

# 10

## CAPÍTULO

### **ESCOAMENTO DE GRÃOS EM SILOS**

**Reis, F. A. 1;**  
**Silva, A. C. 2\*;**  
**Silva, E. M. S. 2;**  
**Bicalho, A. C. 1**

1 Universidade Federal de Goiás, Graduando do Curso de Engenharia de Minas, Catalão, GO, Brasil

2 Universidade Federal de Goiás, Curso de Engenharia de Minas, Catalão, GO, Brasil

**\* email: [ancarsil@ufg.br](mailto:ancarsil@ufg.br)**

---

**Resumo:** O manuseio de grãos sempre exige uma forma de estocagem que impede a perda de material e facilite as operações posteriores, a qual, muitas das vezes, é feita em silos ou pilhas. Estas possuem algumas desvantagens, pois expõem o material ao ambiente e dificulta a alimentação de operações à jusante. Já os silos, mantem as partículas num volume fechado e orienta o fluxo de descarga para um orifício, sendo uma alternativa muito eficiente no aproveitamento de finos e no manuseio posterior. Entretanto, o conhecimento de propriedades das partículas como massa específica, tamanho, ângulo de fricção e atrito é extremamente importante, pois, em combinação com a geometria do silo e a quantidade de material, podem gerar arcos de tensões no descarregamento e impedir o fluxo. O trabalho foi desenvolvido neste sentido para encontrar relações entre o tempo de escoamento e tais variáveis. Aquelas referentes à geometria do equipamento se restringiram ao diâmetro do orifício de descarga, inclinação da parte cônica (tremonha) e a altura da mesma. Nas simulações, percebeu-se a importância da escoabilidade das partículas no tempo de descarga, o que está condicionado, principalmente, pela granulometria do material e ângulo de escoamento. A umidade e o tempo que o pacote granular permanece dentro do silo antes de ser descarregado foram desprezados, porém podem influenciar no tempo de descarga.

**Palavras-chave:** Fluxo granular; Silos; Simulação computacional

---

## **1. Introdução**

Todo e qualquer material requer um procedimento adequado para a sua estocagem e/ou armazenamento. Materiais granulares são usualmente estocados em silos. Os silos são estruturas de armazenamento de grãos reconhecidamente importantes nas mais diversas áreas, tais como a agricultura, mineração, indústria cimenteira, dentre outras.

Vários autores têm se dedicado a simular computacionalmente o problema da geração de um pacote granular denso em um silo (seja ele bi ou tridimensional) e sua posterior descarga por um orifício. Para isso inúmeras técnicas de simulação computacional têm sido testadas. Pode-se, contudo, destacar alguns trabalhos

de reconhecida importância tais como Langston et al. (1995) que utilizaram um modelo computacional baseado em elementos discretos (DE) para simular o fluxo de material granular armazenado em um silo por uma tremonha. Outros autores tais como Allen e Tildesley (1987) e Rapaport (2004) usaram modelos baseados em dinâmica molecular (MD) de partículas elásticas. Já Lubachevsky (1991) e Herrmann e Luding (1998) utilizaram a simulação conduzida por eventos (EDS) para partículas rígidas. Silva e Bernardes (2010) usaram a técnica chamada autômato celular para simular a geração de um pacote granular denso e poroso em um silo e a subsequente descarga por um orifício na parte inferior da tremonha.

Wendt (2009) reforça que a base para a ferramenta são as equações fundamentais que governam a dinâmica de fluidos – a continuidade, momento e equações de energia. Elas são representações matemáticas de três princípios físicos fundamentais nos quais a dinâmica de fluidos se baseia: conservação de massa,  $F = m \cdot a$  (Segunda Lei de Newton) e conservação de energia.

Fontes et al. (2004) define CFD como uma técnica baseada na teoria dos fenômenos dos transportes, a qual permite simulações computacionais para prever o comportamento de um fluxo. O objetivo da técnica é modelar um fluxo contínuo com Partial Differential Equations (PDE's), discretizar estas PDE's transformando-as em um sistema algébrico, solucioná-lo, validá-lo e encontrar a simulação baseada na geometria. Para isso, são requeridas manipulações com milhões de número impossíveis de serem feitas algebricamente, pois utiliza métodos discretos dependentes de ferramentas computacionais limitadas pelo desenvolvimento de hardwares.

O presente projeto visou o desenvolvimento de um software usando a técnica denominada de CFD (Computer Fluids Dynamics) para simular tanto a geração de um pacote granular denso, mas ainda poroso, em um silo tridimensional bem como o seu posterior descarregamento, produzindo um escoamento do material granular pelo orifício de descarga do silo.

É importante destacar alguns tipos de fluxos que existem durante o descarregamento de partículas granulares dentro de um silo porque o caminho percorrido por estas pode responder questões sobre a obstrução da descarga. Alguns estudos têm sido feitos considerando este aspecto, porém, pode-se destacar alguns trabalhos como o de Palma (2005) que analisou a pressão em silos verticais com fundo cônico para fluxo de massa e fluxo de funil através de simulações e desenvolveu um programa computacional para cálculo de pressão. Araújo (1997) realizou pesquisas para determinar os esforços e alívios de tensões através de análises numéricas e experimentais, comparando os métodos. Freitas (2001) realizou testes em um protótipo de silo e silo piloto e, baseado nos resultados experimentais, propôs modelos empíricos para determinar pressões horizontais e verticais no fundo

de silos para este tipo de unidade armazenadora.

O produto armazenado pode ser descarregado pela gravidade de acordo com dois tipos principais de fluxos: fluxo de massa e fluxo de funil (Figura 1). O tipo de fluxo depende principalmente da propriedade físicas e da geometria e rugosidade da superfície da tremonha. De acordo com Calil Jr. (1990), o tipo de fluxo caracteriza a descarga do produto, o tipo de segregação, a possível geração de zonas sem movimento e se o silo pode ser completamente esvaziado. Além disso, determina a distribuição das pressões nas paredes e fundo do silo, e a integridade e custos de construção.

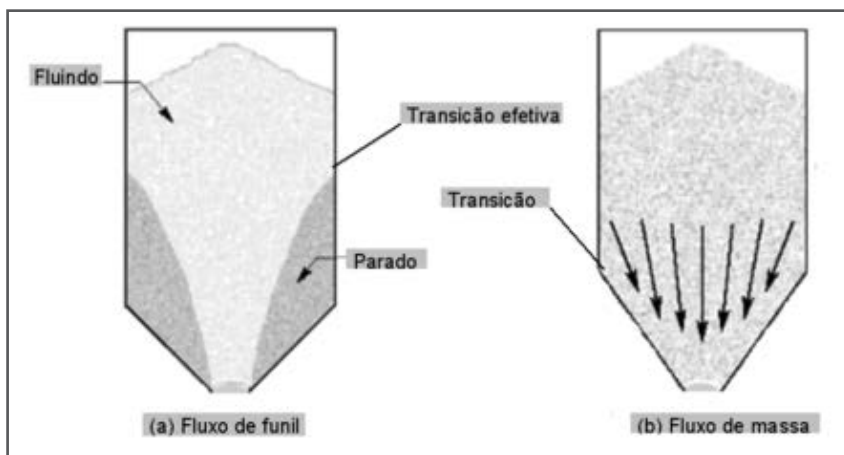


Figura 1 – Tipos de fluxo dentro de um silo. Fonte: Adaptado de Palma, 2005.

Os dados gerados pela simulação foram validados com o auxílio de um aparato experimental de baixo custo composto por uma estrutura de madeira de sustentação do silo e tubulações de policloreto de vinila (PVC) e o pacote granular composto por esferas de vidros, as quais possuem um coeficiente de coesão muito baixo e um fator de forma próximo de um, o que aproxima bastante às características das esferas perfeitas criadas no software. Os dados experimentais foram confrontados com os simulados e obteve-se uma forte correlação entre eles.

Ademais, comparou-se os resultados das simulações com os dados gerados nos ensaios do escoamento de areia de quartzo de leito de rio em um silo de garrafa PET no primeiro estágio do projeto. Esta análise também forneceu um alto índice de correlação.

## 2. Objetivos

o principal objetivo deste projeto foi utilizar técnicas computacionais para simular o escoamento de grãos dentro de silos analisando a influência das principais variáveis no fluxo das partículas. Para tal foi utilizado técnicas de CFD no software Blender, versão 2.70. Os dados foram validados com base em ensaios experimentais.

## 3. Metodologia

a simulação do fluxo de grãos e o modelamento do silo foram feitos no Blender. O software contém várias ferramentas de Computer Aided Design (CAD) o que facilitou a modelagem do silo. Para a geração do pacote granular, criou-se uma esfera com as propriedades específicas e multiplicou-a até a quantidade desejada. A posição de cada esfera dentro do silo podia ser escolhida manualmente. Entretanto, segundos depois, ou até milissegundos dependendo do número de esferas, do início da descarga, o pacote granular tendia a ocupar o menor espaço possível dentro do silo, como mostrado na Figura 2.

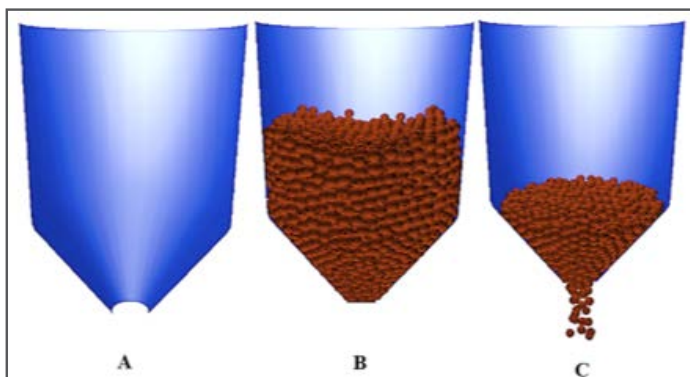


Figura 2 – Representação do silo no Blender: (A) vazio, (B) cheio e (C) em descarregamento. Fonte: autoria própria.

Foram feitas simulações variando o tamanho, número de partículas e inclinação da tremonha, verificando a influência de tais parâmetros no tempo de descarregamento do silo. Após o final da simulação era verificado na timeline do simulador o tempo gasto no descarregamento do silo em frames. Tal valor era então inserido numa tabela, que representa a variação do tempo em relação a uma das variáveis supracitadas. Por fim, obtiveram-se os gráficos representativos de tais relações.

A fase de ensaios consistiu, primeiramente, em criar um aparato composto por uma estrutura de madeira e um silo de PVC, representado na Figura 3 (as dimensões dos silos estão representadas na Figura 4). Após isso, separou-se a quantidade de esferas a serem utilizadas em cada ensaio através da massa de cada montante desejado, haja visto que conhecia-se o diâmetro – e consequentemente o volume – e a massa específica do material. Obstruiu-se o orifício de descarga com uma moeda e inseriu as partículas dentro do silo. Com uma câmera Câmera fotográfica Sony DSC P200 com tripé filmou-se cada ensaio gerando vídeos que eram importados para o programa VirtualDub, no qual consegue-se observar o momento exato do início e fim do descarregamento, permitindo encontrar o período de escoamento em frames por segundo. Tal informação foi relacionada com o número de esferas através da construção de tabelas e gráficos no Microsoft Office Excel 2013.



Figura 3 – Aparato experimental criado para validar o simulador. Fonte: autoria própria.

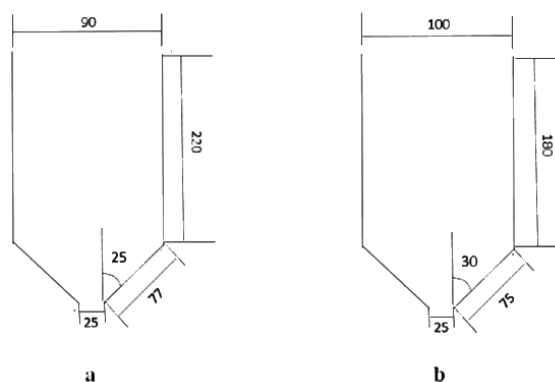


Figura 4 – Dimensões dos silos utilizados: (a) Garrafa PET e (b) Silo de PVC. Comprimentos em milímetros e ângulos em graus. Fonte: autoria própria

Os resultados das simulações e dos ensaios foram confrontados a fim de validar o simulador. Além disso, fez-se uma comparação com resultados encontrados no início deste projeto quando os ensaios eram realizados com areia de quartzo de leito de rio e garrafas de Politereftalato de Etileno (PET).

## 4. Resultados e discussões

a tabela 1 apresenta os resultados das simulações utilizando o Blender alterando o número de partículas dentro do silo para uma mesma granulometria (8#) e inclinação da tremonha de 25°. Tais resultados foram plotados no gráfico 1, onde percebe-se a forte correlação linear ( $R^2 = 0,9764$ ) entre o número de partículas e o tempo de descarregamento.

Os testes experimentais foram realizados alterando o número de esferas de vidro dentro do silo para avaliar a influência desta variável no tempo e comparar com os resultados das simulações. Foram utilizados tamanhos de 4, 6 e 8# nos testes com o silo de PVC. A tabela 2 mostra a quantidade de esferas de vidro utilizadas para cada tamanho, bem como o tempo de descarregamento obtido. O volume do silo (1,64 L) limitou o número máximo para cada tamanho de esferas utilizado. O gráfico 2 apresenta os resultados obtidos para as três granulometrias de esferas testadas. A correlação linear foi novamente obtida para todas as granulometrias.

Tabela 1 – Relação entre o tempo de descarga e o número de partículas.

Fonte: autoria própria.

Nº de partículas	Tempo (s)	Tamanho	Inclinação da tremonha
0	0,00		
293	2,50		
784	4,50		
999	5,50	8#	25°
1420	6,75	(2,38 mm)	
2056	9,13		
2692	11,50		
3514	15,33		



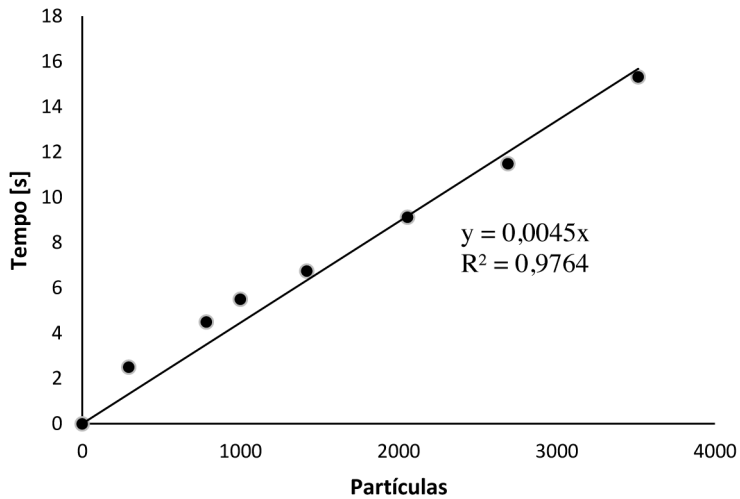


Gráfico 1 – Número de partículas versus o tempo de descarregamento nas simulações. Fonte: autoria própria.

Tabela 2 – Número e tamanho das esferas e o tempo de descarga nos testes com o silo de PVC. Fonte: autoria própria.

Número de esferas	Tempo (s)		
	4#	6#	8#
0	0,00	0,00	0,00
5000	5,25	1,79	0,58
10000	8,19	3,49	1,08
15000	15,76	5,29	1,57
20000	20,62	7,03	2,11
30000	-	9,49	2,99
40000	-	13,56	3,6
60000	-	-	5,63

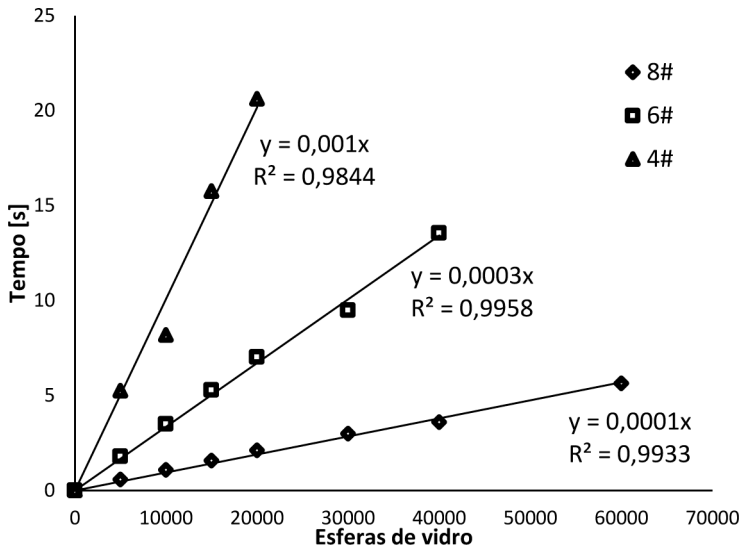


Gráfico 2 – Número de esferas de vidro versus o tempo de descarregamento nos testes com o silo de PVC. Fonte: autoria própria

O gráfico 3 apresenta os resultados encontrados nos testes realizados com o silo de garrafa PET e areia de quartzo. O coeficiente linear da reta e o tamanho das partículas decrescem juntos.

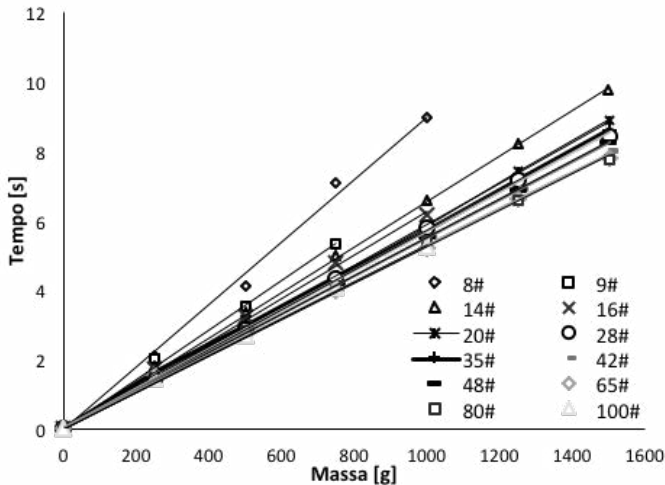


Gráfico 3 – Relação entre a massa e o tempo de descarregamento nos testes com areia de quartzo e garrafa PET. Fonte: autoria própria

O resultado das simulações e testes com areia e esferas de vidro mostraram que a variação entre o tempo de descarregamento e o número de partículas dentro do silo ocorre linearmente. O coeficiente linear desta variação depende de outras variáveis do sistema. Isto envolve algumas características das partículas como tamanho (a Figura 8 representa isto muito bem), rugosidade, esfericidade, entre outras, e da geometria do silo. A tabela 3 apresenta os respectivos coeficientes lineares e de variação das diferentes avaliações considerando o mesmo tamanho (8#).

Tabela 3 – Resultados dos ajustes lineares para os dados simulados e experimentais. Fonte: autoria

Índice	Simulação	Areia	Esfera de vidro
a	0,0045	0,009	0,0001
b	0	0	0
R <sup>2</sup>	0,9764	0,9946	0,9933

Como mostrado na tabela 3, o coeficiente linear da reta que representa os resultados da areia de quartzo é o dobro do simulado e 90 vezes maior que o coeficiente dos testes com esferas. Isto mostra a importância da geometria do silo, pois o silo modelado no Blender tinha a mesma geometria e dimensões que o silo de garrafa PET usado nos testes com areia de quartzo e isto aproximou o valor de ambos os coeficientes. A explicação sobre um ser o dobro com relação ao outro é a diferença entre a escoabilidade das partículas nos dois sistemas. As esferas modeladas tiveram um fator de forma igual a um e não existiu fricção entre elas, isto facilitou o fluxo e reduziu o tempo de descarga. A areia de quartzo é um material coesivo e a forma destas aproxima-se de uma esfera, porém com fator de forma desconhecido, além disso, esteve exposta e sujeita a alterações de umidade, por exemplo.

A maioria das esferas de vidro tinha fator de forma próximo a um e a fricção entre elas era desprezível, logo o fluxo ocorreu de forma mais rápida que com a areia, mas não necessariamente que o simulado. Isto mostra o quanto é importante a geometria do silo num sistema de fluxo de grãos. A tabela 4 apresenta a variação do tempo de descarregamento e o tamanho das partículas nas simulações, sendo apresentado no gráfico 4 o ajuste parabólico obtido para esferas de 8 mm de diâmetro. Desta forma, fica evidente que existe uma relação entre o tempo de descarregamento e o tamanho das partículas. Esta é representada por um ajuste polinomial de grau dois que demonstra o aumento significativo no tempo de escoamento quando aumenta-

se o tamanho das partículas, ou seja, existe um tamanho específico que impede o fluxo. A figura 5 representa a simulação em que o fluxo foi interrompido por arcos de tensões depois da última esfera cair.

Tabela 4 – Resultados simulados entre o tempo de descarregamento e tamanho de partícula. Fonte: autoria própria.

Tamanho	Tempo (s)	Nº de partículas	Inclinação da tremonha
5/16 # (8,00 mm)	120,43	500	60°
4# (4,76 mm)	29,58		
6# (3,36 mm)	12,08		
8# (2,38 mm)	6,50		
10# (2,00 mm)	4,58		
14# (1,41 mm)	2,83		

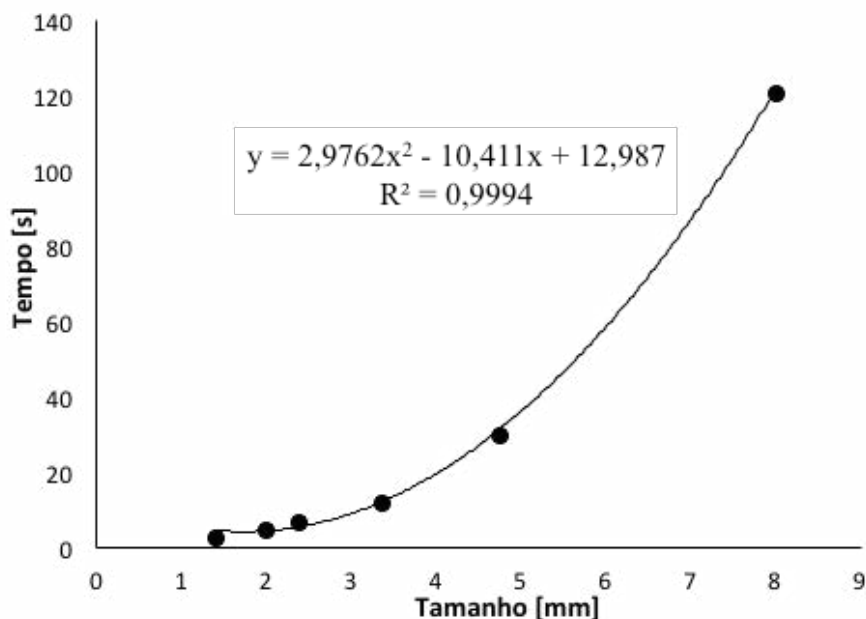


Gráfico 4 – Tamanho versus tempo de descarregamento para os dados simulados (esferas com 8 mm de diâmetro). Fonte: autoria própria.

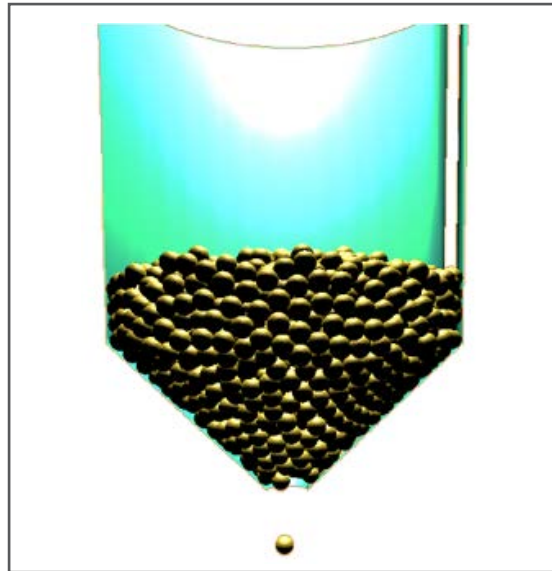


Figura 5 – Arco de tensões dentro do silo impedindo o fluxo granular.

Fonte: autoria própria.

Arcos de tensão ocorrem porque a compressão entre os grãos adquire força o suficiente para suportar o próprio pacote granular e impedir o fluxo. É recomendável utilizar um diâmetro igual ou maior que o tamanho da partícula multiplicado por oito para materiais sem coesão (Palma, 2005). O número máximo de esferas utilizado nas simulações (3514) não foi maior porque os arquivos gerados na simulação atingiram tamanho de até 1,6 GBytes, necessitando assim de grandes recursos computacionais para executar simulações com mais esferas.

Os resultados simulados encontrados entre o tempo de descarregamento do silo e a inclinação da tremonha são mostrados na tabela 5. O gráfico 5 apresenta a influência da inclinação da tremonha no descarregamento do silo, representada por um polinômio de 3º grau, onde o tempo máximo ocorre com a inclinação próxima a 90° e o mínimo em 0° (ou sem tremonha), sendo este ângulo medido entre o eixo longitudinal do silo e a parede da tremonha (vide figura 4).

Inclinação da tremonha (°)	Tempo (s)	Nº de partículas	Tamanho
0	0		
25	17,17		
45	29,17	500	4#
60	29,58		(4,76 mm)
75	32,83		

Tabela 5 – Resultados simulados para a variação inclinação da tremonha e o tempo de descarregamento. Fonte: autoria própria.

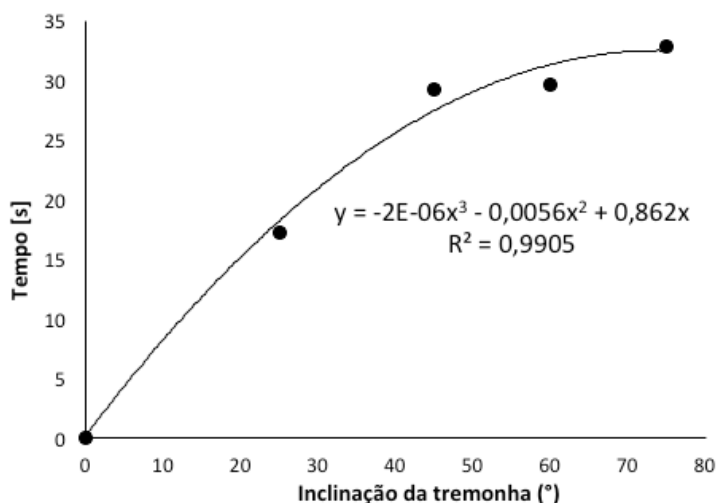


Gráfico 5 – Inclinação da tremonha versus tempo de descarregamento para os dados simulados. Fonte: autoria própria.

## 5. Conclusões

de acordo com as simulações e testes, a correlação entre a quantidade de partículas dentro do silo e o tempo de descarregamento é linear. O tamanho das partículas deve ser rigorosamente controlado junto com a geometria do silo para prevenir problemas com arcos de tensões e, conseqüentemente, obstrução do fluxo. As simulações mostraram isto muito bem. A correlação não-linear entre a inclinação da tremonha e o tempo de descarregamento mostrou que esta é uma variável

importante da geometria do silo.

Portanto, conclui-se que a previsão do tempo de descarregamento em silos depende de um conhecimento de alto nível das propriedades físicas das partículas, como esfericidade e coesão. Logo, o dimensionamento destes equipamentos visando a eliminação de arcos de tensão é um estudo profundo e não deve ser generalizado. Cada situação envolve particularidades decorrentes do manuseio do material que devem ser conhecidas. Assim, esta prevenção sempre irá requerer testes e, muitas vezes, o processo pode apresentar grandes diferenças entre o experimental e a realidade porque as condições de armazenamento, muitas vezes, não podem ser reproduzidas.

## **6. Agradecimentos**

Os autores agradecem ao apoio financeiro, imprescindível para o desenvolvimento do presente trabalho, das agências brasileiras de fomento à pesquisa CNPq, CAPES, FAPEG e FUNAPE e à Universidade Federal de Goiás, pelo apoio dado ao mesmo.

## Granular flow in silos

**Abstract:** The handling grains always need a storage that prevents the loss of materials and make easy the following operations, which often happen in silos or stoke piles. Some disadvantages occur, like the environmental exposure and the difficulty in feeding downstreams operations. The silos keep the particles in a closed volume and direct the flow during the discharge to an orifice, so it has been a very efficient alternative in the use of wispy grain and for subsequent handling. However, the knowledge about the properties of the particles like density, size, friction angle and attrition are important, because in combination with the silo geometry and the amount of grains may cause tension arcs in the outflow and stop it. The present work was developed to find relationships between the flow time and these variables. Using the modeling and 3D simulation software Blender, version 2.68, created by Blender Foundation with free access, and the methodology based on Computer Fluid Dynamics (CFD) tools. On simulations, it was noticed the importance of particles flow ability in the flow time, which is conditioned, mainly, by the grains size and angle of flow. The humidity and the time that the granular package had been in the silo before outflowed were undervalue, but can influence in the flow time.

**Keywords:** Granular flow; Silos; Computer simulation.

---

## Referências bibliográficas

ALLEN M. P., TILDESLEY, D. J. **Computer Simulation of Liquids**. New York: Oxford University Press, 1987. 408 p.

ARAÚJO, E.C. (1997) **Estudo Teórico e Experimental de Tremonhas Piramidais para Silos Metálicos Elevados**. 317p. Tese de Doutorado da Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. 1997.

CALIL Jr., C. (1990). **Recomendações de Fluxo e de Cargas para o Projeto de Silos Verticais**. Tese de Livre Docência. EESC - USP. 198 p.

DEGREZ, G. DEGROOTE, J., GRUNDMANN, R., VIERENDEELS, J., DICK, E., JUNIOR, J. D. A. **Computational Fluid Dynamics**. WENDT, J. F. (editor). Ed. Springer. P. 6-7. 2009.



FONTES, C. E., RIBEIRO JÚNIOR, C. P., RODRIGUES, R. C., SILVA, L. F. L. R. **Fluidodinâmica Aplicada a Processos Químicos. Programa de Engenharia Química.** UFRJ. Rio de Janeiro, 2004.

FREITAS E. G. **Estudo teórico e experimental das pressões em silos cilíndricos de baixa relação altura/diâmetro e fundo plano.** 175p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. 2001.

HERRMANN, H. J., LUDING, S. **Modeling granular media on the computer.** Continuum Mechanics and Thermodynamics, v. 10, n. 4, p. 189–231, 1998.

LANGSTON, P. A., TUZUN, U., HEYE, D. M. **Discrete element simulation of granular flow in 2d and 3d hoppers: dependence of discharge rate and wall stress on particle interactions.** Chemical Engineering Science, v. 50, n. 6, p. 967–987, 1995.

PALMA, G. **Pressões e Fluxo em Silos Esbeltos ( $h/d \geq 1,5$ ).** Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2005.

RAPAPORT, D. C. **The Art of Molecular Dynamics Simulation.** 2. ed., Cambridge: Cambridge University Press, 2004. 564 p.