

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**

**Giovani de Barros Ferro
Igor Codognotto Biagiotti**

**ANÁLISE DE VIABILIDADE, EM ESCALA, DE UM
SISTEMA DE LIMPEZA ACÚSTICA NA FLUIDIZAÇÃO
DE SILOS**

São Carlos

2022

**Giovani de Barros Ferro
Igor Codognotto Biagiotti**

**ANÁLISE DE VIABILIDADE, EM ESCALA, DE UM
SISTEMA DE LIMPEZA ACÚSTICA NA FLUIDIZAÇÃO
DE SILOS**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Leopoldo Pisanelli
Rodrigues de Oliveira

**São Carlos
2022**

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTES
TRABALHOS, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO,
PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

F395a Ferro, Giovani de Barros
 Análise de viabilidade, em escala, de um sistema de limpeza
 acústica na fluidização de silos. / Giovani de Barros Ferro,
 Igor Codognotto Biagiotti; orientador Leopoldo Pisanelli
 Rodrigues de Oliveira -- São Carlos, 2022.

 Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) -- Escola de
 Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2022.

 1. Limpeza acústica. 2. Elementos finitos. 3. Elementos
 discretos. 4. Experimento prático. 5. Fluidização. 6.
 Escoamento. I. Ferro, Giovani de Barros. II. Biagiotti, Igor
 Codognotto. III. Título.

FOLHA DE AVALIAÇÃO

Candidato: Giovani de Barros Ferro
Igor Codognotto Biagiotti

Título:

Análise de viabilidade, em escala, de um sistema de limpeza acústica na fluidização de silos.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Escola de Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo
Curso de Engenharia Mecânica.

BANCA EXAMINADORA

Professor Doutor Leopoldo Pisanelli Rodrigues de Oliveira
(Orientador)

Nota atribuída: 10,0 (dez e zero)

(assinatura)

Professor Doutor Jaime Gilberto Duduch

Nota atribuída: 10,0 (dez e zero)

(assinatura)

Doutoranda Camila Sanches Schimidt

Nota atribuída: 10,0 (dez e zero)

(assinatura)

Média: 10,0 (dez e zero)

Resultado: APROVADOS

Data: 15 / 12 / 2022.

Este trabalho tem condições de ser hospedado no Portal Digital da Biblioteca da EESC

SIM ☒ NÃO ☐ Visto do orientador

*Aos nossos pais, familiares e amigos que nos apoiaram em cada fase
das nossas vidas e não mediram esforços para que tivéssemos essa
oportunidade e experiência.*

AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente aos nossos professores que sempre buscaram nos instruir da melhor maneira possível, a fim de nos tornar profissionais que pudessem fazer a diferença. De maneira especial ao professor Dr. Leopoldo Pisanelli Rodrigues de Oliveira pela orientação e amizade, que destinou seu tempo livre a nos auxiliar nesse trabalho.

Agradecemos também aos nossos pais e familiares que confiaram em nossas carreiras e incentivaram a busca de conhecimento, independentemente dos esforços envolvidos.

Aos nossos amigos dentro e fora do curso, com os quais compartilhamos momentos e experiências de vida.

Ademais, nosso reconhecimento e agradecimento à Nestlé Purina que disponibilizou dados e informações sensíveis, mas necessários, referentes aos problemas abordados neste trabalho.

*“Existem muitas hipóteses em ciência que estão erradas.
Isso é perfeitamente aceitável, eles são a abertura para
achar as que estão certas”*
Carl Sagan

RESUMO

FERRO, Giovani de Barros; BIAGIOTTI, Igor Codognotto **ANÁLISE DE VIABILIDADE, EM ESCALA, DE UM SISTEMA DE LIMPEZA ACÚSTICA NA FLUIDIZAÇÃO DE SILOS**. 2022. 59p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2022.

O armazenamento de matérias-primas e produtos em silos é um dos processos mais importantes no processo produtivo de inúmeras indústrias, sendo importante garantir o correto funcionamento destes processos. Desta maneira, o objetivo deste estudo foi avaliar as possibilidades para melhorar o escoamento em um silo de concreto, utilizando-se um sistema conhecido como limpeza acústica, encontrando por experimentos e simulações as melhores frequências sonoras para fluidização e retomada de escoamento do material, presente no interior do silo. Para isso, buscou-se elaborar uma simulação em um *software* de elementos finitos com integração em um *software* de simulação de elementos discretos, e um experimento prático, em escala, para evidenciar como seria o funcionamento deste sistema de limpeza acústica para escoamento do silo. Como resultado, verificou-se que este tipo de sistema pode ser eficaz no objetivo de se melhorar o escoamento nos silos, tanto na fluidização quanto na retomada de escoamento do recipiente. Entretanto, percebeu-se que as melhores faixas de frequência, para sua utilização, dependem da geometria do silo e das características do material armazenado, devendo ser realizado um estudo caso a caso.

Palavras-chave: Limpeza acústica. Elementos finitos. Elementos discretos. Experimento prático. Fluidização. Escoamento.

ABSTRACT

FERRO, Giovani de Barros; BIAGIOTTI, Igor Codognotto **SCALED FEASIBILITY ANALYSIS OF AN ACOUSTIC CLEANING SYSTEM IN SILO FLUIDIZATION**. 2022. 59p. Monograph (Conclusion Course Paper) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2022.

The storage of raw materials and products in silos is one of the most important processes in the production process of numerous industries, it is important to ensure the correct functioning of these processes. The objective of this study was to evaluate the possibilities to improve the flow in a concrete silo, using a system known as acoustic cleaning, finding through experiments and simulations the best sound frequencies for fluidization and resumption of flow of the material, present inside the silo. For this, we sought to develop a simulation in a finite element software with integration in a discrete element simulation software, and a practical experiment in scale to show how this acoustic cleaning system would work for the silo flow. As a result, it was found that this type of system can be effective in improving the flow in silos, both in fluidization and in the resumption of flow from the container. However, it was noticed that the best frequency ranges for its use depend on the silo geometry and the characteristics of the stored material.

Keywords: Acoustic cleaning. Finite elements. Discrete elements. Practical experiment. Fluidization. Flow.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Problema de <i>Ratholing</i>	26
Figura 2 – Problema de <i>Ratholing</i>	27
Figura 3 – Problema de ponte	28
Figura 4 – Ortogonalidade de uma célula	30
Figura 5 – Validade de uma face da célula	31
Figura 6 – Qualidade de célula	31
Figura 7 – Mudança volumétrica de célula	32
Figura 8 – Malha com <i>base size</i> de 15mm	36
Figura 9 – Malha com <i>base size</i> de 10mm	37
Figura 10 – Malha com <i>base size</i> de 5mm	37
Figura 11 – Malha com <i>base size</i> de 10mm	37
Figura 12 – Malha com <i>base size</i> de 5mm	38
Figura 13 – Análise de convergência para <i>base size</i> de 15mm	38
Figura 14 – Análise de convergência para <i>base size</i> de 10mm	39
Figura 15 – Análise de convergência para <i>base size</i> de 5mm	39
Figura 16 – Escoamento para <i>base size</i> de 15mm	40
Figura 17 – Escoamento para <i>base size</i> de 15mm	40
Figura 18 – Escoamento para <i>base size</i> de 15mm	41
Figura 19 – Escoamento para <i>base size</i> de 10mm	41
Figura 20 – Escoamento para <i>base size</i> de 5mm	42
Figura 21 – Entradas de velocidade no silo	43
Figura 22 – Condições de contorno - Modelo de turbulência	43
Figura 23 – Condições de contorno - Modelo de turbulência	44
Figura 24 – Condições de contorno - Inicialização	44
Figura 25 – Condições de contorno - Resultados	45
Figura 26 – Propriedades do material	46
Figura 27 – Geometria e tamanho das partículas	46
Figura 28 – Injeção de material	47
Figura 29 – Modelagem no Rocky®	47
Figura 30 – Silo na simulação	48
Figura 31 – Silo em gesso e pet	49
Figura 32 – Produto simulado no experimento	50
Figura 33 – Duto de transição	51
Figura 34 – Conjunto de excitação acústica	51
Figura 35 – Excitação lateral	52
Figura 36 – Excitação vertical	53

Figura 37 – *Ratholing* 54

Figura 38 – Descarregamento do silo na simulação 55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Simulações e tempos de escoamento	55
Tabela 2 – Ensaios e tempos de escoamento	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CFD	Computational Fluid Dynamics
DEM	Discrete Element Method
USP	Universidade de São Paulo

LISTA DE SÍMBOLOS

μ	Velocidade do escoamento
ρ	Densidade
ϵ	Energia cinética turbulenta
τ	Tensão de cisalhamento

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	25
1.1	Objetivos	25
1.2	Motivação	25
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
2.1	<i>Ratholing</i> e pontes no escoamento de silos	27
2.2	Escoamento de fluidos e sua relação com a acústica	28
2.3	Dinâmica dos fluidos computacionais	29
2.3.1	Introdução	29
2.3.2	Equações de conservação	29
2.3.3	Modelo de turbulência K- ϵ	29
2.3.4	Modelagem de malhas	30
2.4	Modelagem de partícula em software de elementos discretos	32
2.4.1	Introdução	32
2.4.2	Distribuição granular	32
2.4.3	Forças de contato	33
2.4.3.1	Interação entre partículas	33
2.4.3.2	Adesão	33
2.4.3.3	Resistência ao rolamento	34
3	SIMULAÇÃO DO ESCOAMENTO NO SILO	35
3.1	Materiais e métodos	35
3.1.1	Ansys Fluent®	36
3.1.1.1	Confecção de malha	36
3.1.1.2	Condições de contorno	42
3.1.2	Rocky DEM®	45
3.1.2.1	Modelagem da partícula	45
3.1.2.2	Condições de contorno	47
3.1.2.3	Obtenção e geração de dados para análise	48
4	EXPERIMENTO DE VALIDAÇÃO PRÁTICO	49
4.1	Materiais e métodos	49
4.1.1	Silo de armazenagem	49
4.1.2	Produto armazenado	50
4.1.3	Duto de transição	50
4.1.4	Sistema acústico	51

4.2	Montagem do experimento	52
4.3	Obtenção de dados experimentais	53
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	55
5.1	Simulação do escoamento no silo	55
5.2	Experimento de validação prático	55
6	CONCLUSÃO	57
	REFERÊNCIAS	59

1 INTRODUÇÃO

O armazenamento de produtos em silos é uma parte importante na dinâmica de funcionamento de uma planta de produção de *Pet Food*. Neles são armazenados diversas matérias-primas e também produto terminado.

Contudo, os silos podem, muitas vezes, apresentar problemas de escoamento durante o seu descarregamento. Para sanar estes problemas, desenvolveu-se diversas técnicas mecânicas para gerar fluxo no material dentro do silo.

Para silos de formato regular e feitos em material metálico, pode-se instalar um sistema de fundo vibratório, sistema de martelos pneumáticos, sistemas de inserção de ar comprimido dentro do silo, arrastadores mecânicos, entre outros sistemas bastantes eficazes na tarefa de escoar o produto aprisionado dentro destes.

Por outro lado, silos em concreto apresentam menos soluções quando comparados aos silos em material metálico, não podendo-se instalar sistemas vibratórios em seu corpo devidos aos riscos à estrutura do próprio recipiente. Assim, sistemas de escoamento de silos de concreto limitam-se à tratar a superfície de contato entre material e silo e/ou instalar sistemas de arrastadores em seu interior.

Uma geometria muito complicada em um silo de concreto impede a instalação de qualquer tipo de sistema arrastador em seu interior, seja um sistema de vibração de paredes interno ou rosca girante em seu interior. Portanto, para possibilitar o correto escoamento em silos de concreto com geometrias complexas, é necessário o estudo de alguma alternativa que não gere danos estruturais e seja possível a instalação em silos com tais características.

1.1 Objetivos

Este trabalho visou estudar a viabilidade de impulsionar e auxiliar o escoamento de um silo de concreto com geometria complexa e não usual por meio de um sistema de limpeza acústica por meio do uso de cornetas anexadas nas entradas e saídas de material. Para isso, é importante realizar um estudo sobre diferentes frequências sonoras de funcionamento para fluidização e/ou retomada do escoamento do material que pode ser armazenado no silo. Relacionando assim, os resultados experimentais e computacionais aos produtos estudados para poder avaliar se pode-se obter resultados positivos com a inserção deste sistema.

1.2 Motivação

Durante atuação em operação de produção de *Pet Food*, observou-se que a linha produtiva sofria algumas interrupções na sua alimentação de farinha para o processo. Ao investigar as causas raiz, percebeu-se que estas interrupções tinham como um dos fatores problemas de

escoamento nos silos de matéria-prima. Assim, surgiu-se a ideia de tentar elaborar algum método ou equipamento que pudesse mitigar este tipo de parada não programada de linha.

Figura 1 – Problema de *Ratholing*



Fonte: Elaborado pelos autores

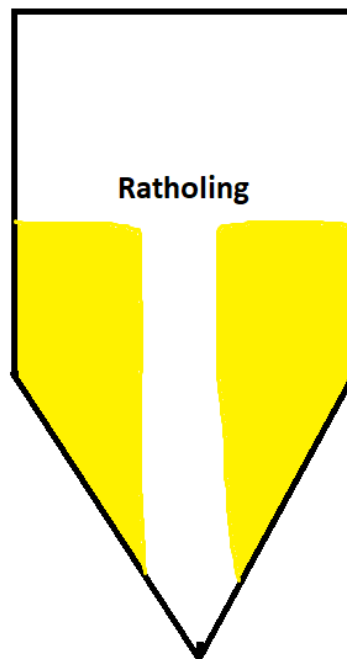
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 *Ratholing* e pontes no escoamento de silos

Os principais problemas no escoamento de silos estão relacionados aos fenômenos conhecidos como *Ratholing* e formação de pontes. Estes, são resultados das propriedades dos materiais e das características físicas dos recipientes nos quais são armazenados.

O fenômeno do *Ratholing* ocorre quando o material fica agregado nas paredes do silo e apenas a parte interna do volume de material é descarregado. Isto é, cria-se uma falsa sensação de que o silo foi completamente descarregado quando observado a partir de seu bocal de descarregamento. As principais causas para o aparecimento deste evento são a grande aderência das paredes do silo (exacerbadas quando o silo é de concreto), a geometria do vaso de armazenagem, a umidade, o índice de gordura, a granulometria, a higroscopia e as forças de interação intermoleculares dos produtos armazenados. Este problema pode ser melhor compreendido observando-se a Figura 2 (SILO AND HOPPER RATHOLING, 2022).

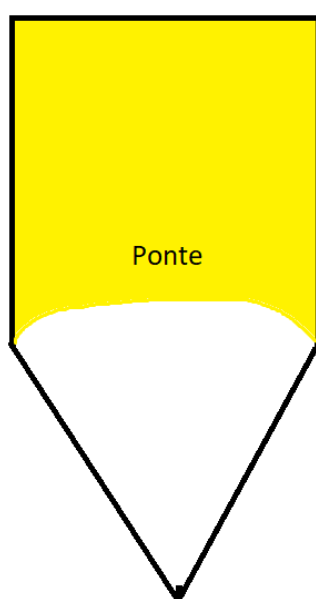
Figura 2 – Problema de *Ratholing*



Fonte: Elaborado pelos autores

Por outro lado, a formação de pontes é o problema mais encontrado nos silos. Este é caracterizado quando ocorre a interrupção completa do escoamento no silo e percebe-se que o material está agregado e condensado de maneira a não escoar. As principais razões para o aparecimento deste tipo de problema são basicamente os mesmos da formação de *Ratholing*, mas tendo uma influência maior da coluna de produto, que pode aumentar a compactação na base de retirada do armazém. A Figura 3 exemplifica o problema (SILO AND HOPPER BRIDGING, 2022).

Figura 3 – Problema de ponte



Fonte: Elaborado pelos autores

2.2 Escoamento de fluidos e sua relação com a acústica

Uma onda sonora é o resultado de uma perturbação. Uma geração de onda sonora está profundamente ligada à necessidade de um meio físico de propagação, isto porque depende de um meio para sua difusão e transmissão. Uma propagação em ar, por exemplo, ocasiona uma perturbação de pressão no meio dando continuidade à propagação (HALLIDAY; RESNICK, 2016)

Esta perturbação de pressão no meio, advinda da propagação natural das ondas sonoras, pode influenciar nos demais elementos e estruturas a sua volta. Ou seja, uma onda sonora pode acabar movimentando e vibrando objetos e partículas ao redor. Assim, uma onda sonora é capaz de perturbar um meio (ar) e transmitir, por variações de pressão, estes efeitos até, por exemplo, uma partícula presente em um silo de concreto.

2.3 Dinâmica dos fluidos computacionais

2.3.1 Introdução

A dinâmica de fluidos computacional (CFD - *Computational Fluid Dynamics*) é uma poderosa ferramenta de simulação de fluidos que vem se tornando muito utilizada por diversas áreas da indústria, como a indústria alimentícia (NORTON; SUN, 2006).

De acordo com Versteeg e Malalasekera (1995), CFD é a análise de sistemas que envolvem escoamento de fluidos, transferência de calor e fenômenos associados, tais como reações químicas por meio de simulação computacional. Isso inclui tanto movimento de fluidos ao redor de corpos como em tubulações ou turbinas e dessa forma, pode-se obter dados de distribuição de velocidade, pressão e temperatura (FORTUNA, 2000).

A fluidodinâmica computacional veio conectar a experimentação e o estudo analítico dos problemas relacionados ao mundo moderno a fim de guiar as práticas abordadas pelos engenheiros e outras profissões nas mais diversas áreas da indústria. Deste modo a análise computacional busca facilitar e auxiliar nos estudos e no desenvolvimento de projetos.

2.3.2 Equações de conservação

Entende-se que a velocidade máxima atingida pelo ar, devido ao gradiente de pressão fornecido pela corneta, não atinge a velocidade suficiente para ultrapassar $Mach = 0,3$. Assim, a densidade do fluido não apresenta alteração com a pressão, pode-se assumir que o fluido é incompressível (PESTANA, 2010).

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.1)$$

Com essa simplificação adotada, podemos obter das equações de Navier Stokes para conservação da quantidade de movimento.

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}[\mu \cdot (\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i})] \quad (2.2)$$

Com essas equações, conseguimos descrever o escoamento de fluidos.

2.3.3 Modelo de turbulência K- ϵ

Devido a dificuldade de resolução das equações de escoamento de fluido devido à turbulência, são utilizados modelos de turbulência que modificam e simplificam as equações de Navier-Stokes. O modelo de turbulência $k - \epsilon$ aproxima as equações de escoamento através da energia cinética turbulenta e da dissipação da energia cinética.

Devido à sua simplicidade e baixo custo computacional, foi escolhido esse modelo como a utilizada nas simulações de escoamento da matéria-prima do silo.

As equações 2.3, 2.4, 2.5 e 2.6 resolvem as variáveis K e ϵ .

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon} \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j}[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x_j}] + P + \rho \epsilon + P_{kb} \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_j \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j}[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j}] + \frac{\epsilon}{k}(C_{\epsilon 1} P - C_{\epsilon 2} \rho \epsilon) \quad (2.5)$$

$$P = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (2.6)$$

Assim, P é a produção de turbulência por forças viscosas e $C_{\epsilon 1} = 1,44$, $C_{\epsilon 2} = 1,92$, $C_\mu = 0,09$, $\sigma_\epsilon = 1,3$ e σ_k são constantes experimentais. (VERSTEEG; MALALASEKERA, 1995)

2.3.4 Modelagem de malhas

A construção de uma malha leva em conta alguns parâmetros e é de grande importância dentro de uma simulação CFD, devido ser um dos pontos chaves para que o resultado seja o mais preciso e fiel a realidade possível. Dentro do *software* Ansys®, a malha padrão é a tetraédrica, apesar de não ser a mais recomendada para o tipo de análise feita apresenta uma boa resolução para o problema.

Para verificar a qualidade de uma malha recomenda-se verificar alguns parâmetros, são eles (MOREIRA, 2021):

- **Ortogonalidade:** A orthogonalidade é o ângulo formado entre o vetor que conecta as centróides de duas células, com o vetor normal à aresta de contato entre as duas.

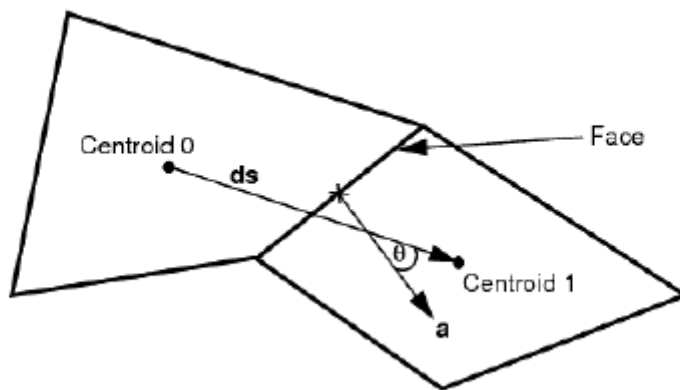


Figura 4 – Ortogonalidade de uma célula

- **Validade de Face:** Validade de face é explicada quando os vetores normais às arestas de uma célula apontam para longe do centríde. Assim, células com validade de face menores que 1 (< 1) apresentam certa concavidade.

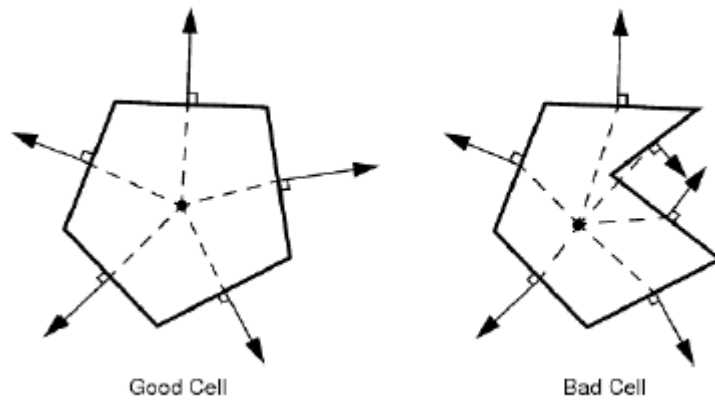


Figura 5 – Validade de uma face da célula

- **Qualidade da célula:** Qualidade de célula é considerada boa, quando seu valor aproxima-se de 1. Para isso ela deve ter os parâmetros que foram inseridos para criação dela, ou seja, uma célula tetraédrica deve se comportar como tal e não apresentar formas muito discrepantes.

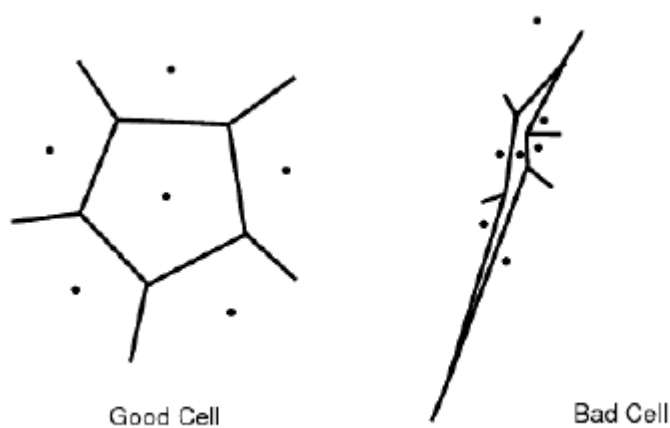


Figura 6 – Qualidade de célula

- **Mudança volumétrica:** Mudança volumétrica é dada pela razão entre o volume de duas células vizinhas, sendo uma o ponto de partida e seu vizinho a maior célula.

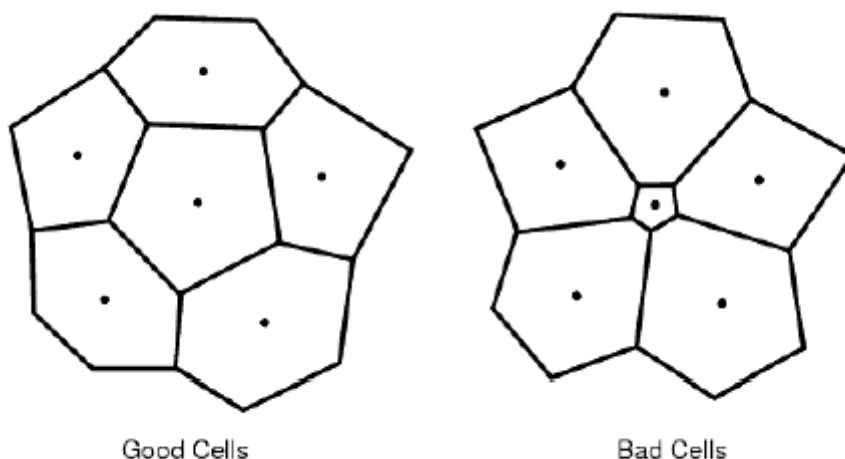


Figura 7 – Mudança volumétrica de célula

2.4 Modelagem de partícula em software de elementos discretos

2.4.1 Introdução

O escoamento de material em silos apresenta um comportamento pouco coeso de partículas, com as diversas regiões de descarregamento podendo demonstrar diferentes padrões de escoamento. Assim, uma alternativa para realizar uma simulação mais fidedigna é a utilização de um método de modelagem discreta para cada partícula.

A modelagem considera o movimento de cada partícula e suas interações com as demais e com as características do meio em que se encontram. Para isso, as principais equações de dinâmica são utilizadas. Ademais, a geometria e as características do material modelado têm grande influência na maneira como ocorre o movimento e as interações, assim, considera-se na modelagem parâmetros como densidade, módulo de elasticidade, tamanho e configuração geométrica, coeficientes de atrito, coeficiente de restituição e resistência ao rolamento.

2.4.2 Distribuição granular

Parte da modelagem discreta, é importante caracterizar as partículas que estarão dentro do domínio de simulação. No *software* Rocky DEM®, é necessário informar as características principais do material. Inicialmente, insere-se a densidade, módulo de Young e coeficiente de Poisson no ambiente de materiais do *software*.

Também faz parte da descrição das partículas a inserção do quantitativo de material que será simulado, o tamanho do particulado, a geometria e o tipo de inserção de material. Com relação à quantidade, especifica-se a massa de material desejada na aba de partículas do *software*. Também nesta área, indica-se o tamanho da partícula e a geometria, podendo apresentar a forma esférica, tetraédrica ou customizada. Vale a pena salientar que uma geometria mais

complexa acaba por exigir um maior poder de processamento, devendo o autor relativizar a influência da geometria a fim de otimizar o gasto computacional da simulação. Por fim, o tipo de inserção de material poderá ser customizada na aba de injeção de material, podendo ser um volume fixo ou uma adição constante ou progressiva de material no domínio de estudo (DEM FUNDAMENTALS, 2022).

2.4.3 Forças de contato

As forças de contato podem alterar o resultado de uma simulação de forma bastante acentuada. Desta forma, é preciso avaliar e modelar as magnitudes e as formas das forças de contato atuantes.

2.4.3.1 Interação entre partículas

O *software* Rocky® utilizado para a posterior simulação do escoamento de um silo apresenta três formulações principais para a modelagem do escoamento. A primeira é um modelo linear, na qual as relações entre partículas são regidas por uma configuração de massa, mola, amortecedor e coeficiente de atrito. Esta configuração, varia linearmente, permitindo calcular de forma mais rápida o comportamento do sistema, considerando as forças normais e tangenciais ao sistema de interação entre as partículas com coeficientes elásticos e de amortecimento constantes (MODELO LINEAR, 2019).

A segunda forma disponível dentro do *software* é o modelo Hertz. Este modelo é uma formulação não linear que tem como base uma análise teórica de deformação das partículas em contato. Como resultado, o modelo massa, mola, amortecedor sofre variações não lineares, de acordo com os *gaps* formados em decorrência de deformações normais e tangenciais entre as partículas (MODELO HERTZ, 2019).

Por fim, a última forma de tratamento da simulação é um modelo histerético que tem como base também uma característica não linear na modelagem das interações à semelhança da forma Hertz mas com um componente de amortecimento que leva em consideração a tendência de manutenção da configuração apresentada, analogamente ao fenômeno de histerese (MODELO HISTERÉTICO, 2019).

2.4.3.2 Adesão

As forças de adesão são aquelas que geram a agregação entre partículas ou entre partícula e meio. Estas, sofrem influência das propriedades dos materiais envolvidos e dos parâmetros externos do ambiente, tais como nível de umidade e índice de gordura do material. No *software* Rocky®, existem três maneiras de modelagem das forças de adesão. A primeira, é a consideração de nulidade de influência destas forças de adesão para a simulação em questão. A segunda, considera uma força de adesão constante durante todas as interações da simulação. Por fim, a última considera uma força linear de adesão semelhante às forças de Van der Waals, na qual uma

esfera de influência atua de forma que torna-se proporcional à distância entre as partículas e o envelope de simulação (MODELO LINEAR DE RESISTÊNCIA AO ROLAMENTO, 2019).

2.4.3.3 Resistência ao rolamento

A resistência ao rolamento é uma propriedade do material que define a facilidade que a partícula tem em entrar em um movimento rotativo. Da mesma forma que as forças de adesão, existem três formas de se modelar a influência desta componente na simulação. A primeira, considera nula a resistência ao rolamento da partícula. A segunda, considera uma resistência constante ao rolamento, para isso, para efeito de cálculo na simulação, insere-se um torque constante em cada partícula durante todo o período de simulação. Por fim, a terceira considera uma resistência de rolamento linear, considerando um torque atuante que é linearmente variável de acordo com as condições de contorno encontradas na simulação, como a compactação de partículas, pressão e umidade (DEM FUNDAMENTALS, 2022).

3 SIMULAÇÃO DO ESCOAMENTO NO SILO

A simulação em elementos discretos teve como objetivo verificar a influência da excitação sonora na fluidização e escoamento do silo. Para isso, utilizou-se um acoplamento entre a parte fluídica contínua e a parte discreta de particulado. Após esta primeira simulação, repetiu-se o processo sem o acoplamento dos resultados obtidos no Ansys Fluent®, permitindo assim, comparar os resultados dos escoamentos com e sem a excitação sonora.

3.1 Materiais e métodos

A natureza do escoamento em questão fez com que fosse necessária a utilização de dois métodos de simulação complementares. O primeiro foi o escoamento em elementos finitos da camada de ar presente no silo, esta camada está sujeita à variação da pressão de acordo com as ondas sonoras. O segundo, por sua vez, foi o escoamento das partículas de material de forma discreta, levando em consideração as interações entre as diferentes moléculas do material, escoamento do ar (etapa anterior) e interação com as paredes do silo.

Durante os estudos, utilizou-se de um *hardware* emprestado pelo orientador para realizar as simulações. O *hardware* apresenta como especificações técnicas:

- CPU

Intel(R) Core(TM) i7-10700 CPU @ 2.90GHz

Velocidade base: 2,90 GHz

Sockets: 1

Núcleos: 8

Processadores lógicos: 16

- Memória

16,0 GB

Velocidade: 2933 MHz

- GPU

NVIDIA GeForce RTX 2060 SUPER

Versão do driver: 30.0.15.1277

Data do driver: 04/05/2022

Versão do DirectX: 12 (FL 12.1)

Memória da GPU dedicada 0,4/8,0 GB

Memória da GPU compartilhada 0,1/7,8 GB

Memória da GPU 0,4/15,8 GB

3.1.1 Ansys Fluent®

O primeiro *software* que foi utilizado foi o Ansys Fluent®. Neste, é possível simular o comportamento da massa de ar presente dentro do silo de forma contínua, por meio do método dos volumes finitos no volume de controle do silo. Dessarte, recorreu-se ao método *Fluent Flow* para simular o escoamento do ar que será acoplado ao *software* Rocky DEM®.

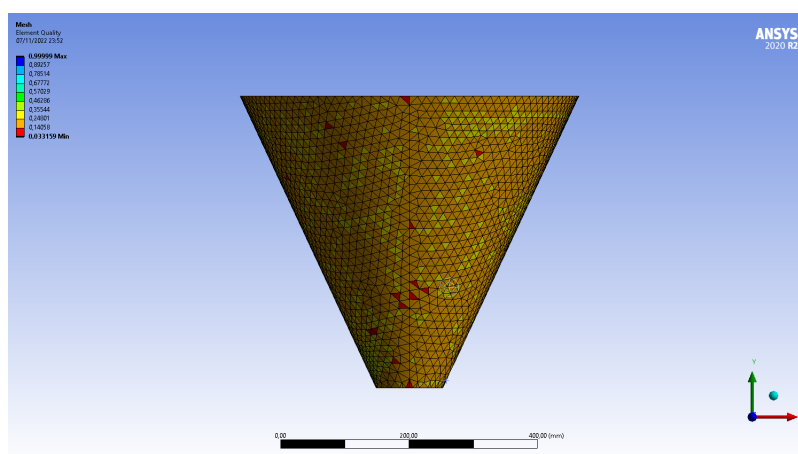
3.1.1.1 Confeção de malha

O primeiro passo para se realizar a simulação em elementos finitos é definir uma geometria para o volume de controle. Neste caso, utilizou-se uma geometria simplificada, um silo redondo de fundo cônico. Esta medida, buscou otimizar os recursos computacionais, uma vez que seriam realizadas diversas iterações não só dentro do *Fluent*, mas principalmente dentro do *software* Rocky®.

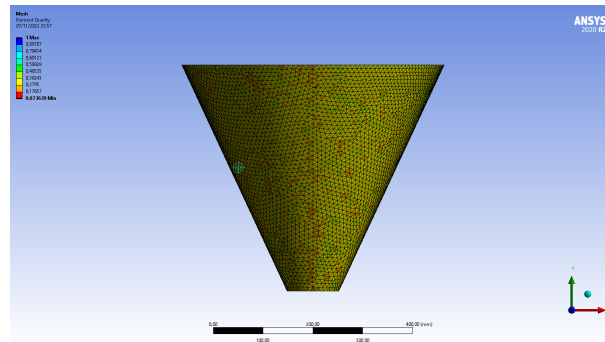
Definida a geometria do silo, extraiu-se o volume de fluido presente dentro deste. A seguir, iniciou-se o processo de criação e estudo de malha.

Para o tamanho de malha (*Base size*), optou-se por três tamanhos diferentes, de 15mm, 10mm e 5mm. Verificou-se a qualidade das células conforme as Figura 8, Figura 9, Figura 10 e Figura 11.

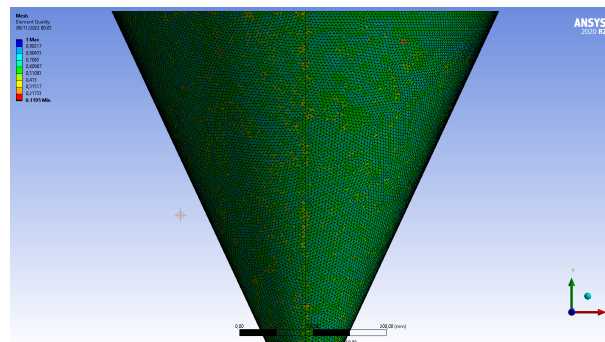
Figura 8 – Malha com *base size* de 15mm



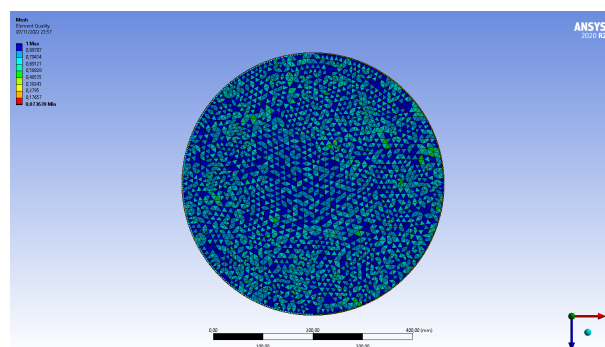
Fonte: Elaborado pelos autores

Figura 9 – Malha com *base size* de 10mm

Fonte: Elaborado pelos autores

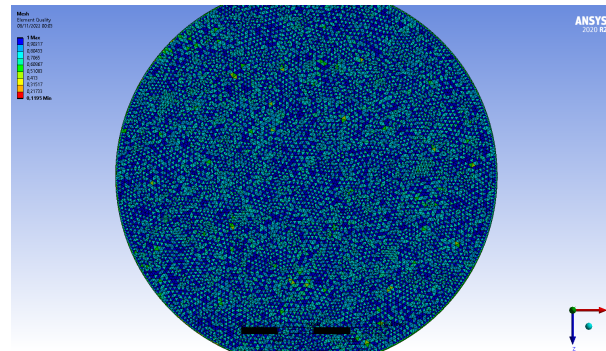
Figura 10 – Malha com *base size* de 5mm

Fonte: Elaborado pelos autores

Figura 11 – Malha com *base size* de 10mm

Fonte: Elaborado pelos autores

Figura 12 – Malha com *base size* de 5mm



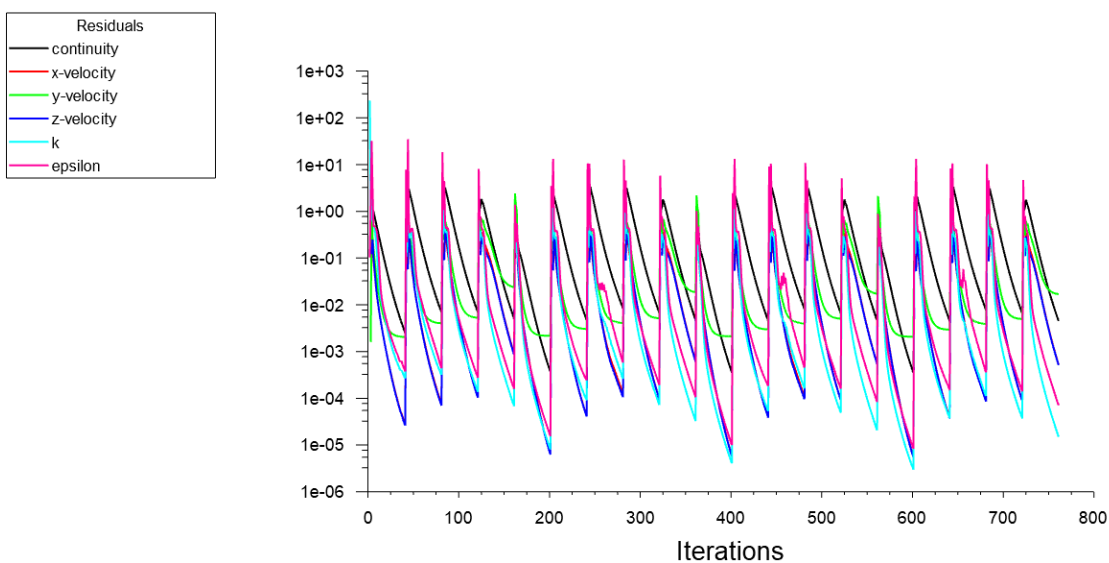
Fonte: Elaborado pelos autores

Vemos que as qualidades da malha é incrementada conforme menor o base size, entretanto temos de levar em conta se há poder computacional suficiente para simular. Visto isso, devemos considerar um estudo de convergência de malha.

Podemos observar, também, na Figura 11 e Figura 12 não apresentam discrepâncias quanto a qualidade da malha tanto na entrada quanto na saída.

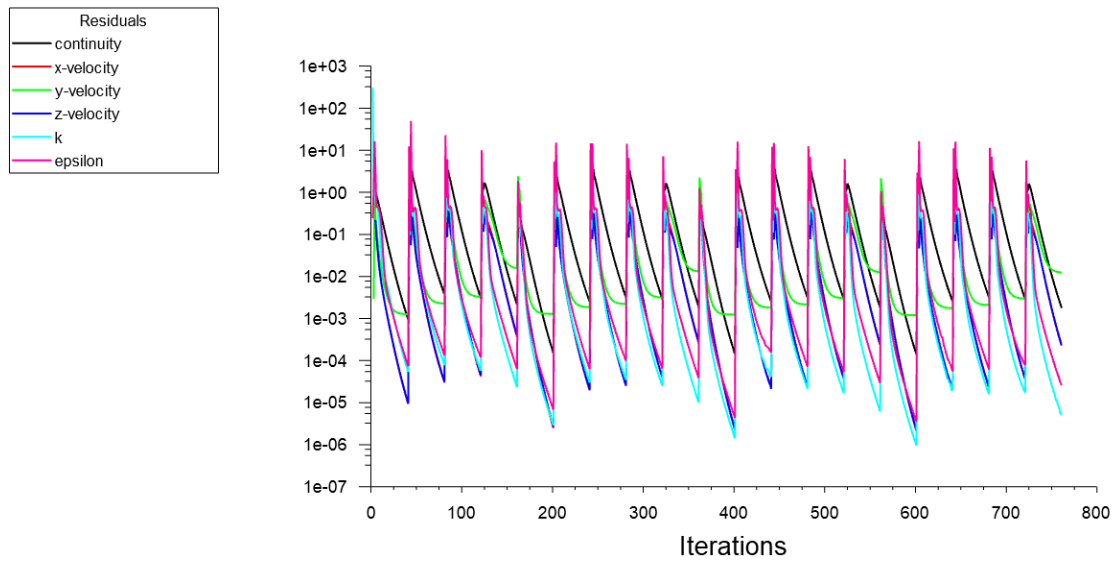
Iniciando as simulações, coletamos os dados de *residuals* e verificamos a *continuity*, que deve ter resultados < 1 para que se configure uma resposta válida e, além disso, quanto menor o resultado, mais preciso se encontra (Figuras 13, 14 e 15).

Figura 13 – Análise de convergência para *base size* de 15mm



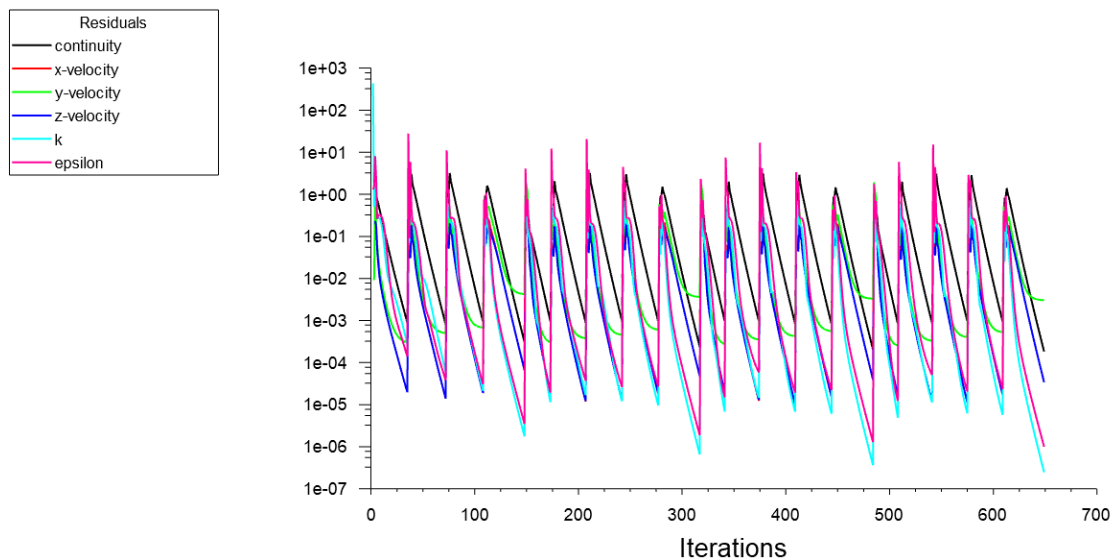
Fonte: Elaborado pelos autores

Figura 14 – Análise de convergência para *base size* de 10mm



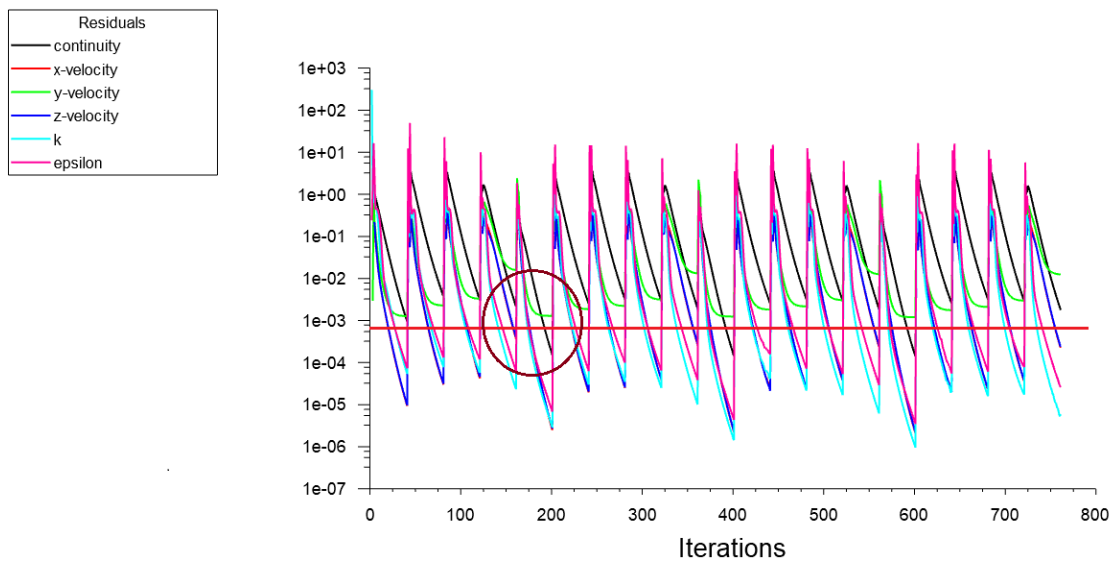
Fonte: Elaborado pelos autores

Figura 15 – Análise de convergência para *base size* de 5mm

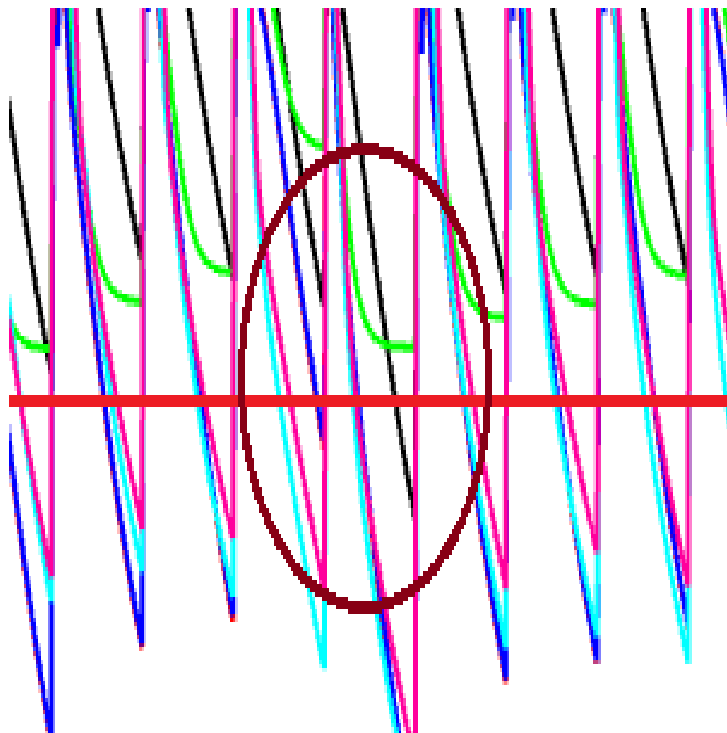


Fonte: Elaborado pelos autores

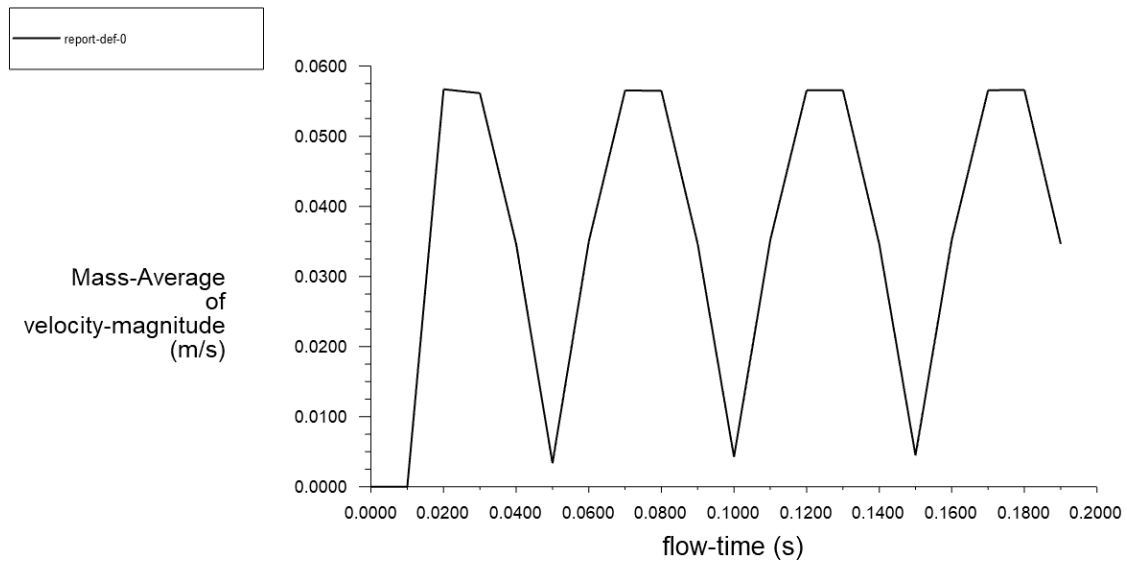
Por conseguinte, podemos verificar uma aproximação da ordem de 10^{-3} no gráfico de *continuity* para o *base size* de 10mm, visto na Figura 16 e Figura 17. Visto os resultados de velocidade de escoamento na Figura 18, Figura 19 e Figura 20, pode-se notar que todos obtiveram resultados muito semelhantes, principalmente entre as malhas de 10mm e 5mm.

Figura 16 – Escoamento para *base size* de 15mm

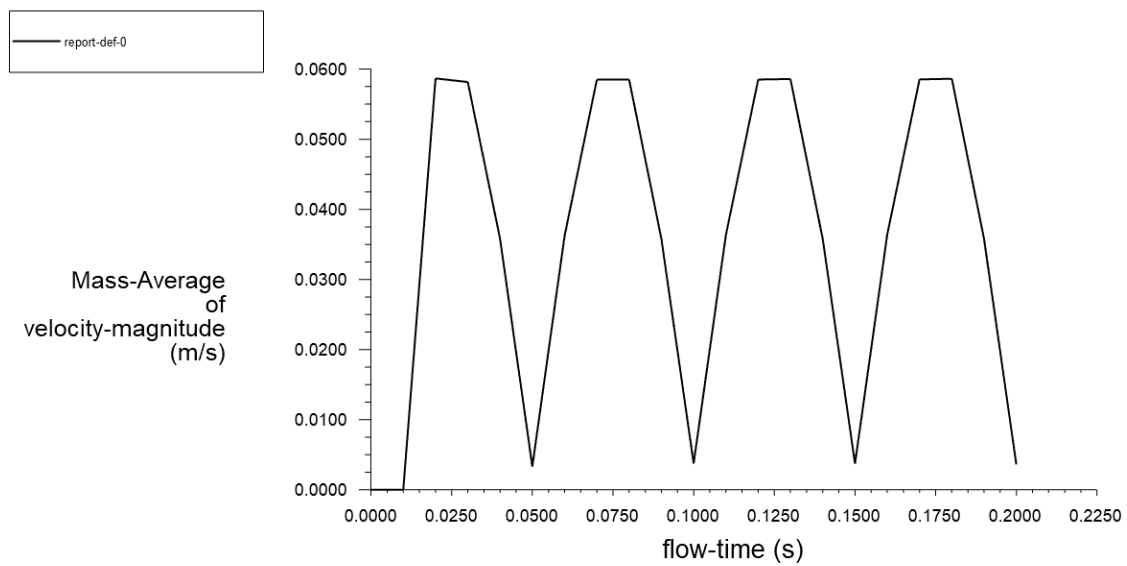
Fonte: Elaborado pelos autores

Figura 17 – Escoamento para *base size* de 15mm

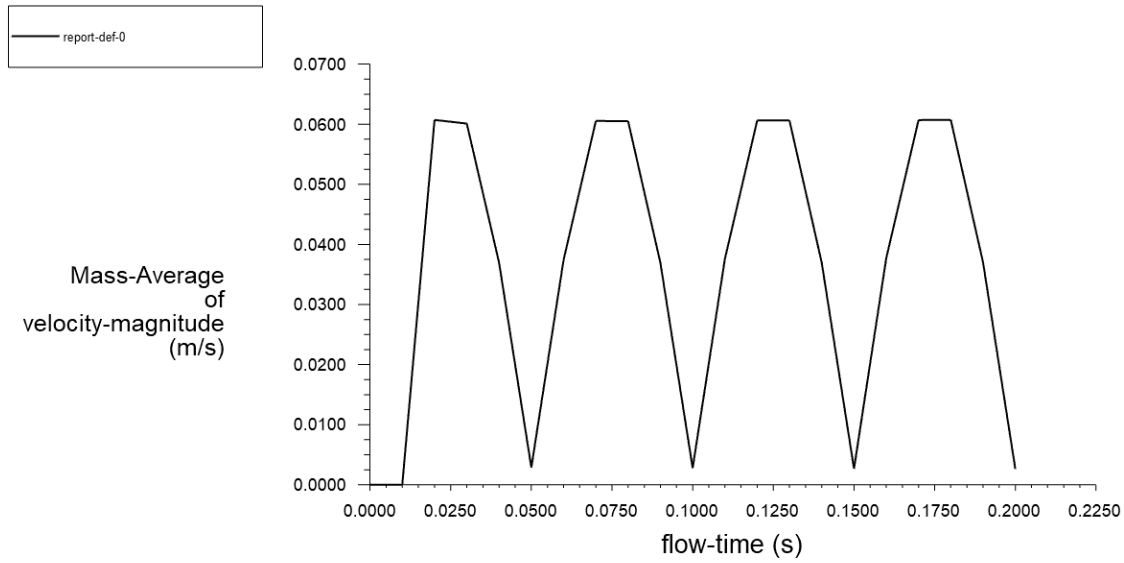
Fonte: Elaborado pelos autores

Figura 18 – Escoamento para *base size* de 15mm

Fonte: Elaborado pelos autores

Figura 19 – Escoamento para *base size* de 10mm

Fonte: Elaborado pelos autores

Figura 20 – Escoamento para *base size* de 5mm

Fonte: Elaborado pelos autores

Com esses resultados, escolheu-se essa malha para a realização de toda a simulação, devido seu custo-benefício entre precisão de resultados e tempo computacional, sendo esta a malha de 10mm.

3.1.1.2 Condições de contorno

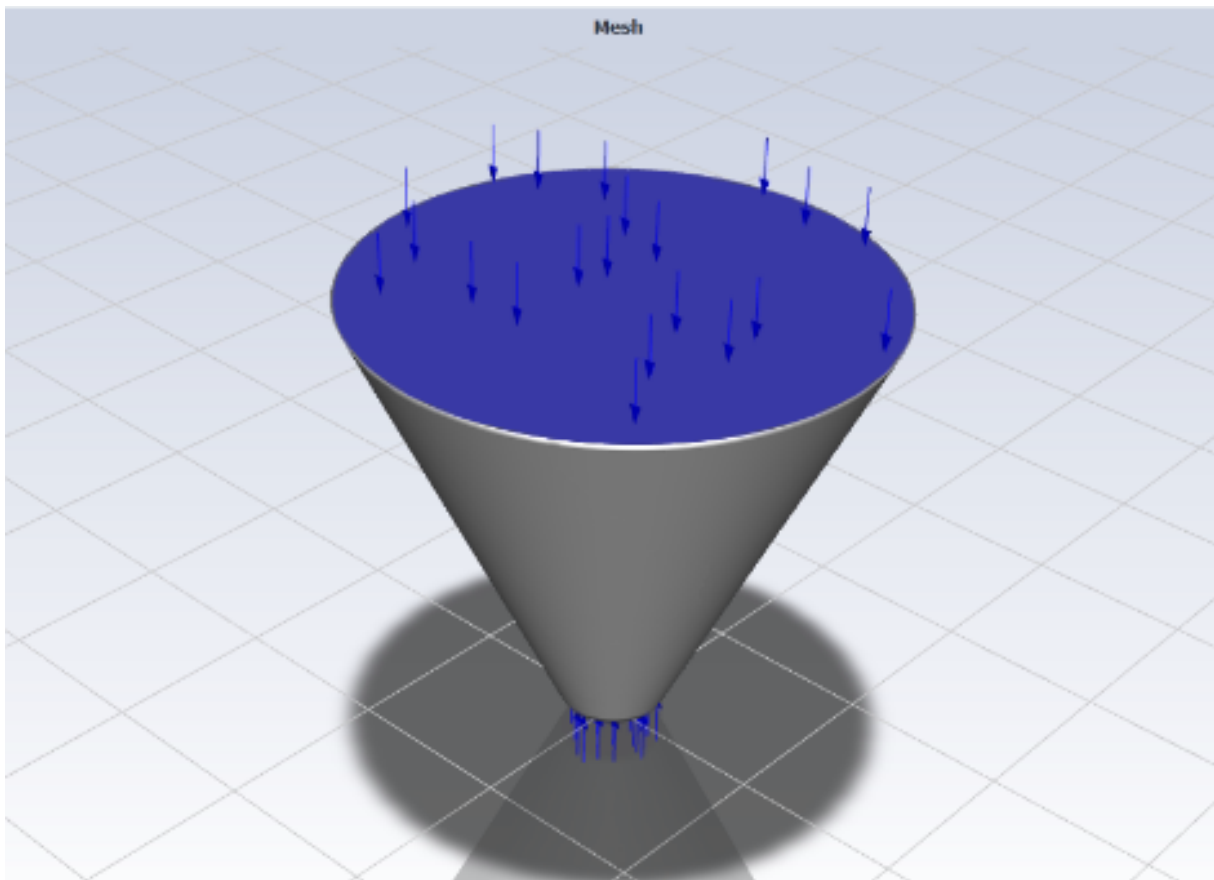
As ondas sonoras decorrentes da excitação pelo sistema acústico perturbam o escoamento de ar dentro do silo. A forma desta perturbação depende do formato de onda emitida pelo sistema, neste caso, são ondas senoidais. As excitações utilizadas nesta simulação foram 60Hz e 250Hz. Estas frequências foram adotadas com base na orientação de fabricantes de sistemas acústicos (geometria disponível).

Assim, inseriu-se uma função entrada de velocidade na boca de saída do silo com uma frequência de 60Hz, Equação 3.2, e uma entrada de velocidade na boca de entrada com uma frequência de 250Hz, Equação 3.1, (Figura 21). Ambas as amplitudes utilizadas foram 120 Db.

$$1.02[m \cdot s^{-1}] \cdot \sin(250[Hz] \cdot 2 \cdot \pi \cdot s) \quad (3.1)$$

$$1.02[m \cdot s^{-1}] \cdot \sin(60[Hz] \cdot 2 \cdot \pi \cdot s) \quad (3.2)$$

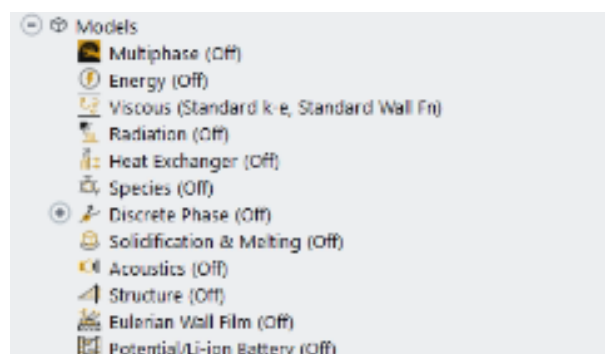
Figura 21 – Entradas de velocidade no silo



Fonte: Elaborado pelos autores

Conforme o decorrido no trabalho, optamos pelo modelo de turbulência $K-\epsilon$ - *Standard* como visto na Figura 22 e Figura 23.

Figura 22 – Condições de contorno - Modelo de turbulência



Fonte: Elaborado pelos autores

Figura 23 – Condições de contorno - Modelo de turbulência

Model

- ☐ Inviscid
- ☐ Laminar
- ☐ Spalart-Allmaras (1 eqn)
- ☒ k-epsilon (2 eqn)
- ☐ k-omega (2 eqn)
- ☐ Transition k-k-omega (3 eqn)
- ☐ Transition SST (4 eqn)
- ☐ Reynolds Stress (7 eqn)
- ☐ Scale-Adaptive Simulation (SAS)
- ☐ Detached Eddy Simulation (DES)
- ☐ Large Eddy Simulation (LES)

Model Constants

Cmu: 0.09

C1-Epsilon: 1.44

C2-Epsilon: 1.92

TKE Prandtl Number: 1

TDR Prandtl Number: 1.3

k-epsilon Model

- ☒ Standard
- ☐ RNG
- ☐ Realizable

Near-Wall Treatment

- ☒ Standard Wall Functions
- ☐ Scalable Wall Functions
- ☐ Non-Equilibrium Wall Functions
- ☐ Enhanced Wall Treatment
- ☐ Menter-Lechner
- ☐ User-Defined Wall Functions

Options

- ☐ Curvature Correction
- ☐ Production Kato-Launder
- ☐ Production Limiter

User-Defined Functions

Turbulent Viscosity: none

Prandtl Numbers

TKE Prandtl Number: none

TDR Prandtl Number: none

Fonte: Elaborado pelos autores

Por fim, definiu-se a condição de simulação, isto é, o tempo por *time-step*, o *time-step* e a quantidade de iterações. Para essa escolha, optou-se por um minutos de simulação, ou seja, 6.000 (seis mil) *time-step* e 0,01 segundos por *time-step*, com quarenta iterações por *time-step* (Figura 24). Esta escolha deu-se, por estudos realizados igualmente citado na seção de estudo de malha, variando as iterações para se adequar à *continuity* desejada.

Figura 24 – Condições de contorno - Inicialização

Run Calculation

Check Case... Preview Mesh Motion...

Time Advancement

Type: Fixed Method: User-Specified

Parameters

Number of Time Steps: 6000 Time Step Size (s): 0.01

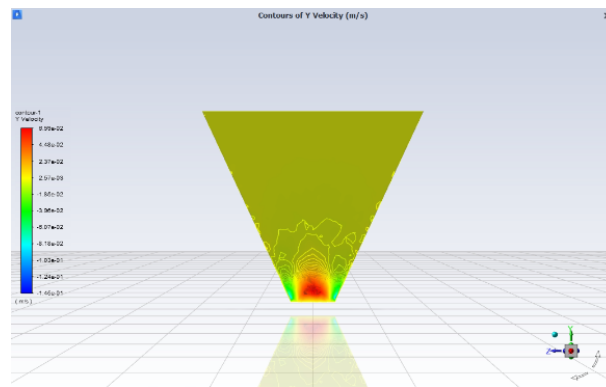
Max Iterations/Time Step: 40 Reporting Interval: 1

Profile Update Interval: 1

Fonte: Elaborado pelos autores

Como modelo visual de resultado, obtivemos a Figura 25 como um ponto de estudos de resultados, evidenciando a velocidade do ar na direção Y (para baixo) no escoamento do silo. Vemos que há um escoamento mais acelerado conforme o silo apresenta um estrangulamento, conforme o esperado.

Figura 25 – Condições de contorno - Resultados



Fonte: Elaborado pelos autores

3.1.2 Rocky DEM®

O segundo *software* utilizado foi o Rocky DEM®. Este tem a característica de realizar uma simulação de forma discreta, considerando impactos e interações entre moléculas, paredes e condições de contorno. Estas condições de contorno podem ser *setups* e resultados de uma simulação de escoamento de fluidos em um sistema de elementos finitos, como o Ansys Fluent®.

3.1.2.1 Modelagem da partícula

Para a modelagem da partícula, utilizou-se como referência os dados obtidos em laboratório para um grão de farelo de soja. Desta forma, criou-se inicialmente o material soja no *software* e inseriu-se as propriedades disponíveis, conforme Figura 26.

Figura 26 – Propriedades do material

The screenshot shows a software window titled 'Data Editors' with a 'Material' tab. The 'Name' field is set to 'Farelo de soja'. Below it, there are several input fields for material properties, each with a unit dropdown menu:

- Use Bulk Density:** An unchecked checkbox.
- Density:** 705 kg/m3
- Bulk Density:** 423 kg/m3
- Young's Modulus:** 38 MPa
- Thermal Conductivity:** 0 W/m.K
- Specific Heat:** 0 J/kg.K
- Poisson's ratio:** 0,14 -

Fonte: Elaborado pelos autores

A seguir, definiu-se a geometria e o tamanho da partícula. Para a geometria, considerou-se que as partículas tinham formas perfeitamente esféricas para diminuir o custo computacional da simulação, uma vez que uma geometria complexa acarreta em um custo exponencial de processamento.

Figura 27 – Geometria e tamanho das partículas

The screenshot shows the 'Size' tab of the 'Data Editors' window. It includes a 'Size Type' dropdown menu set to 'Sieve Size'. Below this are four icons: a green plus sign, a blue double-headed arrow, a red minus sign, and a red cluster of dots. A table displays the particle size distribution:

Size	Cumulative %
m	
0,01	100

Fonte: Elaborado pelos autores

O último passo na modelagem das partículas foi informar o tipo de injeção e a massa de material envolvida na simulação. O tipo, foi definido como uma injeção de volume fixo de material, uma vez que buscou-se simular o escoamento de um silo já abastecido. Para a massa foi considerado o valor de 15 Kg, levando em consideração o a geometria das partículas e do modelo em escala do silo.

Figura 28 – Injeção de material

Name:

Particles Region

Particle	Mass	Temperature
	kg	K
milho	5	0

Fonte: Elaborado pelos autores

3.1.2.2 Condições de contorno

Nesta etapa, definiu-se como método de solução o modelo linear. Este método foi escolhido por apresentar boa resolução para o problema de fluidização proposto, requerendo um menor gasto computacional necessário à simulação, uma vez que visa-se modelar o problema com ênfase no escoamento contínuo de material e não na sua adesão.

Também considerou-se o acoplamento dos resultados obtidos através da simulação de fluidos no software Ansys®.

Figura 29 – Modelagem no Rocky®

Gravity Momentum Thermal Coarse-Graining

Rolling Resistance Model:

Normal Force:

Adhesive Force:

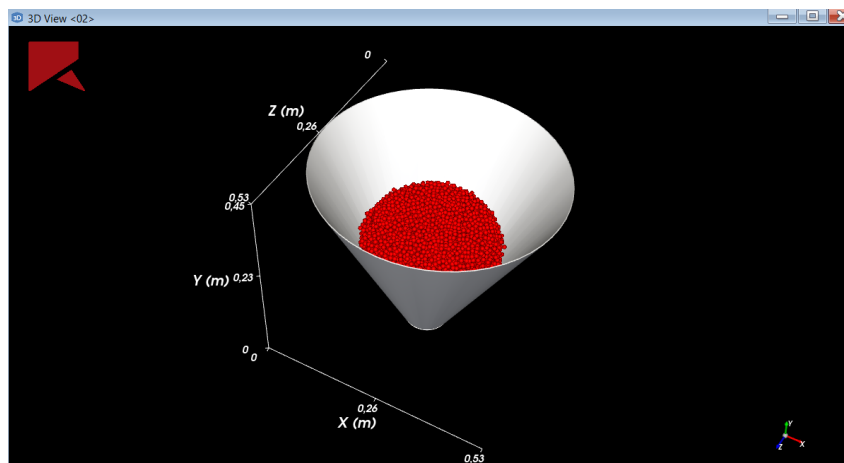
Tangential Force:

Fonte: Elaborado pelos autores

3.1.2.3 Obtenção e geração de dados para análise

Após esta primeira simulação, que utilizou os dados obtidos da excitação sonora gerados pelo Ansys Fluent®, repetiu-se o processo da seção 3.1.2 mas desta vez sem acoplar os resultados anteriores. Com estas simulações, foi possível gerar dados para o escoamento sem e com o sistema acústico que foram utilizados posteriormente em uma análise no capítulo 5.

Figura 30 – Silo na simulação



Fonte: Elaborado pelos autores

4 EXPERIMENTO DE VALIDAÇÃO PRÁTICO

O experimento realizado teve como objetivo verificar se um sistema acústico poderia retomar o fluxo de descarga de material, rompendo problemas de ponte e *Ratholing*, em um silo em escala com geometria semelhante ao sistema de armazenagem que motivou este estudo.

4.1 Materiais e métodos

4.1.1 Silo de armazenagem

Para representação do silo de armazenamento, utilizou-se uma garrafa pet de formato retangular, assemelhando-se o máximo possível ao silo que motivou a elaboração deste trabalho. Além disso, para representar de forma fidedigna a densidade e a geometria das paredes de concreto, utilizou-se um revestimento em gesso com espessuras proporcionais às do silo original.

Figura 31 – Silo em gesso e pet



Fonte: Elaborado pelos autores

4.1.2 Produto armazenado

Para o produto armazenado, buscou-se um que mantivesse a maior quantidade das propriedades encontradas no material original, buscando-se alterar apenas a granulometria do produto para a nova escala. Assim, chegou-se à conclusão que o melhor material seria serragem, por ser possível controlar a granulometria e apresentar as propriedades semelhantes ao material inicial. A densidade utilizada foi de 695 g/l em teste realizado no laboratório da Nestlé Purina de Ribeirão Preto. Com relação à granulometria, o material utilizado apresentava cerca de 5 mm por partícula. Por fim, a serragem utilizada apresentava ângulo de repouso semelhante ao do produto que motivou o estudo, 35° , sendo uma propriedade que relaciona granulometria, densidade, coeficiente de atrito e forças intermoleculares do material.

Figura 32 – Produto simulado no experimento



Fonte: Elaborado pelos autores

4.1.3 Duto de transição

Para a representação do duto de transição na saída do silo, utilizou-se uma peça do tipo "T" de PVC de 100 mm, no qual na saída lateral foi inserido o sistema acústico da base do silo. Este duto, em um sistema de armazenagem, faz a conexão entre a saída do silo e o sistema de transporte de material, este é o local no qual os operadores atuam mecanicamente em caso de obstrução de material por ser o local de mais fácil acesso à fonte do problema.

Figura 33 – Duto de transição



Fonte: Elaborado pelos autores

4.1.4 Sistema acústico

Para a realização deste experimento, utilizou-se como fonte de geração de ondas acústicas um amplificador acústico (modelo MK1200), um gerador de ondas senoidais que pudesse variar a frequência emitida (modelo Selenium D-250 X 8 Ohms 150 W e 75 W RMS) e um cone amplificador plástico de 250 mm de comprimento e 150 mm de abertura final.

Figura 34 – Conjunto de excitação acústica



Fonte: Elaborado pelos autores

O gerador das ondas e o amplificador são elétricos, desta maneira, preferiu-se utilizar frequências um pouco mais altas que nas simulações, a fim de garantir uma boa amplitude na ex-

citação. Uma frequência baixa neste tipo de equipamento gerava uma amplitude demasiadamente baixa, impedindo o correto funcionamento do sistema em escala.

4.2 Montagem do experimento

Inicialmente, posiciona-se o modelo de duto de transição sobre um suporte aéreo, montado de maneira a permitir a visualização do escoamento do material armazenado.

A seguir, preenche-se o modelo do silo com a serragem escolhida para a representação do material armazenado ainda com a presença da tampa para permitir a formação dos fenômenos estudados neste trabalho. Ao liberar a restrição imposta pela tampa, uma parte do material escoar, liberando a saída do recipiente e gerando a formação de uma ponte de material, interrompendo o escoamento. Neste momento, o recipiente é posicionado sobre o duto de interligação em repouso.

Por fim, posiciona-se inicialmente o sistema acústico na saída lateral do duto de transição, posicionando, desta forma, logo abaixo do local de formação da ponte. Após estas configurações iniciais, liga-se o conjunto do amplificador e inicia-se a reprodução de frequência na fonte sonora.

Figura 35 – Excitação lateral



Fonte: Elaborado pelos autores

Após o início da excitação pelas ondas sonoras, o material começará a escoar, quebrando e formando novas pontes, cada vez mais altas até o ponto em que irá colapsar totalmente, ocasionando o aparecimento do fenômeno de *Ratholing*. Após o início do fenômeno, o material cessará seu escoamento, neste ponto, desliga-se o sistema acústico e o posiciona sobre o silo.

Figura 36 – Excitação vertical



Fonte: Elaborado pelos autores

O posicionamento superior da corneta no silo visa romper a barreira de escoamento ocasionada pelo *Ratholing*, excitando o material no sentido do topo até a base. Assim, religa-se o sistema acústico, soando novamente a frequência de excitação, o processo ocorre até que ocorra o completo descarregamento do material.

4.3 Obtenção de dados experimentais

Para a obtenção dos dados do experimento, realizou-se uma série de testes de escoamento para diferentes faixas de frequência (440Hz, 550Hz, 300Hz e 250Hz). Para cada frequência, realizou-se três ensaios, de modo a tentar reduzir a influência de eventos aleatórios que pudessem gerar variabilidade nos experimentos.

Assim, para verificar qual frequência apresentava melhor resultado, mediu-se os tempos de escoamento do silo para cada frequência teste, utilizando a mesma massa de material no interior deste (300 g), medida através do uso de uma balança.

Como explanado na seção anterior, o experimento consiste no estímulo sonoro em duas regiões do silo, na base e no topo. Por isso, utilizou-se como critério de mudança do local de excitação o aparecimento do fenômeno de *Ratholing*, o ponto a partir do qual permitiria a adequada propagação das ondas sonoras advindas do topo do silo.

Figura 37 – *Ratholing*



Fonte: Elaborado pelos autores

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Simulação do escoamento no silo

Após a realização das simulações, pode-se comparar o tempo de escoamento dos dois sistemas simulados no *software* Rocky®. O primeiro, realizado com a excitação sonora por meio do acoplamento da simulação no Ansys Fluent® e o segundo com apenas a ação da gravidade no escoamento.

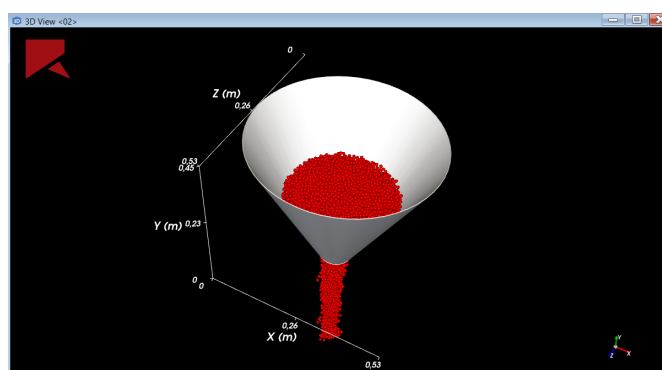
Tabela 1 – Simulações e tempos de escoamento

Simulação	Tempo de escoamento
Excitada	23,7 s
Não Excitada	25,2 s

Fonte: Elaborada pelos autores.

Assim, é possível notar que o escoamento do processo com o sistema acústico foi mais rápido que quando comparado à outra simulação. Como consequência, percebe-se que o sistema agiu de forma a fluidibilizar o material armazenado, facilitando o escoamento e mostrando que este tipo de sistema é eficaz na execução desta função.

Figura 38 – Descarregamento do silo na simulação



Fonte: Elaborado pelos autores

5.2 Experimento de validação prático

O experimento realizado envolveu alguns testes com quatro frequências de excitação, cada qual, tendo o tempo de escoamento medido. Assim, foi possível elaborar a Tabela 2 comparando o desempenho das frequências de excitação.

Tabela 2 – Ensaios e tempos de escoamento

Ensaio	Frequência	Tempo na Base	Tempo no Topo	Tempo Geral
1°	250 Hz	12 s	134 s	146 s
2°	250 Hz	12 s	140 s	152 s
3°	250 Hz	14 s	142 s	156 s
4°	300 Hz	17 s	128 s	145 s
5°	300 Hz	16 s	123 s	139 s
6°	300 Hz	16 s	130 s	146 s
7°	440 Hz	18 s	93 s	111 s
8°	440 Hz	16 s	85 s	101 s
9°	440 Hz	18 s	90 s	108 s
10°	550 Hz	27 s	89 s	116 s
11°	550 Hz	26 s	90 s	116 s
12°	550 Hz	29 s	92 s	121 s

Fonte: Elaborada pelos autores.

Observando a tabela, percebe-se que a frequência de 440 Hz apresentou o melhor desempenho geral. Contudo, observando os tempos de quebra de ponte nas frequências mais baixas, percebe-se que o sistema ideal envolveria o emprego de uma frequência de 250 Hz na base e de 440 Hz no topo do silo, para o rompimento de *Ratholing*.

Deste modo, o sistema mostrou-se eficaz na tarefa de desobstruir sistemas de armazenagem, rompendo os principais problemas envolvidos no escoamento de silos. Entretanto, pelos resultados obtidos, percebe-se que frequências diferentes têm desempenhos diferentes na solução dos diversos problemas de escoamento. Assim, é preciso conhecer os problemas envolvidos em cada silo para dimensionar e desenvolver um sistema acústico ideal.

6 CONCLUSÃO

Com isso, pode-se concluir que é eficaz a utilização de um sistema de limpeza acústica para auxiliar no escoamento de um silo em operação. Os conceitos estudados e apresentados podem trazer efeitos benéficos no fluxo de material armazenado.

A simulação em escala de um sistema acústico como fluidizador se mostrou eficiente neste aspecto, facilitando e diminuindo o tempo de escoamento durante a retirada do produto, após a inserção e acoplamento das excitações causadas pelo sistema acústico. Desta maneira, a fluidização evita também o surgimento de problemas de interrupção de escoamento, os quais foram estudados na realização do experimento prático.

O experimento de utilização de um sistema acústico em um silo em escala também mostrou que o conceito é eficaz contra alguns tipos de problemas encontrados no escoamento em silos. O sistema, quando instalado na base, é capaz de desobstruir as pontes que impedem o correto descarregamento do produto. No topo, por sua vez, é eficaz na resolução dos problemas relacionados à agregação de material nas paredes do silo, como o fenômeno de *Ratholing*.

Desta maneira, o uso de sistema acústico torna-se útil principalmente em sistemas de armazenagem que não podem receber equipamentos de descarga tradicionais, como o silo de concreto de geometria não usual, que motivou o estudo do uso desta tecnologia para este fim. Para isso, deve-se fazer um estudo de caso pontual para verificar quais as melhores frequências sonoras para a excitação do silo, levando-se em consideração a geometria do recipiente e as propriedades dos materiais armazenados em seu interior.

Por fim, o emprego deste tipo de sistema tem a capacidade de evitar paradas indesejadas de linha. Por consequência, a planta apresentaria melhores indicadores de disponibilidade e volume de produção. Além disso, traz benefícios significativos para a ergonomia e qualidade do ambiente de trabalho do operador deste silo, evitando trabalhos manuais em espaços confinados que poderiam trazer danos à saúde do colaborador. Por isso, espera-se instalar um sistema piloto para testes de eficácia do sistema na planta produtiva que motivou este estudo no decorrer do ano de 2023.

REFERÊNCIAS

- DEM FUNDAMENTALS. 2022. Disponível em: <https://rocky.esss.co/typ/39da7c3826d1bb730dc283d8dab4b3c6/>. Acesso em: 02 nov. 2022.
- FORTUNA, A. de O. **Técnicas Computacionais para Dinâmica dos Flúidos Vol. 30**. [S.l.: s.n.]: Edusp, 2000.
- HALLIDAY; RESNICK. **Fundamentos de Física - gravitação, ondas e termodinâmica**. Rio de Janeiro: LTC, 2016. 643 p.
- MODELO HERTZ. 2019. Disponível em: <http://docs.itascacg.com/pfc600/common/contactmodel/hertz/doc/manual/cmhertz.html>. Acesso em: 02 nov. 2022.
- MODELO HISTERÉTICO. 2019. Disponível em: <http://docs.itascacg.com/pfc600/common/contactmodel/hysteretic/doc/manual/cmhysteretic.html>. Acesso em: 02 nov. 2022.
- MODELO LINEAR. 2019. Disponível em: <http://docs.itascacg.com/pfc600/common/contactmodel/linear/doc/manual/cmlinear.html>. Acesso em: 02 nov. 2022.
- MODELO LINEAR DE RESISTÊNCIA AO ROLAMENTO. 2019. Disponível em: <http://docs.itascacg.com/pfc600/common/contactmodel/rrlinear/doc/manual/cmrrlinear.html>. Acesso em: 02 nov. 2022.
- MOREIRA, A. F. **Estudo Numérico da aplicação de Geradores de Vórtices em um perfil de asa em escoamento de baixo Reynolds**. 2021. 33–35 p., 2021.
- NORTON, T.; SUN, D.-W. Computational fluid dynamics (cfd)—an effective and efficient design and analysis tool for the food industry: a review. **Trends in Food Science & Technology**, Elsevier, v. 17, n. 11, p. 600–620, 2006.
- PESTANA, A. F. d. S. **Simulação computacional do escoamento em torno de asa traseira de automóvel de competição**. 2010. 13–15 p., 2010.
- SILO AND HOPPER BRIDGING. 2022. Disponível em: <https://www.primasonics.com/silo-hopper-bridging>. Acesso em: 18 out. 2022.
- SILO AND HOPPER RATHOLING. 2022. Disponível em: <https://www.primasonics.com/silo-and-hopper-ratholing>. Acesso em: 18 out. 2022.
- VERSTEEG, H.; MALALASEKERA, W. **Computational fluid dynamics: the finite volume method**. [S.l.: s.n.], 1995.