



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO CONSTRUÇÕES RURAIS E AMBIÊNCIA



EFEITO DE INSERTS NO PADRÃO DE FLUXO E VAZÃO MÁSSICA EM SILOS VERTICAIS

LUANNA AMADO DA SILVA

Campina Grande - PB

Fevereiro - 2019

LUANNA AMADO DA SILVA

**EFEITO DE INSERTS NO PADRÃO DE FLUXO E VAZÃO
MÁSSICA EM SILOS VERTICAIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Campina Grande, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola.

Orientador: Prof. Dr. José Wallace Barbosa do Nascimento

Campina Grande - PB

Fevereiro – 2019



PARECER FINAL DO JULGAMENTO DA DISSERTAÇÃO

LUANNA AMADO DA SILVA

“EFEITO DE INSERTS NO PADRÃO DE FLUXO E VAZÃO MÁSSICA EM
SILOS VERTICAIS”

APROVADO (A): 28 de fevereiro de 2019

BANCA EXAMINADORA

Dr. José Wallace Barbosa do Nascimento
Orientador – UAEA/CTRN/UFCC

Dr. José Pinheiro Lopes Neto
Examinador – UAEA/CTRN/UFCC

Dra. Cássia Mendonça dos Anjos
Examinadora – FACISA



ATA DA DEFESA PARA CONCESSÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA AGRÍCOLA, REALIZADA EM 28 DE FEVEREIRO DE 2019 (Nº638).

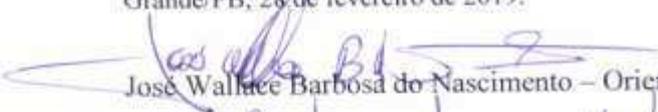
CANDIDATO (A): **LUANNA AMADO DA SILVA**

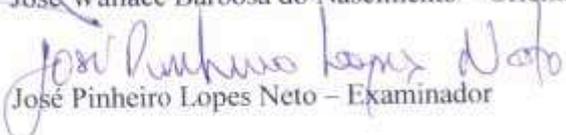
COMISSÃO EXAMINADORA: José Wallace Barbosa do Nascimento – Orientador – UAEA/CTRN/UFPA, José Pinheiro Lopes Neto – Examinador – UAEA/CTRN/UFPA e Cássia Mendonça dos Anjos – Examinadora – FACISA (Portaria COPEAG - MS 17/2019).

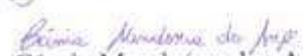
TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: EFEITO DE INSERTS NO PADRÃO DE FLUXO E VAZÃO
MÚLTIPLO EM SILOS VERTICAIS

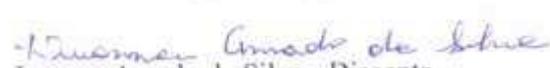
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Construções Rurais e Ambiente
HORÁRIO: 16h

Em sessão pública, após exposição de cerca de 50 minutos, foi arguido (a) oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização no tema de sua Dissertação, sendo APROVADA, com modificações no texto, de acordo com as exigências da Comissão Examinadora, que deverão ser cumpridas no prazo máximo de 30 (trinta) dias. Na forma regulamentar, foi lavrada a presente ata, assinada pelo (a) aluno (a) e demais membros da Comissão Examinadora presentes. Campina Grande/PB, 28 de fevereiro de 2019.


José Wallace Barbosa do Nascimento – Orientador


José Pinheiro Lopes Neto – Examinador


Cássia Mendonça dos Anjos – Examinadora


Luanna Amado da Silva - Discente

FEVEREIRO - 2019

S586e Silva, Luanna Amado da.
Efeito de inserts no padrão de fluxo e vazão mássica em silos verticais / Luanna Amado da Silva. – Campina Grande, 2021.
88 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2019.
"Orientação: Prof. Dr. José Wallace Barbosa do Nascimento".
Referências.

1. Projeto de Silos. 2. Construções Rurais e Ambiência. 3. Descarregamento. 4. Tremonha. I. Nascimento, José Wallace Barbosa do. II. Título.

CDU 631.24(043)

DEDICATÓRIA

A Deus

À minha avó Ivone

Aos meus pais Ronaldo e Dione

Aos meus irmãos Pablio e Amanda

Às minhas sobrinhas Ayanne e Lívia

À Letícia, Diacuí, Nathalya, Walter e Karol

Por serem fundamentais em todos os momentos de minha vida.

AGRADECIMENTOS

Ao orientador, professor **José Wallace Barbosa do Nascimento**, pela paciência que teve durante todo o período do curso, pela orientação desta pesquisa, pelos ensinamentos e confiança.

A Lucius, pela parceria, amizade e dedicação durante toda fase experimental.

À Ariadne, pela amizade, incentivo e orientações dados a mim, durante todo curso.

As amigas Júlia, Michele, Laize, Vanessa, por toda força e amizade.

Aos amigos de mestrado e doutorado; Elisangela, Joab, Sebastião, Patrício, Jordânio, Valneide, Noelly e Daniela, que se tornaram minha família do LACRA.

Aos funcionários Joselito, Edil que ajudaram na montagem e viabilização do local do experimento.

À Aldaniza, Roberto, Dona Cida, por toda dedicação, paciência e amizade.

A todos que fazem parte do Laboratório de Construções Rurais e Ambiente (LACRA), que contribuíram de forma direta ou indiretamente na realização da pesquisa.

Ao Programa de Pós – Graduação de Engenharia Agrícola da Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola - UFCG

À Capes pela bolsa de estudo e incentivo à pesquisa

Muito obrigada!

“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes”.

(Marthin Luther King)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tipos de tremonhas	24
Figura 2 - Tipos básicos de fluxo	25
Figura 3 - Fluxo tipo mássico.....	26
Figura 4 - Variações do tubo no fluxo de funil	27
Figura 5 - Variações do fluxo misto.....	28
Figura 6 - Variações do fluxo em função da esbeltez dos silos	28
Figura 7 - Obstruções do fluxo em silos.	30
Figura 8 - Arco mecânico.....	31
Figura 9 - Arcos coesivos.....	32
Figura 10 - Formação do efeito tubo.....	33
Figura 11 - Silo com descarga incompleta.	33
Figura 12 - Tipos de inserts.....	35
Figura 13 - Esboço do cone-em-cone configuração.....	35
Figura 14 - Efeito do duplo cone durante o descarregamento.	36
Figura 15 - Diferentes tipos de inserts na indústria e esboço seccional do inserto na simulação.....	37
Figura 16 - Esquema ilustrativo do aparelho de cisalhamento direto de Jenike	40
Figura 17 - Silo secção transversal semicircular e dimensões.	44
Figura 18 - Conjunto para ensaio.	45
Figura 19 - Medição dos inserts utilizados	46
Figura 20 - Representação da proporcionalidade dos inserts com a tremonha.	47
Figura 21 - Demonstração das alturas utilizadas.....	48
Figura 22 - Detalhamento das alturas analisadas.	48
Figura 23 - Lugares geométricos e ângulos de atrito interno.....	51
Figura 24 - Características de fluxo instantâneo da farinha de milho sem insert.	55
Figura 25 - Características de fluxo da farinha de milho sem insert, armazenado por 24 horas.	56
Figura 26 - Características de fluxo instantâneo da farinha de milho flocada para o insert 1 na altura 1.....	57
Figura 27 - Características de fluxo da farinha de milho flocada para o insert 1 na altura 1, armazenado por 24 horas.....	57
Figura 28 - Características de fluxo da farinha de milho para o insert 1 na altura 2, instantâneo.....	58
Figura 29 - Características de fluxo da farinha de milho para o insert 1 na altura 2, armazenado por 24 horas.....	59
Figura 30 - Características de fluxo instantâneo da farinha de milho flocada para o insert 1 na altura 3.....	59
Figura 31 - Características de fluxo da farinha de milho para o insert 1 na altura 3, armazenado por 24 horas.....	60
Figura 32 - Características de fluxo instantâneo da farinha de milho para o insert 1 invertido na altura 1.....	61
Figura 33 - Características de fluxo da farinha de milho para o insert 1 invertido na altura 1, armazenado por 24 horas.....	61

Figura 34 - Características de fluxo instantânea da farinha de milho flocada para o insert 1 invertido na altura 2.....	62
Figura 35 - Características de fluxo da farinha de milho para o insert 1 invertido na altura 1, armazenado por 24 horas.....	62
Figura 36 - Características de fluxo da farinha de milho para o insert 1 invertido na altura 3, instantâneo.....	63
Figura 37 - Características de fluxo da farinha de milho para o insert 1 invertido na altura 3, armazenado por 24 horas.....	64
Figura 38 - Características de fluxo instantâneo da farinha de milho para o insert 2 na altura 1.....	64
Figura 39 - Características de fluxo da farinha de milho para o insert 2 na altura 1, armazenado por 24 horas.....	65
Figura 40 - Características de fluxo instantâneo da farinha de milho para o insert 2 na altura 2.....	66
Figura 41 - Características de fluxo da farinha de milho para o insert 2 na altura 2, armazenado por 24 horas.....	66
Figura 42 - Características de fluxo da farinha de milho para o insert 2 na altura 3, instantâneo.....	67
Figura 43 - Características de fluxo da farinha de milho para o insert 2 na altura 3, armazenado por 24 horas.....	67
Figura 44 - Características de fluxo instantâneo da farinha de milho para o insert 2 invertido na altura 1.....	68
Figura 45 - Características de fluxo da farinha de milho flocada para o insert 2 invertido na altura 1, armazenado por 24 horas.....	69
Figura 46 - Características de fluxo da farinha de milho para o insert 2 invertido na altura 2, instantâneo.....	69
Figura 47 - Características de fluxo da farinha de milho para o insert 2 invertido na altura 2, armazenado por 24 horas.....	70
Figura 48 - Características de fluxo da farinha de milho para o insert 2 invertido na altura 3, instantâneo.....	70
Figura 49 - Características de fluxo da farinha de milho para o insert 2 invertido na altura 3, armazenado por 24 horas.....	71

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Curva de vazão de descarga instantânea para farinha de milho sem insert	75
Gráfico 2 - Curva de vazão de descarga consolidada por 24 horas para farinha de milho sem insert	75
Gráfico 3 - Curva de vazão de descarga instantânea para farinha de milho com insert 1 em três diferentes alturas.....	76
Gráfico 4 - Curva de vazão de descarga armazenada por 24 horas para farinha de milho com insert 1 em três diferentes alturas	76
Gráfico 5 - Curva de vazão de descarga instantânea para farinha de milho com insert 1 invertido em três diferentes alturas	77
Gráfico 6 - Curva de vazão de descarga consolidada por 24 horas para farinha de milho com insert 1 invertido em três diferentes alturas	78
Gráfico 7 - Curva de vazão de descarga instantânea para farinha de milho com insert 2 em três diferentes alturas.....	78
Gráfico 8 - Curva de vazão de descarga armazenada por 24 horas para farinha de milho com insert 2 em três diferentes alturas	79
Gráfico 9 - Curva de vazão de descarga instantânea para farinha de milho com insert 2 invertido em três diferentes alturas	80
Gráfico 10 - Curva de vazão de descarga armazenada por 24 horas para farinha de milho com insert 2 invertido em três diferentes alturas	80
Gráfico 11 - Curva de vazão de descarga instantânea da farinha de milho para a altura 1 com 4 configurações de inserts	81
Gráfico 12 - Curva de vazão de descarga armazenada por 24 horas da farinha de milho para a altura 1 com 4 configurações de inserts	82
Gráfico 13 - Curva de vazão de descarga instantânea da farinha de milho para a altura 2 com 4 configurações de inserts	83
Gráfico 14 - Curva de vazão de descarga armazenada por 24 horas da farinha de milho para a altura 1 com 4 configurações de inserts	83
Gráfico 15 - Curva de vazão de descarga instantânea da farinha de milho para a altura 3 com 4 configurações de inserts	84
Gráfico 16 - Curva de vazão de descarga armazenada por 24 horas da farinha de milho para a altura 1 com 4 configurações de inserts	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos silos quanto à esbeltez	23
Tabela 2 - Valores limites da Função Fluxo proposto por Jenike (1964)	41
Tabela 3 - Proporção das dimensões dos inserts utilizados, relacionados à tremonha.	47
Tabela 4 - Configurações dos ensaios realizados	49
Tabela 5 - Resultado da análise granulométrica da farinha de milho flocada.....	53
Tabela 6 - Classificação dos produtos de acordo com a granulometria	53
Tabela 7 - Caracterização das propriedades de fluxo.....	54
Tabela 8 - Determinação da vazão mássica experimental instantânea.....	72
Tabela 9 - Determinação da vazão mássica experimental armazenada por 24 horas.....	73

LISTA DE ABREVIATURAS/SÍMBOLOS/UNIDADES

Γ	Peso específico consolidado	Kg/m ³
Φ	Ângulo de atrito interno	(°)
Δ	Efetivo ângulo de atrito interno	(°)
ϕ_w	Ângulo de atrito do produto com a parede	(°)
YL	Lugar geométrico de deslizamento do produto	
EYL	Lugar geométrico efetivo de deslizamento	
WYL	Lugar geométrico de deslizamento com a parede	
C	Coesão	(Pa)
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 sessão transversal do silo	(m ²)
Mw	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 m/s ²	(m/s ²)
H	Peso do Pêndulo	(Kg)
S _p	Força de cisalhamento no pré-cisalhamento/estado de consolidação	(Kg)
S _s	Força de cisalhamento/início de consolidação	(Kg)
W _p	Peso no pendural durante o pré-cisalhamento	(Kg)
W _S	Peso no pendural durante o cisalhamento	(Kg)
W _{wt}	Peso total da célula, inclusive anel, tampa e o produto	(Kg)
W _m	Peso da chapa do material da parede	(Kg)

W_w	Peso no pendural para o teste de atrito na parede	(Kg)
S_w	Força de cisalhamento	(Kg)

RESUMO

Problemas relacionados à silo, tais como a formação de arcos coesivos e interrupção da descarga do silo, provocam parada total ou parcial do descarregamento. Uma possibilidade para evitar problemas relacionados com o fluxo é tentar promover o fluxo de massa através da adaptação da tremonha com inserts específicos. Desta forma, objetivou analisar a influência de inserts no padrão de fluxo em silo vertical esbelto, para armazenamento de farinha milho, utilizando diferentes alturas em ensaios instantâneos e ensaios armazenados por um período de 24 horas. Os experimentos de propriedades de fluxo e caracterização de fluxo foram determinados no Laboratório de Construções Rurais e Ambiente- LACRA, pertencente à Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande - PB, no período de julho a novembro de 2018. Concluiu-se que o padrão de fluxo predominante para o produto em estudo foi o fluxo de funil, podendo ser misto em alguns momentos; com relação à altura onde o insert esteve fixado, a localização a 0,35m de distância do orifício de descarga, ou seja, altura 1, foi a que apresentou melhores valores quando relacionada a vazão mássica de descarregamento da farinha de milho.

Palavras-chave: descarregamento, projeto de silos, tremonha

ABSTRACT

Problems related to the silo, such as the formation of cohesive arcs and interruption of the silo discharge, cause total or partial unloading. One possibility to avoid problems related to the flow is to try to promote the mass flow by adapting the hopper with specific inserts. Thus, it aimed to analyze the influence of inserts in the flow pattern in a slender vertical silo, for storage of corn flour, using different heights in instant tests and tests stored for a period of 24 hours. The flow properties and flow characterization experiments were determined at the Laboratory of Rural Constructions and Ambience - LACRA, belonging to the Federal University of Campina Grande, Campina Grande - PB, from July to November 2018. It was concluded that the pattern the predominant flow for the product under study was the funnel flow, which can be mixed in some moments; with respect to the height where the insert was fixed, the location 0.35m away from the discharge orifice, that is, height 1, was the one that presented the best values when related to the mass flow of unloading corn flour.

Keywords: discharge, silo design, hopper

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
1.1 Justificativa.....	20
1.2 Objetivos.....	21
1.2.1 Objetivo geral	21
1.2.2 Objetivos específicos.....	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
2.1 Silos 22	
2.1.1 Classificação dos silos.....	22
2.2 Tremonhas	23
2.2.1 Classificação das tremonhas.....	23
2.3 Fluxo 24	
2.3.1 Tipos de Fluxo.....	25
2.3.1.1 Fluxo de massa	25
2.3.1.2 Fluxo de funil	27
2.3.1.3 Fluxo misto.....	27
2.4 Obstruções do Fluxo.....	29
2.4.1 Arqueamento	30
2.4.1.1 Efeito tubo	32
2.4.1.2 Descarga incompleta	33
2.4.1.3 Efeitos da segregação	34
2.5 Inserts	34
2.6 Propriedades dos Produtos Armazenáveis	38
2.6.1 Propriedades físicas.....	35
2.6.2 Propriedades de Fluxo.....	38
2.6.2.1 Peso específico consolidado.....	40
2.6.2.2 Ângulo de atrito interno e Ângulo efetivo de atrito interno	40
2.6.2.3 Ângulo de atrito interno do produto com a parede.....	40
2.6.2.4 Coesão	41
2.6.2.5 Fator fluxo da tremonha (ff).....	41
2.6.2.6 Função Fluxo (FF).....	41
2.6.2.7 Índice de Fluxo.....	42

2.7. Vazão de descarregamento em silos.....	42
2.8. Uso de imagens digitais para investigação do fluxo em silos	42
2.9. Produto utilizado	43
3 MATERIAL E MÉTODOS	44
3.1 Descrição do silo protótipo	44
3.2. Carregamento	45
3.3. Aquisição de dados durante o descarregamento	45
3.4. Captação das imagens	46
3.5. Inserts utilizados.....	46
3.5.1. Alturas dos inserts	47
3.5.2. Quantidade de ensaios	49
3.6 Determinação das propriedades físicas do produto.....	49
3.6.1. Teor de umidade.....	50
3.6.2. Granulometria.....	50
3.7 Determinação das propriedades de fluxo	50
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
4.1. Propriedades físicas.....	53
4.2 Propriedades de fluxo.....	54
4.2 Características de fluxo	55
4.2.1. Sem insert	55
4.2.2. Insert 1	56
4.2.2.1. Altura 1.....	56
4.2.2.2. Altura 2.....	57
4.2.2.3. Altura 3.....	59
4.2.3. Insert 1 invertido	60
4.2.3.1. Altura 1.....	60
4.2.3.2. Altura 2.....	61
4.2.3.3. Altura 3.....	63
4.2.4. Insert 2	64
4.2.4.1. Altura 1.....	64
4.2.4.2. Altura 2.....	65
4.2.4.3. Altura 3.....	66
4.2.5. Insert 2 invertido	68
4.2.5.1. Altura 1.....	68

4.2.5.2. Altura 2.....	69
4.2.5.3. Altura 3.....	70
4.3. Análise da vazão mássica.....	72
4.3.1. Análise por ensaio	74
4.3.1.1. Sem Insert.....	74
4.3.1.2. Insert 1.....	76
4.3.1.3. Insert 1 invertido	77
4.3.1.4. Insert 2.....	78
4.3.1.5. Insert 2 invertido	79
4.3.2. Análise das alturas.....	81
4.3.2.1 Altura 1.....	81
4.3.2.2. Altura 2.....	82
4.3.2.3. Altura 3.....	83
5. CONCLUSÕES	85

1 INTRODUÇÃO

Silos são construções destinadas ao armazenamento de produtos sólidos, podendo ser construídas de vários materiais como: chapas metálicas, de concreto ou alvenaria. A maioria dos silos de grandes dimensões é de fundo plano equipados com dispositivos de descarga por gravidade ou através de meios mecânicos ou pneumáticos.

São estruturas complexas de se projetar, pois existe uma gama imensurável de produtos que podem ser armazenados, e isto exige o conhecimento prévio de propriedades tais como as físicas e de fluxo do produto, propriedades estas, relevantes ao seu dimensionamento. A determinação das propriedades do produto armazenado a estrutura do silo é de fundamental importância para que o carregamento e o descarregamento sejam eficientes e seguros.

Problemas encontrados no silo, tais como a formação de arcos coesivos e interrupção da descarga do silo, provocam parada total ou parcial do descarregamento, não necessariamente do setor de produção, e ou distribuição, acarreta em prejuízos devido ao aumento dos custos de produção, o que poderá causar a médio prazo o início de um processo de descontinuidade da indústria.

A compreensão do comportamento do fluxo de um sólido é essencial para identificar problemas de segregação e descarga. O regime de descarga de fluxo pode precisar ser melhorado a fim de manter o tempo de armazenamento o material suficientemente uniforme, a fim de evitar a formação de zonas de estagnação ou para reduzir a segregação.

Uma possibilidade para evitar problemas relacionados com o fluxo é promover o fluxo de massa através da adaptação da tremonha com inserts específicos. Um insert, quando corretamente projetado e posicionado, pode reduzir as zonas estagnadas em um silo com tremonha, levando a um padrão de fluxo próximo ao fluxo de massa.

Geometrias de inserts têm sido investigadas como cone-em-cone, duplo cone, inserts em forma de cunha, inserts quadrados, estão entre as geometrias mais comuns exploradas. No entanto, a grande maioria das experiências publicadas na literatura até à data foram conduzidos em laboratório usando pequenos modelos.

Um insert pode ser necessário em um silo quando há espaço livre limitado ou quando há uma modificação para resolver um problema de fluxo reconhecido em um silo existente. O custo de instalação de um insert é muito menor do que o custo da reforma ou modernização de equipamento para melhorar o fluxo.

1.1 Justificativa

A instalação de um insert em um silo é uma alternativa para modificar o tipo de fluxo do produto, preexistente em um silo. Autores relatam em suas pesquisas que reduziram significativamente o tamanho de zonas de estagnação durante o fluxo de funil, porém nem sempre acontece e necessita-se de estudos e critérios realistas com relação ao tipo, tamanho e localização dos inserts a serem analisados para obter fluxo de massa, visto que ainda são escassos, pois há pouco conhecimento sobre o efeito de inserts nos padrões de fluxo.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Analisar a influência de inserts no padrão de fluxo em silo vertical esbelto, para armazenamento de farinha milho flocada, utilizando diferentes alturas em ensaios instantâneos e ensaios armazenados por um período de 24 horas.

1.2.2 Objetivos específicos

- Analisar as propriedades físicas e de fluxo do produto armazenável.
- Analisar o tipo de fluxo e vazão mássica através de imagens sequenciadas em silo protótipo, com e sem a utilização de inserts.
- Comparar os tipos de fluxos obtidos e descrever a eficiência ou não dos inserts.
- Identificar os fenômenos de formação de arcos coesivos e efeito tubo, mensurar suas dimensões críticas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Silos

Silos são estruturas construídas de vários materiais com a finalidade de armazenar produtos granulares e pulverulentos visando a qualidade final do produto, os quais são possuidores ou não de mecanismos de carga e descarga, assim como sistemas de aeração (Costa, 2013).

Historicamente, Jenike e Johanson (1968) informam que os primeiros silos foram construídos em 1860 para armazenamento de grãos. Desde então, silos de grande, médio e pequeno porte, têm sido construídos para o armazenamento de uma enorme variedade de produtos, sejam eles agrícolas ou não.

Atualmente, o termo silo é utilizado para identificar um grande depósito para armazenar e conservar produto sólido, granular ou pulverulento, a granel, seja ele industrial ou agrícola. Podem ser projetados e construídos em diversas formas e tamanhos dependendo do tipo de utilização e do processo para os quais são requeridos (Garbaza, 2011).

Com a expansão da agricultura e de outros setores da economia, os silos se tornaram estruturas fundamentais à economia de espaço físico, mão-de-obra, conservação do produto e, sobretudo, exercem a função de regulador de estoques e preços (Costa, 2014).

A grande demanda por silos no Brasil pode ser explicada devido ao constante crescimento da produção e da exportação agrícola, acarretando assim a necessidade pelo armazenamento de grandes quantidades de produtos em espaços reduzidos (Reis, 2011).

2.1.1 Classificação dos silos

Várias são as classificações dos silos quanto à geometria, ao material empregado na estrutura e também em relação ao solo.

Quanto à sua geometria, há grandes divergências entre autores e normas; esta classificação pode dividir-se em silos esbeltos com relação $H/D \geq 1,5$; silos baixos, com relação $H/D < 1,5$ e silos horizontais que apresentam as dimensões da base maior que a altura. Em geral, silos são classificados, com relação $H/D \leq 1,5$, como sendo baixo e, caso contrário, altos (Costa, 2013).

Segundo Reis (2011) além de serem classificados de acordo com sua esbelteza, os silos se diferenciam quanto a sua forma geométrica. Os tipos mais comumente utilizados são: silos

quadráticos, silos cilíndricos e silo de superfície. Cada um deles tem suas vantagens e desvantagens, principalmente, ao custo de construção, facilidade de carregamento e descarga e eficiência na conservação da silagem.

Tabela 1 - Classificação dos silos quanto à esbeltez

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

Fonte: Adaptado de Calil Junior & Cheung (2007)

2.2 Tremonhas

2.2.1 Classificação das tremonhas

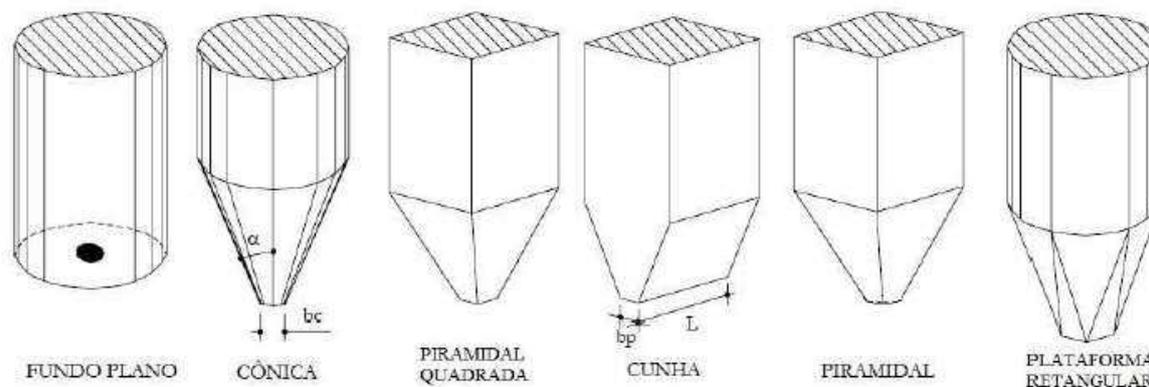
Os fundos dos silos são classificados em função do seu ângulo de inclinação com a horizontal e são intituladas de fundo plano ou fundo inclinado. Este último é comumente chamado de tremonha. Existem várias nas geometrias dos fundos dos silos, como pode-se observar na figura 1 (Coelho, 2016).

Existem atualmente vários tipos de tremonhas no mercado podendo ser escolhidas para atender determinadas características do projeto. Quanto ao fluxo, podem ser divididas em tremonha de fluxo plano e tremonha de fluxo axissimétrico. Também podem ser classificadas quanto a sua forma geométrica em tremonhas de fundo plano, tremonhas com saída excêntrica e tremonhas com saída concêntrica (Vieira, 2009).

Para o dimensionamento de tremonhas cônicas para fluxo de massa deve-se evitar a formação de um arco espontâneo sobre a abertura de escape de um silo durante a etapa de descarga do produto armazenado, o que é um dos maiores problemas enfrentados quando ao processo de dimensionamento do silo (Lobato, 2013).

Uma tremonha projetada para fluxo de massa é caracterizada pela seção convergente relativamente alta com paredes íngremes, pela ausência de transições bruscas e pela saída relativamente grande. Para a maioria dos propósitos, o fluxo de massa é o padrão de fluxo preferível. Silos com tremonhas rasas, que são propensas a induzir fluxo de funil, podem ser encontradas para armazenar grandes quantidades de material principalmente quando o espaço livre é limitado (Volpato *et al.*, 2014).

Figura 1 - Tipos de tremonhas



Fonte: Adaptado CHEUNG (2007)

2.3 Fluxo

O fluxo de produtos sólidos pode ser descrito como o movimento sucessivo entre partículas em contato umas com as outras e com a superfície das paredes dos silos; e contudo, a possibilidade de ocorrência de fluxo é fortemente regida, dentre outros fatores, pela capacidade de dilatação do produto armazenado, por se acreditar que, durante a fase de armazenamento, o produto esteja sujeito a cargas constantes de consolidação responsáveis pelo aumento de sua densidade. No instante do fluxo o sólido armazenado deve ser suficientemente capaz de se expandir e fluir por pequenos canais (Medeiros, 2012).

Segundo Jenike & Johanson (1968) o fluxo acontece quando as pressões são tais que o cisalhamento ocorre sem destruir a isotropia do produto armazenado. Durante o fluxo a densidade do produto é uma função das pressões. Quando as pressões são constantes, o produto cisalha sob densidade constante. Quando as pressões aumentam, o produto consolida e a densidade também aumenta. Quando as pressões diminuem, o produto expande, a densidade diminui, e o fluxo pode prosseguir indefinidamente.

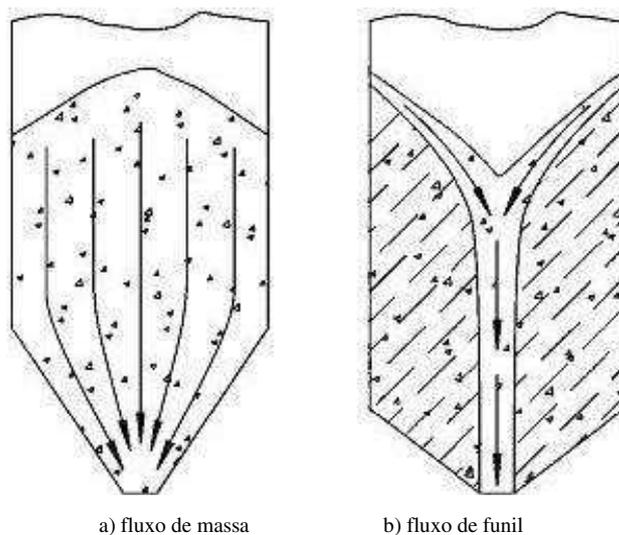
O produto armazenado pode ser descarregado pela gravidade de acordo com dois tipos principais de fluxos: fluxo de massa e fluxo de funil (Figura 2). O tipo de fluxo depende principalmente da propriedade físicas e da geometria e rugosidade da superfície da tremonha (Reis *et al.*, 2015).

Segundo Wojcik *et al.* (2012) o fluxo padrão ocorrendo em um silo é fundamental para as tensões atuantes nas paredes do silo. Em silos, dois principais tipos de fluxo podem ser distinguidos, nomeadamente fluxo em massa e funil.

Calil Junior (1990) destaca que o tipo de fluxo caracteriza o descarregamento do produto, o tipo de segregação, a formação ou não de zonas de produto sem movimento e se o silo pode ser descarregado completamente. Determina, também, a distribuição das pressões nas paredes do silo e fundação, além da integridade e custo da construção. Pioneiro no estudo do comportamento de sólidos sob condições de armazenagem, Jenike (1964) definiu dois tipos básicos de fluxo: massa e funil.

Define-se fluxo de massa aquele cujo produto entra, substancialmente, em movimento, em todas as partes do silo no momento do processo de descarregamento (ocorre quando as paredes da tremonha são suficientemente inclinadas e lisas e não existem abruptas transições) (Figura 3a). Com relação ao fluxo de funil conceitua-se como sendo o tipo de fluxo onde apenas parte do produto entra em movimento, através de um canal vertical formado no centro do silo (Figura 3b) (Medeiros, 2012).

Figura 3 - Tipos básicos de fluxo



Fonte: Medeiros, 2012.

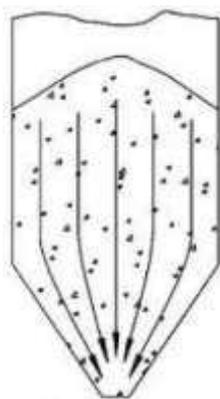
2.3.1 Tipos de Fluxo

2.3.1.1 Fluxo de massa

Durante o fluxo de massa, todo o material está em movimento e move-se para baixo com uma velocidade de mesma ordem, o padrão do fluxo é do tipo que o primeiro a entrar, é o primeiro a sair. Isto geralmente acontece em silos equipados com tremonhas lisas, inclinadas e de grandes diâmetros de saída (Wojcik *et al.*, 2012).

Segundo Campos (2012) o fluxo de massa fica caracterizado quando, no descarregamento de um silo, todas as partículas sólidas nele presentes começam a se movimentar, escoando de forma regular. Um silo projetado para o fluxo tipo massa pode ser reconhecido pela presença de uma válvula de controle de fluxo ou pelo declive íngreme da parede do silo próximo à saída, que auxilia na descarga do material, como ilustra a Figura 4.

Figura 4 - Fluxo tipo mássico



Fonte: Medeiros, 2012.

Em silos com fluxo de massa existem menores chances de formação de obstrução de fluxo e permite a determinação das pressões de forma mais fácil. Outra vantagem deste tipo de fluxo é a possibilidade de se descarregar totalmente o produto por gravidade, aproveitando dessa forma toda a capacidade do silo (Garbazza, 2011).

A principal desvantagem é que é necessário um ângulo de tremonha muito inclinado, o que torna o silo relativamente alto. Além disso, o fluxo provoca tensões dinâmicas nas paredes (em particular na transição silo/tremonha) o que requer paredes de silos espessas (Wojcik *et al.*, 2012).

Segundo Campos (2012) o fluxo de massa é o mais utilizado industrialmente, pois apresenta as seguintes vantagens:

- o fluxo é uniforme e contínuo;
- a pressão é relativamente uniforme na seção horizontal do silo;
- a segregação das partículas sólidas é mínima;
- não há formação de regiões mortas no interior do silo e
- não há canalização do material no descarregamento.

2.3.1.2 Fluxo de funil

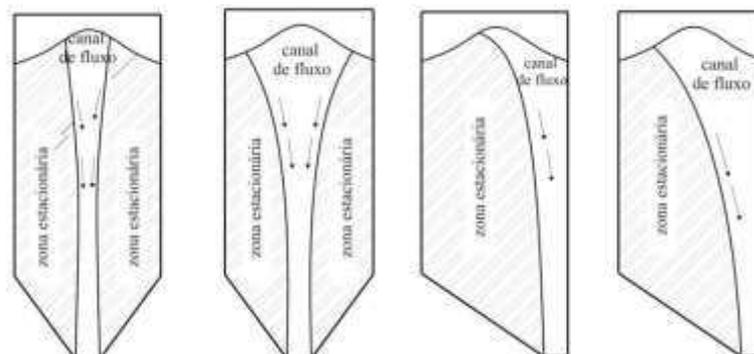
O fluxo de funil ocorre quando a parede do silo não é suficientemente inclinada, e sua superfície não é lisa. O movimento das partículas ocorre das bordas para dentro tão logo se inicie a retirada do material pela abertura do orifício, sendo bastante prejudicial para produtos cujas partículas segregam (Lobato, 2013).

Segundo Campos (2012) as principais características deste tipo de escoamento, muitas vezes consideradas indesejáveis, são:

- não há mistura de material quando ocorre segregação no carregamento do silo;
- o escoamento não é uniforme e
- se o material apresentar tendência à degradação ou à formação de aglomerados, isto irá acontecer nas regiões estagnadas.

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

Figura 2 - Variações do tubo no fluxo de funil

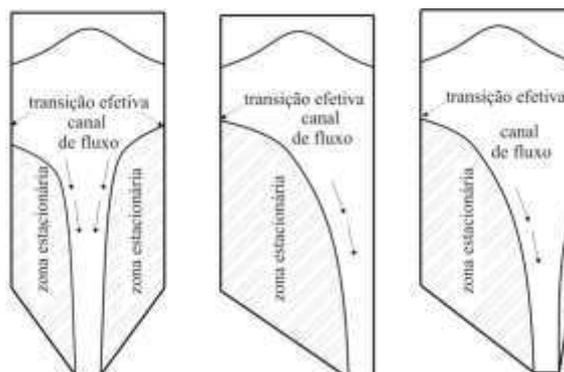


Fonte: Medeiros, 2012

2.3.1.3 Fluxo misto

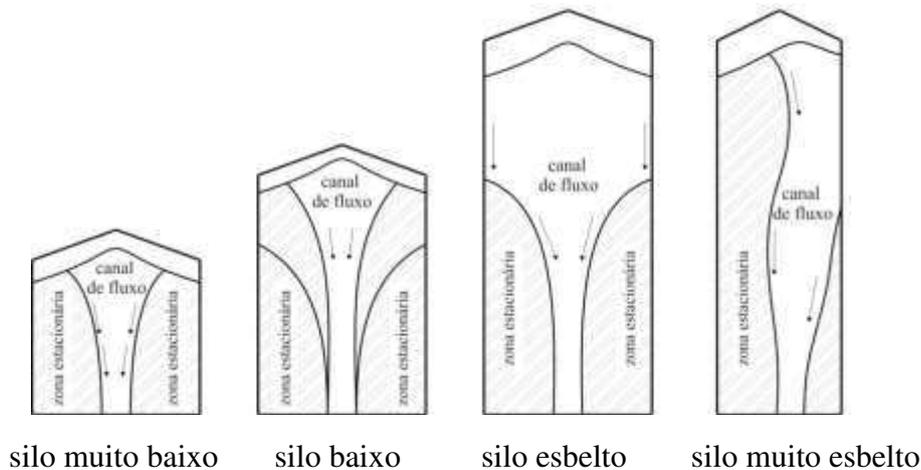
O fluxo misto é caracterizado quando os limites do canal de fluxo chegam a interceptar as paredes do silo ainda durante o processo de descarregamento e são característicos de silos classificados esbeltos, cuja relação H/D é maior ou igual a 2 (Sadowski & Rotter, 2011).

Segundo Medeiros (2012) esse tipo intermediário de fluxo pode surgir sendo caracterizado pelo movimento de todas as partículas da massa ensilada em uma parte do silo, juntamente com a formação do efeito tubo em outra parte; esse tipo intermediário é denominado fluxo misto, conforme a Figura 5.

Figura 3 - Variações do fluxo misto

Fonte: Medeiros, 2012.

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

Figura 4 - Variações do fluxo em função da esbeltez dos silos

Fonte: Medeiros, 2012.

Além da configuração da descarga do silo, outro fator que contribui para a variação do fluxo no interior dos silos é sua esbeltez, relação definida entre a razão da altura do corpo do silo H e seu diâmetro interno D (H/D). Quanto maior for esta relação mais esbelto será considerado o silo, na Figura 6 são apresentadas as prováveis configurações do canal de fluxo, em função da esbeltez do silo (Medeiros, 2012).

2.4 Obstruções do Fluxo

Segundo Jenike (1964), a ocorrência de obstruções do fluxo em silos deve-se ao fato do produto armazenado adquirir resistência, quando consolidado, suficiente para suportar seu próprio peso.

O escoamento de um sólido a granel depende das forças de coesão existentes entre as partículas individualmente sendo que elas podem ser resultado de diferentes mecanismos: interação entre partículas muito finas, presença de umidade no produto, interação de forças de Van der Waals entre as partículas do produto oriundas das condições descritas adiante (Naka, 2010).

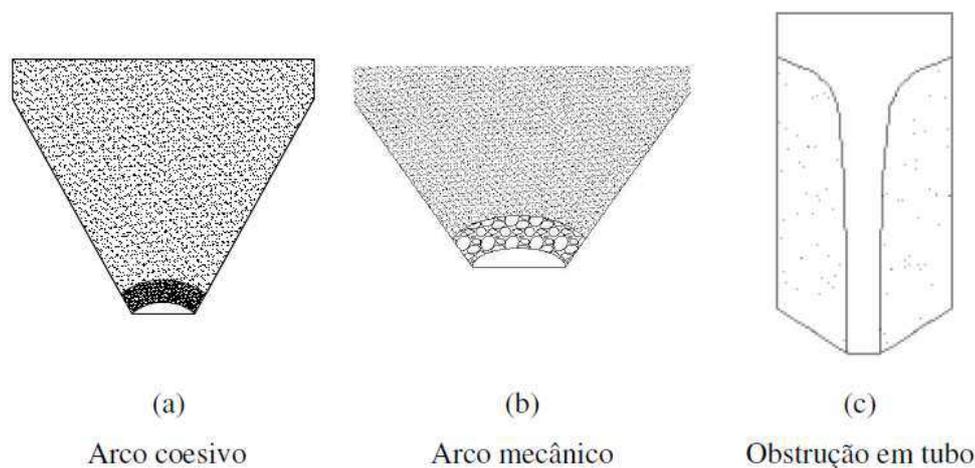
Muitos sólidos, depois de armazenados por longo período continuam a ganhar forças de coesão que dificultarão o escoamento no momento da retirada do silo. Este efeito é chamado de consolidação com o tempo de repouso do produto. Muitos são os mecanismos que podem atuar nesta condição de armazenamento e segundo Schulze (2007) e Marinelli e Carson (2001), a formação de arcos ou pontes coesivas podem ter origem a partir de várias condições a que o produto foi submetido, a saber:

- a) cristalização de substâncias que inicialmente estavam dissolvidas na água presente no próprio produto, na forma de umidade ou se formaram devido à absorção da umidade do ambiente a que estavam submetidas.
- b) formação de pontes líquidas com posterior solidificação de sais devido ao armazenamento a temperaturas elevadas, próximas à temperatura correspondente ao ponto de fusão de determinadas substâncias contidas no produto.
- c) formação de arco mecânico decorrente da interação de partículas de formas irregulares. Partículas fibrosas com tamanhos variados tendem a formar estruturas mecanicamente estáveis que impedem o livre escoamento.
- d) deformação plástica no contato entre as partículas ocasionando aumento da área de contato entre as partículas podendo gerar um aumento das forças de coesão entre elas.
- e) ocorrência de processos biológicos com desenvolvimento de fungos propiciando a aglomeração das partículas do produto armazenado.
- f) aglomeração devido à presença de forças eletrostáticas entre as partículas do produto armazenado.

Os tipos de obstruções observados no momento da descarga e relatados por Marinelli e Carson (2001) podem ser basicamente identificados como arco mecânico entre partículas e coesão entre as partículas, conforme ilustrado na Figura 6.

Segundo Calil Jr. (1990) o objetivo de um projeto de silo para esvaziamento por gravidade é que o fluxo ocorra sem obstruções. O autor destaca dois principais tipos de obstruções de fluxo: arco e tubo (Figura 7). Durante a descarga do produto, caso nenhuma destas obstruções ocorra, o produto fluirá facilmente.

Figura 5 - Obstruções do fluxo em silos.



Fonte: Teixeira, 2006

O objetivo no projeto de silos para prevenir a formação de obstruções é determinar a dimensão do orifício de descarga e a inclinação ideal para a tremonha do silo, levando em consideração o espaço disponível para projeto, custo e o produto armazenado (Teixeira, 2006).

A formação de um arco coesivo ocorre mais em produtos de granulometria fina e coesivos, ao contrário da formação de arcos mecânicos, mostrado na figura 7(b), decorrente da interação de partículas de formas irregulares. Partículas fibrosas com tamanhos variados tendem a formar estruturas mecanicamente estáveis que impedem o livre escoamento (Naka, 2010).

2.4.1 Arqueamento

As partículas sólidas podem transferir tensões de cisalhamento entre si e entre as paredes do silo, mesmo se não houver movimento relativo entre elas. Além disso, a magnitude destas tensões de cisalhamento é para a maior parte dos sólidos, independentemente da velocidade ou velocidade de deformação por cisalhamento. Os sólidos

podem formar superfícies de pilhas estáveis e, por vezes, interrupções de fluxo estáveis conhecidas como arcos e *ratholes* (Carson, 2014).

Diz-se do arqueamento quando ocorre a formação, por parte de uma porção da massa ensilada, de um elemento obstrutor, na forma de um arco, estável logo acima do orifício de descarga. Usualmente, isto ocorre quando o silo é dotado de tremonha, o que pode resultar em um fluxo irregular ou até mesmo em seu total impedimento (Medeiros, 2012).

O efeito de arqueamento pode ser dividido em arcos mecânicos e coesivos. Ravenet (1983) cita que os arcos mecânicos são geralmente formados por partículas grossas que, quando iniciado o fluxo, são impedidas de se movimentar no sentido axial e de rotação entre si, principalmente quando os espaços vazios entre essas partículas são preenchidas por partículas de tamanhos menores (Figura 8).

Figura 6 - Arco mecânico



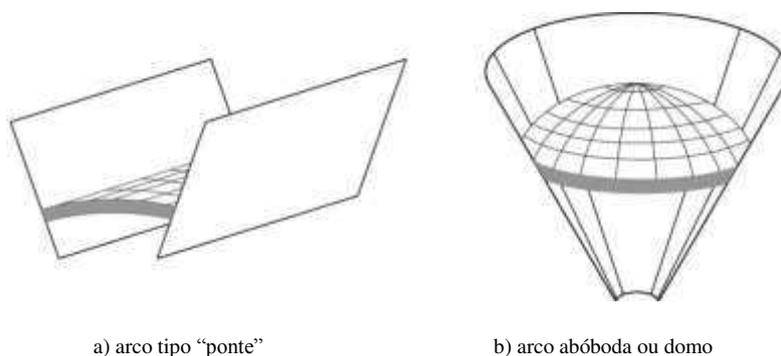
Fonte: Medeiros, 2012

Além de serem prejudiciais ao processo de descarga, tanto os arcos mecânicos quanto os coesivos representam grande perigo à integridade estrutural do silo uma vez que seu desprendimento tende a gerar efeito de sucção do ar na parte superior do corpo do silo, simultaneamente a um acréscimo abrupto de pressão nos elementos logo abaixo de sua localização. Obviamente, essas consequências se manifestam de forma mais indesejada em silos de paredes delgadas (Medeiros, 2012).

Dentre as principais dificuldades enfrentadas pelas indústrias que manuseiam produtos granulares e pulverulentos se destacam a formação de arcos coesivos capazes de restringir, parcial ou completamente, a descarga cuja ocorrência está intrinsecamente relacionada às geometrias dos silos e das tremonhas, às propriedades físicas e de fluxo dos produtos sólidos e condições ambientais, tais como pressão, temperatura e umidade relativa (Lopes Neto *et al.*, 2009).

No que se refere aos arcos coesivos, estes serão substancialmente formados por partículas finas que, sob ação de forças de coesão, se agrupam e adquirem resistência suficiente para prejudicar o processo de descarregamento. Os arcos coesivos podem assumir diferentes configurações em função da forma da tremonha utilizada, sendo comum o surgimento de arcos coesivos denominados de “ponte” em tremonhas na forma de cunha (Figura 9a) e de arcos conhecidos como abóboda ou domo em tremonhas de eixo simétrico (Figura 9b) (Medeiros, 2012).

Figura 7 - Arcos coesivos.



Fonte: Medeiros, 2012

O tempo de armazenagem é outro fator que pode afetar consideravelmente o tipo de fluxo e favorecer a formação de arcos coesivos. Quanto maior for o período do produto no interior do silo, maior será o nível de compactação de suas partículas uma vez que todas as camadas estarão submetidas à ação da gravidade (Batista, 2009).

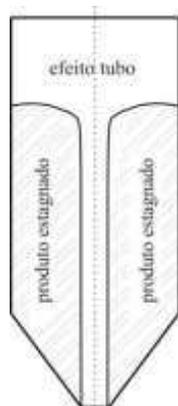
Matchett (2007) concluiu que, apesar de diversas teorias de formação de arcos coesivos, como as de Jenike (1964), Enstad (1981) e Walker (1966) previrem a obstrução na forma de arcos circulares e, ainda, terem boa aproximação quando comparadas a situações reais, isto não significa que a hipótese de arco circular é válida para qualquer situação de descarga, pelo fato de não haver, ainda, informações experimentais das tensões no produto localizado próximo ao orifício de descarga.

2.4.1.1 Efeito tubo

Segundo Medeiros (2012), o efeito tubo ocorre, substancialmente, no fluxo de funil, sendo caracterizado pela estagnação e conservação de toda a massa ensilada adjacente ao

canal de fluxo e ao longo de toda a altura do silo, mesmo após o término do esvaziamento, Figura 10.

Figura 8 - Formação do efeito tubo

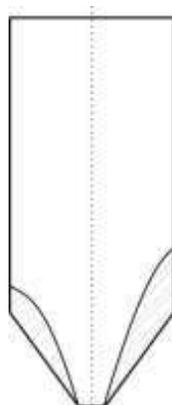


Fonte: Medeiros, 2012.

2.4.1.2 Descarga incompleta

Ocorre devido a permanência de parte da massa armazenada no interior do silo; suas consequências, tal como no efeito tubo, vão desde a perda de capacidade efetiva de armazenagem até possíveis contaminações uma vez que uma mesma quantidade de produto pode permanecer no interior do silo por um período superior ao desejado como no caso de perecíveis, como leites em pó, farinhas e outros compostos alimentícios, conforme Figura 11 (Medeiros, 2012).

Figura 9 - Silo com descarga incompleta.



Fonte: Medeiros, 2012.

2.4.1.3 Efeitos da segregação

O fenômeno e o grau de segregação presentes na operação de um silo pode influenciar de forma significativa e muitas vezes negativamente o padrão de fluxo em um silo. Potencialmente silos com fluxo de massa podem apresentar fluxo de funil e vice-versa. Silos simétricos podem exibir severamente os padrões de fluxo não simétricos. Os silos carregados pneumaticamente podem causar problemas particulares (Arnold, 2013).

Muitas vezes, quando a solução de problemas de desempenho do silo é a segregação que tem uma influência significativa sobre os problemas que estão sendo experimentados. É preciso estar sempre atento à propensão dos sólidos a segregar e perceber que existem vários mecanismos de segregação. Identificar os mecanismos de segregação dominantes que contribuem para as dificuldades de desempenho nem sempre é direto (Arnold, 2013).

2.5 Inserts

A utilização de Inserts em silos é um dos meios utilizados para influenciar benéficamente o padrão de fluxo em silos verticais, alteram também as forças atuantes ao longo do corpo do silo e principalmente na tremonha. Mesmo os inserts que são utilizadas para injetar ar para dentro de um silo ou para aumentar a estabilidade estrutural do silo, alteram o padrão de escoamento. A mudança no padrão de fluxo muda o estado de tensão em um silo (Wojcik *et al.*, 2012).

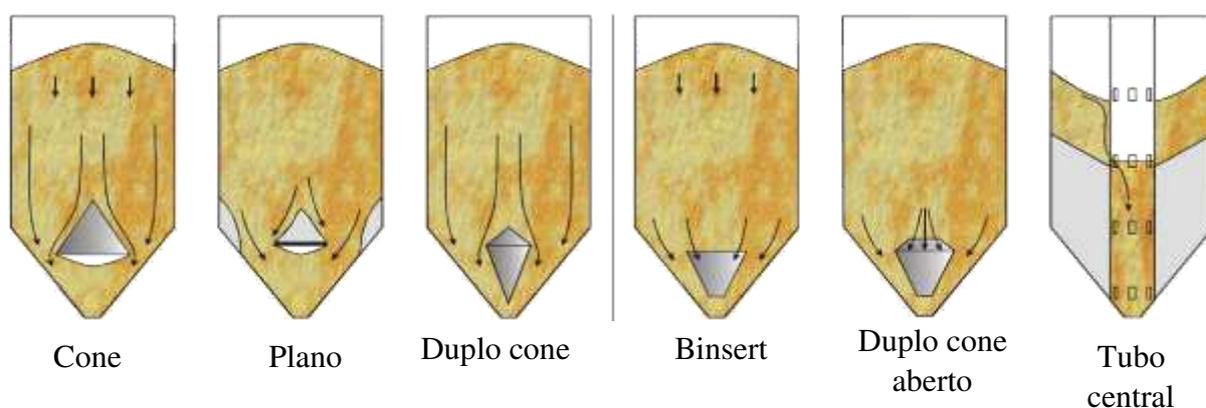
Em outras áreas industriais, uma alternativa para promover o fluxo de massa sem alterar a geometria do silo é a aplicação de inserts para correção do fluxo (Wojcik *et al.*, 2009; Yang e Hsiau, 2001). Estes inserts têm várias formas, tais como plana, coluna, conicidade, fuso e tremonha. Embora vários tipos de inserts sejam utilizados em indústrias, a compreensão do mecanismo com um insert fixo colocado no silo não é conhecida com certeza. O procedimento usual para encontrar a forma, tamanho e colocação adequados é por tentativa e erro (Li *et al.* 2016).

Segundo Wojcik *et al.* (2012) uma alternativa para aumentar o diâmetro do fluxo de funil até o diâmetro do silo (e para atingir o fluxo de massa) são inserts, ou seja, dispositivos de forma diferente colocado dentro do silo na região da tremonha para promover o fluxo de massa. Inserts, tais como um duplo cone, um cone-em-cone, cone invertido e outros que têm sido utilizados há mais de 40 anos no silo, prática muito frequente porém com êxito limitado, sabendo-se que as regras existentes de projeto para silo com inserts, ainda não tem muito

desenvolvimento e critérios realistas com relação ao tipo, tamanho e localização dos inserts a serem cumpridos para obter fluxo de massa ainda são escassos.

Várias geometrias de inserts têm sido investigadas, como cone-em-cone, inserts em forma de cunha, inserts quadrados, estão entre as geometrias em comum exploradas. No entanto, a grande maioria das experiências publicadas na literatura até a data de que foram conduzidos em laboratório usando pequenos modelos. Uma vez que os fenômenos do silo são conhecidos por serem sensíveis aos efeitos de escala, esses resultados podem não ser diretamente aplicável em escala completa em silos (Hartl *et al.*, 2008).

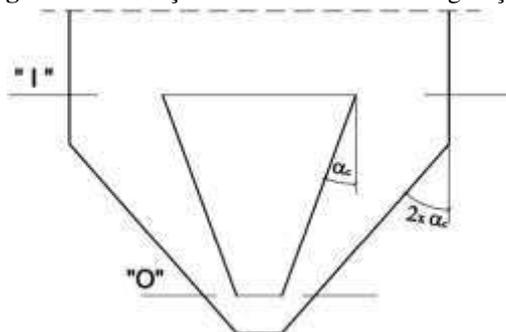
Figura 10 - Tipos de inserts.



Fonte: Hartl, 2008

O mais abrangente conjunto de investigações experimentais com inserts em silo em escala de laboratório foi realizado por Enstad (1998) que utilizou diferentes encaixes (cone em cone, duplo cone invertido). A partir de suas experiências com um insert cone-em-cone, algumas sugestões importantes foram obtidas. A inclinação do cone interno à vertical α teve de ser menor que a inclinação da parede para o fluxo de massa crítica α_c , (Figura 13).

Figura 11 - Esboço do cone-em-cone configuração.



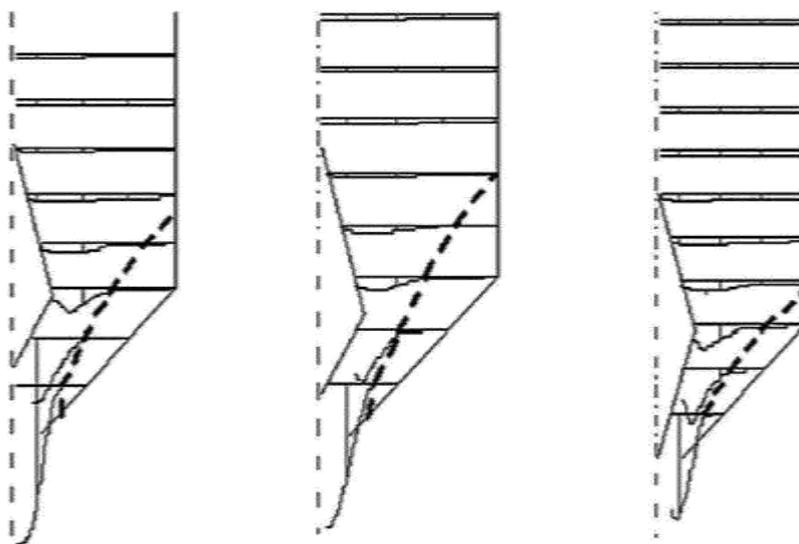
Fonte: Wojcik, 2012.

Aplicação de inserts para melhorar os padrões de fluxo do material durante o esvaziamento foi originalmente proposto por Johanson e Kleysteuber, (1996), que mostraram que um cone invertido localizado em uma posição específica cima da saída do silo, significativamente reduziu o tamanho de zonas de estagnação durante o fluxo de funil. Há indicativos com esse estudo de um aumento significativo de tensões de parede no início da descarga com um insert localizado na parte superior da tremonha, enquanto que o pico de pressão na parede não apareceu com um pequeno insert colocado relativamente perto da saída do silo.

Um insert é normalmente colocado dentro da tremonha: se for bem escolhido e posicionado, pode reduzir significativamente as zonas de estagnação em toda a massa de sólidos armazenados, levando a um padrão de fluxo se aproximando do fluxo de massa (Hartl *et al.*, 2008).

Dind (2015) em estudos realizados constatou que após a instalação do cone duplo, o fluxo que anteriormente apresentava problemas como: rathole, interrupções, zonas estagnadas, alterou significativamente; a massa movia-se uniformemente mantendo a superfície plana e toda massa foi descarregada continuamente e sem interrupção.

Figura 12 - Efeito do duplo cone durante o descarregamento.

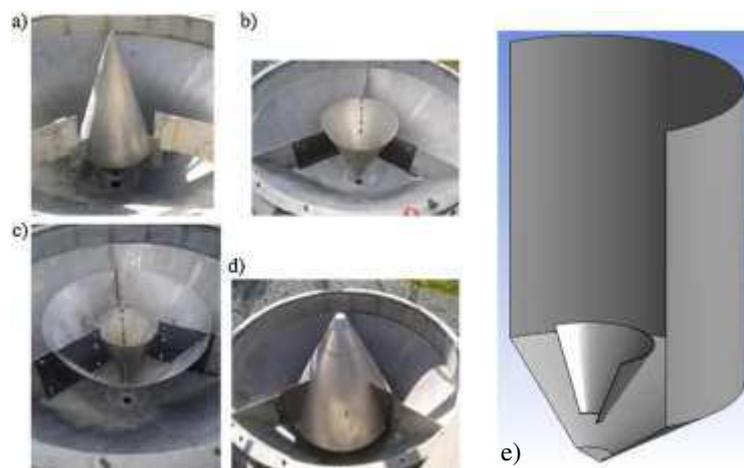


Fonte: Ding, 2015.

Na Figura 15, **a**, **b**, **c** e **d**, mostra vários inserts utilizados na indústria ou experiências, são cone duplo, cone-em-cone, cone duplo em cone e cone invertido respectivamente (Wójcik

et al., 2012). A figura 15 e, exibe uma vista em corte, adotado na simulação, que pertence ao tipo cone-in-cone, em que Li *et al.* (2016) objetivou verificar a aplicabilidade do efeito do insert no fluxo por meio de simulações 3D.

Figura 13 - Diferentes tipos de insertos na indústria e esboço seccional do inserto na simulação.



O insert cone-em-cone pode ser utilizado para minimizar a influência de um certo número de mecanismos de segregação. As principais limitações do cone-em-cone são o tamanho do silo em que o insert pode ser montado e o nível de coesão que o sólido pode exibir. Muito cuidado deve ser tomado para assegurar que o insert esteja adequadamente dimensionado e localizado (Arnold, 2013).

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

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).

Não obstante a existência de algumas regras de concepção (Jenike, 1966; Johanson, 1968) ainda permanecem com desafios no projeto e na colocação correta de um insert e há ainda pouco conhecimento sobre o efeito de inserts nos padrões de fluxo (Härtl *et al.*, 2008). Por exemplo, pequenas alterações no posicionamento vertical do insert são geralmente consideradas para alterar drasticamente os padrões de fluxo internos, tornando a massa estável e uniforme.

2.6 Propriedades dos Produtos Armazenáveis

2.6.1 Propriedades físicas

A determinação das características dos produtos sólidos e seus componentes quando armazenados em silos têm sido objeto de estudo de muitos pesquisadores ao longo dos tempos e a completa caracterização serve de base para que projetistas e engenheiros possam dimensionar não só os silos, mas também o tipo de moega capaz de promover a retirada do produto ali contido com a maior eficiência possível além dos demais equipamentos de transporte (Naka, 2010).

Segundo Garbazza (2011) a caracterização do produto consiste em determinar as propriedades físicas e propriedades de fluxo. Estas propriedades se referem ao comportamento do produto e surgem das forças que atuam sobre as partículas individualmente. As propriedades do produto influenciam no padrão do fluxo, pressões atuantes, geometria e rugosidade da parede da célula de armazenamento e dispositivo de descarga, entre outros.

Pelo fato dos sólidos possuírem características diferentes dos fluidos, torna-se difícil projetar silos que garantam escoamento contínuo assegurando rapidez e viabilidade técnica e econômica capazes de atender às necessidades de utilização. Para produtos agrícolas, igualmente aos demais produtos como minérios e químicos faz-se necessário conhecer as propriedades específicas que caracterizam o escoamento após terem sido armazenados em silos (Naka, 2010).

2.6.2 Propriedades de Fluxo

Para os mais diversos projetos de silos, processos de planejamento, dimensionamento de máquinas e equipamentos para manuseio de material a granel, em quase todas as áreas da

indústria é de fundamental importância o conhecimento das propriedades de fluxo, assim como os parâmetros geométricos dos silos (Mellmann *et al.*, 2014).

Segundo Lobato *et al.* (2016) os problemas em silos podem ocorrer, em muitos casos, devido ao incorreto dimensionamento de sua geometria por não considerar as propriedades de fluxo do material.

As propriedades de fluxo, por sua vez, dependem da composição dos produtos e de suas características físicas, tais como a distribuição do tamanho das partículas, forma das partículas, a estrutura de superfície, peso específico, teor de água e a composição química (Crowley *et al.*, 2014).

As propriedades do fluxo de pó são críticas no que diz respeito à concepção e operação de equipamentos industriais, bem como a prevenção de problemas como o desenvolvimento de arqueamento em silos, a segregação em sólidos e outros problemas que muitas vezes resultam em paralisação do processo ou um produto de má qualidade. O projeto adequado do equipamento e a eficiência adequada da produção do processo exigem, portanto, a aquisição de dados extensos sobre a fluidez do pó, afetados por diferentes fatores, como parâmetros operacionais, características do equipamento e propriedades dos materiais (Opalinski, 2012).

Uma das grandes contribuições neste ramo de pesquisa foi dada por Jenike (1964) ao desenvolver o aparelho de cisalhamento direto por translação conhecido como Jenike ShearTester para a determinação do ângulo de atrito interno, ângulo de atrito com a parede, densidade consolidada, função fluxo e índice de fluxo, além de ter definido os padrões de fluxo em silos, de massa e funil, importantíssimo em projeto de silos verticais (Lopes Neto *et al.*, 2013).

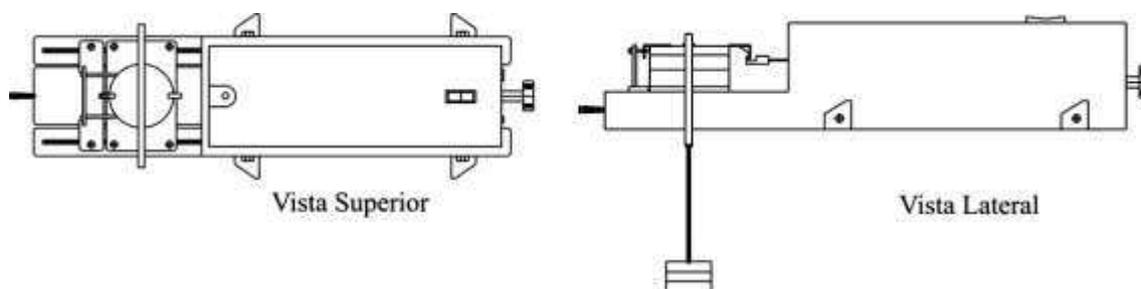
Os ensaios de cisalhamento têm como referencial teórico a normas ASTM (1997), estes ensaios medem as tensões de consolidação e cisalhamento das amostras, requisitos necessários para a construção dos círculos de tensões de Mohr, por meio do qual se determinam as propriedades físicas e de fluxo do produto a ser armazenado (Lobato, 2013).

Medeiros (2012) afirma que com ele é possível determinar os esforços sobre os quais o produto estará sujeito durante o armazenamento e nas condições de fluxo previstas para acontecer no silo conforme Figura 16.

Desta forma, podem-se determinar os seguintes parâmetros:

Peso específico consolidado (γ); Ângulo de atrito interno (Θ); Ângulo efetivo de atrito interno (δ); Ângulo de atrito interno do produto com a parede (Θ_w); Função Fluxo (FF) e; Fator fluxo da tremonha (ff).

Figura 14 - Esquema ilustrativo do aparelho de cisalhamento direto de Jenike



Fonte: Lopes Neto & Nascimento, 2013.

2.6.2.1 Peso específico consolidado

Garbazza (2011) define o peso específico consolidado como a quantidade de massa de partículas sólidas dividida pelo seu volume total e multiplicado pela aceleração da gravidade ($g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$).

2.6.2.2 Ângulo de atrito interno e Ângulo efetivo de atrito interno

O ângulo de atrito interno (ϕ) é o ângulo formado entre a linha que representa o lugar geométrico de deslizamento e o eixo das tensões normais. A linha que passa pela origem e tangencia o maior semicírculo de Mohr, ou seja, o círculo que representa o estado de fluxo estável é chamada de efetivo lugar geométrico de deslizamento e o ângulo formado entre essa linha e o eixo das tensões normais, de efetivo ângulo de atrito interno (δ). De uma maneira mais clara, o ângulo de atrito interno representa o atrito existente entre o produto dentro da estrutura de armazenamento (Reis, 2011).

2.6.2.3 Ângulo de atrito interno do produto com a parede

O ângulo de atrito com a parede é uma medida do atrito entre as partículas e a parede, que depende da rugosidade, da forma e do tamanho das partículas e da rugosidade da parede.

Quanto maior a rugosidade da parede, maior o atrito no contato com as partículas. Tendo a tangente do ângulo de atrito com a parede como corresponde ao coeficiente de atrito com a parede (μ_w). Pela análise da abordagem gráfica de Jenike (1964) o ângulo de atrito com a parede possibilita determinar o ângulo de inclinação da tremonha cônica com a vertical, para incidência de fluxo mássico e o fator de fluxo da tremonha (Lobato, 2013).

2.6.2.4 Coesão

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

2.6.2.5 Fator fluxo da tremonha (ff)

O fator fluxo é um importante parâmetro para o estudo da fluidez dos produtos armazenados, pois é uma propriedade do conjunto do silo (geometria e ângulo de atrito interno com a parede) e do produto. Para calcular o fator fluxo do sistema, é necessário conhecer: o efetivo ângulo de atrito interno do produto (δ), o ângulo de atrito interno do produto com a parede (ϕ_w), a geometria e a inclinação da tremonha (Matos Júnior *et al*, 2014).

2.6.2.6 Função Fluxo (FF)

Segundo Medeiros (2012) a função fluxo de um produto é um gráfico no qual é plotada a tensão confinada de deslizamento do produto versus o maior valor de tensão de consolidação e representa o esforço atuante no produto quando em situação de consolidação.

Observa-se que a escoabilidade do produto é inversamente proporcional ao ângulo que a reta FF forma com a horizontal.

Tabela 2 - Valores limites da Função Fluxo proposto por Jenike (1964)

Função Fluxo	Análise da Fluidez
$FF > 2$	Produto muito coesivo, não flui
$2 < FF < 4$	Produto coesivo
$4 < FF < 10$	Produto de flui facilmente
$FF > 10$	Produto de fluxo livre

Fonte: adaptado de Garbazza,2011.

A Função Fluxo é um indicativo da capacidade do produto em fluir. Como demonstrado anteriormente, podemos ter um valor (índice FFc) que “expressa” se o produto escoará com um fluxo fácil ou difícil.

2.6.2.7 Índice de Fluxo

Outro parâmetro importante é o Índice de fluxo (ffc) o qual é definido como o inverso da inclinação de FF (Jenike, 1964) e pode variar de uma condição de ausência de fluxo até outra caracterizada como de fluxo livre. Jenike usou o ffc para classificar os produtos armazenáveis quanto à sua escoabilidade com altos valores representando uma condição de fluxo fácil.

2.7. Vazão de descarregamento em silos

A vazão de descarregamento está intrinsecamente relacionada à velocidade com que o produto armazenado se movimenta em direção ao orifício de descarga o que a torna uma variável de importância fundamental; por sua vez, a velocidade de descarregamento depende do tipo de fluxo desenvolvido e, por consequência, das propriedades do produto armazenado e das características geométricas dos silos (Medeiros, 2012).

Predizer e, sobremaneira, poder controlar a vazão de descarga de um silo significa poder prever com clareza o tempo máximo demandado para seu total esvaziamento bem como a possibilidade de uso em situações que requerem descargas parciais extremamente controladas, como no caso de sistemas de dosagem industrial situações em que flutuações na vazão de descarga podem representar perda de eficiência de trabalho e aumento dos custos de produção (Medeiros, 2012).

2.8. Uso de imagens digitais para investigação do fluxo em silos

Segundo Medeiros (2012), uma dificuldade encontrada para validação dos modelos criados para predição de fluxo é sua comparação com situações reais devido à opacidade das paredes dos silos, o que vem sendo contornado pelo uso de protótipos confeccionados com material translúcido e construídos em laboratório.

No desejo de maximizar as possibilidades de exploração nesses modelos reduzidos, a obtenção de imagens computadorizadas de todas as etapas do fluxo vem sendo largamente empregada na tentativa de melhor compreensão de todos os detalhes inerentes ao fluxo de produtos armazenáveis Medeiros (2012).

2.9. Produto Utilizado

O milho é produzido em quase todos os continentes, sendo sua importância econômica caracterizada pelas diversas formas de sua utilização, que vão desde a alimentação animal até a indústria de alta tecnologia, como a produção de filmes e embalagens biodegradáveis. Cerca de 70% da produção mundial de milho é destinada à alimentação animal, podendo este percentual chegar a 85%, em países desenvolvidos. Em termos gerais, apenas 15% de toda a produção mundial destina-se ao consumo humano, de forma direta ou indireta (Embrapa, 2006).

Em todas as regiões brasileiras consumidoras de milho, as principais formas de aquisição domiciliar ainda são: o milho em grão, o milho em espiga ou enlatado, o creme de milho, os flocos de milho, o fubá (farinha de milho) e o pão de milho. Portanto, os produtos ou derivados obtidos através de moagem seca do milho são os mais apreciados, tendo participação efetiva como componente básico na dieta alimentar das camadas mais pobres da população.

Dados da última pesquisa de aquisição domiciliar do Brasil, realizada pelo IBGE, em 2002/2003, confirmam o milho como uma das mais importantes fontes alimentares da população brasileira. Na avaliação de consumo, a população da região Nordeste é a maior consumidora de milho, com per capita anual da ordem de 11 kg, cifra 40% superior à média nacional de consumo deste cereal (~7,7 kg). Mas o consumo de milho na zona rural brasileira é ainda mais expressivo, sendo a zona rural da região Sudeste a grande consumidora de milho e seus derivados, com per capita de aproximadamente 31 kg, seguida pela zona rural da região Nordeste, com consumo de cerca de 20 kg/pessoa.

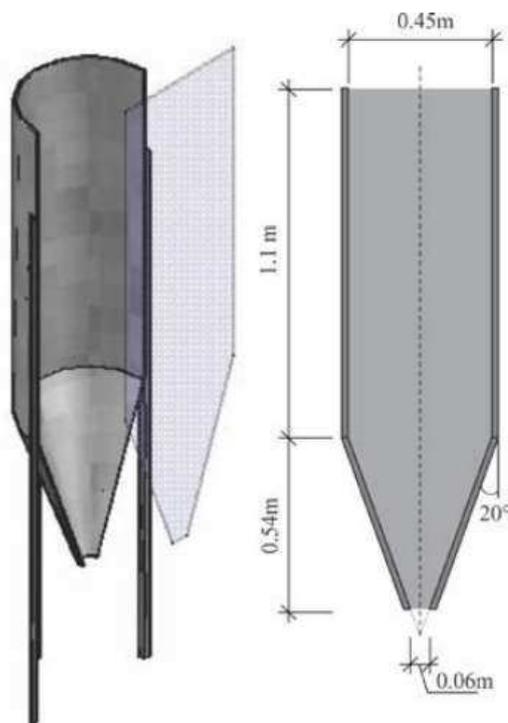
3 MATERIAL E MÉTODOS

Os ensaios de vazão mássica e as propriedades físicas e de fluxo foram realizadas no período de julho a novembro de 2018, no Laboratório de Construções Rurais e Ambiente, pertencente à Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, Campina Grande, Paraíba - PB, Brasil.

3.1 Descrição do silo protótipo

Para visualização do tipo de fluxo da farinha de milho, utilizou-se um silo cilíndrico de seção transversal semicircular, metálico, de tremonha concêntrica com 0,50 m de altura e inclinação com a horizontal de aproximadamente 70°, com 0,06 m de orifício de descarga; tendo sua parte frontal vedada por uma parede de vidro transparente de 8mm de espessura; as dimensões do corpo do silo utilizado nos ensaios são de 1,1 m de altura e 0,45 m de diâmetro, representando um silo com relação igual a 2,4 H/D, totalizando uma capacidade de armazenamento de 0,1 m³ (Figura 17).

Figura 15 - Silo seção transversal semicircular e dimensões.



Fonte: Lopes Neto, 2013.

3.2. Carregamento

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 à estrutura do silo e posicionado 0,05 m acima do corpo do silo, de modo a se obter de um carregamento concêntrico e uniforme.

O procedimento experimental de fluxo foi realizado carregando o silo de forma manual, concêntrica e com velocidade aproximadamente constante. Isso permitiu que o produto fosse distribuído homogeneamente. Os descarregamentos foram realizados por gravidade, após os ensaios adotados; ensaios instantâneos e ensaios com o produto armazenado por 24 horas.

Figura 16 - Conjunto para ensaio.



3.3. Aquisição de dados durante o descarregamento

Para a aquisição dos valores de vazão mássica durante o descarregamento, o silo foi posto sobre uma balança com capacidade máxima de 200,00 Kg, com medição de 75,0 x 75,0 cm, acoplada a um sistema de aquisição de dados; Spider 8 da marca HBM e software Catman 4.0, para leitura instantânea da vazão mássica, previamente calibrada e conectada a um computador (Figura 18).

Durante todos os ensaios foi verificado o posicionamento do silo para exata distribuição das cargas entre as duas células, assim como o seu nivelamento, o que poderia interferir diretamente no fluxo do produto armazenado.

Dessa forma foi possível quantificar o produto descarregado, em relação ao tempo que por definição tem-se vazão mássica experimental.

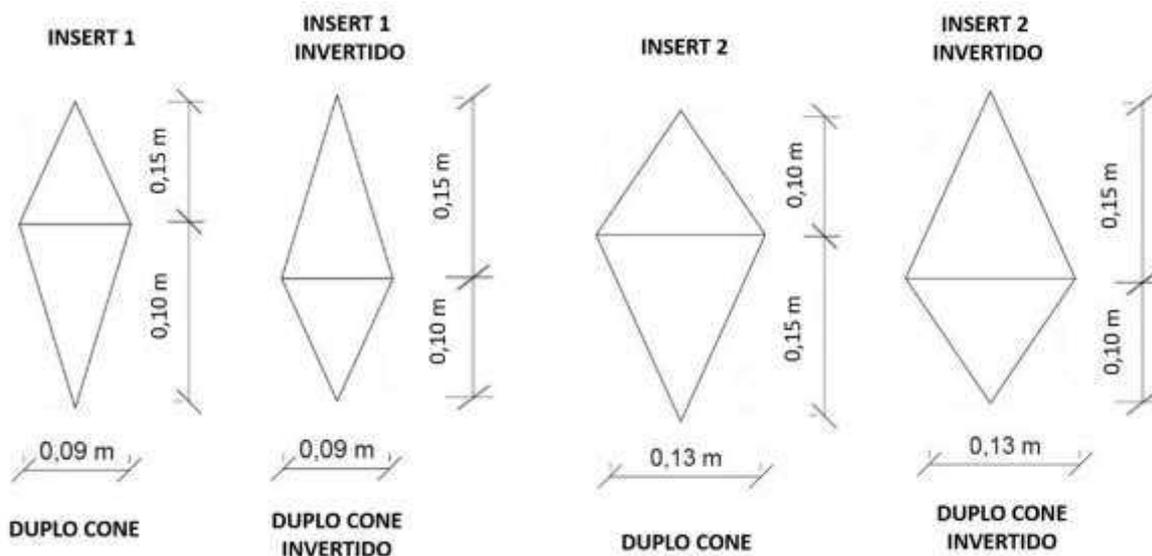
3.4. Captação das imagens

Com o auxílio de uma câmera digital de resolução Ultra HD 4K (30 fps) equivalente a 3840 x 2160 pixels, foram filmadas e captadas as imagens do tipo de fluxo formado durante o descarregamento do silo.

3.5. Inserts utilizados

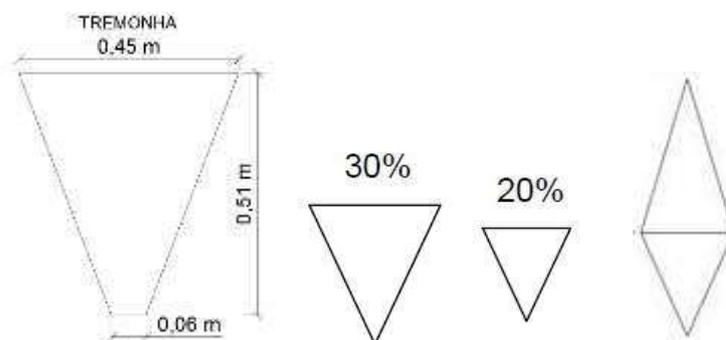
Para seleção das geometrias de inserts a serem analisadas, foram considerados estudos realizados por (Ding *et al.*, 2015; Li *et al.*, 2016), nos quais os resultados obtidos demonstram que *inserts* de cone duplo e de cone duplo invertido foram os mais promissores. Segundos os autores assim como a geometria, as dimensões também influenciam a eficiência dos inserts, sendo utilizadas tais recomendações para dimensionamento dos inserts na atual pesquisa (Bandeira, 2017).

Figura 17 - Medição dos inserts utilizados



As dimensões dos inserts foram relacionadas com as dimensões da tremonha correspondendo a 20 e 30%, para o insert 1 e 2, respectivamente, conforme mostrado na Figura 20, as dimensões dos inserts estão detalhadas na Tabela 03.

Figura 18 - Representação da proporcionalidade dos inserts com a tremonha.



A relação de 30% com as dimensões da tremonha é considerada a relação máxima a ser utilizada, ao ultrapassar desta relação o insert provocará problemas de obstrução do fluxo (Bandeira, 2017).

Tabela 3 - Proporção das dimensões dos inserts utilizados, relacionados à tremonha.

	Cone Superior		Cone Inferior	
	RT (%)	hxb (m)	RT (%)	hxb (m)
Insert 1	20	0,10 x 0,09		0,15 x 0,09
Insert 1 inv		0,15 x 0,09	20	0,10 x 0,09
Insert 2	30	0,15 x 0,13		0,10 x 0,13
Insert 2 inv		0,10 x 0,13	30	0,15 x 0,13

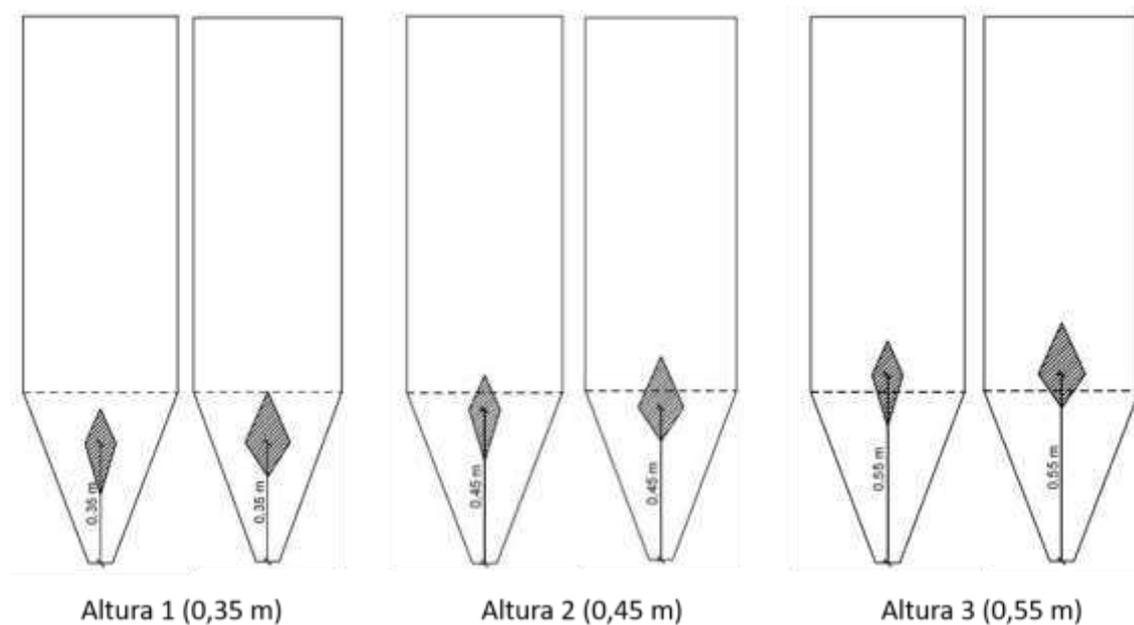
Legenda: RT – Porcentagem de Relação com a Tremonha; h – altura; b – base.

3.5.1. Alturas dos inserts

As três diferentes alturas dos inserts utilizadas nesta pesquisa são: 0,35 ; 0,45 e 0,55 m em relação ao orifício de descarga (Figura 21), essas foram adotadas tendo como base a zona de transição entre o corpo do silo e a tremonha, sendo a altura 3 de 0,55 m, (10% da altura da tremonha acima da zona de transição), a altura 2, 0,45 m (10% da altura da tremonha abaixo da zona de transição), e a altura 1 de 0,35 m (30% da altura da tremonha abaixo da zona de

transição), exemplo das alturas aplicadas podem ser visualizadas na Figura 21 (Bandeira, 2017).

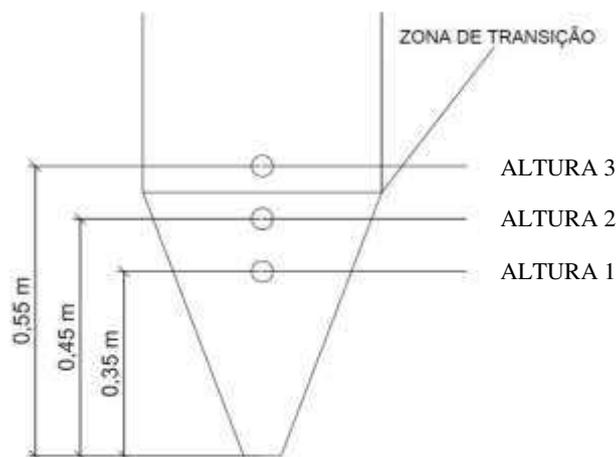
Figura 19 - Demonstração das alturas utilizadas.



Fonte: Bandeira, 2017.

Para as alturas 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.

Figura 20 - Detalhamento das alturas analisadas.



Fonte: Bandeira, (2017).

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 alturas: a terceira 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 altura de 0,45 m, em que novamente foi objetivada a minimização das tensões horizontais provenientes da parede da tremonha; por fim, foi adotada a primeira altura de 0,35 m, nessa o insert está inserido totalmente dentro da tremonha, pretendendo provocar um novo pico de tensão entre a zona de transição e o orifício de descarga, há uma mudança no estado de tensão, onde a principal maior (σ), torna-se menor (σ), facilitando assim o fluxo do produto armazenado (Bandeira, 2017).

3.5.2. Quantidade de ensaios

Para esta pesquisa, foram realizadas três repetições com cada configuração, como podemos observar na tabela 4, totalizando 78 ensaios válidos.

Tabela 4 - Configurações dos ensaios realizados

Configuração	Altura	Período	Repetições	Ensaio
Sem Insert	-	2	3	6
Insert 1	3	2	3	18
Insert 1 invertido	3	2	3	18
Insert 2	3	2	3	18
Insert 2 invertido	3	2	3	18
Total de ensaios				78

Legenda: Altura: (Altura 1: 0,35m, Altura 2: 0,45m e Altura 3: 0,55m); Período: Armazenamento (Instantâneo e por 24 horas).

3.6 Determinação das propriedades físicas do produto

As propriedades físicas que foram determinadas são: teor de umidade e granulometria.

3.6.1. Teor de umidade

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

3.6.2. Granulometria

A determinação da granulometria da farinha de milho flocada foi realizada por meio de peneiramento de uma amostra de 500g, utilizando peneiras padronizadas da ABNT (2,8; 1,00; 0,59; 0,297; 0,149 mm) e um agitador mecânico com uma frequência de vibração de 10 Hz, durante 5 minutos. Após finalização do processo, foi realizada a pesagem do produto retido em cada peneira, obtendo-se, portanto, a percentagem retida acumulada em cada peneira.

3.7 Determinação das propriedades de fluxo

A determinação das propriedades de fluxo foi realizada utilizando-se o aparelho de cisalhamento de translação (TSG 70-140) conhecido internacionalmente por “Jenike Shear Cell”, seguindo-se a metodologia proposta pela British Material Handling Board (1985); Foram utilizadas as séries 70 N (50, 35 e 20 N) e 50 N (35, 20 e 10 N) 35N (25, 10 e 7 N) como cargas de pré-cisalhamento e de cisalhamento.

As propriedades de fluxo que foram determinadas são: peso específico, em função da consolidação (γ), ângulo de atrito interno (ϕ), efetivo ângulo de atrito interno (δ), coesão (C), ângulo de atrito com a parede (ϕ_w); dessas informações foram determinados o coeficiente de atrito com a parede (μ).

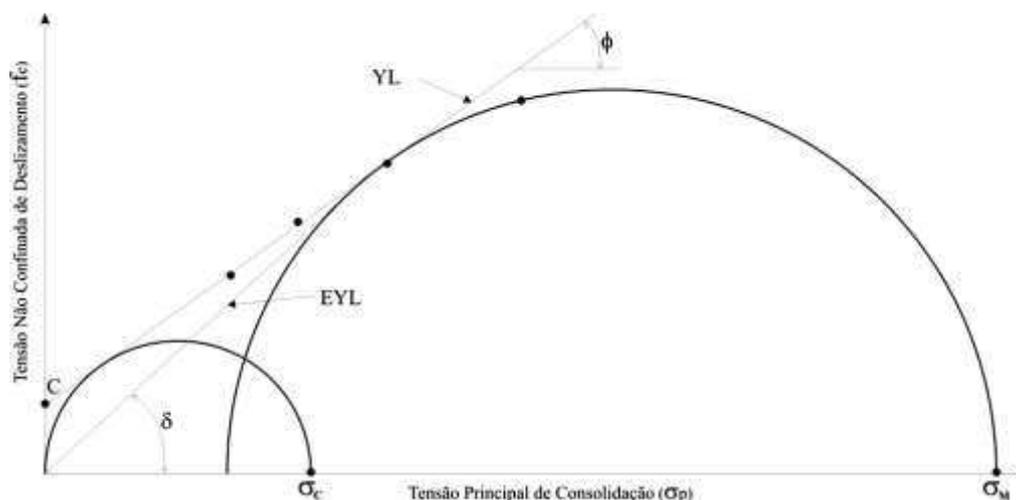
O ângulo de atrito interno foi obtido através do primeiro círculo de Mohr, que terá um ponto P, com o qual, haverá intersecção com a reta da coesão. O efetivo ângulo de atrito interno foi obtido a partir da reta que parte da origem e tangencia o primeiro círculo de Mohr. O Coeficiente angular do lugar geométrico é o ângulo de atrito interno.

Com referência à determinação do ângulo de atrito com a parede (ϕ_w) foi utilizado uma placa de aço rugoso, por ser o mesmo tipo empregado na construção do modelo reduzido, substituindo apenas o anel inferior pela amostra do material da parede enquanto os níveis de carga normais serão: 50, 40, 30, 20, 10 e 4,4 N. Todos os ensaios foram realizados apenas

visando à obtenção das propriedades instantâneas de fluxo em temperatura ambiente (24 °C) e umidade relativa do ar em torno de 67%.

De posse dos resultados, e com o auxílio de um programa de computação gráfica (AutoCad), foram traçados os gráficos de tensão normal versus tensão de cisalhamento (σ, τ), para as cargas utilizadas, o que possibilitou traçar-se círculos de Mohr (Figura 23). Para a determinação das propriedades de fluxo de produtos armazenados, é importante que se conheçam os lugares geométricos de deslizamento obtidos pela relação entre a tensão de cisalhamento (τ) e a tensão normal (σ) para o sólido armazenado predizendo, desta forma, como seria seu deslizamento frente a si próprio e ao material da parede do silo. A determinação do lugar geométrico de deslizamento (YL) e do lugar geométrico de deslizamento da parede (WYL) auxilia, também, na determinação da forma da tremonha e nas dimensões do orifício de descarga.

Figura 21 - Lugares geométricos e ângulos de atrito interno.



Legenda: YL - lugar geométrico de deslizamento; EYL – Efetivo lugar geométrico de deslizamento

Fonte: Lopes Neto (2009)

Jenike (1964) propôs o índice de fluabilidade (ffc) como parâmetro de predição do comportamento do produto durante o descarregamento do silo obtido pela razão entre a tensão principal de consolidação, σ_M , e a tensão não confinada de deslizamento, f_c , conforme equações 1 a 5 de Enstad (1981):

$$ff = \frac{Y(1 + \sin \theta)}{2(x-1)F(\theta) \cos \theta}$$

$$Y = \left[\frac{[(2 - 2 \cos \alpha)^m (a^{1-m}) (\cos \theta) + (\sin \beta) (\sin \alpha)^{1+m}]}{(1 - \sin \theta) (\sin \alpha)^{1+m}} \right]$$

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

$$\alpha = \beta + 90 - \theta$$

$$F(\theta) = \left(\frac{65}{220 - \theta} \right)^m \left(\frac{200}{290 - \theta} \right)^{1-m}$$

$m = 1$ (eixo simétrico)

$m = 0$ (retangular $L \geq 30$)

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Propriedades físicas

As propriedades físicas da farinha de milho flocada analisadas foram a granulometria e o teor de umidade com o qual o produto foi utilizado nos testes de fluxo.

A Tabela 5 apresenta a granulometria encontrada após o ensaio de peneiras recomendado pela ABNT.

Tabela 5 - Resultado da análise granulométrica da farinha de milho flocada

Peneiras	Massa peneira(g)	Peneira + Produto	Produto	% retida	% Retida acumulada
2	476,19	476,19	0	0	0
1	435,85	545,8	109,95	22,0	22,0
0,59	468,31	732,83	264,52	53,0	75,0
0,297	467,13	539,08	71,95	14,4	89,4
0,149	441,43	487,3	45,87	9,2	98,6
Fundo	442,59	449,21	6,62	1,3	99,9
			498,91	100	

Segundo a classificação de Callil Júnior (1984), a partir do diâmetro médio das partículas do produto armazenado (Tabela 6), a farinha de milho flocada pode ser classificada como produto coesivo.

Tabela 6 - Classificação dos produtos de acordo com a granulometria

Diâmetro de partícula (mm)	Classificação
D > 0,42 mm	Granulares
0,42 < D < 0,149	Pulverulentos coesivos
0,149 < D < 0,079	Pulverulentos coesivos finos
D < 0,079	Pulverulentos coesivos extra – finos

4.2 Propriedades de fluxo

Encontram-se na Tabela 7 os resultados das propriedades de fluxo da farinha de milho flocada. O peso específico consolidado foi de 6616,10 e 6686,19 N/m³, para os limites inferior e superior, respectivamente. Em estudos realizados por Medeiros (2012) utilizando farelo de soja e milho triturado, foram obtidos valores de peso específico consolidado, inferior e superior, variando de 6564,2 a 6640,1 N/m³ para farelo de soja e 7441,4 a 7638,1 N/m³ para milho triturado.

Para os limites inferior e superior do ângulo de atrito interno, os valores respectivamente encontrados foram de 22 e 28°. Medeiros (2012) determinou o ângulo de atrito interno dos produtos: com valores de 32,8 a 35,1° para farelo de soja e para o milho triturado encontrou valores de 25,3 a 33,3°. Já em estudos realizados por Bandeira (2017), para determinação do ângulo de atrito interno da ração avícola encontrou valores de 25 a 30°, para os limites inferior e superior, respectivamente.

No efetivo ângulo de atrito interno os limites para farinha de milho, inferior e superior foram 29 a 32°, respectivamente. Valores próximos foram encontrados por Bandeira (2017), para ração avícola, produto pulverulento, com limites de 29 e 34°. Medeiros (2012) obteve resultados para farelo de soja de 34,3 a 38,8°, e para o milho triturado de 34,1 a 35,5°, limites inferiores e superiores, respectivamente.

Tabela 7 - Caracterização das propriedades de fluxo.

Produto	γ		\emptyset		δ		\emptyset_w		ff _c
	inf	sup	Inf	sup	inf	Sup	inf	sup	
Farinha de milho	6616,10	6686,19	22	28	29	32	17	18	1,85

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 (°); ff_c = Índice de fluxo de Jenike; inf; sup = limite inferior e superior, respectivamente.

Os resultados obtidos para o ângulo de atrito do produto com a parede foram de 17 a 18°, limites inferior e superior, respectivamente. Para os valores de farelo de soja foram de 23,4 e 25°, para o milho triturado foram 23 e 23,9°, limites inferior e superior do ângulo de atrito com a parede em estudos realizados por Medeiros (2012). Já Bandeira (2017) encontrou valores para ração avícola de 21 a 23°, em estudos realizados.

As propriedades de fluxo são diretamente influenciadas pelas propriedades físicas como a granulometria e o teor de umidade dos produtos armazenáveis. Embora os autores Medeiros (2012) e Bandeira (2017) tenham utilizado em seus trabalhos produtos diferentes do estudado no presente trabalho, a granulometria e o teor de umidade dos produtos foram similares, apresentando assim, correspondência de valores.

O produto estudado foi classificado como muito coesivo, apresentando o índice de fluxo de 1,85. Segundo Jenike (1964) que classifica os produtos armazenáveis quanto à sua escoabilidade, pode variar de uma condição de ausência de fluxo até outra caracterizada como de fluxo livre. Bandeira (2017) encontrou o ffc para ração avícola de 1,92, classificando-se também como muito coesivo.

4.2 Características de fluxo

4.2.1. Sem insert

A sequência de imagens da Figura 24 mostra o descarregamento instantâneo do silo para a farinha de milho sem a utilização do insert, onde é verificado que no início do descarregamento do produto, o fluxo é mássico, sem alteração do talude até os primeiros 40 cm ou o equivalente a 20 segundos de descarregamento, onde o fluxo passa a ser em funil, havendo tentativas de formações de tubo próxima a parede direita do silo, de forma excêntrica, seguidos por desmoronamentos de massa.

Calil Junior *et al.* (2007) comentam que este movimento é característico de silos muito esbeltos. Caracterizando o fluxo como do tipo misto, que é uma mudança do fluxo mássico para fluxo. Notou-se que o plano superior do canal de fluxo, apresentou inclinação praticamente constante.

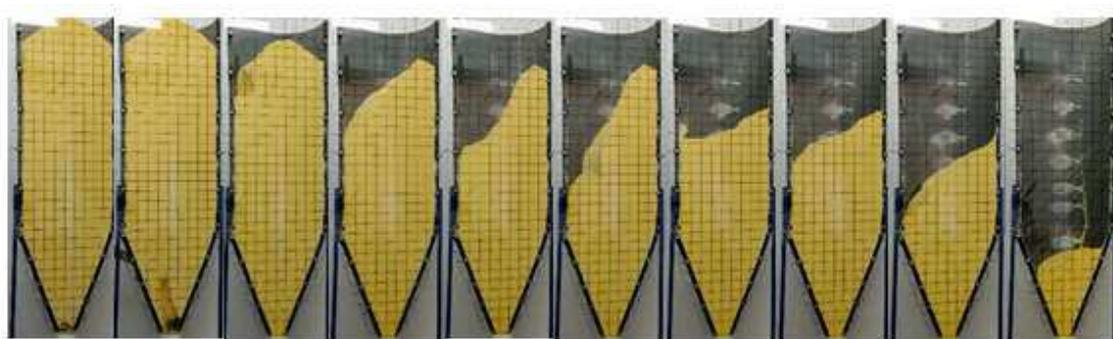
Figura 22 - Características de fluxo instantâneo da farinha de milho sem insert.



Para a Figura 25 a seguir, o produto foi armazenado por um período de 24 horas, podendo-se observar que após a abertura do orifício de descarga ocorre a formação de um arco coesivo estável, sendo necessário utilizar de força externa à tremonha do silo para ruptura do arco, que tinham aproximadamente 5 cm de largura até os 35 cm de comprimento.

Após ruptura deste arco, o fluxo seguiu-se mássico nos primeiros 20 cm, passando para seguidas tentativas de formações de tubos excêntricos com sucessivos desmoronamentos de massa, apresentando instabilidades à estrutura do silo, pelo impacto da massa na parede do silo, caracterizando-se como fluxo do tipo misto, porém mal definido e de difícil classificação.

Figura 23 - Características de fluxo da farinha de milho sem insert, armazenado por 24 horas.



4.2.2. Insert 1

4.2.2.1. Altura 1

Observa-se que na sequência de imagens da Figura 26 é apresentado o descarregamento instantâneo da farinha de milho flocada utilizando o insert 1 na primeira altura. Nota-se inicialmente, que houve tentativas de formações de tubo excêntrico seguidos por leves desmoronamentos até aproximadamente aos 50 cm de profundidade, onde houve alteração do fluxo funil para fluxo mássico, porém é verificado que o produto desliza pelo lado esquerdo com inclinação de talude praticamente constante, onde parte da massa do lado direito permanece estática/estagnada até o momento em que o plano superior intercepta o insert. Classificando-se como fluxo misto.

Figura 24 - Características de fluxo instantâneo da farinha de milho flocada para o insert 1 na altura 1.



Na Figura 27, o produto ficou armazenado por 24 horas. Após a abertura do orifício de descarga foi formado um arco coesivo estável, onde seu rompimento foi de forma manual e, após a ruptura foram observadas sucessivas formações de efeito tubo próximo à parede esquerda do silo seguidos por desmoronamentos, causando instabilidades a estrutura do silo.

Após os 70 cm de profundidade, tomando como base a marcação a esquerda do silo, o fluxo alterou para mássico com movimentação à esquerda e deslizamentos de massa com inclinação de talude praticamente constante, verificado também que a massa ao lado direito permaneceu estagnada até a interceptação do plano superior com o insert.

Figura 25 - Características de fluxo da farinha de milho flocada para o insert 1 na altura 1, armazenado por 24 horas



4.2.2.2. Altura 2

Figura 28, o fluxo da farinha de milho flocada é analisado utilizando o mesmo insert, insert 1, com alteração da altura, para a 2 equivale a 35 cm de distância do orifício de descarga. É possível verificar que o fluxo iniciou-se com tentativas de formações de funil concêntrico, a variante desse fluxo é percebida próxima a transição silo tremonha quando a concavidade inversa assume uma forma plana e intercepta o insert, seguindo como fluxo mássico.

Medeiros (2012) observa que além dos fluxos de massa e funil, um tipo intermediário de fluxo pode surgir sendo caracterizado pelo movimento de todas as partículas da massa ensilada em uma parte do silo, juntamente com a formação do efeito tubo em outra parte; esse tipo intermediário é denominado fluxo misto.

Figura 26 - Características de fluxo da farinha de milho para o insert 1 na altura 2, instantâneo.

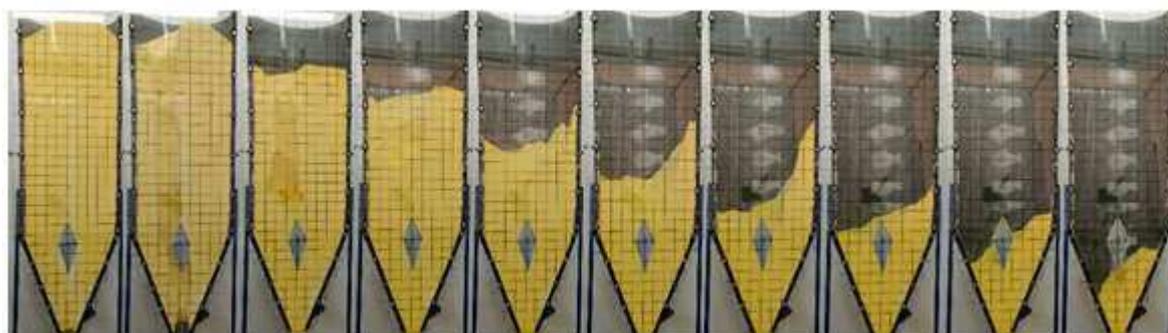


Constata-se na Figura 29 que o fluxo da farinha milho flocada armazenada por 24 horas, na altura 2 e insert 1, foi formado um arco coesivo impedindo o fluxo do produto, sendo necessário romper de forma manual. Após a ruptura, é possível verificar a formação de um canal vertical (*rathole*) formado até a base, deixando a massa estagnada e sem fluxo, sendo necessário utilizar de força externa ao silo para romper e o produto poder fluir.

O fluxo seguiu-se até o fim com sucessivas formações de tubos, sempre com movimentações ascendentes até a superfície, porém com desmoronamentos e efeito sucção, apresentando instabilidade pelo impacto da massa que se desprendia.

Medeiros (2012) relata que o descarregamento de milho triturado com tremonha e armazenado por 120 horas foi do tipo funil cuja característica é a formação de um canal de fluxo alinhado com o orifício de descarga, cercado por uma zona na qual o produto permanece estático (zona parada ou estagnada).

Figura 27 - Características de fluxo da farinha de milho para o insert 1 na altura 2, armazenado por 24 horas.



4.2.2.3. Altura 3

Na Figura 30, estão detalhadas as características do fluxo para farinha de milho flocada utilizando o insert 1 na altura 3, verificando-se que após a abertura do orifício de descarga houve a primeira formação de um canal excêntrico próximo à parede direita do silo, onde foi desfeito pelo desmoronamento de massa. No segundo canal verificado, houve formação de arco coesivo, sendo necessário romper através de força exterior ao silo, após o rompimento, o fluxo seguiu-se em funil com pequenos desmoronamentos até atingir a transição silo tremonha onde houve outra interrupção por formação de arco coesivo; após o rompimento, o fluxo alterou-se para fluxo de massa. Classificando-se como fluxo de funil.

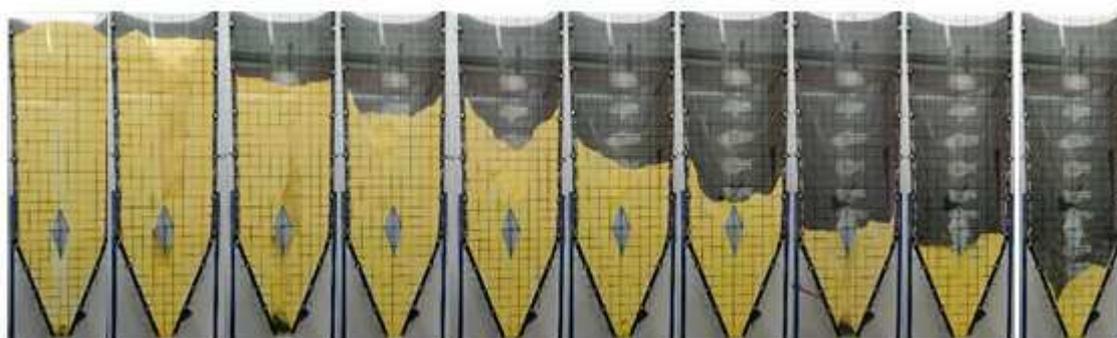
Figura 28 - Características de fluxo instantâneo da farinha de milho flocada para o insert 1 na altura 3.



Observando a Figura 31, foi utilizada a mesma configuração da Figura 31 acima, porém com a farinha de milho armazenada por 24 horas, verifica-se que ao abrir o orifício de descarga é formado um arco coesivo impedindo o fluxo, sendo necessário utilizar-se de forma externa para rompimento do arco, após rompimento, é formado um canal de fluxo de funil que foi desmoronado de forma natural e com grande impacto gerando um efeito sucção. Em seguida houve outra formação de canal até a base e o fluxo foi interrompido por formação de arco coesivo, desta vez, sendo necessário utilizar de força externa para rompimento. O fluxo seguiu-se em funil com formações de canais e desmoronamentos, causando instabilidade a estrutura do silo.

Medeiros (2012) observou mesmo efeito em estudo realizado, onde a queda sucessiva de porções do produto pode resultar em forte instabilidade à estrutura e seguramente refletia na intensidade e distribuição das pressões dinâmicas.

Figura 29 - Características de fluxo da farinha de milho para o insert 1 na altura 3, armazenado por 24 horas.



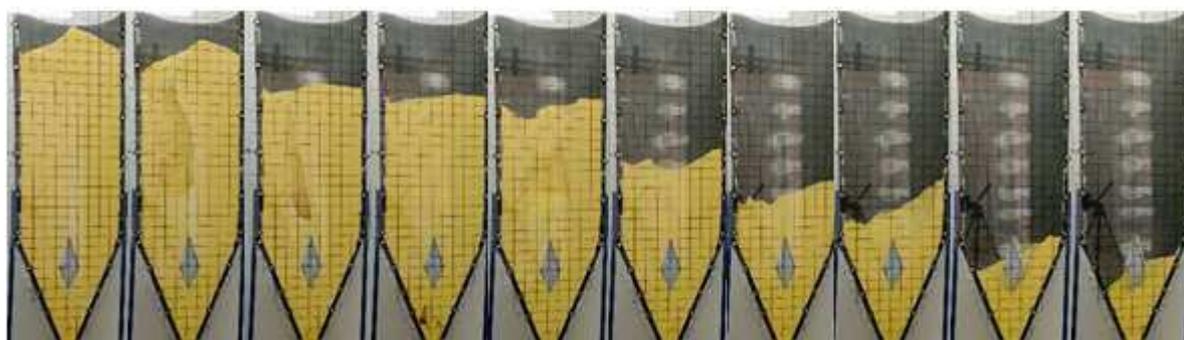
4.2.3. Insert 1 invertido

4.2.3.1. Altura 1

A sequência de imagens da Figura 32 mostra o descarregamento instantâneo do silo para a farinha de milho flocada com a utilização do insert 1 invertido, onde ao abrir o orifício de descarga é verificada uma formação de canal excêntrico próximo a parede esquerda do silo, o primeiro canal tem uma largura que variou de 12 a 18 cm, onde houve desmoronamento natural, causando impacto à estrutura do silo. O fluxo seguiu com sucessivas tentativas de formações tubos e desmoronamentos com efeito sucção, sendo o processo completo caracterizado como com fluxo funil.

Medeiros (2012) informa que durante o descarregamento foi observada à instabilidade do produto em fluir com sucessivas tentativas de formação do efeito tubo e, a cada nova tentativa, o canal de fluxo se tornava maior até atingir dimensão 5 vezes superior ao orifício de descarga.

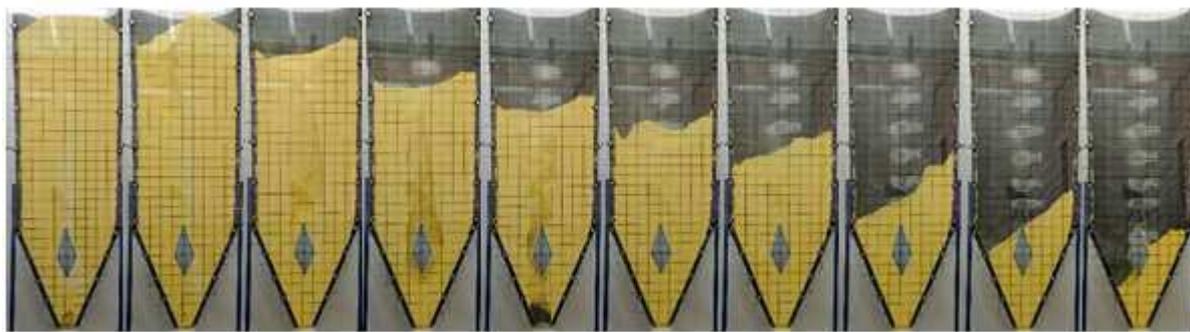
Figura 30 - Características de fluxo instantâneo da farinha de milho para o insert 1 invertido na altura 1.



A Figura 33 apresenta o descarregamento da farinha de milho flocada armazenada por um período de 24 horas, utilizado insert 1 invertido na altura 1, verificado que após abertura do orifício de descarga é formado um arco coesivo que interrompe o fluxo, sendo o rompimento realizado utilizando força externa ao silo, e após o rompimento houve sucessivas tentativas de formação de canais, com desmoronamentos e efeito sucção do produto.

Ao atingir 50 cm de profundidade houve uma interrupção por formação de arco coesivo estável, sendo necessário romper de forma manual. É possível verificar que o fluxo é alterado para fluxo massa próximo aos 20 cm antes da superfície do produto interceptar o insert, caracterizando-se como fluxo misto.

Figura 31 - Características de fluxo da farinha de milho para o insert 1 invertido na altura 1, armazenado por 24 horas

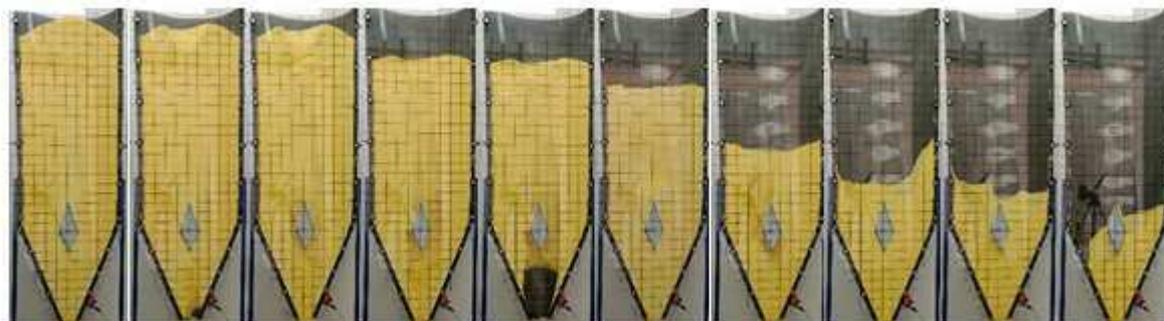


4.2.3.2. Altura 2

A Figura 34 a seguir mostra o fluxo da farinha de milho flocada utilizando o insert 1 invertido na altura 2, onde é observado que logo após a abertura do orifício de descarga, uma pequena quantidade do produto flui, porém, o fluxo é interrompido com uma formação de arco coesivo, sendo necessárias 3 tentativas para quebra do arco coesivo e logo após a quebra é formado o primeiro canal que em seguida é desmoronado, causando grande impacto a estrutura do silo.

O segundo canal é formado onde o fluxo é interrompido com formação de arco coesivo e a massa fica estagnada. Utilizando-se de força externa o arco é quebrado causando impacto na parede do silo pela queda da massa e formação de efeito sucção do produto. Até o fim do descarregamento houve sucessivas formações de tubos com desmoronamentos, classificando-se como fluxo funil.

Figura 32 - Características de fluxo instantânea da farinha de milho para o insert 1 invertido na altura 2.



A Figura 35 a seguir, apresenta o fluxo da farinha de milho flocada armazenada por 24 horas, sendo verificado que há formação o arco coesivo após abertura do orifício de descarga e mais dois arcos coesivos durante o descarregamento, impedindo o fluxo do produto, sendo necessário romper através de força externa. Durante todo descarregamento, foram verificadas sucessivas formações de tubos, seguidos por desmoronamentos, classificando-se como fluxo funil.

Lopes Neto *et al.* (2013) citam que para um fluxo coesivo pode ocorrer a tentativa de formação de tubo em vários momentos além da formação parcial de abóbodas ou arcos no momento da abertura do orifício de descarga.

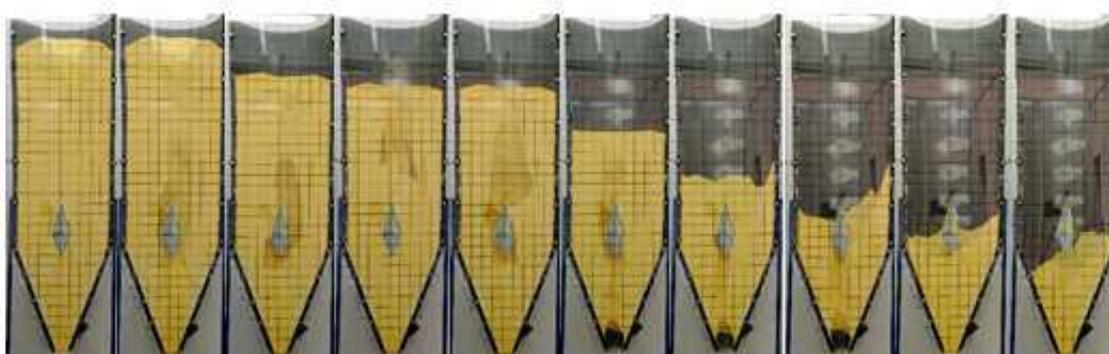
Figura 33 - Características de fluxo da farinha de milho para o insert 1 invertido na altura 1, armazenado por 24 horas.



4.2.3.3. Altura 3

Na Figura 36, a sequência de fotos mostra o descarregamento da farinha de milho flocada utilizando o insert 1 invertido na altura 3 onde o fluxo foi classificado como fluxo funil pois, durante todo o ensaio houve predominância de formações de tubo concêntrico, seguidos por desmoronamentos e efeito sucção. Foram verificadas 3 interrupções de fluxo por formação de arco coesivo.

Figura 34 - Características de fluxo da farinha de milho para o insert 1 invertido na altura 3, instantâneo



Além de serem prejudiciais ao processo de descarga, tanto os arcos mecânicos quanto os coesivos representam grande perigo à integridade estrutural do silo uma vez que seu desprendimento tende a gerar efeito de sucção do ar na parte superior do corpo do silo, simultaneamente a um acréscimo abrupto de pressão nos elementos logo abaixo de sua localização. Obviamente, essas consequências se manifestam de forma mais indesejada em silos de paredes delgadas (Medeiros, 2012).

Verifica-se na Figura 37 o fluxo da farinha de milho flocada, armazenada por 24 horas, utilizando o insert 1 invertido na altura 3, que após a abertura o orifício de descarga é formado o arco coesivo interrompendo o fluxo do produto. Fato este verificado em todos os ensaios após o produto ter sido armazenado por 24 horas. Após rompimento, o fluxo seguiu com formação de efeito tubo (*rathole*), com interrupções em algumas formações e instáveis, seguidos por desmoronamentos. O fluxo foi alterado após o plano superior passar pelo insert e pela transição silo tremonha, ou seja, o fluxo predominou-se como fluxo de funil.

Figura 35 - Características de fluxo da farinha de milho para o insert 1 invertido na altura 3, armazenado por 24 horas.



4.2.4. Insert 2

4.2.4.1. Altura 1

A Figura 38 mostra o descarregamento da farinha de milho flocada utilizando o insert 2 na altura 1, é possível verificar que após a abertura do orifício a concavidade superior do talude é invertida, logo em seguida houve uma formação de canal excêntrico de 65cm de comprimento próximo à parede esquerda do silo, que em seguida é desmoronado, causando pressão na parede e efeito sucção.

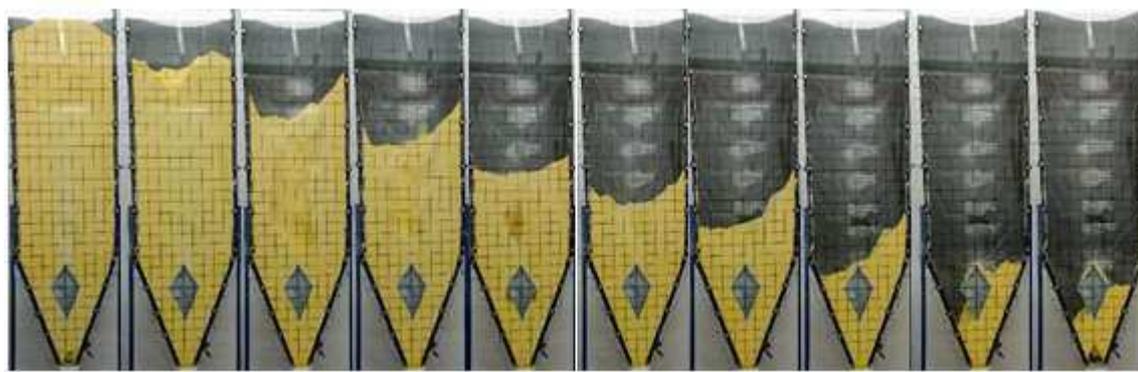
O fluxo segue com tentativas de formação de tubo, porém é perceptível a alteração de fluxo funil para mássico. O fluxo segue mássico com a inclinação do talude e desmoronamentos leves das camadas da direita para esquerda. É verificado também que semelhante ao insert 1 na altura 1, o fluxo segue-se pelo lado esquerdo do insert, fazendo com que o lado direito, a massa fique sem fluxo ou estagnada, classificando-se como fluxo misto.

Figura 36 - Características de fluxo instantâneo da farinha de milho para o insert 2 na altura 1.



Na Figura 39 é apresentado o fluxo da farinha de milho armazenada por 24 horas, utilizando o insert 2 na altura 1.. Após a abertura do orifício de descarga, é formado um arco coesivo, impedindo o fluxo do produto, e após rompimento, o fluxo segue mássico nos primeiros 20 cm de profundidade onde é notável a mudança da concavidade do talude para fluxo funil, que seguiu-se com tentativas de formações de canais, seguidos por desmoronamentos e efeito sucção até os 100cm de profundidade, onde ocorre a mudança para fluxo mássico. Classificando-se como fluxo funil.

Figura 37 - Características de fluxo da farinha de milho para o insert 2 na altura 1, armazenado por 24 horas.

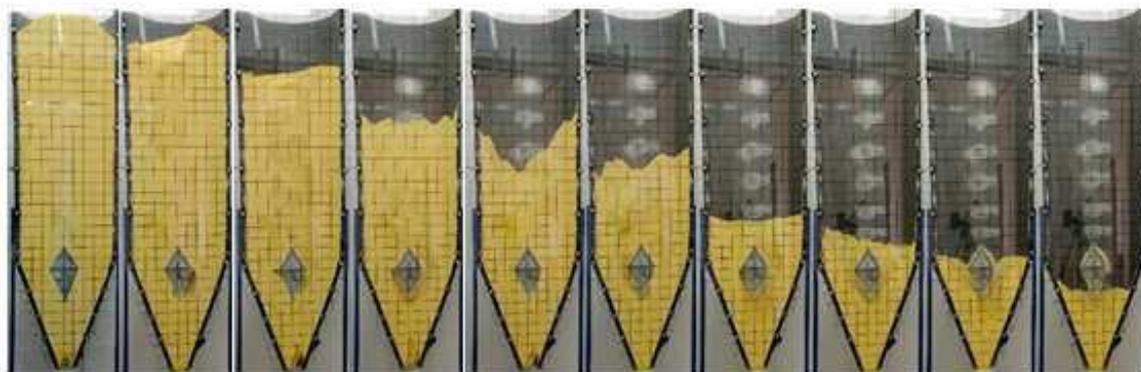


4.2.4.2. Altura 2

Para o insert 2 na segunda altura analisada, as características do fluxo da farinha de milho flocada estão detalhadas na Figura 40. Foi possível verificar visualmente que o fluxo iniciou com a formação de um canal de fluxo vertical central e com flutuações no sentido ascendente, com desmoronamento e efeito sucção. O fluxo seguiu-se com várias tentativas de formação do efeito tubo, desmoronamentos e foram verificadas em média 8 interrupções de fluxo por formação de arco coesivo, sendo necessário utilizar de força externa para romper.

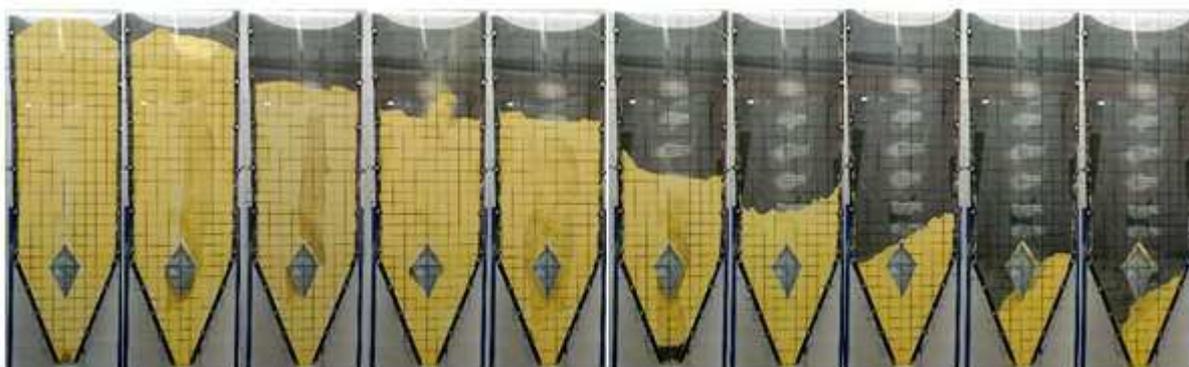
Matchett (2007) concluiu que, apesar de diversas teorias de formação de arcos coesivos, como as de Jenike (1964), Estand (1981) e Walker (1966) previrem a obstrução na forma de arcos circulares e, ainda terem boa aproximação quando comparadas a situações reais, isto não significa que a hipótese de arco circular é válida para qualquer situação de descarga, pelo fato de não haver, ainda, informações experimentais das tensões no produto localizado próximo ao orifício de descarga.

Figura 38 - Características de fluxo instantâneo da farinha de milho para o insert 2 na altura 2.



A Figura 41, representa o descarregamento da farinha de milho armazenada por 24 horas, na altura 2 utilizando o insert 2, após abertura do orifício de descarga é formado o arco coesivo. O fluxo inicia-se com formações de canais até a base, com desmoronamentos e efeito sucção do produto. Na quarta formação de tubo verificada, o fluxo é interrompido sendo necessário romper de forma manual, após rompimento seguiu-se com tentativas de formação de canal, porém o fluxo é alterado para fluxo de massa aos 10 cm próximo ao insert.

Figura 39 - Características de fluxo da farinha de milho para o insert 2 na altura 2, armazenado por 24 horas.



4.2.4.3. Altura 3

Para o insert 2 na terceira altura analisada, as características do fluxo da farinha de milho de flocada estão detalhadas na Figura 42, o fluxo iniciou-se com tentativas de formações de canais, seguidos por desmoronamentos. É possível verificar a formação de um canal de 110 cm, com largura máxima de 22 cm da base superior até o insert, após o insert e próximo ao orifício de descarga o canal ficou mais estreito, com 10 cm de largura.

Em seguida, o tubo é desfeito por desmoronamento natural com efeito sucção. O fluxo seguiu com flutuações, formação de canal central, desmoronamento com efeito sucção e uma interrupção de fluxo por formação de arco coesivo.

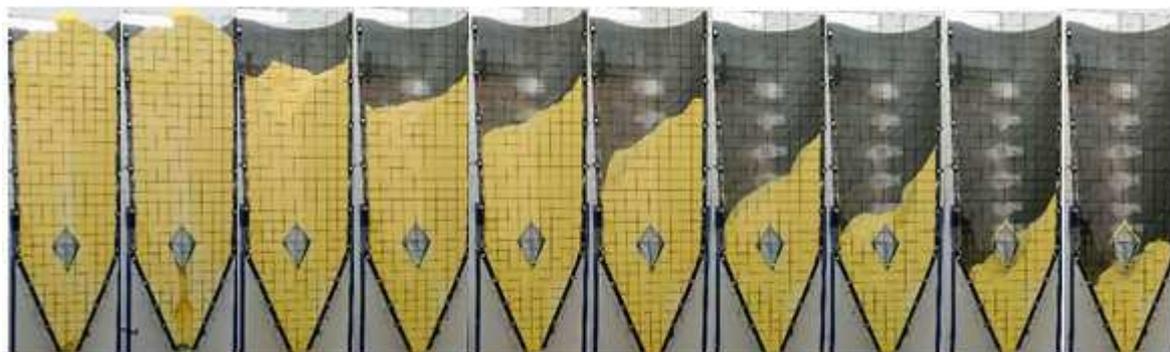
Figura 40 - Características de fluxo da farinha de milho para o insert 2 na altura 3, instantâneo.



A Figura 43 representa o descarregamento da farinha de milho flocada armazenada por 24 horas, na altura 2 utilizando o insert 3. Verifica-se que após abertura do orifício de descarga é formado o arco coesivo, logo em seguida ao rompimento, sendo formado ainda um canal estável de 40 cm de comprimento e largura decrescente iniciando de 7 cm, finalizando em 3 cm até que chegasse ao insert, sendo necessário utilizar de força externa para romper.

O fluxo seguiu-se, sendo perceptível que a concavidade superior ficou invertida, evidenciando o fluxo funil. O fluxo altera-se após os 45 cm de profundidade para fluxo em massa, porém fica alterando-se entre fluxo funil e mássico com formações de tubos excêntricos próximo à parede esquerda do silo e desmoronamentos leves devido ao talude formado ao lado direito do silo.

Figura 41 - Características de fluxo da farinha de milho para o insert 2 na altura 3, armazenado por 24 horas.

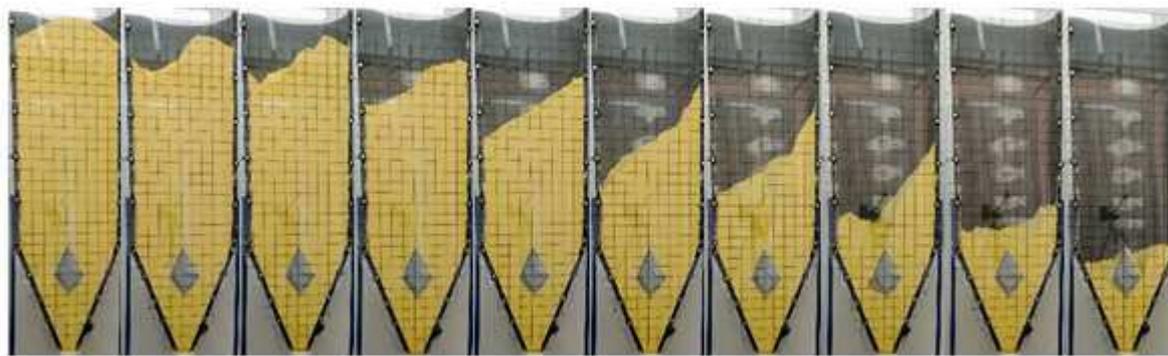


4.2.5. Insert 2 invertido

4.2.5.1. Altura 1

Para o insert 2 invertido, na altura 1 analisada, as características do fluxo da farinha de milho flocada estão detalhadas na Figura 44, é verificado que o fluxo, inicia-se como fluxo mássico nos primeiros 20 cm, onde há alteração da concavidade superior que inverte-se, torna-se a fluxo mássico com inclinação de talude à direita, alternando-se para tentativas de formações de canais e desmoronamentos. É verificado que o ângulo formado do talude é defeito ao se aproximar do insert, classificando como fluxo de funil.

Figura 42 - Características de fluxo instantâneo da farinha de milho para o insert 2 invertido na altura 1.



A figura 45, representa o descarregamento da farinha de milho armazenada por 24 horas, na altura 1 utilizando o insert 2 invertido, sendo verificado que após a abertura do orifício de descarga é formado um arco coesivo, que foi necessário romper de forma manual, porém é formado um canal até aproximadamente a metade do insert, de largura 12cm a 8cm.

O fluxo segue-se mássico até os 20 cm de profundidade, quando altera-se para fluxo funil, com várias formações de tubos, seguidos por desmoronamentos e alguns efeitos sucção quando o canal apresentava-se mais profundo.

Figura 43 - Características de fluxo da farinha de milho flocada para o insert 2 invertido na altura 1, armazenado por 24 horas.

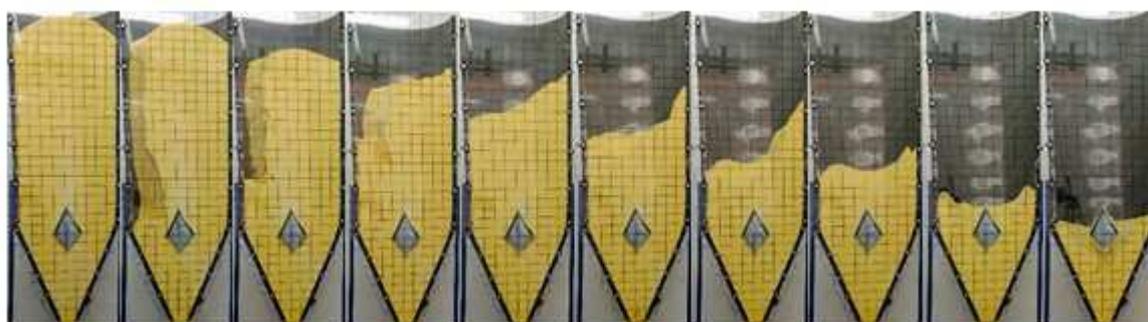


4.2.5.2. Altura 2

Para o insert 2 invertido, na altura 2 analisada, as características do fluxo da farinha de milho estão detalhadas na Figura 46, onde o fluxo foi classificado como fluxo misto, pois foram verificadas formações de canais de fluxo excêntrico, próximo à parede esquerda do silos; o primeiro medindo 90cm e o segundo 60 cm de comprimento, seguidos por grandes desmoronamentos e efeito sucção.

Porém, o fluxo altera-se para fluxo massa, com algumas flutuações próximo ao insert. Verificou-se que a massa movimentava-se mais pelo lado esquerdo do insert, enquanto parte da massa do lado direito permanecia estática, apenas por desmoronamentos, até o plano superior interceptar o insert.

Figura 44 - Características de fluxo da farinha de milho para o insert 2 invertido na altura 2, instantâneo.



A Figura 47, representa o descarregamento da farinha de milho flocada armazenada por 24 horas, na altura 2 utilizando o insert 2 invertido. Foi observado que ao abrir o orifício de descarga, o fluxo foi interrompido por uma formação de arco coesivo que utilizando de força externa foi rompido.

Após rompimento, o fluxo segue-se com uma formação de um tubo vertical 130 cm de comprimento e largura 10 cm, representando uma relação altura/largura igual a 13, no qual é desmoronado de forma natural, causando efeito sucção.

Logo a após, é verificado outra formação de canal até a base, onde o fluxo é interrompido. O fluxo seguiu-se com seguidas formações de tubos desordenados, desmoronamentos e efeito sucção, apresentou ainda duas interrupções. Caracterizando-se como fluxo funil.

Figura 45 - Características de fluxo da farinha de milho para o insert 2 invertido na altura 2, armazenado por 24 horas.



4.2.5.3. Altura 3

Para o insert 2 invertido na altura 3 analisada, as características do fluxo da farinha de milho estão detalhadas na Figura 48, o fluxo iniciou com formação de um tubo concêntrico de 125 cm de comprimento e 15 cm de largura. Outra formação de canal foi verificada, onde o fluxo foi interrompido por formação de arco coesivo, evidenciando, uma zona estagnada. Após rompimento o fluxo segue com flutuações e tentativas de formação de tubo, desmoronamentos ao longo de todo o fluxo. Classificando-se como fluxo funil.

Figura 46 - Características de fluxo da farinha de milho para o insert 2 invertido na altura 3, instantâneo.



A Figura 49 representa o descarregamento da farinha de milho armazenada por 24 horas, na altura 3 utilizando o insert 2 invertido. Visualmente observou-se que no momento de abertura do orifício de descarga é formado um arco coesivo, interrompendo o fluxo, sendo necessário utilizar-se de força externa para quebrar o arco. O fluxo seguiu-se com formações de tubo, seguidos por várias interrupções de fluxo, desmoronamentos e efeito sucção do ar.

A formação de abóbodas ou arcos, o efeito tubo pode ser perigoso caso o produto comece a se mover no sentido da saída; desta forma, as primeiras camadas movidas provocarão sucção do ar na parte superior do corpo do silo e uma expulsão abrupta do ar contido no tubo, pelo orifício de descarga podendo causar deformações e ruptura das paredes, na união tremonha-corpo do silo, no orifício de descarga e nos dispositivos de descarregamento (Lopes Neto, 2013).

Figura 47 - Características de fluxo da farinha de milho para o insert 2 invertido na altura 3, armazenado por 24 horas.



4.3. ANALISE DA VAZÃO MÁSSICA

Na Tabela 8 encontram-se os resultados médios obtidos para a vazão mássica experimental dos ensaios instantâneos realizados, apresentando a influência dos modelos dos inserts e as alturas nas quais estão dispostos, em cada ensaio.

Tabela 8 - Determinação da vazão mássica experimental instantânea

	Altura	Produto armazenado (Kg)	Tempo de descarregamento (s)	Vazão experimental (Kg.s ⁻¹)
Sem insert	0	64,390	120	0,537±0,019
	1	70,401	132	0,523±0,031
Insert 1	2	75,046	141	0,532±0,016
	3	74,396	148	0,511±0,076
Insert 1 I	1	70,531	141	0,499±0,015
	2	75,749	154	0,496±0,049
	3	76,721	217	0,362±0,068
Insert 2	1	75,606	145	0,522±0,028
	2	77,530	212	0,407±0,131
	3	76,260	178	0,446±0,108
Insert 2 I	1	72,563	142	0,512±0,025
	2	75,012	156	0,481±0,025
	3	79,117	173	0,462±0,042

Ao se analisar os dados obtidos a partir dos ensaios experimentais, nota-se que a maior vazão mássica da farinha de milho flocada dá-se na ausência de inserts. Em seu trabalho, Medeiros (2012) encontra valores de vazão para o milho triturado na razão de 0,33 kg.s⁻¹. O autor utiliza o mesmo silo do presente trabalho, porém, ausenta-o de inserções.

Ao comparar as duas situações, no presente trabalho, a vazão mássica está a aproximadamente 38,5% acima da vazão encontrada pelo autor. Tal acréscimo da vazão é explicado a partir da distinção entre granulometria dos produtos estudados.

Um fato que deve ser observado é que embora segundo Ding *et al.* (2015) a introdução de inserts no silo tenha como objetivo a melhoria do fluxo interno do produto, a presença deste pode representar um empecilho ao fluxo do produto pulverulentos.

Tal fato é expresso com os dados obtidos a partir dos ensaios com o insert 1 invertido, onde a vazão mássica é a menor de todas, chegando a ser aproximadamente 24% inferior à vazão mássica na ausência de insert.

Quando relacionada à altura imposta para cada insert, na grande maioria, a altura 1 foi a que melhor apresentou vazão mássica e em contrapartida, a altura 3 de ambos os inserts independente da posição invertida ou não, a média da vazão mássica é sempre a menor possível.

Dentro de um mesmo padrão de insert, a altura no qual ele foi fixado no interior do silo, influenciou na vazão. Diferindo do que foi encontrado por Bandeira (2017) em seu trabalho, que verifica a insignificância da variação da altura que o insert foi instalado na vazão da ração avícola.

Para o tempo de consolidação de 24 horas, na Tabela 9 encontram-se os resultados médios da vazão mássica experimental.

Tabela 9 - Determinação da vazão mássica experimental armazenada por 24 horas.

	Altura	Produto Armazenado (Kg)	Tempo de descarregamento (s)	Vazão Experimental (Kg.s ⁻¹)
Sem insert	0	67,355	122	0,551±0,01
Insert 1	1	67,408	116	0,582±0,01
	2	73,213	140	0,527±0,04
	3	74,879	160	0,474±0,07
Insert 1 I	1	73,170	143	0,513±0,01
	2	72,722	171	0,459±0,13
	3	74,386	144	0,518±0,04
Insert 2	1	75,643	132	0,572±0,01
	2	75,806	170	0,470±0,12
	3	75,984	166	0,472±0,10
Insert 2 I	1	74,996	134	0,558±0,01
	2	75,571	152	0,506±0,08
	3	76,710	191	0,415±0,07

Após o tempo de consolidação do material no interior do silo por 24 horas, a vazão mássica foi aproximadamente 2,5% superior à vazão mássica obtida com o descarregamento instantâneo.

Esta alteração poderá ser justificada pelo fato da granulometria da farinha de milho não ser homogênea e na transição entre os ensaios instantâneos e os ensaios de consolidação de 24 horas ter havido a troca do produto já utilizado por um produto novo.

Em relação ao tipo de insert, a vazão mássica obtida a partir da introdução do insert 1 apresentou maiores valores, sendo este fato explicado em todas as alturas impostas. Tal insert teve como principal objetivo a modificação do estado de tensão do produto, facilitando o fluxo, auxiliando assim na vazão.

Já no caso do insert 2 por apresentar maior robustez, foi entendido como um obstáculo para o produto fluir livremente, fazendo assim com que a vazão mássica seja a menor quando comparados os valores da vazão mássica com o insert 1.

Entre as alturas de impostas para fixação dos inserts após o tempo de consolidação de 24 horas, a altura 1 foi a que apresentou maior vazão ficando aproximadamente 5% acima da vazão mássica na situação sem insert e 10% acima do valor encontrado para a vazão mássica instantânea.

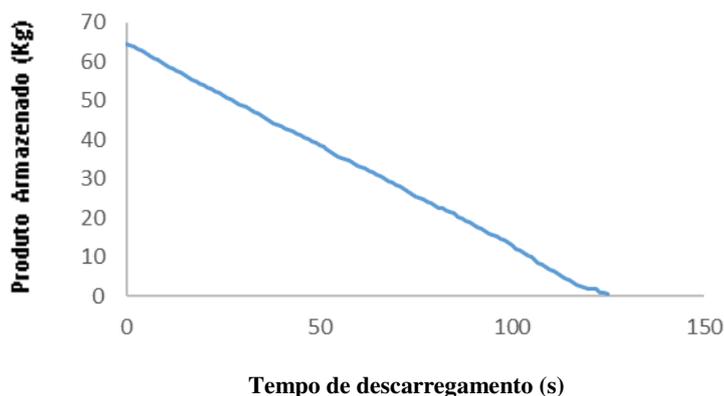
Não foi encontrada na literatura menção a correlação entre vazão mássica e o tempo de consolidação do produto, apenas para casos de vazão instantânea, sendo assim, incompatível a comparação com outros autores a respeito da presente situação.

4.3.1 – Análise por ensaio

4.3.1.1. Sem Insert

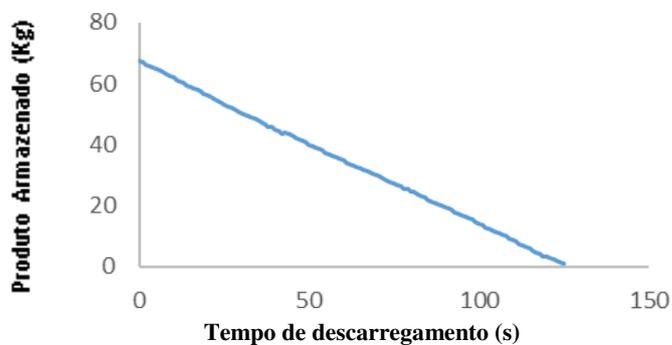
O Gráfico 1 seguinte mostra o descarregamento da farinha de milho flocada para a situação sem insert, apresentando uma vazão de $0,537 \text{ Kg.s}^{-1}$ e um tempo de descarregamento de 120 s. É importante ressaltar que para esta configuração não houve interrupção de fluxo durante todo descarregamento, sendo o fluxo classificado como fluxo misto.

Gráfico 1 - Curva de vazão de descarga instantânea para farinha de milho sem insert



O Gráfico 2 representa o descarregamento da farinha de milho flocada armazenada por 24 horas sem utilização do insert, apresentando uma vazão de $0,551 \text{ Kg.s}^{-1}$ e tempo de descarregamento de 122 s.

Gráfico 2 - Curva de vazão de descarga consolidada por 24 horas para farinha de milho sem insert

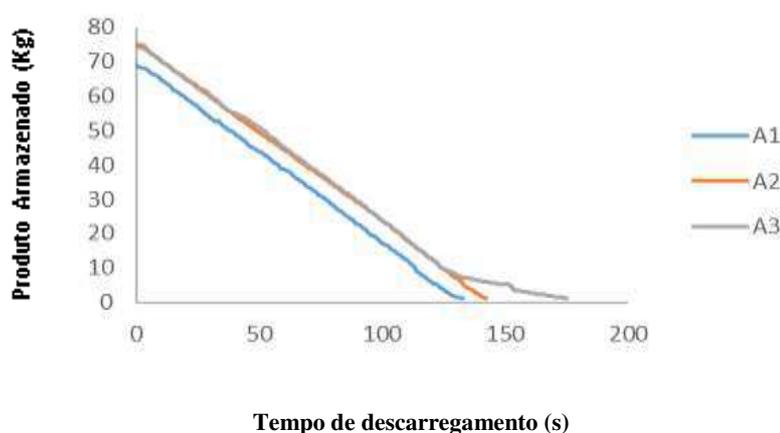


Como efeito comparativo, a vazão mássica após 24 horas de consolidação foi 2,6% superior ao encontrado no ensaio instantâneo. Devido à ocorrência de fluxo misto e de interrupções do fluxo ao longo do descarregamento após a consolidação de 24 horas, a vazão mássica sofreu tais alterações.

4.3.1.2. Insert 1

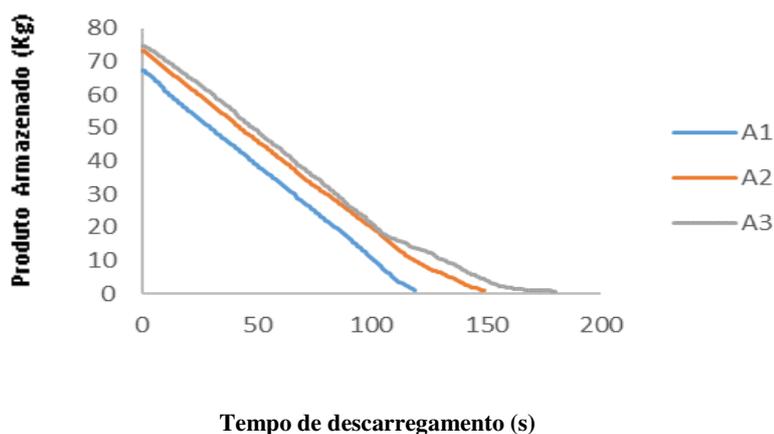
O Gráfico 3 representa a média do descarregamento instantâneo da farinha de milho flocada para o insert 1 nas três alturas distintas do insert, ficando evidente que altura 2 obteve uma vazão de $0,532\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$, sendo 1,7% maior que na altura 1 que obteve uma vazão de $0,523\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ e 3,9% que na altura 3. Devido a problemas de fluxo observados na altura 3, a vazão de descarregamento foi inferior dentre as alturas analisadas.

Gráfico 3 - Curva de vazão de descarga instantânea para farinha de milho com insert 1 em três diferentes alturas



Para o descarregamento após o tempo de consolidação de 24 horas da farinha de milho para insert 1, no Gráfico 4, nota-se que altura 1 também obteve melhor resultado dentre as alturas analisadas, obtendo uma vazão de $0,582\text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$, representando 9,46% e 18,56% superior as vazões encontradas na altura 2 e 3 respectivamente.

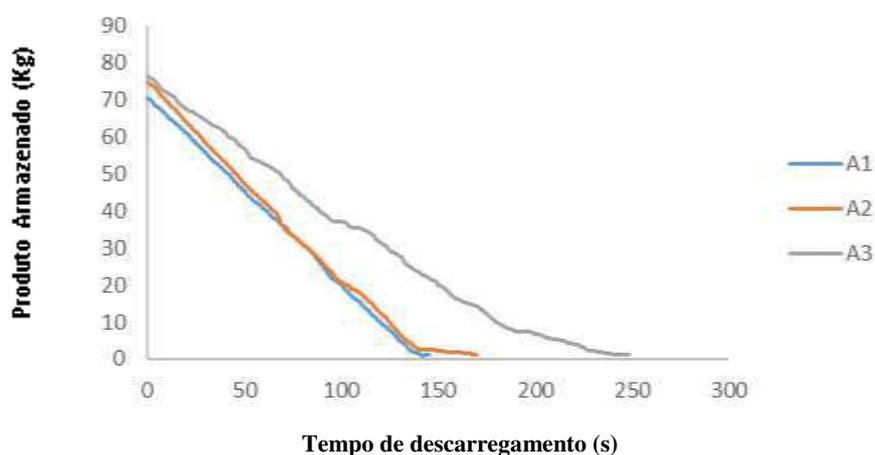
Gráfico 4 - Curva de vazão de descarga armazenada por 24 horas para farinha de milho com insert 1 em três diferentes alturas



4.3.1.3. Insert 1 invertido

O Gráfico 5 mostra a curva de descarregamento instantâneo da farinha de milho flocada para o insert 1 invertido nas três alturas, onde é possível observar que a altura 1 obteve o melhor desempenho dentre as alturas analisadas. Com vazão de $0,499 \text{ Kg.s}^{-1}$ e tempo de descarregamento de 141s, verifica-se que a altura 2 obteve 9,21% de tempo a mais para uma vazão de $0,496 \text{ kg.s}^{-1}$ semelhante ao encontrado na altura 1. A menor vazão foi encontrada para altura 3, devido aos problemas de fluxo verificados durante os ensaios tais como interrupções de fluxo, desmoronamentos e efeito tubo.

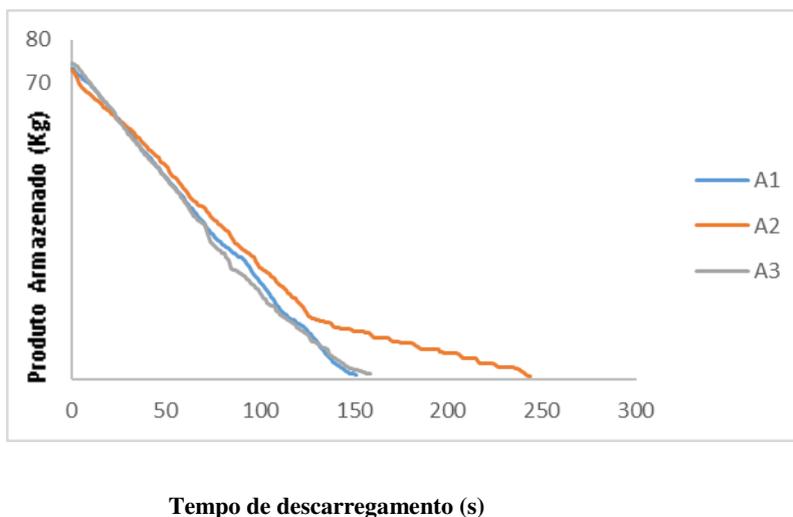
Gráfico 5 - Curva de vazão de descarga instantânea para farinha de milho com insert 1 invertido em três diferentes alturas



Para o produto armazenado por 24 horas com o insert 1 invertido, no Gráfico 6, é possível constatar que a altura 1 e altura 3 obtiveram resultados semelhantes com diferença de vazão de 0,97% e tempo de descarregamento de 0,69%. Verifica-se que a altura 2 obteve uma vazão inferior de 13% devido a sucessivas formações de tubo e interrupções de fluxo constatados nos ensaios, o tempo de descarregamento para altura 2 foi menor dentre as alturas estudadas.

O posicionamento do insert no interior da tremonha é fator de influência direto quando relacionado ao tempo de descarregamento, independente da configuração geométrica de tais inserções. Segundo Ding *et al.* (2015), o produto pode apresentar variação no tempo de descarga, onde o posicionamento pode alterar as 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.

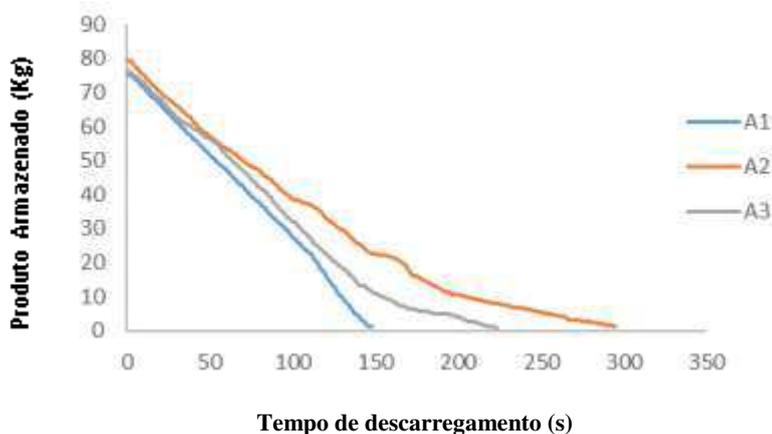
Gráfico 6 - Curva de vazão de descarga consolidada por 24 horas para farinha de milho com insert 1 invertido em três diferentes alturas



4.3.1.4. Insert 2

No Gráfico 7, verifica-se que para o descarregamento instantâneo da farinha de milho flocada utilizando o insert 2, evidenciou-se que assim como para o insert 1, a altura 1 também é a mais eficiente dentre as analisadas, com vazão de $0,522 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ e tempo de descarregamento de 145 segundos. Constata-se que a altura 3 e a altura 2 obtiveram uma vazão inferior à altura 1 de 14,5% e 22,3% respectivamente. Nota-se que o tempo de descarregamento das alturas 2 e 3, foram influenciadas pelo padrão de fluxo, caracterizados como fluxo de funil, enquanto o fluxo da altura 1 foi classificado como fluxo misto. A menor vazão foi encontrada para altura 2, devido ao seu elevado tempo de descarregamento, que foi provocado por vários problemas de fluxo constatados em ensaios.

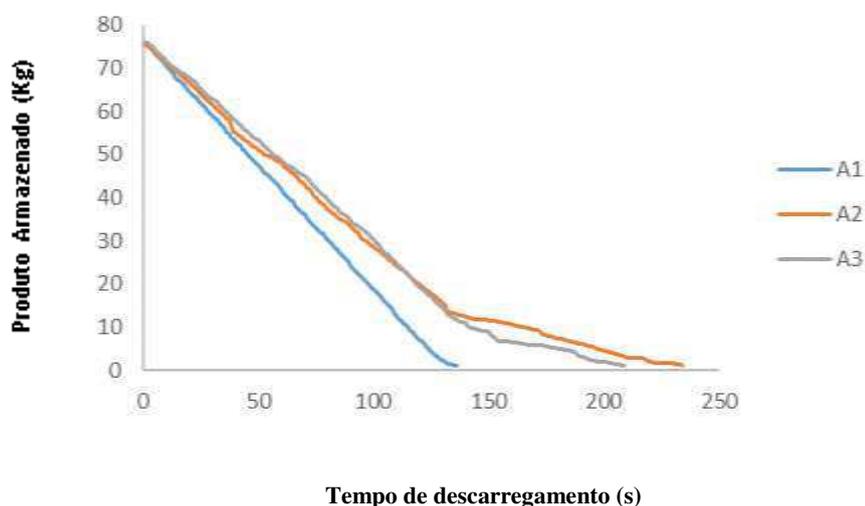
Gráfico 7 - Curva de vazão de descarga instantânea para farinha de milho com insert 2 em três diferentes alturas



É importante ressaltar também que o tempo de descarregamento da altura 2 utilizando o insert 2 foi observado como sendo o maior tempo encontrado dentre todos os inserts analisados, demonstrando assim, a ineficiência desta altura para o insert analisado.

No Gráfico 8, há a representação do descarregamento da farinha de milho flocada armazenada por 24 horas para o insert 2. É possível constatar que a maior vazão ocorreu na altura 1, com vazão de $0,572 \text{ Kg.s}^{-1}$ e tempo de descarregamento de 132s, verifica-se que a altura 2 e 3, obtiveram resultados semelhantes com vazões de $0,470$ e $0,472 \text{ Kg.s}^{-1}$ respectivamente, e obtiveram maior tempo de descarregamento devido aos problemas no padrão fluxo.

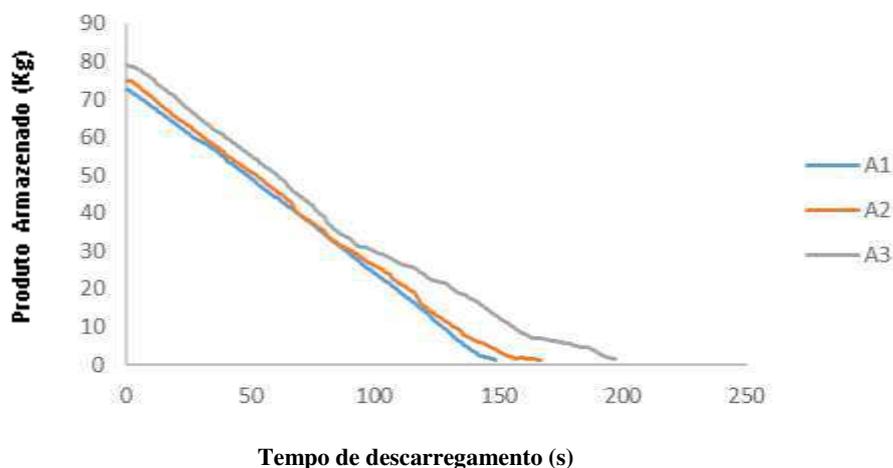
Gráfico 8 - Curva de vazão de descarga armazenada por 24 horas para farinha de milho com insert 2 em três diferentes alturas



4.3.1.5. Insert 2 invertido

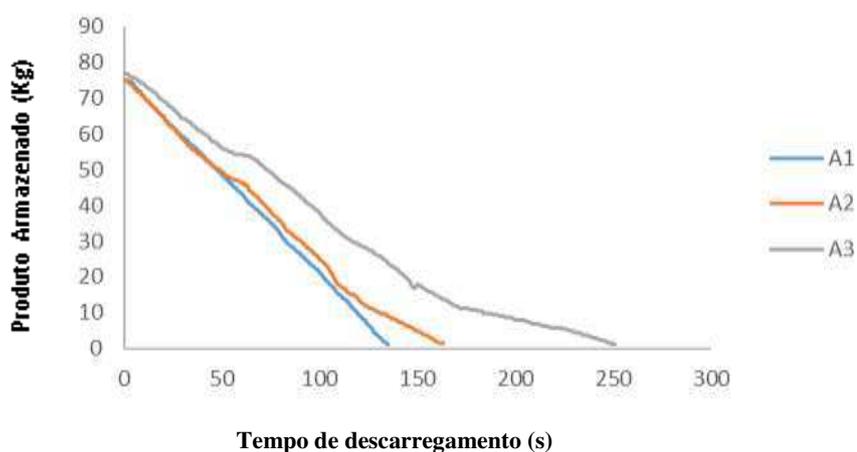
O Gráfico 9 mostra o descarregamento instantâneo para a farinha de milho flocada utilizando o insert 2 invertido, observa-se que altura 1 também se destaca para esta configuração, tendo uma vazão média de $0,512 \text{ Kg.s}^{-1}$ e tempo de 142 s. Verifica-se que a altura 2 obteve uma vazão inferior de 6% comparado à altura 1 e 4% superior à altura 3, constata-se também que o tempo de descarregamento da altura 2 foi de 21,8% superior ao tempo encontrado na altura 1 e 10,9% inferior ao tempo de descarregamento com o insert na altura 3. Evidenciou-se a altura 1 como mais eficiente para o insert 2 invertido.

Gráfico 9 - Curva de vazão de descarga instantânea para farinha de milho com insert 2 invertido em três diferentes alturas



No Gráfico 10 o armazenamento de 24 horas da farinha de milho flocada utilizando o insert 2 invertido na altura 1 também obteve melhor resultado para esta configuração, obtendo vazão de $0,588 \text{ Kg}\cdot\text{s}^{-1}$ com tempo de descarregamento de 134s. Ficou evidente que a altura 2 e altura 3 obtiveram vazões inferiores de 9,32 e 25,63% respectivamente quando comparadas a altura 1, e conseqüentemente o tempo de descarregamento foi superior devido a problemas de padrão de fluxo.

Gráfico 10 - Curva de vazão de descarga armazenada por 24 horas para farinha de milho com insert 2 invertido em três diferentes alturas



É importante ressaltar que o tempo de armazenamento de 24 horas influenciou positivamente na altura 1 e 2. Nota-se que o fluxo da altura 1 armazenada por 24 horas foi 5,9% mais rápida e vazão 8,2% superior aos valores encontrados na altura 1 instantânea. A

altura 2 armazenada por 24 horas obteve uma vazão de 5,1% superior a vazão instantânea e tempo de descarregamento de 2,6% mais rápido que o instantâneo.

Porém para a altura 3, o tempo de descarregamento foi 9,4% superior e vazão 11,32% inferior aos valores encontrados no ensaio instantâneo, constatando-se a ineficiência da altura 3 para o insert estudado.

Conforme o encontrado por López *et al.* (2014) e Bandeira (2017), a altura que apresentou melhor desempenho de vazão foi a altura 1 para ambos os inserts, ficando evidenciado que a configuração do insert não é tão influenciável quanto a altura na qual ele é colocado no interior do silo, para esse ensaio e tipo de produto.

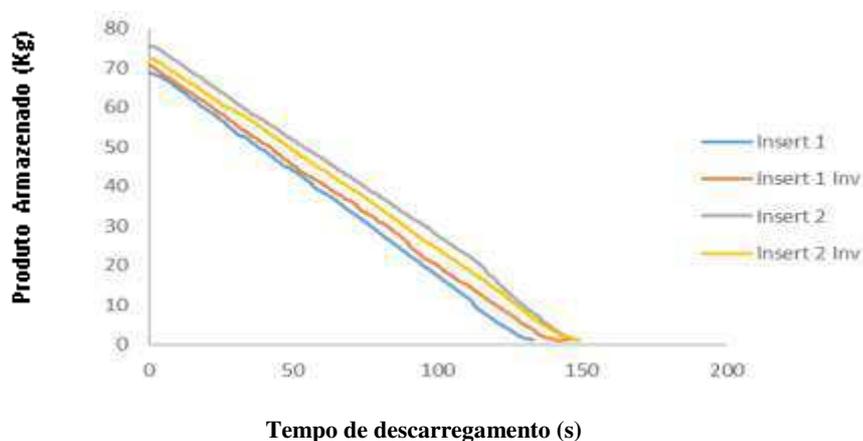
4.3.2. Análise das alturas

4.3.2.1 Altura 1

No Gráfico 11 é identificada a média dos descarregamentos da farinha de milho flocada para 4 configurações de inserts estudados e posicionados na altura 1, é possível constatar que a maior vazão ocorreu para o insert 1, que obteve uma vazão média de 0,523 Kg.s⁻¹, sendo 4,8% inferior ao encontrado para o insert 2, que obteve menor vazão dentre os inserts analisados para esta altura.

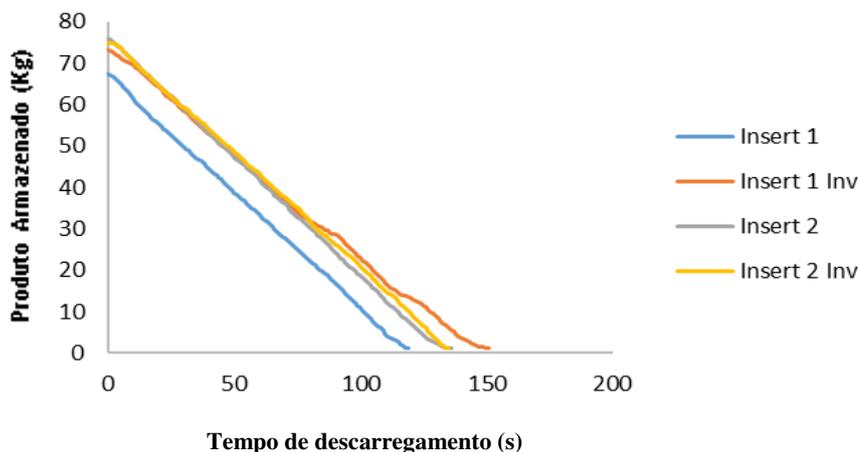
Para o insert 2, tem-se uma vazão de 0,522 Kg.s⁻¹ e tempo de descarregamento de 145s, sendo 1,9% mais rápida que o insert 2 invertido, que obteve uma vazão de 0,512 Kg.s⁻¹, e diferença de 0,2% do insert 1.

Gráfico 11 - Curva de vazão de descarga instantânea da farinha de milho para a altura 1 com 4 configurações de inserts



A partir do Gráfico 12, analisando o descarregamento da farinha de milho flocada armazenada por 24 horas na altura 1, fica evidente que o insert 1 obteve o melhor resultado dentre os inserts analisados, com vazão média de $0,582 \text{ Kg.s}^{-1}$, sendo 11,86% superior ao insert 1 invertido.

Gráfico 12 - Curva de vazão de descarga armazenada por 24 horas da farinha de milho para a altura 1 com 4 configurações de inserts



Verifica-se que o insert 2 obteve uma vazão de $0,572 \text{ Kg.s}^{-1}$, sendo 2,4% superior a vazão do insert 2 invertido, e 1,7% inferior à vazão do insert 1.

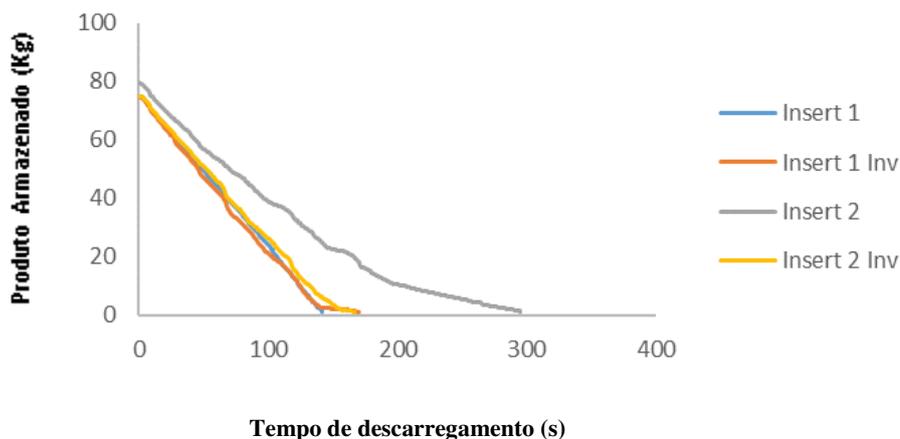
Evidenciando desta forma, que devido aos problemas no padrão de fluxo constatados nos ensaios do insert 1 invertido, na altura 1, esta configuração torna-se ineficiente.

4.3.2.2. Altura 2

Para o descarregamento instantâneo da farinha de milho na altura 2, nota-se que o insert 1 obteve o melhor desempenho para esta configuração, com vazão média de $0,532 \text{ Kg.s}^{-1}$, sendo 6,8% superior ao insert 1 invertido. Comparando-se insert 1 ao insert 2 invertido, verifica-se que a vazão foi de 9,6% inferior.

Nota-se que devido a várias interrupções de fluxo verificadas nos ensaios da configuração do insert 2, o tempo de descarregamento foi mais prolongado, evidenciando a ineficiência do insert 2 para esta configuração.

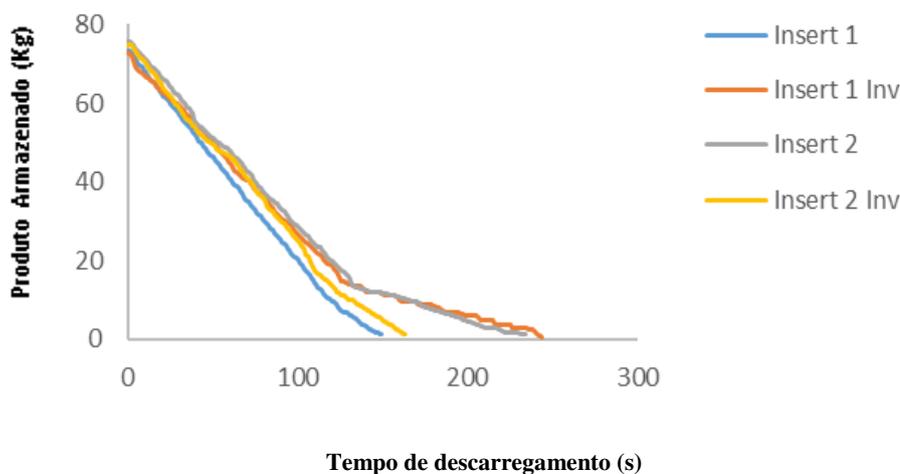
Gráfico 13 - Curva de vazão de descarga instantânea da farinha de milho para a altura 2 com 4 configurações de inserts



Para análise da farinha de milho armazenada por 24 horas, temos que o insert 1 também obteve melhor resultado para esta configuração, obtendo um tempo médio de descarregamento de 140 s e vazão de $0,527 \text{ Kg.s}^{-1}$. Comparando-se ao insert 2 invertido, segundo melhor resultado para esta altura, foi verificado uma vazão de 4% inferior, ao insert 1.

Verifica-se que o insert 1 invertido obteve uma vazão média de $0,459 \text{ Kg.s}^{-1}$, menor vazão encontrada para esta configuração, sendo 14,8% inferior ao insert 1, que obteve melhor eficiência para esta altura.

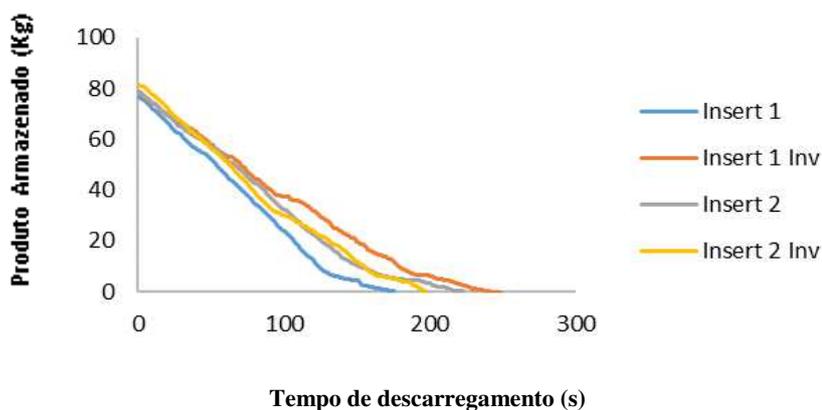
Gráfico 14 - Curva de vazão de descarga armazenada por 24 horas da farinha de milho para a altura 1 com 4 configurações de inserts



4.3.2.3. Altura 3

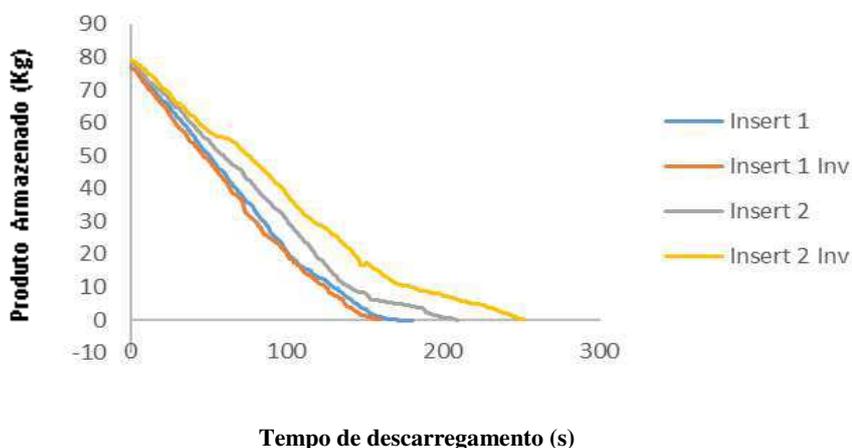
No Gráfico 15 a seguir é apresentada a média dos descarregamentos instantâneos da farinha de milho na altura 3, evidencia-se também que o insert 1 obteve o melhor resultado com vazão média de $0,511 \text{ Kg.s}^{-1}$, sendo esta 29,2% superior ao insert 1. Nota-se que, comparando-se o insert 2 e insert 2 invertido, verifica-se uma diferença 3,5% na vazão média.

Gráfico 15 - Curva de vazão de descarga instantânea da farinha de milho para a altura 3 com 4 configurações de inserts



Para o descarregamento da farinha de milho armazenada por 24 horas na altura 3, tem-se que o insert 1 invertido teve o melhor desempenho para esta altura, obtendo uma vazão média de $0,518 \text{ Kg.s}^{-1}$, sendo 8,5% superior a vazão com o insert 1. Analisando o insert 2, verifica-se que obteve uma vazão média de $0,472 \text{ Kg.s}^{-1}$, sendo 12% superior ao insert 2 invertido que, por sua vez representa o menor desempenho para esta configuração estudada.

Gráfico 16 - Curva de vazão de descarga armazenada por 24 horas da farinha de milho para a altura 3 com 4 configurações de inserts



5. CONCLUSÕES

Após os ensaios realizados com a farinha de milho podemos concluir que:

- O padrão de fluxo predominando para o produto em estudo foi o fluxo funil, podendo ser misto em alguns momentos;
- A vazão mássica que apresentou maiores valores foi quando na ausência de insert no descarregamento instantâneo e com o insert 1 na altura 1.
- Com relação à altura onde o insert esteve fixado, a localização a 0,35m de distância do orifício de descarga, ou seja, altura 1, foi a que apresentou melhor valores quando relacionada a vazão mássica de descarregamento da farinha de milho flocada;
- A inversão dos inserts não alterou com significância o padrão de fluxo mas influenciou significativamente a vazão mássica;
- Em todos os ensaios com a presença dos inserts, houve a formação de tubo no fluxo funil e a formação de arco coesivo.
- Não é recomenda a utilização de inserts em silos para armazenamento de farinha de milho

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agência Nacional de Vigilância Sanitária; Gerência-Geral Alimentos. Ministério da Saúde. Resolução – CNNPA nº. 12 de 1978. D. O. de 24/07/1978.
- Arnold, Peter. Determining the geometry of mass-flow bins some important considerations. In: 11th International Congress on Bulk Materials Storage, Handling and Transportation, 2013, The University of Newcastle.
- Bandeira, D.J.A. Efeito de inserts no fluxo e vazão mássica de ração avícola em silos verticais. Campina Grande – PB: Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, 2017. Dissertação de Mestrado em Engenharia Agrícola.
- Batista, C. S. Estudo teórico e experimental do fluxo de sólidos particulados em silos verticais. Campina Grande – PB: Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, 2009. p.81. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos).
- Calil Junior, C. Recomendações de fluxo e de cargas para o projeto de silos verticais. São Carlos: USP, 1990, p.197.
- Calil Junior, C; Cheung, A. B. Silos: pressões, fluxo, recomendações para projetos e exemplos de cálculo. Editora Escola de Engenharia de São Carlos – USP. São Carlos, SP, 2007, p.232.
- Campos, Milene Minniti de. Análise da escoabilidade de pós. São Carlos-SP: Universidade Federal de São Carlos- UFSCar, 2012. p.126. Dissertação (Mestrado).
- Carson, J. W. Limits of silo design codes. Practice Periodical on Structural Design and Construction, v. 20, n. 2, p. 04014030, 2014.
- Coelho, Licia Carvalho. Software para cálculo de fluxo e pressões em silos cilíndricos metálicos para armazenamento de produtos agrícolas e industriais. São Carlos-SP: Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2016. Dissertação (Mestrado).
- Costa, C. André da. Propriedades físicas, mecânicas e de fluxo de produtos agroindustriais. Campina Grande-PB: Universidade Federal de Campina Grande-UFCG, 2013. p.120. Dissertação (Mestrado).
- Costa, C. A. da, Lopes Neto, J. P., Nascimento, J. W. B. do Diniz, M. J. , Silva, V.R. da. Propriedades mecânicas e de fluxo de produtos agroindustriais. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. v.18, n.7, p.774–780, 2014.
- Crowley, S.V. Gazi, I Kelly, A.L. Huppertz, T. O'Mahony. J.A. Influence of protein concentration on the physical characteristics and flow properties of milk protein concentrate powders. Journal of. Food Engineering, v.135, p. 31–38, 2014.
- Enstad, G. G. A novel theory on the arching and doming in mass flow hoppers. Bergen: The Michelsen Institute, p.172, 1981.
- Enstad, G.G. Use of inverted cones and double cones as inserts for obtaining mass flow, POSTEC-Newsletter. n.17 ,p.15–16, 1998.
- Garbaza, I. E. Programa computacional para cálculo de pressões em silos verticais de acordo com a norma australiana. Lavras – MG: Universidade Federal de Lavras – UFLA, 2011, p.77. Dissertação (Mestrado).
- Jenike, A.W. Storage and flow of solids. Bulletin, 123. Utah: University of Utah, 1964. 197p.
- J. Hartl, J.Y. Ooi, J.M. Rotter, M. Wojcik, S. Ding, G.G. Enstad, The influence of a cone-in-cone insert on flow pattern and wall pressure in a full-scale silo Chemical Engineering and Processing v.86, p. 370–378, 2008.

- Johanson, J.R., The placement of inserts to correct flow in bins. *Powder Technol*, v.1 n.6, p.328-333 1968.
- Johanson, JR W.K. Kleysteuber, Flow corrective inserts in bins, *Chemical Engineering Progress* 62 v.11, p.79-83,1996.
- 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, p.495–505, 2016.
- Lobato, J. C. M. Caracterização das propriedades de fluxo da lama vermelha para fins de dimensionamento de silos aplicação para tremonhas cônicas. Belém – PA: Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, 2013, p.1971. Dissertação (Mestrado).
- Lobato, J. C. M. et al. Conical hopper design for mass flow–case of red mud. *Holos*, v. 2, p. 120-131, 2016.
- Lopes Neto, J. P.; Nascimento, J. W. B. Características de fluxo e projeto de tremonhas cônicas em silos verticais. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.17, n.3, p.339-345, 2013.
- Lopes Neto, J. P.; Silva, V. R. Da; Nascimento, J. W. B. DO. Propriedades de fluxo de produtos pulverulentos alimentícios. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.13, n.5, p.639-644, 2009a.
- Marinelli, J.; Carson, J.W. Solve solids flow problems in bins, hoppers and feeders. *Chemical Engineering Progress*, June, 2001.
- Matchett, A. J. The shape of the cohesive arch in hoppers and silos - Some theoretical considerations. *Powder Technology*, v.171, p.133-145, 2007.
- Matos Júnior, J. J. L. de, Meira, A.S., Neto, S. G., Mota, E. de L., Lopes Neto, J.P. Determinação da função fluxo e do fator fluxo no dimensionamento de silo armazenador de sementes de linhaça. In: 9º Congresso de Educação Agrícola Superior, 2014, Areia-PB
- Medeiros, I. Freire de. Características de fluxo e vazão de descarga em silos verticais. Campina Grande-PB: Universidade Federal de Campina Grande-UFCG, 2012, 95 f. Dissertação (Mestrado).
- Mellmann, J.; Hoffmann, T.; Fürll, Christian. 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.
- Naka, S. Determinação das propriedades físicas dos grãos de mamona ‘guarani’ visando armazenagem em silos verticais. Campinas-SP. Universidade Estadual de Campinas – SP, 2010, Dissertação (Mestrado).
- Opalinski., M. Chutkowski, M. Stasiak. Characterizing moist food-powder flowability using a Jenike shear-tester. *Journal of Food Engineering*. v.108, p.51-58, 2012.
- Ravenet, J. Silos. Flujo de vaciado de solidos. Formacion de bovedas. Efectos. Barcelona: Editores Técnicos Asociados, 335 p., 1983
- Reis, S. G. dos. Determinação das ações atuantes nos silos através de redes neurais artificiais Lavras-MG: Universidade Federal de Lavras - UFLA, 2011, 76. Dissertação (Mestrado).
- Reis, F. A.; Silva, A. C.; Silva, E. M. S.; Bicalho, A. C.; Escoamento de grãos em silos. *Engenharias, Saúde e Gestão*. v.3, p153-169, 2015.
- Sadowski, A. J.; Rotter, J. M. Steel silos with different aspect ratios: II - behaviour under eccentric discharge. *Journal of Constructional Steel Research*, v.67, p.1545-1553, 2011.
- Schulze, D. Powders and bulk solids – behavior, characterization, storage and flow. New York Springer Verlag , p.35-59, 2007.
- S. Ding, H.Li, J.Y.Ooi, J.M. Rotter. Prediction of flow patterns during silo discharges using a finite element approach and its preliminary experimental verification. Elsevier B.V. on behalf of Chinese Society of Particology and Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences. p.42-29, 2015

- Teixeira, L. G. R. Determinação das propriedades físicas e de fluxo do café para projeto estrutural de silos e equipamentos. Lavras – MG: Universidade Federal de Lavras – UFLA, 2006, p.104. Dissertação (Mestrado).
- Vieira, L. H. D. S. Estudo teórico e experimental das pressões em tremonhas cônicas e piramidais de silos metálicos esbeltos. Lavras-MG: Universidade Federal de Lavras – UFLA, 2009. p.110. Dissertação (Mestrado)
- Volpato, S; A, Riccardo; S., Andrea C. Numerical study on the behavior of funnel flow silos with and without inserts through a continuum hydrodynamic approach. *Chemical Engineering Research and Design*, v. 92, n. 2, p. 256-263, 2014.
- Walker, D. M. An approximate theory for pressures and arching in hoppers. *Chemical Engineering Science*, v.21, p.975-997, 1966.
- Wójcik, M., Tejchman, J., Enstad, G.G.. Confined granular flow in silos with inserts—full-scale experiments. *Powder Technol.* v. 222, p.15–36, 2012.
- Yang, S.C., Hsiau, S.-S., The simulation and experimental study of granular materials discharged from a silo with the placement of inserts. *Powder Technol.* v.120, p.244–255, 2001.