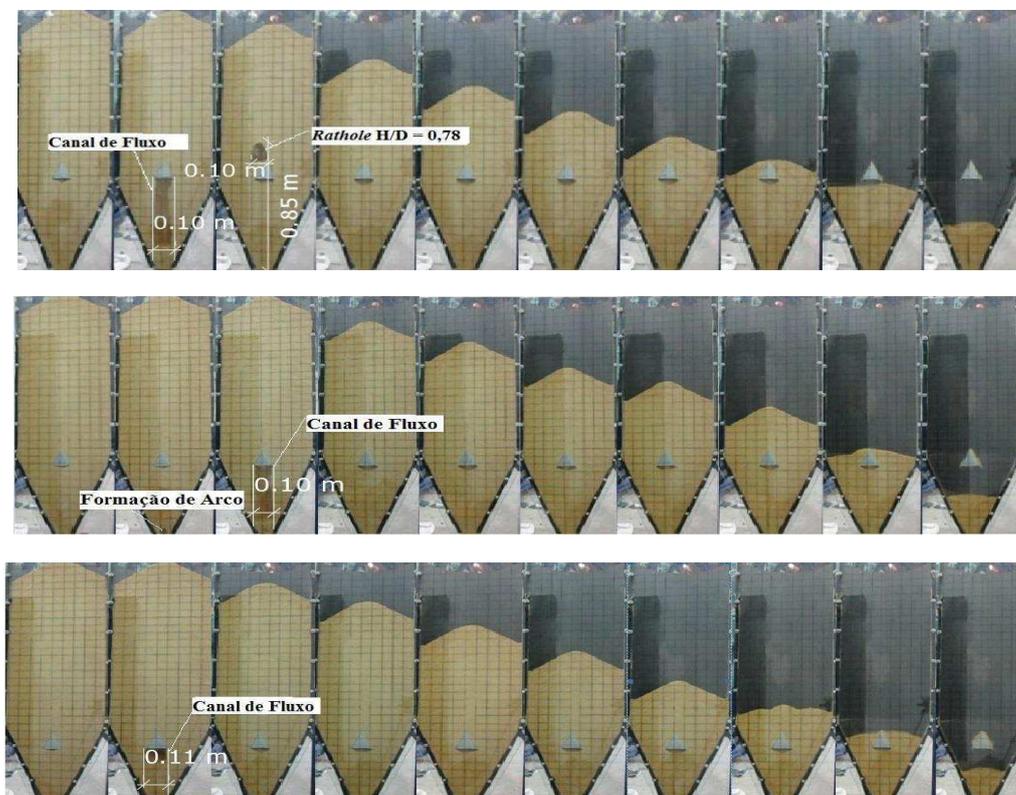


Observamos ainda um erro médio de 11,87% comparando o modelo numérico e o experimental para as três alturas analisadas, desta forma a utilização do *insert* não se mostrou prejudicial a modelagem.

Na figura 29 é apresentada a sequência fotográfica do fluxo da ração avícola com a utilização do *insert* 1 na posição 1, onde observamos 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. 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, por fim no terceiro posicionamento 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.

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*.

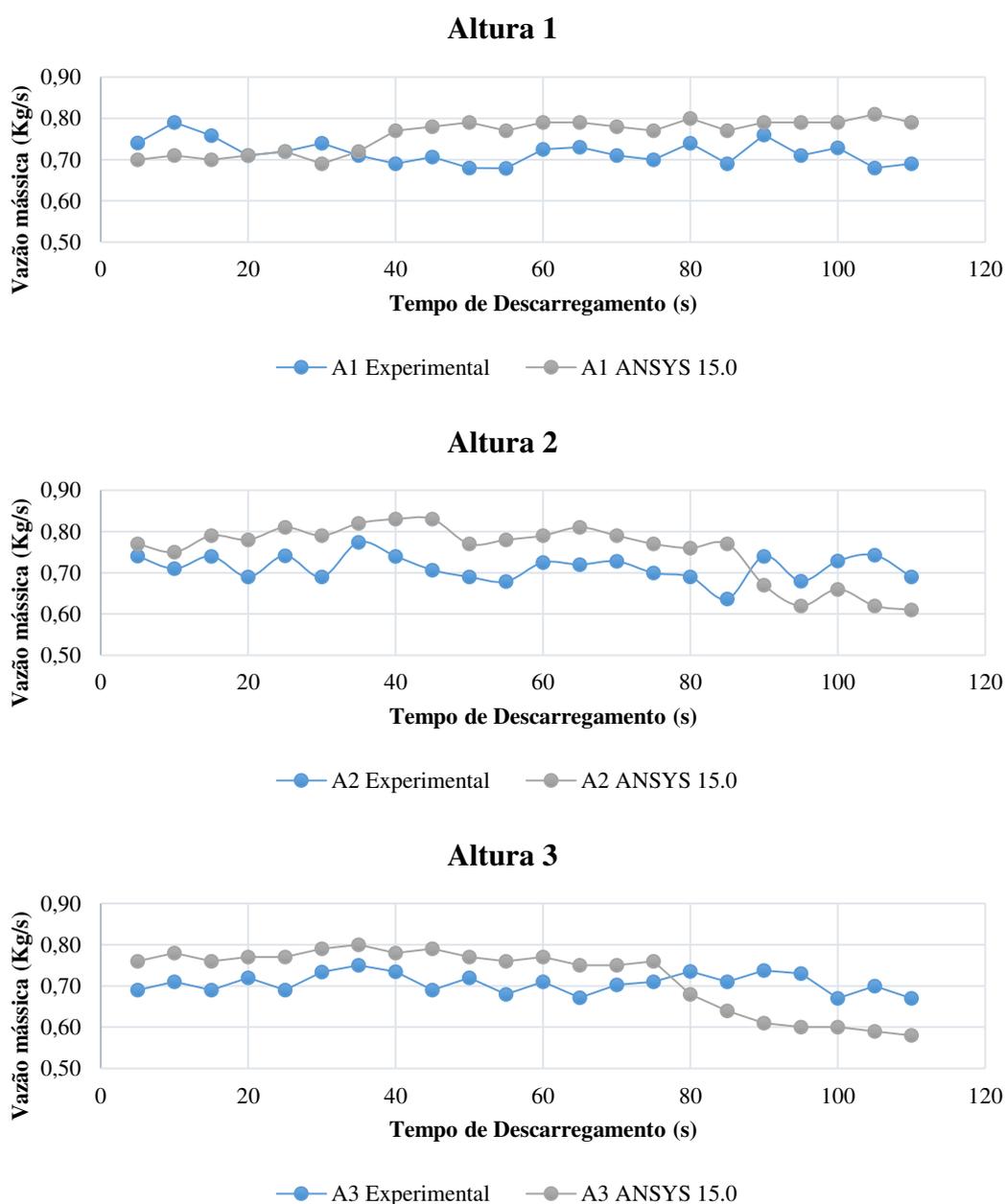
Figura 29 - Descarregamento *insert* 1 em três diferentes posições.



Fonte: Bandeira (2017).

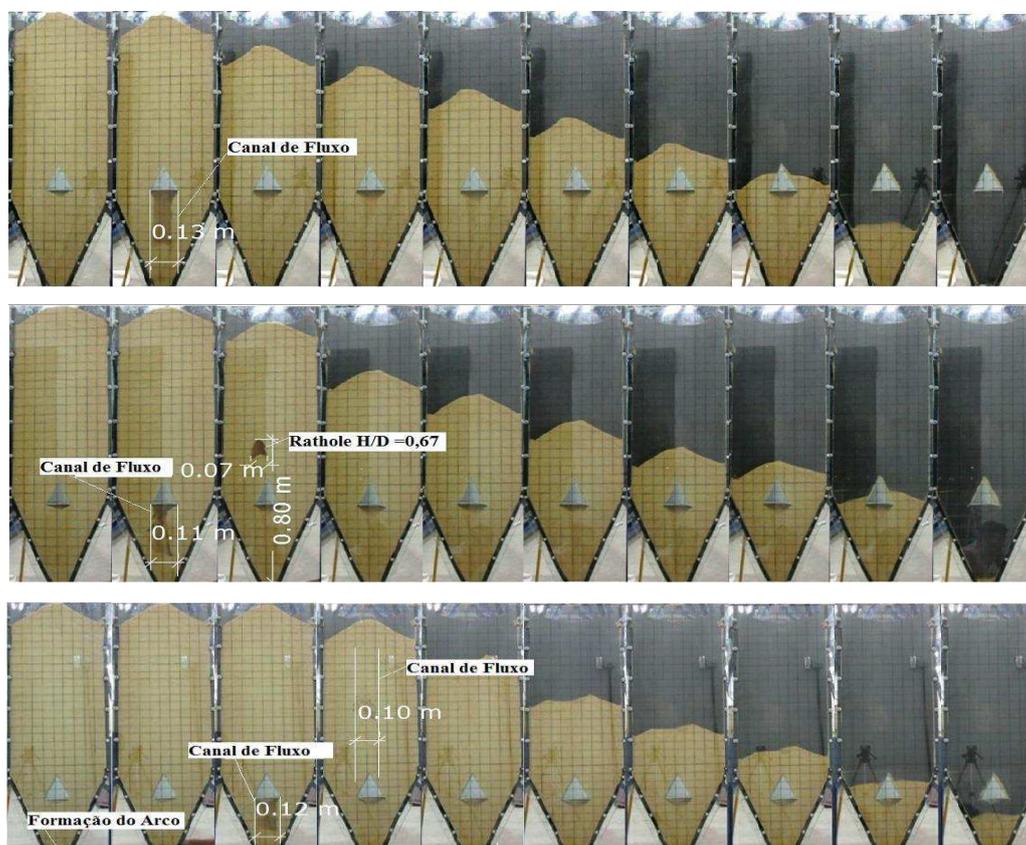
Representado na Figura 30, o descarregamento da ração avícola do silo com o *insert* 2 em três posições distintas, ficando evidente que a maior vazão ocorreu na posição 2, sendo 2,1% mais rápida que na posição 1 e 5% superior à vazão na posição 3. nota-se ainda que a vazão do *insert* 1 é 3% superior à registrada na posição 3. Devido à formação de um canal de fluxo observado na posição 3, que atingiu o topo da massa armazenada, sua vazão de descarregamento foi inferior as outras posições analisadas. Assim como observado na situação anterior, observamos um erro médio de 11,27 %, para o segundo modelo de *insert* nas alturas analisadas.

Figura 30 - Curva de vazão mássica instantânea para ração avícola com *insert* 2 em três diferentes posições.



Na sequência fotográfica da Figura 31 estão as características do fluxo da ração avícola com a utilização do *insert 2*, na posição 1 percebe-se que o descarregamento da ração foi com fluxo de massa, sem a formação do arco coesivo. Na segunda posição foi formado canal de fluxo até a base do *insert* com 0,11m de diâmetro, que impediu a ascensão deste ao topo da massa armazenada, atingindo relação $H/D = 0,67$, ocorreu formação de *rathole*, com 0,07m de diâmetro e 0,80m de altura em relação ao orifício de descarga, o descarregamento foi em fluxo de massa. Observamos na posição 3 a formação de arco coesivo; após sua ruptura houve a formação do canal de fluxo com 0,12m de diâmetro até a base do *insert*, que não evitou a ascensão do canal.

Figura 31 - Descarregamento *insert 2* em três diferentes posições.

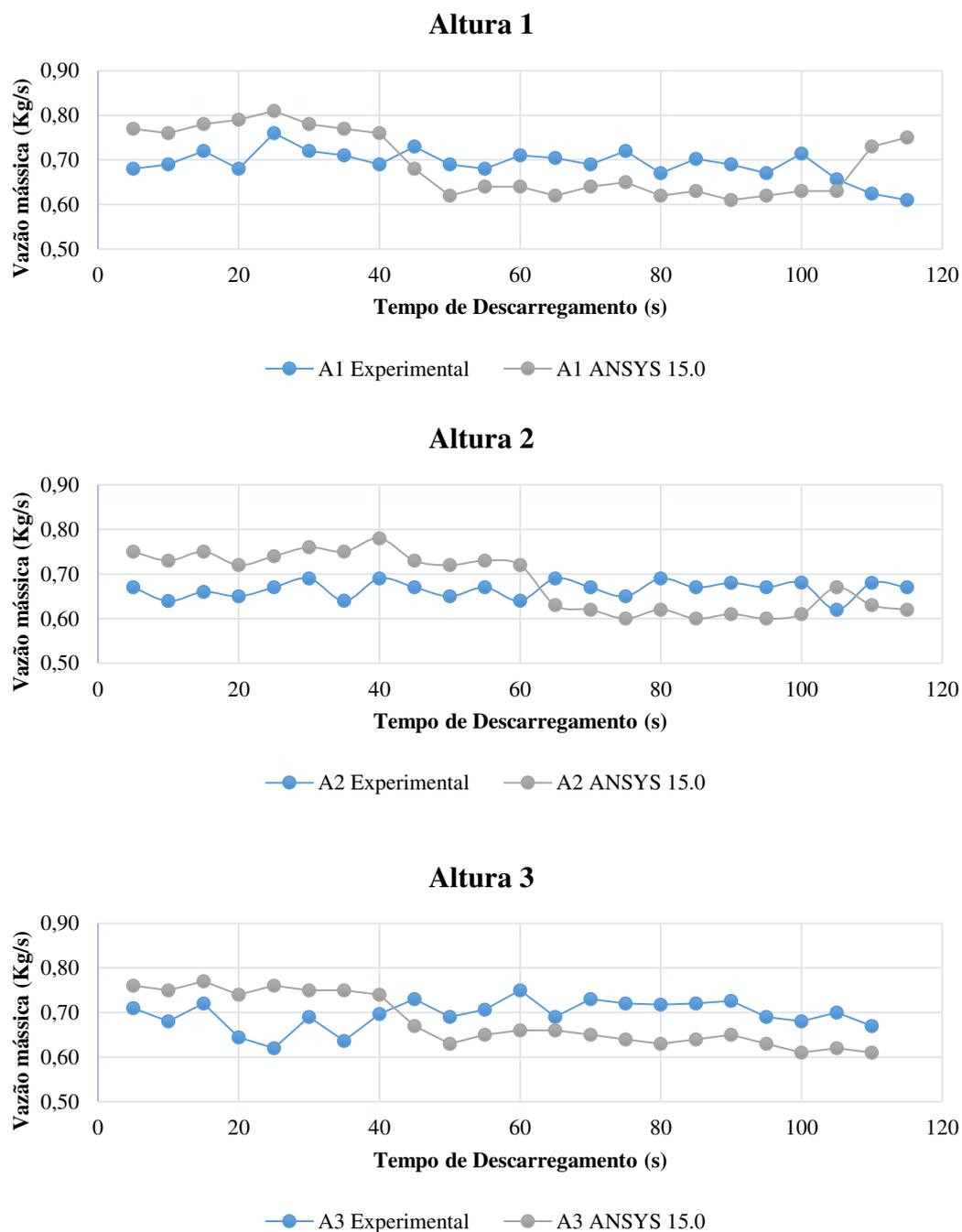


Fonte: Bandeira (2017).

A Figura 32 representa as curvas de descarregamento da ração avícola para o *insert 3* em três posições distintas, constatando-se que a maior vazão ocorreu na posição 3, com uma vazão de 3,6% superior à da posição 2 que, por sua vez, a posição 2 foi 2,2% mais lenta que na posição 1. A vazão mássica simulada não ultrapassou o erro de 23,41%, sendo o erro médio apresentado de 14,32%. Observa-se ainda a oscilação durante todos

os descarregamentos com este tipo de *insert*, o que pode ter sido provocado pelo atrito adicional do cone inferior com o produto armazenado.

Figura 32 - Curva de vazão mássica instantânea para ração avícola com *insert* 3 em três diferentes posições.

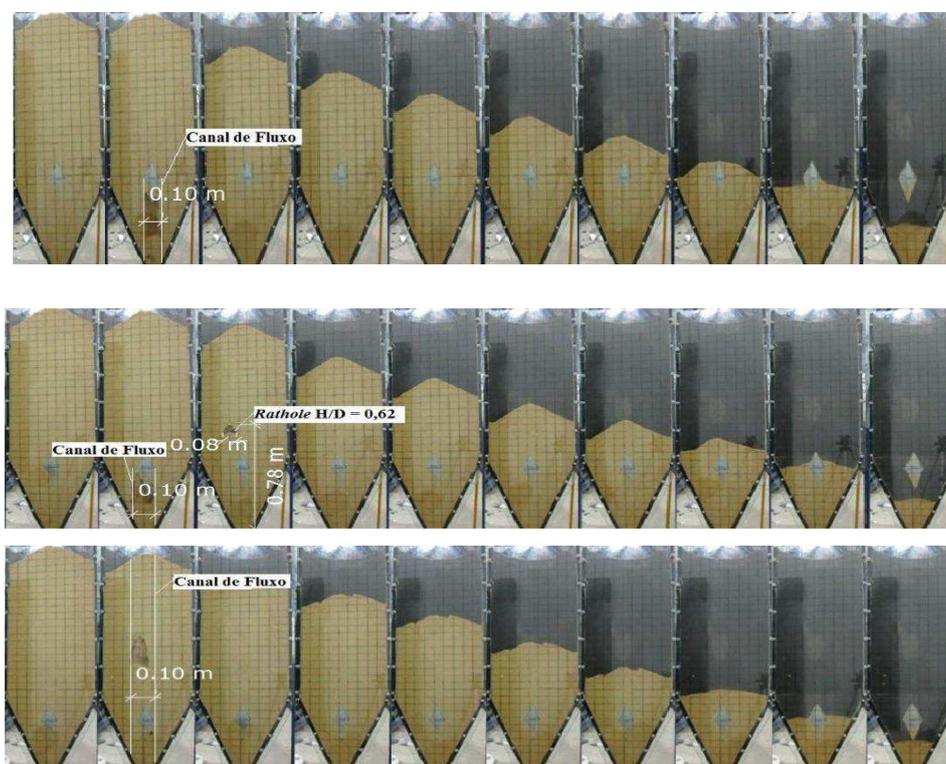


Fonte: Acervo do Autor (2021).

Na Figura 33 notamos que para o *insert* 3 na posição 1 a sequência fotográfica ocorreu formação de canal de fluxo até o *insert* com 0,10m de diâmetro, na posição 2 foi

formado canal de fluxo até a base do *insert* com 0,10m de diâmetro, o qual impediu a ascensão. No ponto em que a relação $H/D = 0,62$ ocorreu a formação de *rathole*, com 0,08m de diâmetro e 0,78m de altura em relação ao orifício de descarga, localizado com excentricidade em relação ao eixo do silo. Na posição 3 Ocorreu formação do canal de fluxo excêntrico com 0,10m de diâmetro, que atingiu o topo do produto, dando-lhe uma característica de fluxo de funil e instantes depois se transformou em fluxo de massa. Em todas as situações após o canal de fluxo tocar no *insert* ocorreu o fluxo de massa até o fim do descarregamento.

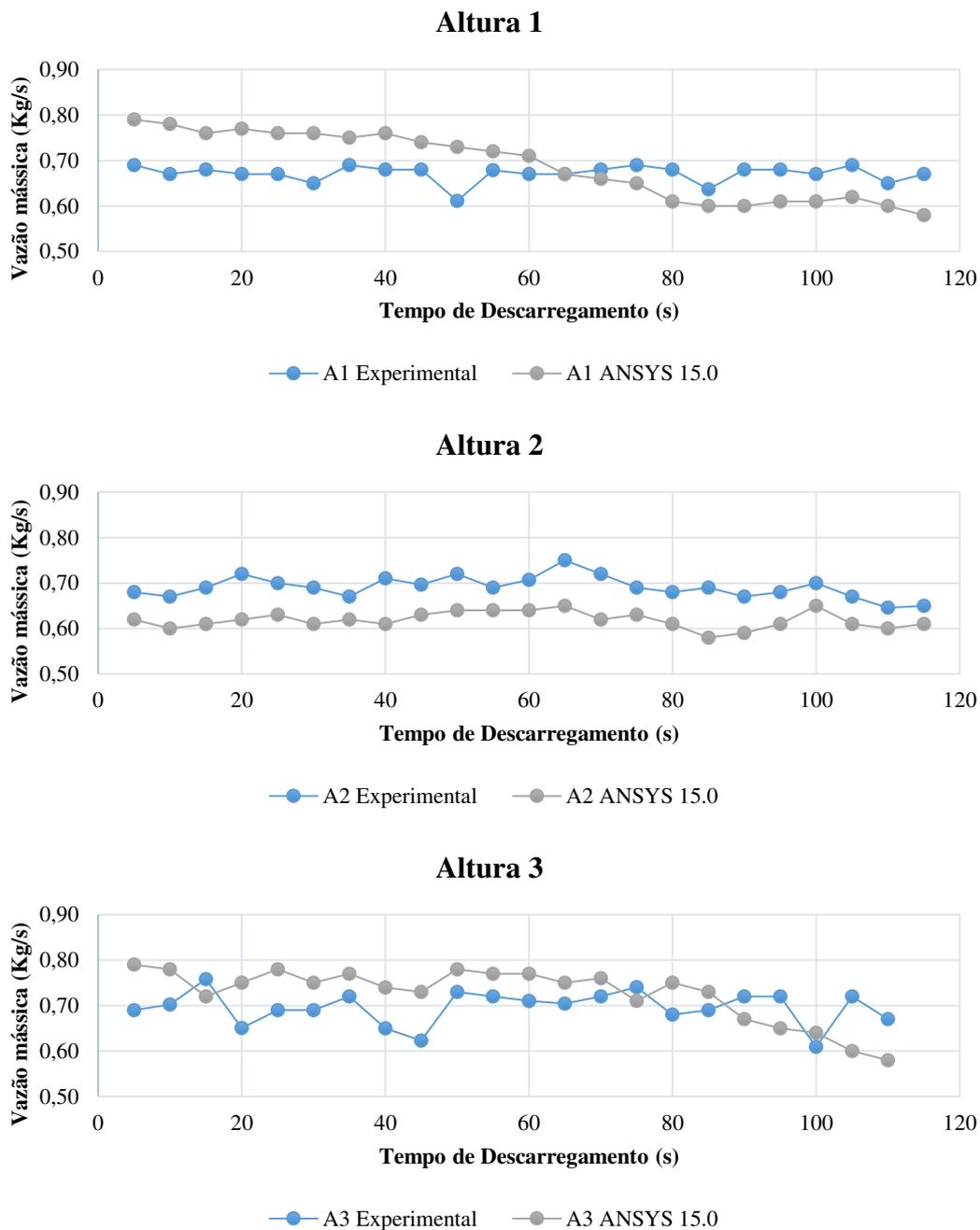
Figura 33 - Descarregamento *insert* 3 em três diferentes posições.



Fonte: Bandeira (2017).

Observa-se na Figura 34 o descarregamento da ração avícola para o *insert* 4 nas três posições estudadas, nota-se que a menor vazão ocorreu na posição 1, sendo 2,9% mais lenta que as demais posições, sendo estas iguais entre si. Desta forma, para vazão de descarregamento a posição 1 é a mais ineficiente para o *insert* estudado. Percebe-se novamente como no *insert* 3, a oscilação da vazão mássica durante todo o descarregamento do produto armazenado, reforçando uma possível interferência do cone inferior durante o descarregamento. Sendo observado um erro médio de 13,29% para a vazão do *insert* nas posições analisadas.

Figura 34 - Curva de vazão mássica instantânea para ração avícola com *insert* 4 em três diferentes posições.

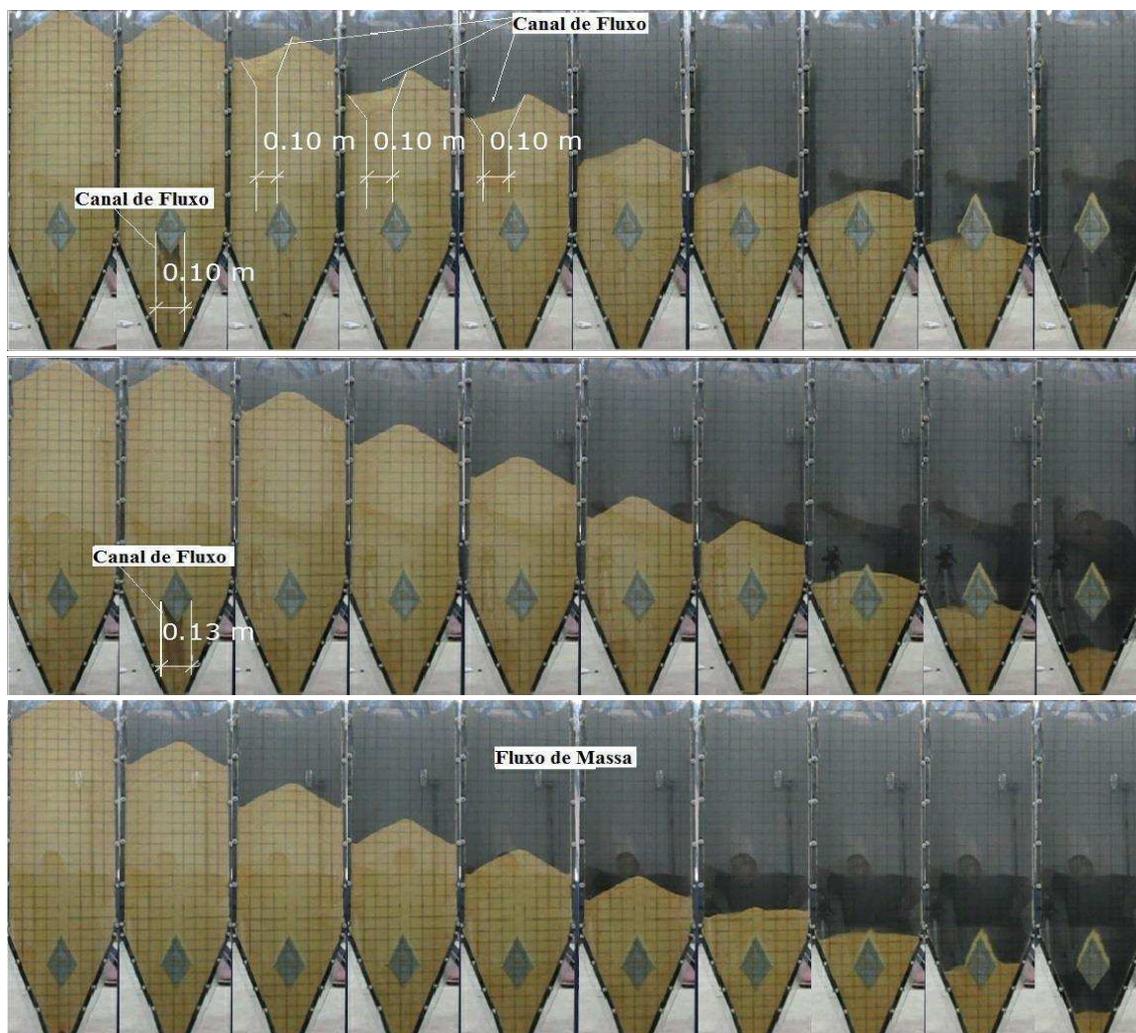


Fonte: Acervo do Autor (2021).

Observa-se na Figura 35 a sequência fotográfica do descarregamento da ração avícola com a utilização do *insert* 4 na posição 1. Formou-se canal de fluxo até a base do *insert* com 0,10 m de diâmetro. Neste ponto, o canal foi direcionado de forma excêntrica, formando assim um canal de fluxo excêntrico com 0,10 m de diâmetro. Na posição 2 observou-se o desenvolvimento de um canal de fluxo concêntrico com 0,13m de diâmetro

foi até a base do *insert*. Na posição 3, não ocorreu formação de canal de fluxo e ocorreu fluxo de massa desde a abertura do orifício de descarga.

Figura 35 - Descarregamento *insert* 3 em três diferentes posições.



Fonte: Bandeira (2017).

Foi observado que as geometrias de cone duplo apresentaram valores inferiores de vazão mássica de descarregamento em relação a geometria de cone simples, devido ao atrito do produto com a parede do cone inferior do *insert* diminuir sua velocidade de descarregamento e conseqüentemente sua vazão mássica. Dentre os *inserts* estudados, o *insert* 3 apresentou os menores valores de vazão mássica de descarregamento.

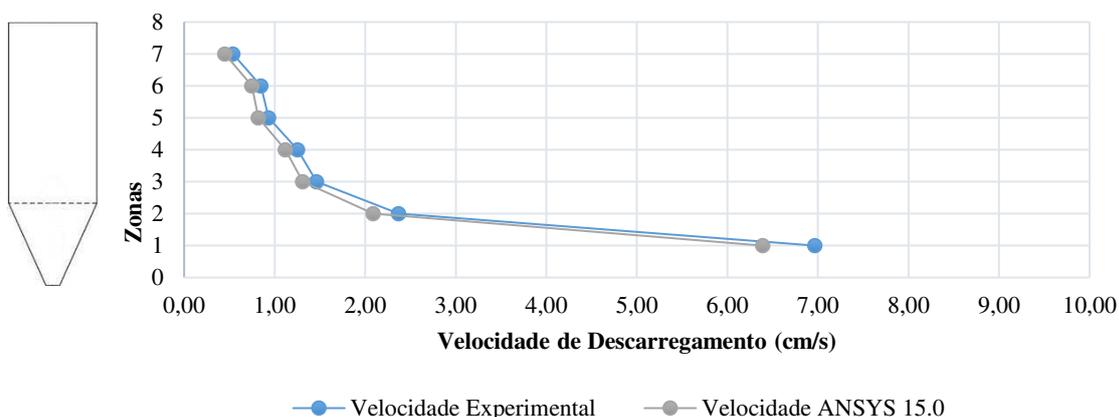
Para a vazão mássica no descarregamento, foi constatado influência da geometria e do posicionamento dos *inserts*, resultados obtidos foram semelhantes aos estudos realizados por López, Pastorello e Arce (2014), os quais concluíram que existe influencia da geometria dos *inserts*, porém a vazão mássica é influenciada principalmente pela posição a qual estes foram dispostos.

Desta forma, para a vazão mássica no modelo analisado, os erros médio observados foram inferiores a 8% para todas as situações, mostrando assim a adequação e validação do modelo aplicado a situação experimental.

5.4 Análise da Velocidade de Descarregamento

A Figura 36 representa a velocidade média de descarregamento do silo para ração avícola com tremonha cônica, sem utilização de *insert*. Nota-se o irregular perfil de velocidade média, provocado pela constante alteração do padrão de fluxo durante os instantes iniciais de descarregamento.

Figura 36 - Comparativa da curva de velocidade média de descarregamento sem *insert* experimental e simulado.

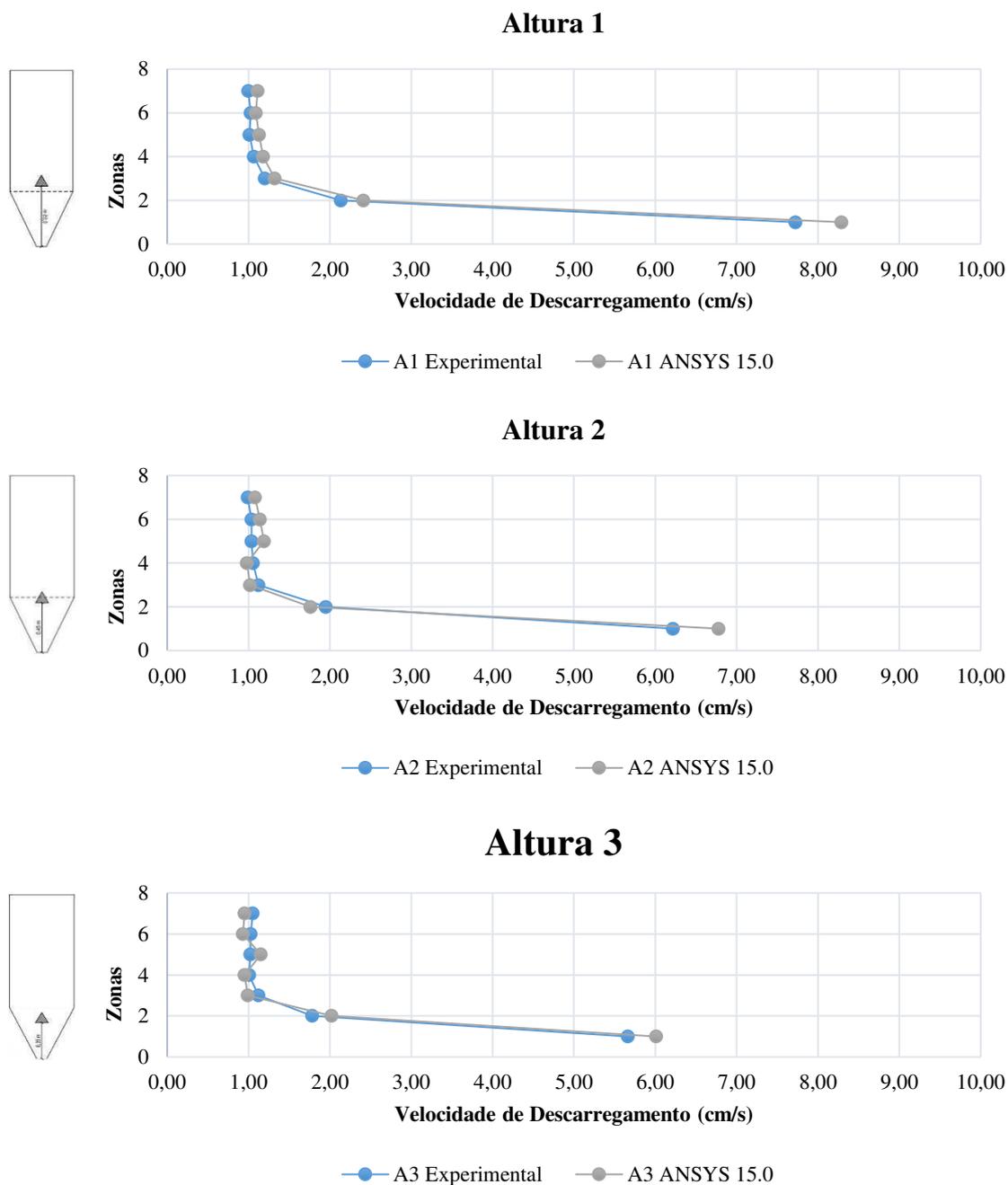


Fonte: Acervo do autor (2021).

Observamos a suficiência do modelo numérico ao comparar os resultados com valores experimentais, para a velocidade de descarregamento o desvio médio foi de 11,58%.

Na Figura 37 visualizamos a velocidade média de descarregamento da ração avícola para o *insert* 1 em três alturas distintas, ficando patente que a velocidade média de descarregamento não foi alterada entre as zonas 3 e 7, sendo alterada na zona 1 e 2, região onde estão localizados os insets, é observado que a velocidade média nesta zona decresce conforme é alterado o posicionamento do *insert*, sendo a velocidade média na primeira altura 17,25% superior a velocidade média registrada na altura 2, por sua vez, 8,2% superior a altura 3. Observando ainda um erro médio, de 8,9% para o *insert* nas posições analisadas, quando comparamos o modelo numérico ao experimental.

Figura 37 - Curva de velocidade média de descarregamento para ração avícola com *insert* 1 em três diferentes alturas.

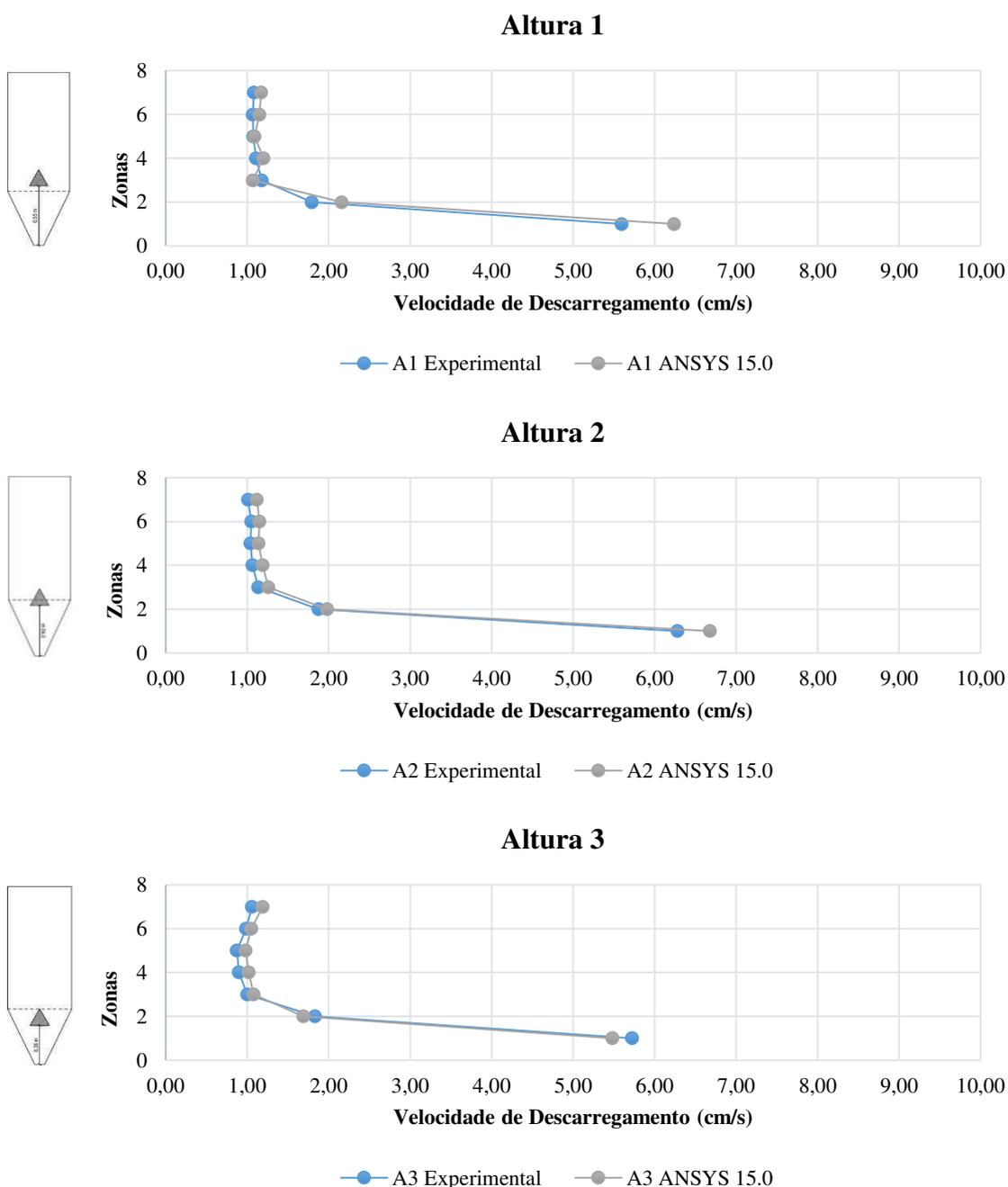


Fonte: Acervo do Autor (2021).

Representado na Figura 38 está a velocidade média de descarregamento da ração avícola para o *insert* 2 em três alturas distintas, ficando evidente a redução da velocidade entre as zonas 3 e 7 para a altura 3, sendo 12% inferior as demais alturas na região citada, entre a zona 1 e 2, os valores obtidos para velocidade não diferiram entre as alturas 1 e 3, sendo estas 9,36% inferior a velocidade de descarregamento da altura 2 na região analisada. Devido a problemas do padrão de fluxo observado na altura 3, sua vazão de

descarregamento foi inferior as duas alturas analisadas, da mesma for que sua velocidade de descarregamento. Deve-se observar ainda que os menores valores de velocidade média de descarregamento na zona de localização dos *inserts*, foram registrados para esta geometria, sendo 3,85 cm/s. Onde o erro médio comparando o modelo numérico e o experimental foi inferior a 11,61%, para todas as situações.

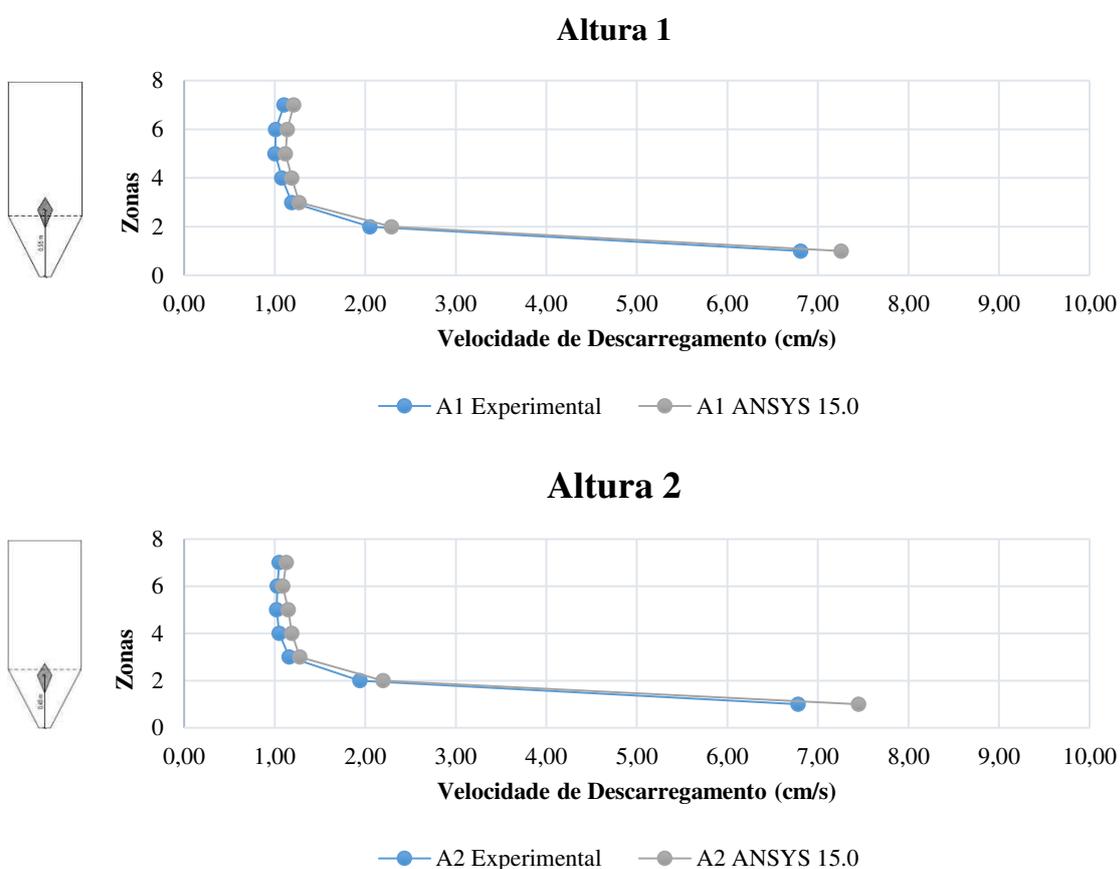
Figura 38 - Curva de velocidade média de descarregamento para ração avícola com *insert 2* em três diferentes alturas.

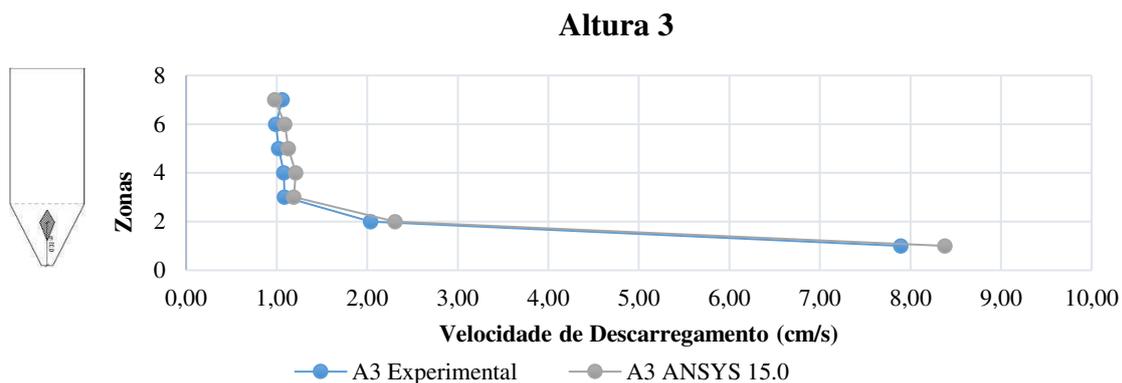


Fonte: Acervo do Autor (2021).

A Figura 39 representa a velocidade de descarregamento da ração avícola para o *insert* 3 em três alturas distintas, observando um erro médio de 8,3% para todas as situações analisadas ao comparar o modelo numérico ao experimental, constatando-se ainda que entre a zona 3 e 7 não houve diferença para a variável analisada, observando a zona de localização do *insert*, a maior velocidade de descarregamento foi na altura 3, sendo esta, 11,31% superior que as demais alturas analisadas, que não diferiram entre si. O erro médio entre o modelo numérico e o experimental foi de 12,07%

Figura 39 - Curva de velocidade média de descarregamento para ração avícola com *insert* 3 em três diferentes alturas.

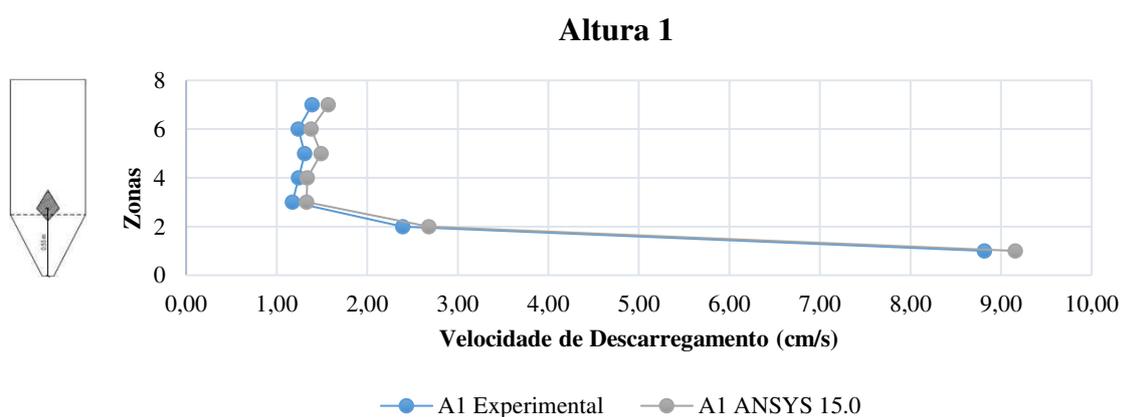




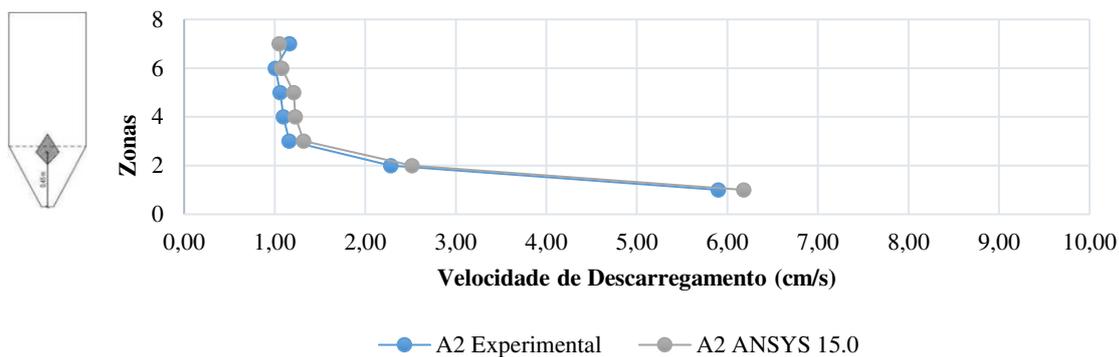
Fonte: Acervo do Autor (2021).

Na Figura 40 encontra-se a curva de velocidade média de descarregamento da ração avícola para o *insert* 4 em três alturas distintas, notando o irregular perfil de velocidade média na altura 1, provocado pela seguida alteração do padrão de fluxo durante os momentos iniciais de descarregamento, entre a zona 3 e 7, nesta região a média de velocidade para as demais alturas permaneceu inalterada. Entre as zona 1 e 2, onde estão localizados os *insets*, é observado que a maior velocidade média foi registrada na altura 1, sendo 16,25 % superior a velocidade na altura 3, por sua vez, 12,8 % superior a altura 2. Nesta situação o erro médio entre o modelo numérico e o experimental foi de 11,88%.

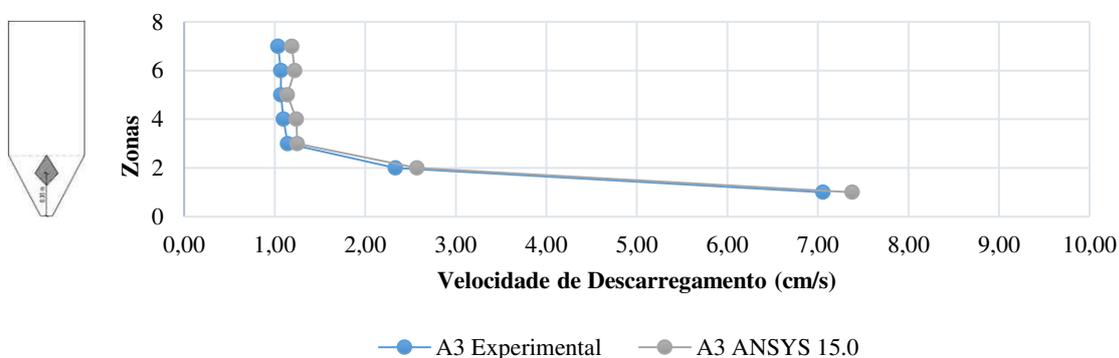
Figura 40 - Curva de velocidade média de descarregamento para ração avícola com *insert* 4 em três diferentes alturas.



Altura 2



Altura 3



Fonte: Acervo do Autor (2021).

Foi constatado alteração quanto a geometria dos *inserts* para a velocidade de descarregamento, entretanto, o posicionamento dos *inserts* interferiu na velocidade apenas na zona de transição entre o corpo do silo e a tremonha, devido a alteração do estado de tensão, onde a tensão principal nesta regional era predominantemente no sentido horizontal, com a utilização do *insert* estas tensões foram redirecionadas para o sentido vertical, reduzindo a resistência à força gravitacional facilitando assim o fluxo do produto, consequentemente aumentando a velocidade de escoamento.

Para a velocidade de descarregamento o modelo numérico analisado apresentou um erro médio de 13,74% para todos os *inserts* utilizados nas três diferente alturas, validando assim os dados numéricos com os ensaios experimentais realizados.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foi observado a adequação do modelo numérico com o modelo experimental para a vazão mássica, onde o desvio médio foi de 10,96% para a situação sem *insert*. A vazão experimental foi aumentada para todas as situações com a utilização de *inserts*.

Os resultados obtidos do modelo numérico para vazão mássica com utilizações de *inserts* alterando seus posicionamentos corresponderam aos obtidos experimentalmente.

O tempo de descarregamento foi reduzido, para todas as situações analisadas com aplicação de *inserts*, quando comparado com a situação sem *insert*.

O modelo numérico correspondeu expectativas em relação a velocidade de descarregamento, para a situação sem *inserts*, apresentando um desvio médio de 11,58%. O mesmo ocorreu para todos os *inserts* analisados e todas as posições, mostrando a robustez do modelo numérico.

Concluimos que houve diferença estatística para a vazão mássica e o tempo de descarregamento, quando alteramos a posição e a geometria do *insert*.

Foi observado que a geometria e o posicionamento dos *inserts* analisados influenciaram no padrão de fluxo da ração avícola. A melhor combinação experimental de geometria do *insert* e sua localização foi registrado para o *insert 2* na segunda altura analisada.

7 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

- Analisar os efeitos dos *inserts* estudados, com outros produtos armazenáveis;
- Analisar a alteração do estado de tensão na zona de transição da tremonha, com a utilização de *inserts*, validando com modelo numérico;
- Analisar o efeito dos *inserts* na redistribuição das partículas durante o carregamento e descarregamento;
- Diferenciar as camadas dos produtos para melhor visualização do comportamento de fluxo, e conseqüentemente, melhor análise da influência do *insert* na alteração do padrão de fluxo;
- Analisar o efeito no padrão de fluxo de *inserts* com inclinação diferente da tremonha;
- Analisar a interação entre o fluxo e estrutura no modelo numérico.

REFERÊNCIAS

- AMORÓS, J. L. *et al.* Projeto de Silos para o Armazenamento de Materiais na Forma de Pó. Problemas Associados à Etapa de Descarga. **Revista Cerâmica Industrial**, v. 7, n. 1, p. 12-23, 2002.
- ANJOS, C. M. dos. **Simulação numérica das pressões exercidas pelos grãos nas paredes dos silos verticais pelo método dos elementos finitos**. 2018. 150f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2018.
- ARMENIO, V.; FIOROTTO, V. The importance of the forces acting on particles in turbulent flows. **Physics of Fluids (1994-present)**, v. 13, n. 8, p. 2437–2440, 2001.
- ASTM. **Standard Test Method for Shear Testing of Bulk Solids Using the Jenike Shear Cell**. EUA: ASTM International, 2013.
- AYRES, G. D. J.; NASCIMENTO, J. W. B.; MASCARENHAS, N. M. H. (2020). Rompimento de arcos coesivos em silos verticais com emprego de pneumáticos: Uma revisão bibliográfica. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 43, n. 4, p. 390-395, 2020.
- AVELAR, F. D. M. dos S. L. de. **Modelagem e simulação da emissão de material particulado a partir da queima de bagaço em uma usina de açúcar e álcool**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Florianópolis, 2013.
- BANDEIRA, I. S. A. **Análise de fluxo de ração e farelo de trigo em silos prismáticos industriais**. 1997. 89f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1997.
- BANDEIRA, D. J. A. **Efeito de inserts na vazão mássica e fluxo de ração avícola em silos verticais esbeltos**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 2017.
- BANDEIRA, D. J. A. et al. Physical and flow properties of common bean cultivars for the design of vertical silos. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 12, 2021.
- BANDEIRA, D. J. A.; NASCIMENTO, J. J. DA S.; NASCIMENTO, J. W. B. DO. (2020). Flow analysis of poultry feed in slender vertical silos with inverted cone insert. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 11, p. e63091110369-e63091110369, 2020.
- BARBOSA, V. B. **Análise paramétrica de escoamento particulado aplicado ao preenchimento de fraturas**. 2015. 136f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e de Materiais) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

BARONI, G. D.; BENEDETI, P. H.; SEIDEL, D. J. Cenários prospectivos da produção e armazenagem de grãos no Brasil. **Revista Thema**, v. 14, n. 4, p. 55-64, 2017.

BATISTA, C. S. **Estudo teórico e experimental do fluxo de sólidos particulados em silos verticais**. 2009. 81f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2009.

BENINK, E.J. **Flow and stress analysis of cohesionless bulk materials in silos related to codes**. 1989. 162f. Thesis (PhD in Engineer Mechanic) - Universiteit Tweste, Netherlands, 1989.

BIAN, Qi *et al.* Bulk flow properties of hard and soft wheat flours. **Journal of Cereal Science**, v. 63, p. 88-94, 2015.

BLOCKEN, B. *et al.* Numerical evaluation of pollutant dispersion in the built environment: comparisons between models and experiments. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 96, n. 10, p. 1817-1831, 2008.

BLOKEN, B.; CARMELIET, J.; STATHOPOULOS, T. CFD evaluation of wind speed conditions in passages between parallel buildings—effect of wall-function roughness modifications for the atmospheric boundary layer flow. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 95, n. 9, p. 941-962, 2007a.

BLOKEN, B.; CARMELIET, J.; STATHOPOULOS, T. CFD simulation of the atmospheric boundary layer: wall function problems. **Atmospheric environment**, v. 41, n. 2, p. 238-252, 2007b.

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

CALIL JÚNIOR, C. **Recomendações de fluxo e de cargas para o projeto de silos verticais**. 1990. 160f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1990.

CAMARGO, F. L.; SANCHEZ, C. G. Novo Alimentador de Bagaço de Cana. **Bioenergia em revista**, v. 1, n. 1, p. 140-150, 2011.

CARSON, J. W. Hopper/Bin Design. *In*: CARSON, J. H (Org.). **Bulk Solids Handling: Equipment Selection and Operation**. EUA: Blackwell Publishing Ltd, 2008.

CARSON, J. W. **Limits of Silo Design Codes**. EUA: American Society of Civil Engineers, 2014.

CHEUNG, A. B. **Modelo estocástico de pressões de produtos armazenados para a estimativa da confiabilidade estrutural de silos esbeltos**. 2007. 305f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2007.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento safra brasileira de grãos**: - Quarto levantamento. Brasília: CONAB, 2021. p. 1-85. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safra/gaos/boletim-da-safra-de-graos>. Acesso em: 06 Jan. 2021.

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. **Propriedades físicas, mecânicas e de fluxo de produtos agroindustriais**. 2013. 138f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, Centro de Tecnologias e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, 2013.

COSTA, C. A.; 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**. 2014. 147f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014.

DEVILLA, I. A.; COUTO, S. M.; QUEIROZ, D. M. DE. Distribuição do fluxo de ar em silos com sistema de aeração: Análise por elementos finitos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, n. 2, p. 256-262, 2005.

DING S. *et al.* Prediction of flow patterns during silo discharges using a finiteelement approach and its preliminary experimental verification. **Particuology**, v.18, p. 42-49, 2015.

DING, S. *et al.* Measurements of pressure and frictional tractions along walls of a large-scale conical shallow hopper and comparison with Eurocode 1991-4: 2006. **Thin-Walled Structures**, v. 80, p. 231-238, 2014.

DING, S. *et al.* 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. *et al.* Experimental Investigation of Load Exerted on a Double-Cone Insert and Effect of the Insert on Pressure Along Walls of a Large-Scale Axisymmetrical Silo. **Particulate Science & Technology**, v. 29, n. 2, p. 127-138, 2011.

DORNELAS, K. C. *et al.* Gargalo da produção agrícola brasileira: Colapsos de silos verticais. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 8, p. e14510817253, 2021.

ERDEMIR, A. *et al.* Considerations for Reporting Finite Element Analysis Studies in Biomechanics. **J Biomech**, v. 45, n. 4, p. 625-33, 2012.

FANK, M. Z. *et al.* Vertical pressures and compressive friction force in a large silo. **Engenharia Agrícola**, v. 38, p. 498-503, 2018.

FAORO, V. **Modelagem e simulação 3d de armazéns graneleiros com aeração**. 2014. 83 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática) - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2014.

FERREIRA, A. D. **Estudo experimental e numérico da fluidodinâmica de um leito de jorro**. 2019. 67f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2019.

FREIRE, I. M. **Propriedades de fluxo do feijão macassar (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) para o dimensionamento de silos**. 2004. 84f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, Centro de Tecnologias e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2004.

FULLARD, L. A. *et al.* Mixing experiments in 3d-printed silos; the role of wall friction and flow correcting inserts. **Advanced Powder Technology**, v. 31, n. 5, p. 1915-1923, 2020.

GALLEGO, E.; RUIZ, A.; AGUADO, P. J. Simulation of silo filling and discharge using ANSYS and comparison with experimental data. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.118, p. 281–289, 2015.

GARBAZZA, I. E. **Programa computacional para cálculo de pressões em silos verticais de acordo com a norma australiana**. 2011. 77f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

GÓMEZ, Á. R. The discrete element method in silo/bin research. Recent advances and future trends. **Particulate Science and Technology**, v. 38, n. 2, 210-227, 2020.

GÓMEZ, Á. R. Research needs on biomass characterization to prevent handling problems and hazards in industry. **Particulate Science & Technology**, v. 34, n. 4, 432–441, 2016.

HAMMADEH, H. *et al.* Effect of using insert on the flow pressure in cylindrical silo. **Studia Geotechnica et Mechanica**, v. 41, n. 4, p. 177-183, 2019.

HARTL, J. *et al.* 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.

HSIAU, S. S. *et al.* Impact of flow-corrective insert on flow patterns in two-dimensional moving bed. **Chemical Engineering and Processing**. v.73, p. 7-15, 2013.

JENIKE, A. W. Storage and Flow of Solids. **Utah Engineering Experiment Station**, v. 53, p. 197, 1964.

JOHANSON, J. R; KLEYSSTUBER, W. K. Flow corrective inserts in bins. **Chemical Engineering Progress**. v.62, p. 79–83, 1996.

KOBYŁKA, R.; MOLENDNA, M.; HORABIK, J. Loads on grain silo insert discs, cones, and cylinders: Experiment and DEM analysis. **Powder Technology**, v. 343, n. 1, p. 521-532, 2019.

KOCK, M. A. **Dimensionamento de um silo metálico com fundo plano para armazenamento de soja**. 2018. 44f. Trabalho de Conclusão de curso (Bacharel em Engenharia Civil) - Universidade tecnológica do Paraná, Pato Branco, 2018.

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.

LI, Y. *et al.* Effect of a flow-corrective insert on the flow pattern in a pebble bed reactor. **Nuclear Engineering and Design**, v. 300, n. 1, p. 495-505, 2016.

LOBATO, J. C. M. *et al.* A. Conical Hopper Design for Mass Flow – Case of red mud. **HOLOS**, v. 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.

MADRONA, F. S. **Pressões em silos esbeltos com descarga excêntrica**. 2008. 196f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade Federal de São Paulo, São Carlos, 2008.

MALALASEKERA, W.; VERSTEEG, H. K. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics**. 2. ed. England: Pearson Education Limited, 2007.

MALISKA, C. R.; **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**. 2.ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1995.

MARÍN, F. C. Gravity reclaim stockpiles: What you need to know. **Particulate Science & Technology**, v. 36, n. 4, p. 473–480, 2018.

MATHEWS, J. C.; WU, W. Model tests of silo discharge in a geotechnical centrifuge, **Powder Technology**, v. 293, p. 3-14, 2016.

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.

MEDEIROS, I. F. **Características de fluxo e vazão de descarga em silos verticais**. 2012. 98f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, Centro de Tecnologias e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2012.

MEIRA, A. S. *et al.* Análise comparativa de pressões horizontais durante o carregamento em silos verticais metálicos. **Pesquisa e Ensino em Ciências Exatas e da Natureza**, v. 4, p. 30, 2020.

MELLMANN, J.; HOFFMANN, T.; FÜRL, 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, J. W. B. **Estudos dos silos metálicos prismáticos para fábricas de ração**. 1996. 152f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade Federal de São Paulo, São Carlos, 1996.

NASCIEMNTO, E. L. do. **Suspensão e deposição de material particulado emitido por pilhas de estocagem de granulados**: uma abordagem numérica empregando LES. 2014. 182 f. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico, Vitória, 2014.

NÓBREGA, M. V. **Análise de vazão e fluxo de ração avícola em silos prismáticos com descarga excêntrica**. 2003. 109f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, Centro de Tecnologias e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2003.

OGINNI, O.; FASINA, O. Theoretical estimation of silo design parameters for fractionated loblolly pine grinds –Moisture content and particle size effects. **Industrial Crops and Products**, v. 123, p. 379-385, 2018.

OLIVARES, M. C. V. *et al.* Towards a one parameter equation for a silo discharging model with inclined outlets. **Powder Technology**, v. 336, p. 265-272, 2018.

PARK, H. W. *et al.* Flow Behavior of Adzuki Bean Flour. **Journal of Food Process Engineering**, v. 39, n. 4, 366-376, 2016.

PAULA, W. C. **Influência da geometria de tremonhas concêntricas e excêntricas nos esforços de silos esbeltos metálicos**. 2020. 183f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2020.

PONTIGGIA, M. *et al.* Hazardous gas dispersion: a CFD model accounting for atmospheric stability classes. **Journal of hazardous materials.**, v. 171, n. 1, p. 739-747, 2009.

ROCHA, K. S. O. **Modelagem e simulação do processo de resfriamento de grãos armazenados em silos graneleiros por meio das leis de conservação de energia e massa**. 2012. 150f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.

SALEH, K.; GOLSHAN, S.; ZARGHAMI, R. A review on gravity flow of free-flowing granular solids in silos – Basics and practical aspects. **Chemical Engineering Science**, v. 192, p. 1011-1035, 2018.

SILVA, NETO; SANTOS, T. L. O déficit na capacidade estática de armazenamento nas regiões centro-oeste e sul do Brasil. **Revista de Economia e Agronegócio**, v. 17, n. 3, p. 507-530, 2019.

- SILVA, F. S. *et al.* 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. Viçosa, MG: Editora Aprenda Fácil, 2008.
- SCHULZE, D. Hopper/Bin Design. *In*: MCGLINCHEY, D. (Org.). **Bulk Solids Handling: Equipment Selection and Operation**. EUA: Blackwell Publishing Ltd, 2008.
- STARON, L.; LAGRÉE, P.-Y.; POPINET, S. Continuum simulation of the discharge of the granular silo. **The European Physical Journal E**, v. 37, n. 1, p. 1-12, 2014.
- STRUSCH, J. **Wandnormalspannungen in einem Silo mit Einbau und Kräfte auf Einbauten**. Germany: Technische Universität Braunschweig, 1996.
- TASCÓN, A. Design of silos for dust explosions: Determination of vent area sizes and explosion pressures. **Engineering Structures**, v. 134, p. 1-10, 2017.
- XUE, J. *et al.* Determination of the flow/no-flow transition from a flat bottom hopper. **Powder Technology**, v. 358, n. 1, p. 55-61, 2019.
- 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.
- WOJCIK, M. *et al.* Full-scale experiments on wheat flow in steel silo composed of corrugated walls and columns. **Powder Technology**, v. 311, p. 537-555, 2017.
- YEOH, G. H; TU, J. **Computational Techniques for Multi-Phase Flows**. EUA: IChemE, 2010.
- YU, X. *et al.* Behavior of a Large Steel Field Silo Structure Subject to Grain Loading. **Journal of Performance of Constructed Facilities**, v. 31, n. 5, p. 04017038, 2017.
- ZHANG, Y. DEM study in the critical height of flow mechanism transition in a conical silo. **Powder Technology**, v. 331, p. 98-106, 2018.
- ZHENG, Q. J.; YU, A. B. Finite element investigation of the flow and stress patterns in conical hopper during discharge. **Chemical Engineering Science**, v. 129, p. 49–57, 2015.