

ANÁLISE DA DESCARGA EM SILOS BIDIMENSIONAIS COM INSERTOS POR MEIO DE FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL (CFD)

Felipe Leonardo Barcelos Mateus¹

felipe.lb.mateus@gmail.com

Irineu Petri Júnior²

irineu.junior@ufla.br

Resumo: O manuseio de materiais granulares está muito presente na indústria, compondo metade dos produtos da indústria química, sendo geralmente armazenadas em silos. Os silos apresentam desafios quanto à descarga, podendo apresentar zonas mortas que prejudicam o armazenamento. Para compreender o escoamento de partículas nos silos, o estudo realizado visou a obtenção, a partir de simulações por fluidodinâmica computacional (CFD), das vazões mássicas em silos com diferentes configurações de insertos: *no insert*, BINSERT®, BINSERT 6cm e *conical insert*, comparando os resultados com valores experimentais da literatura. Foi verificada a influência da altura de partículas, pressão atmosférica na saída do silo e dos coeficientes de restituição e especularidade. Foi realizada também uma análise do fluxo de partículas a partir de perfis de velocidade. Os resultados sem modificações de parâmetros foram satisfatórios para os silos de configuração *no insert*, enquanto modificações foram necessárias para as demais configurações. Observou-se alteração insignificante nas vazões em relação a altura e a pressão atmosférica. O aumento do coeficiente de especularidade resultou em menores vazões mássicas, e o mesmo foi observado para o coeficiente de restituição. Constatou-se, assim, que entre os parâmetros analisados, os coeficientes podem ser ajustados para se obter convergência satisfatória. O fluxo de partículas se aproximou ao mass flow apenas nas configurações BINSERT 6cm e *conical insert*, as quais se dão como boas adições estruturais para o silo.

Palavras-chaves: Material Granular; Silagem; Simulação.

ANALYSIS OF THE DISCHARGE IN BIDIMENSIONAL SILOS WITH INSERTS THROUGH THE USE OF COMPUTER FLUIDYNAMICS (CFD)

Abstract: The use of granular materials is present in the industry, making up half of the products of the chemical industry, usually stored in silos. Silos present challenges regarding discharge, and might display dead zones, which can harm the storage. To comprehend the particle flow inside silos, this study aimed at the CFD simulation of the mass flow in silos with different inserts: *no insert*, BINSERT®, BINSERT 6cm and *conical insert*, comparing the results with experimental data obtained in the literature. The influence of particle height, atmospheric pressure on the outlet, and the restitution and specularity coefficients were observed. An analysis of the particle flow inside the silo through velocity profiles was also made. For the simulations with no modifications on the parameters, the results were adequate for the *no insert*

1 Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Lavras.

2 Doutor em Engenharia Química, Universidade Federal de Lavras.

configuration, while modifications were necessary for the other inserts. The results weren't affected significantly by changes in the particle height and atmospheric pressure. Raising the specular coefficient resulted in lower mass flows, and the same was observed for changes in the restitution coefficient. It was stated that the value of the coefficients could be adjusted for a proper numeric convergence. The discharge flow of particles was considered as mass flow only with the BINSERT 6cm and conical insert configurations, which are suitable structural additions for the silo.

Keywords: Granular Material; Silage; Simulation.

INTRODUÇÃO

O manuseio de materiais granulares tem grande importância em indústrias químicas. Pois, aproximadamente metade dos produtos e cerca de três quartos da matéria prima utilizada na indústria química são encontrados na forma de materiais granulares que são geralmente armazenados em silos (NEDDERMAN, 1992). Os materiais granulares são muito presentes também na agricultura, onde safras constituem-se de grãos (arroz, feijão, café, etc.), e os silos são utilizados para melhor manejo do produtor quanto a problemas de logística e armazenamento. Esse armazenamento dos grãos em silos nas fazendas garante que o produtor possa esperar o melhor momento para entregar o produto, evitando o transporte na época de safra, momento em que o frete fica inflacionado. (SCALABRIN, 2008).

A dinâmica dos produtos sólidos armazenáveis tem grande importância dentro dos processos industriais, e ainda, exerce influência em fatores como produtividade, eficiência e segurança. Com o acréscimo em quantidade e variedade de produtos sólidos armazenáveis produzidos pela indústria, existe a necessidade de informações quanto às suas características para manuseio e processamento (SCHUBERT, 1987).

A ocorrência de obstruções no fluxo ou até mesmo sua completa ausência são problemas enfrentados pelas indústrias que manuseiam produtos pulverulentos, sejam eles orgânicos ou minerais (NETO et al., 2007). O modo como o produto fluirá por gravidade em um silo é governado, por um lado, pelas propriedades de fluxo do produto e, por outro lado, pela geometria e estrutura da superfície da tremonha (NÓBREGA, 2003).

Desta forma, são estudadas formas de otimizar o fluxo das partículas armazenadas a partir de modificações no sistema. Uma delas é a utilização de insertos na geometria do silo, paredes adicionais inseridas de forma estratégica no interior do silo para reduzir a tensão nas paredes e homogeneizar a descarga de material, reduzindo ao máximo as chamadas "zonas mortas", regiões onde o material granular fica estagnado durante o fluxo de partículas comprometendo a descarga. O fluxo ideal é chamado *mass flow*, onde todo o material granular escoar sem criação de zonas mortas. Um estudo desses fluxos bem como a influência dos insertos na taxa de descarga e nas tensões nas paredes dos silos foi realizado por Yang e Hsiau (2001), e algumas de suas análises experimentais serão utilizadas neste trabalho.

OBJETIVO

Este trabalho tem por objetivo principal o estudo, via fluidodinâmica computacional (*Computational Fluid Dynamics* - CFD), da operação de descarga em silos bidimensionais de diferentes geometrias, analisando a influência de insertos e da geometria utilizada na descarga do material granular. Utilizando para isso o modelo Euleriano Granular Multifásicos presente no *software* Ansys FLUENT® para a simulação do comportamento do material granular e validando a técnica por meio de dados experimentais de Yang e Hsiau (2001).

Serão estudadas a vazão mássica de dois silos sem insertos com diferentes geometrias e três silos de diferentes insertos, sendo essas configurações BINSERT[®], BINSERT 6cm e *conical insert*, as mesmas utilizadas por Yang e Hsiau (2001). Serão feitas também alterações nos parâmetros de simulação: altura de partículas no silo, pressão na saída do silo, coeficientes de especularidade e de restituição. Observando a influência de tais parâmetros na vazão mássica na saída dos silos. Pretende-se também analisar o comportamento de fluxo do particulado no interior dos silos, determinando o tipo de escoamento no interior deles, classificados como tipo *mass flow* e *funnel flow*, afim de compreender quais das configurações de insertos se mostra mais eficiente em dinamizar o escoamento e evitar zonas mortas dentro do equipamento.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Fluidodinâmica Computacional (CFD)

O estudo das dinâmicas e propriedades dos fluidos existe há vários séculos, dada sua relevância para a compreensão de processos e fenômenos da natureza. Historicamente, o estudo dos fluidos acontecia de forma majoritariamente experimental, considerando as limitações da época, e a descrição matemática concreta dos conceitos da fluidodinâmica só foram descritos no século XIX, com as equações de Navier-Stokes. No entanto, as equações de Navier-Stokes só conseguem apresentar soluções analíticas a um sistema em casos muito específicos e limitados, próximos a idealidade. Sistemas reais apresentam condições de contorno generalizadas, entre outras complicações que dificultam a utilização das equações, uma vez que resultam em problemas complexos nos quais a matemática atual não é capaz de resolver. Desta forma, para problemas complexos de sistemas reais, a solução numérica se encontra como uma alternativa (LIMA, 2005).

O método numérico para a resolução de problemas de fluidodinâmica pode ser dividido, pela nomenclatura do método dos elementos finitos, em três etapas: pré-processamento, processamento e pós-processamento. O pré-processamento é de suma importância por influenciar diretamente na precisão e no tempo de simulação, e se dá pela representação geométrica do domínio e a discretização do mesmo a partir da construção da geometria e, por seguinte, da malha do sistema. Para a etapa de construção geométrica, os principais *softwares* utilizados são: SpaceClaim, DesignModeler, Gambit e SolidWorks. Já no caso da construção da malha, os mais utilizados são Meshing, ICEM e Gambit (SANTOS, 2011).

Na fase de processamento, são utilizados os *solvers*, que são *softwares* que utilizam de métodos numéricos para obter grandezas de interesse num sistema a partir de determinadas condições iniciais e de referência. Tais condições são definidas tanto na etapa de pré-processamento quanto no processamento. Os principais *softwares* utilizados são o FLUENT[®] e o CFX[®], ambos pertencentes ao pacote computacional da Ansys. Por fim, na fase de pós-processamento, os dados obtidos na fase de processamento são analisados e comparados com dados empíricos para a validação do método utilizado.

Modelos Multifásicos

Um escoamento é dado como multifásico quando o movimento médio de um determinado material é distinto dos demais que compõem o escoamento, resultando em interações características que influenciam no comportamento do fluido. Muitos escoamentos presentes na natureza e na indústria apresentam este

comportamento multifásico e, por isso, com os avanços na fluidodinâmica computacional, alguns modelos surgiram de forma a reproduzir o comportamento apresentado pelos escoamentos multifásicos.

Para o modelamento de sistemas bifásicos, duas abordagens são normalmente encontradas: abordagem Euler-Lagrange (modelos Lagrangeanos) e abordagem Euler-Euler (modelos Eulerianos). A aproximação Lagrangeana utiliza das equações médias de Navier-Stokes aplicadas à fase fluida separadamente da fase chamada dispersa, que ocupa a menor fração volumétrica no problema. Após aplicadas as equações para a fase fluida, a fase dispersa é inserida no campo de velocidades calculado. A aproximação supõe que, devido à baixa concentração da fase dispersa, suas interações causam perturbações insignificantes à fase fluida e, por isso, os cálculos de escoamento para esta podem ser realizados separadamente (SANTOS, 2011).

A aproximação Euleriana utiliza da consideração de que todas as fases são fluidas, e estas se interpenetram. Tal consideração tem como consequência a inserção de frações volumétricas no problema, onde cada fase possui uma fração volumétrica e as equações de balanço e de transporte são aplicadas nesta fração separadamente para cada fase. O *software* Ansys FLUENT® apresenta três modelos multifásicos distintos que seguem a aproximação Euleriana, sendo estes: Modelo Volume de Fluido (VOF), Modelo de Mistura e Modelo Euleriano.

Dentro de todos os modelos Eulerianos, destaca-se a Modelagem Euleriana Granular Multifásica. Este modelo é bastante difundido na literatura como um ótimo modelo para sistemas particulados como leitos de jorro e leitos fluidizados. Sendo considerado o mais complexo entre os modelos Eulerianos, ele se baseia na resolução de equações de momento e continuidade definidas de acordo com o número de fases do sistema (VIEIRA, 2006).

Em trabalhos anteriores, a Modelagem Euleriana Granular Multifásica, também chamado de maneira mais geral de Modelo Euleriano, foi utilizado por WANG et al.(2009) para a simulação de leitos de jorro cônicos e cilíndricos. Os resultados mostraram-se convergentes aos resultados experimentais, e o método permitiu a previsão da queda de pressão, velocidade local e comportamento do fluxo no equipamento. Outros autores adotaram este método para a modelagem de sistemas particulados, como DUARTE *et al.*(2009), DAN *et al.*(2010) e SZAFRAN e KMIEC (2004). (SANTOS, 2011).

Um parâmetro importante em simulações de materiais granulares imersos em um fluido é a força de arraste, relacionada às interações entre o particulado e o fluido. O *software* FLUENT® apresenta diversos métodos para a simulação deste parâmetro. O método utilizado neste trabalho é o apresentado por GIDASPOW (1994). O modelo de força de arraste de Gidaspow também se mostra eficaz em representar sistemas bifásicos fluido-granulares assim como estudado por DU *et al.* (2006).

Coefficientes de Restituição e Especularidade

Dentro da modelagem multifásica, existem parâmetros e modelos para a simulação das interações entre as fases do sistema. Um desses parâmetros é o coeficiente de restituição, que representa o grau de elasticidade das colisões entre as partículas com um valor entre 0 e 1, sendo o valor de 1 representativo da colisão perfeitamente elástica e 0 perfeitamente inelástica. Este mostra-se um parâmetro de significativo efeito na estimativa das propriedades dos fluidos, contudo, é raramente mensurado experimentalmente, sendo geralmente tomado com um parâmetro ajustável. De acordo com (LOHA, et al., 2014), analisando as velocidades de partículas em um leito fluidizado, o aumento do coeficiente de restituição acarretou em uma redução das velocidades.

Outro parâmetro passível de análise para a simulação adequada do escoamento de material granular em silos é o coeficiente de especularidade, associado ao arraste das partículas nas regiões de contorno ou paredes, isto é, à condição de deslizamento do particulado. Este se dá por um valor de zero a um, sendo o valor de zero representativo da condição de não deslizamento. (DU et al., 2006), em seu estudo de simulações CFD de leitos fluidizados, concluiu que o coeficiente de especularidade pouco influenciava nos resultados obtidos, e tomou-o pelo seu valor unitário padrão.

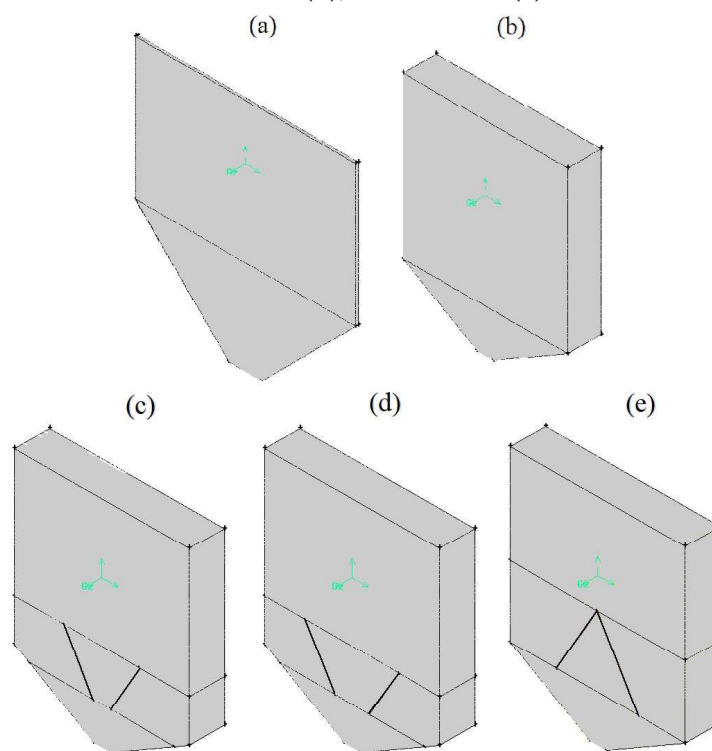
METODOLOGIA NUMÉRICA

Pré-processamento

Para o cálculo da solução numérica foi gerada uma malha computacional da geometria do problema de forma a discretizar o sistema em volumes finitos. As confecções das malhas utilizadas foram realizadas no *software* comercial GAMBIT® versão 2.3.16.

No ambiente GAMBIT® foram construídas cinco geometrias e malhas tridimensionais, cada uma representando um dos silos estudados, são elas: geometria sem insertos (*no insert*), com insertos afunilados (BINSERT® e BINSERT 6cm) e de insertos cônico (*conical insert*). O silo sem insertos foi utilizado em duas diferentes situações, com diferentes geometrias. De forma a diferenciá-los, denominou-se de *no insert 1s* o silo utilizado para a validação numérica inicial, e *no insert 7,5s* para os demais testes, assim como será explicitado futuramente nesta metodologia. As geometrias dos silos podem ser observadas na Figura 1.

Figura 1 – Geometrias computacionais para silos *no insert 1s* (a) e *no insert 7.5s* (b), BINSERT® (c), BINSERT 6cm (d), *conical insert* (e)



Fonte: Autoria própria (2020).

Os silos estudados foram confeccionados de acordo com o exposto por Yang e Hsiau (2001) em seu estudo, utilizando o mesmo dimensionamento e angulação para cada tipo de silo. No trabalho de referência, a espessura dos silos bidimensionais, com exceção do silo *no insert 1s*, não foi relatada, apenas as demais dimensões. Assim como será elucidado nos resultados, malhas com diferentes espessuras variaram consideravelmente a vazão mássica de descarga dos silos. Desta forma, a espessura para os silos *no insert 7,5s*, BINSERT®, BINSERT 6cm e *conical insert* foi normalizada a partir dos dados experimentais e de simulações preliminares feitas no silo *no insert 7,5s*. Como resultado ótimo, uma espessura de 6 cm foi padronizada para os quatro silos.

A geometria do sistema foi construída de forma a melhor receber uma malha regular, isto é, uma malha constituída por figuras hexaédricas – definida no *software* GAMBIT® como malha hexaédrica do tipo mapeável.

A malha foi definida de forma a discretizar a geometria em um número definido de células. O número de células de cada malha foi otimizado, de forma a obter simulações rápidas e representativas, simultaneamente.

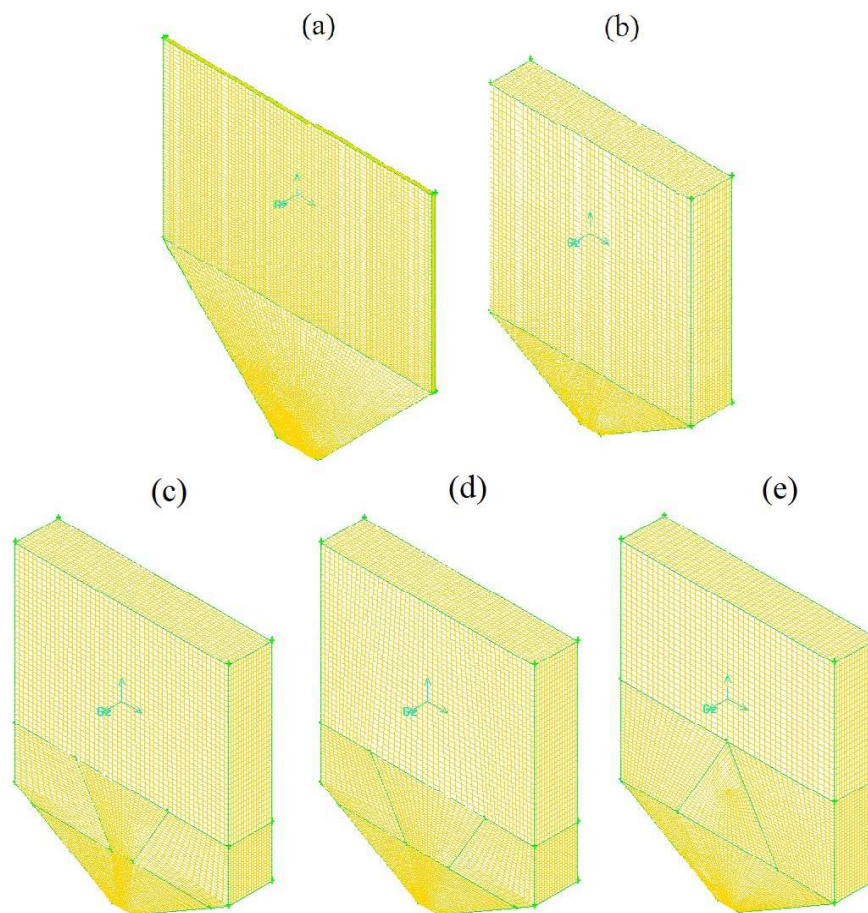
Dada a geometria simples e regular dos silos bidimensionais, a construção da malha sob a geometria construída era facilitada. No caso do silo de inserto tipo *conical*, entretanto, foi necessária a utilização de malha tetraédrica na região interior do inserto, devido a forma triangular do inserto utilizado. Contudo, não há comprometimento ao cálculo numérico do problema, uma vez que esta mesma região interage pouco com o material granular em escoamento.

Uma alternativa para otimizar o tempo de simulação foi a utilização de uma malha 2D. A simulação se deu consideravelmente rápida, entretanto o modelo 2D mostrou-se incapaz de representar o sistema bem o suficiente para obter-se resultados coerentes com os experimentais. Isso era previsto dada a natureza do problema em questão. A utilização de malhas 2D é mais eficiente para problemas simétricos, onde a representação 2D não afeta de forma significativa os resultados da simulação por não dependerem de um dos eixos. Para o estudo dos silos, no entanto, por envolverem escoamento multifásico com material granular compactado em constante interação, a utilização de malhas 2D negligenciaria variáveis importantes do problema. Assim, a partir de uma malha tridimensional inicial de 300 mil células foram obtidas malhas com um número de células cada vez menor, visando otimizar o tempo de simulação, porém mantendo a confiabilidade da simulação como representativa a partir de testes na etapa de processamento.

O número de células das malhas utilizadas neste trabalho foi em torno de 80 mil células, com exceção da malha para o silo *conical insert*, devido a já mencionada malha tetraédrica utilizada no interior do inserto, que pouco impactou na velocidade da simulação.

Para a realização das simulações dos silos, foram utilizadas as classificações de zonas *wall*, *pressure outlet* e *interior*. *Wall* se refere a faces ou volumes que são tomados como sólidos, onde a passagem de fluido é bloqueada. *Pressure outlets* caracterizam as faces onde há saída de material e *interior* são os volumes considerados como interiores do sistema. As malhas computacionais tridimensionais confeccionadas dos silos *no insert 1s*, *no insert 7,5s*, BINSERT®, BINSERT 6cm e *conical insert* estão expostos na Figura 2.

Figura 2 – Malhas computacionais para silos *no insert 1s* (a), *no insert 7,5s* (b), BINSERT® (c), BINSERT 6cm (d) e *conical insert* (e)



Fonte: Autoria própria (2020)

Processamento

Na etapa de processamento, as geometrias e malhas foram carregadas para a realização dos cálculos numéricos pelo *software* FLUENT®. O *software* FLUENT® 19.2 pertence ao pacote ANSYS, e a versão utilizada foi a 19.2 *Teaching License*.

O escoamento dentro dos silos é constituído de duas fases, o ar e o material granular. Assim como descrito anteriormente, para a simulação do sistema bifásico foi utilizado o modelo Euleriano. As condições iniciais, bem como as condições de contorno configuradas nas simulações estão representadas na Tabela 1.

O valor de pressão, posicionado no centro da área de descarga de cada silo, foi usado como referência para o problema e é equivalente à pressão atmosférica do nível do mar, uma vez que a localização exata dos valores experimentais obtidos não é especificada no trabalho de Yang e Hsiau (2001). Os fatores de relaxação foram configurados de acordo com o recomendado para problemas transientes.

Tabela 1 – Condições iniciais e de contorno

• Simulação 3D	
• Regime Transiente	
• Saída: Pressão atmosférica (101325 Pa)	
• Método de discretização da Pressão: PRESTO! (Petri et al, 2009)	
• Coeficiente de interação fluido-sólido: Gidaspow	
• Fatores de relaxação (Petri et al, 2009)	Pressure = 0.3 Density = 1 Body Force = 1 Momentum = 0,1
• Critério de Convergência = 10^{-3}	
• Time Step Size (s) = 10^{-5} a 10^{-4}	

Fonte: Autoria própria (2020)

O critério de convergência representa o valor máximo de valor residual das iterações numéricas a ser tolerado. No caso dos silos, o valor residual da continuidade costuma ser relativamente alto ou instável, devido ao escape constante de matéria dentro de um sistema sem alimentação de material. A utilização do valor 10^{-3} apresentou-se um valor rígido o suficiente para garantir representatividade. O *Time-step Size* determina o intervalo numérico no qual a solução é calculada. Valores altos deste parâmetro levam a resultados menos precisos e com mais resíduos. O valor inicial utilizado para o parâmetro em questão foi de 10^{-5} , e durante as simulações, seu valor limite foi de 10^{-4} .

Configuradas as simulações, foram simulados 1 segundo de escoamento de material granular com o silo *no insert 1s*, de forma a verificar a representatividade dos métodos e dos modelos utilizados. Em seguida, foram realizadas simulações testes de 1 segundo de duração no *no insert 7,5s* com diferentes espessuras para a normalização da espessura.

Um parâmetro necessário para o estudo do escoamento das partículas dentro do silo é o da altura de partículas no interior do silo. A altura utilizada na metodologia experimental por Yang e Hsiau (2001) não foi explicitada. Desta forma, afim de observar a influência deste parâmetro nos resultados utilizou-se alturas de 15 e 23,75 cm para o silo *no insert 7,5s*, testadas em duas simulações adicionais. Para os demais silos foi utilizada a altura de 23,75 cm.

Em seguida foram realizadas simulações teste para a verificação da influência do número de células da malha nos resultados. Utilizando a mesma geometria, foram executadas simulações de 2,5 segundos nos quatro silos (*no insert 7,5s*, BINSERT[®], BINSERT 6cm e *conical insert*) com malhas computacionais de 300 mil (malha refinada) e 80 mil células (malha simplificada), aproximadamente.

A pressão na saída do silo também foi testada. Além da pressão atmosférica de 101325 Pa, também foi utilizada uma pressão atmosférica na saída de 99425 Pa. Sua influência foi testada no silo *no insert 7,5s* em simulações de 3 segundos. A pressão atmosférica de 101325 foi a utilizada em todas outras simulações.

Posteriormente, foram reproduzidas simulações de 7,5 segundos para os quatro silos de diferentes insertos, assim como realizado experimentalmente por Yang e Hsiau (2001). Os resultados de vazão encontrados ao longo do tempo foram comparados com os resultados experimentais, e conferida a validade da simulação, foram também comparados entre si, para verificar a eficiência dos insertos em otimizar o escoamento de material granular dentro dos silos.

Em seguida, foram realizadas simulações com o objetivo de analisar o comportamento da vazão mássica em relação a mudanças no coeficiente de especularidade e restituição. Adotando valores para o coeficiente de especularidade em zero e um, a configuração foi testada em simulações para todos os quatros tipos de insertos. O mesmo foi realizado para o coeficiente de restituição, nos valores de 0,9, 0,95 e 0,99 e uma simulação adicional com valor de 0,8 para o silo de configuração BINSERT*.

Para a análise do fluxo de partículas ao longo do silo a partir de perfis de velocidade em diferentes alturas do silo, foi necessário um aumento da altura de partículas para 27 cm dentro do silo para um escopo ampliado de dados de velocidade. É importante notar que este aumento é limitado, uma vez que influencia diretamente na convergência do problema devido ao peso computacional adicionado pelo maior número de equações a serem resolvidas.

Assim como analisado por Yang e Hsiau (2001), nesta etapa o comportamento do escoamento do material granular no interior do silo foi estudado de forma a ser caracterizado como um fluxo *massflow* (onde as velocidades de queda das partículas ao longo do comprimento do silo se mantém razoavelmente uniformes) ou *funnel flow* (fluxo afunilado com escoamento preferencial, causando zonas mortas no equipamento).

Desta forma, utilizando uma altura de partículas de 27 cm para todas as configurações de silos, cerca de 2.5 segundos foram simulados e perfis de velocidade no eixo vertical em função do comprimento horizontal dos silos foram obtidos nas alturas de 0,0625, 0,115, 0,155, 0,195, 0,225 e 0,2625 m.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Validação das malhas computacionais

Para a realização de simulações é importante, assim como foi salientado, a determinação do número de células mínimo de forma a garantir resultados representativos em um tempo reduzido de uso computacional. Com isso, buscou-se a confecção de malhas otimizadas para que fosse possível a realização de todas as simulações em tempo hábil. O número de células das malhas otimizadas que foram utilizadas ao longo do trabalho pode ser observado na Tabela 2.

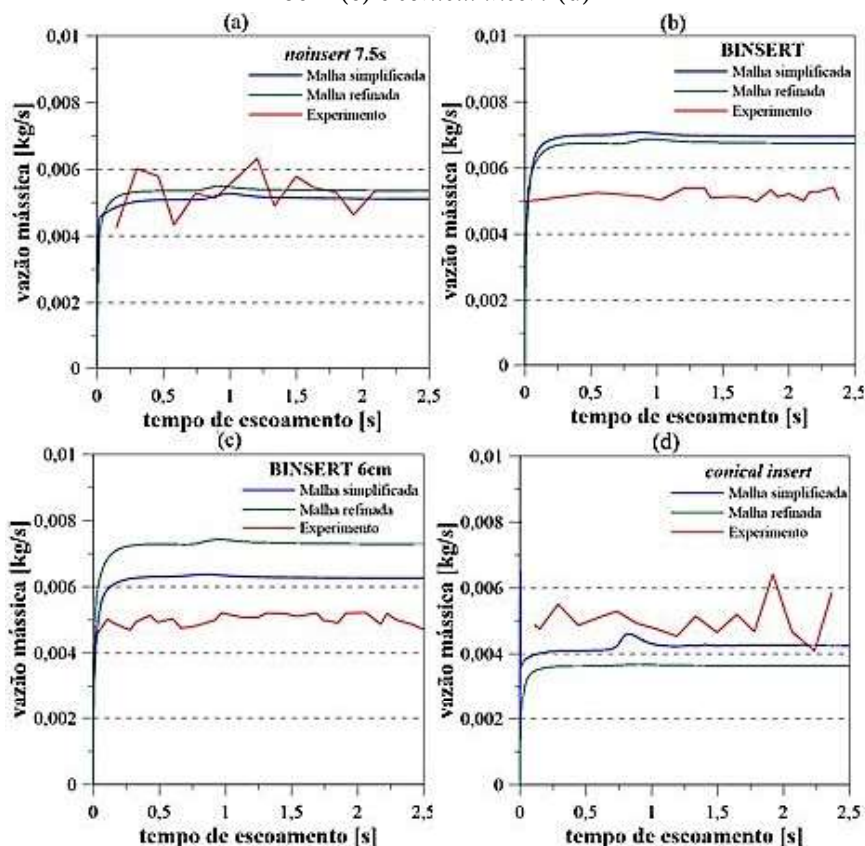
Tabela 2 – Número de células das malhas utilizadas

Silo	Nº de Células
<i>no insert</i> (1s)	68.796
<i>no insert</i> (7.5s)	79.968
BINSERT*	79.968
BINSERT 6cm	79.968
<i>conical insert</i>	95.752

Fonte: Autoria própria (2020)

De forma a melhor ilustrar a eficiência das malhas otimizadas, a Figura 3 apresenta e compara as vazões obtidas com as simulações utilizando ambas malhas, a refinada (~300 mil células) e a simplificada (~80 mil células). Há variações nos resultados, onde a malha refinada apresentou maiores vazões nos silos *no insert* 7,5s e BINSERT 6cm, e menores vazões nos demais. Contudo, esta diferença foi significativa apenas para o silo de configuração BINSERT 6cm, e dada a quantidade de simulações a serem realizadas, optou-se pelas malhas simplificadas para o prosseguimento do trabalho.

Figura 3 – Vazões mássicas das malhas refinadas e otimizadas para *no insert* (a), BINSERT[®] (b), BINSERT 6cm (c) e *conical insert* (d)



Fonte: Autoria própria (2020)

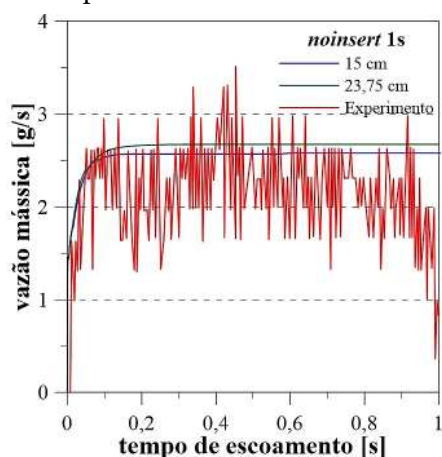
Validação da altura das partículas, espessura do silo e pressão atmosférica de descarga

A influência da altura de partículas pode ser observada a partir dos resultados das simulações utilizando as alturas de 15 e 23,75 cm, que foram comparadas aos dados experimentais na Figura 4.

A diferença de aproximadamente oito centímetros na altura de partículas foi o suficiente para alterar de forma não significativa os resultados de vazão mássica no silo *no insert 1s*. Entretanto, é importante notar que, em um equipamento de escala real, mudanças significativas de altura apresentariam variações igualmente significativas que devem ser transcritas com precisão para a configuração da simulação.

Os valores de vazão mássica se estabilizaram rapidamente em menos de 0,2 segundos de simulação, e o valor obtido foi convergente para com o obtido experimentalmente. Tais resultados indicam, inicialmente, que o método numérico e a malha utilizada foram boas aproximando os resultados simulados aos do problema real.

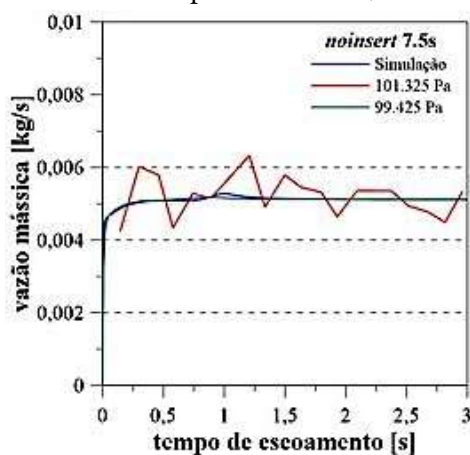
Com a validação preliminar do método pela convergência do silo *no insert 1s*, em seguida, foi realizada a normalização da espessura dos silos *no insert 7,5s*, BINSERT[®], BINSERT 6cm e *conical insert*.

Figura 4 – Vazões mássicas para *no insert* 1s com diferentes alturas de partículas

Fonte: Autoria própria (2020)

Como resultado obtido, as vazões mássicas de descarte para as espessuras de silo de 2 e 5 cm foram de 0.000932 e 0.003901 kg/s, respectivamente. O aumento da espessura, por aumentar conjuntamente a área de descarga do silo, decorreu no aumento significativo das vazões mássicas. Realizando a normalização, foi realizada novas simulações com uma espessura de 6 cm, onde foi possível obter resultados de vazão (0,002355 kg/s) semelhantes ao experimental (0,002692 kg/s). A espessura foi utilizada também para os silos de configuração BINSERT®, BINSERT 6cm e *conical insert*.

A pressão atmosférica na saída do silo foi alterada, e a influência desta mudança nos resultados de vazão mássica pode ser observada na Figura 5.

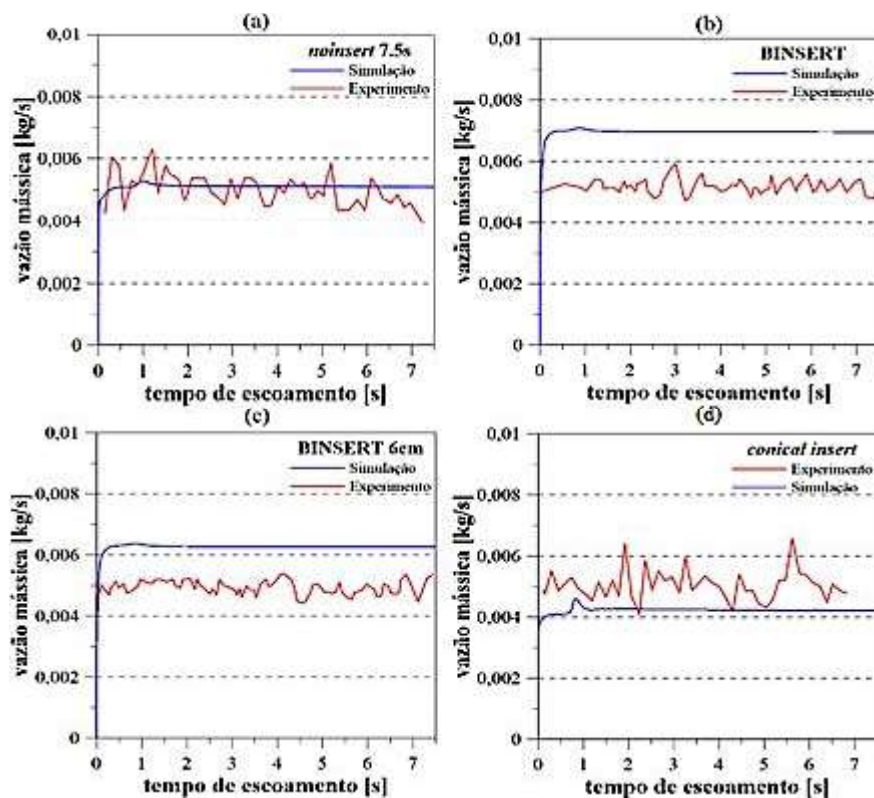
Figura 5 – Resultados de vazão mássica para *no insert* 7,5s de diferentes pressões de saída

Fonte: Autoria própria (2020)

Pela Figura 5, pode-se constatar uma redução de aproximadamente 2000 Pa apresentou vazões mássicas muito similares, o que estabelece a pressão atmosférica na saída do silo como um parâmetro de menor significância para ajustes em casos de divergência.

Utilizando os resultados ótimos obtidos, altura de partículas de 27,25, espessura de 6cm e pressão atmosférica na saída de 101325, foram realizadas simulações dos silos *no insert* 7,5s, BINSERT®, BINSERT 6cm e *conical insert* e os resultados de vazão mássica estão apresentados na Figura 6.

Figura 6 – Resultados de vazão mássica para *no insert* 7.5s (a), BINSERT® (b), BINSERT 6cm (c), *conical insert* (d).



Fonte: Autoria própria (2020)

Pela Figura 6, observa-se que como consequência da normalização e da validação realizada no silo *no insert* 1s, os resultados para o *no insert* 7,5s foram satisfatoriamente convergentes com os dados experimentais. A vazão mássica para os silos de configuração BINSERT® e BINSERT 6cm foi superestimada, enquanto para o de configuração *conical insert*, a vazão foi subestimada.

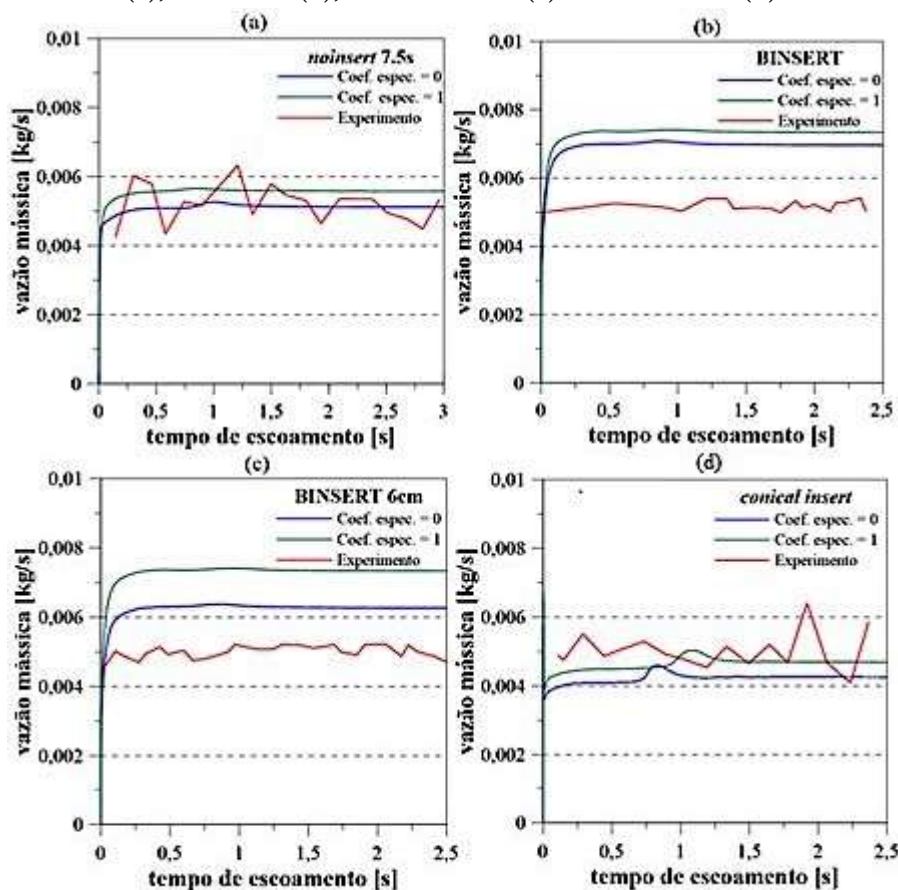
Para elucidar os resultados obtidos, foi elaborada a hipótese de inadequação ao sistema de valores dos parâmetros de simulação adotados, bem como parâmetros não utilizados ou tomados como nulos. É possível argumentar que a pressão não foi fator significativo para os desvios encontrados, considerando o exposto anteriormente, e posto que a pressão utilizada para todos os silos, incluindo o silo *no insert* 1s, foi a mesma.

Uma vez que somente silos com insertos – isto é, silos com paredes adicionais no problema – apresentaram vazões mássicas divergentes, é razoável a suposição de que uma propriedade relacionada às interações partícula-parede seja uma das possíveis fontes de erro da simulação. Assim, o comportamento da vazão mássica foi analisado para diferentes coeficientes de restituição e especularidade.

Influência dos coeficientes de restituição e especularidade no escoamento

Os resultados de vazão mássica para os quatros silos com a modificação no coeficiente de especularidade e valores experimentais são mostrados na Figura 7.

Figura 7 – Resultados de vazão mássica com diferentes coeficientes de especularidade para *no insert* 7,5s (a), BINSERT[®] (b), BINSERT 6cm (c) e *conical insert* (d).



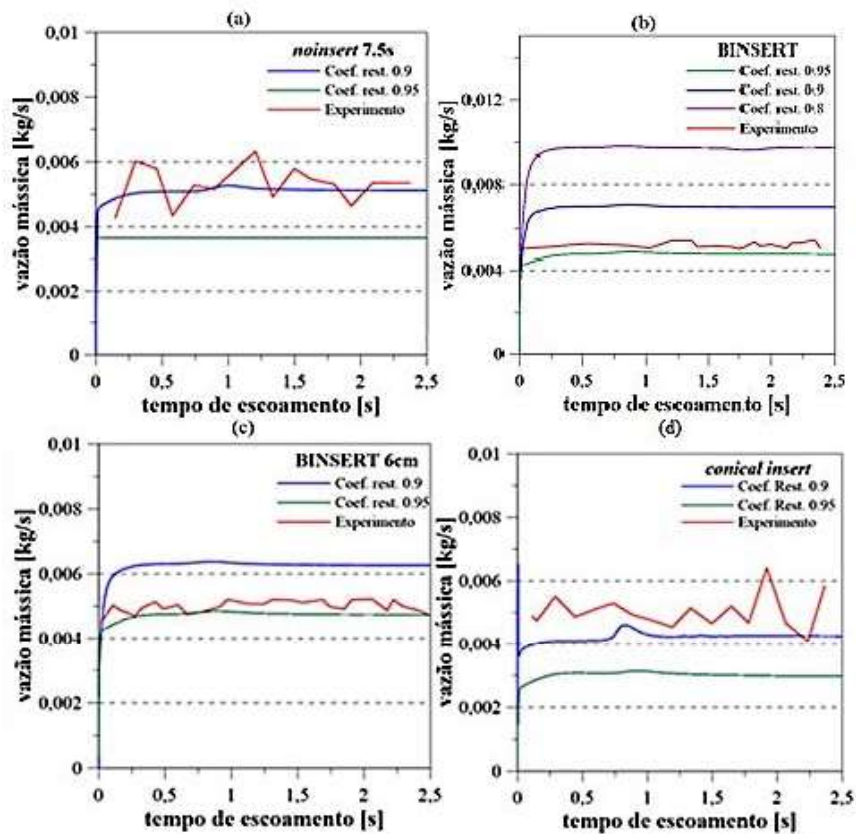
Fonte: Autoria própria (2020)

Pela Figura 7 é possível observar alteração nos valores de vazão mássica com a alteração no coeficiente de especularidade. Com a remoção da condição de não deslizamento (coeficiente de especularidade = 1), a vazão mássica total aumentou em todos os silos estudados, principalmente para o silo de configuração BINSERT 6cm. A mudança no coeficiente de especularidade auxiliou na convergência do silo de configuração *conical*, entretanto, comprometeu ainda mais a convergência nos silos de configuração BINSERT[®] e BINSERT 6cm. Não obstante, é importante assinalar a influência da mudança do coeficiente de especularidade nos resultados obtidos, mostrando-se uma variável importante neste tipo de sistema.

Como alternativa, foi analisado também a influência do coeficiente de restituição na vazão mássica dos quatro silos. Em testes iniciais, observou-se uma grande variação no comportamento do escoamento para pequenas variações no coeficiente de restituição. Os resultados de vazão mássica da simulação para o coeficiente de restituição de valor 0,99 mostrou-se demasiadamente divergente, e de difícil convergência numérica. Desta forma, seu comportamento não será relatado neste trabalho. O comportamento da vazão mássica para os outros valores pode ser observado na Figura 8.

Como é possível observar pela Figura 8, a redução do coeficiente de restituição acarreta no aumento significativo da vazão mássica. Percebeu-se uma maior convergência para os silos de configuração BINSERT[®] e BINSERT 6cm, entretanto, observou-se uma divergência considerável para o silo de configuração *conical insert* e uma moderada para o de configuração *no insert*. Ainda assim, o comportamento da vazão mássica com a alteração do parâmetro mostrou-se muito importante para previsão numérica da descarga de silos

Figura 8 – Resultados de vazão mássica com diferentes coeficientes de restituição para silo *no insert* 7,5s (a), BINSERT[®] (b), BINSERT 6cm (c), *conical insert* (d).

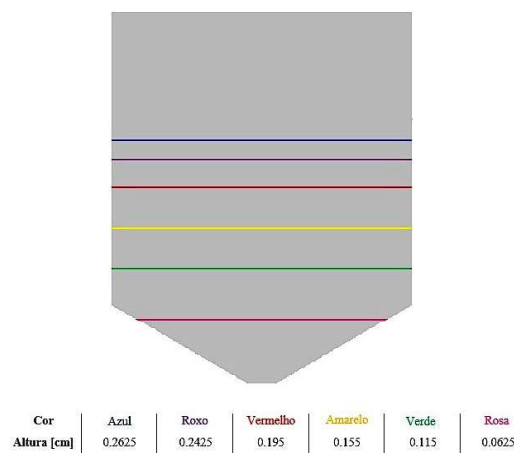


Fonte: Autoria própria (2020)

Análise do fluxo de partículas

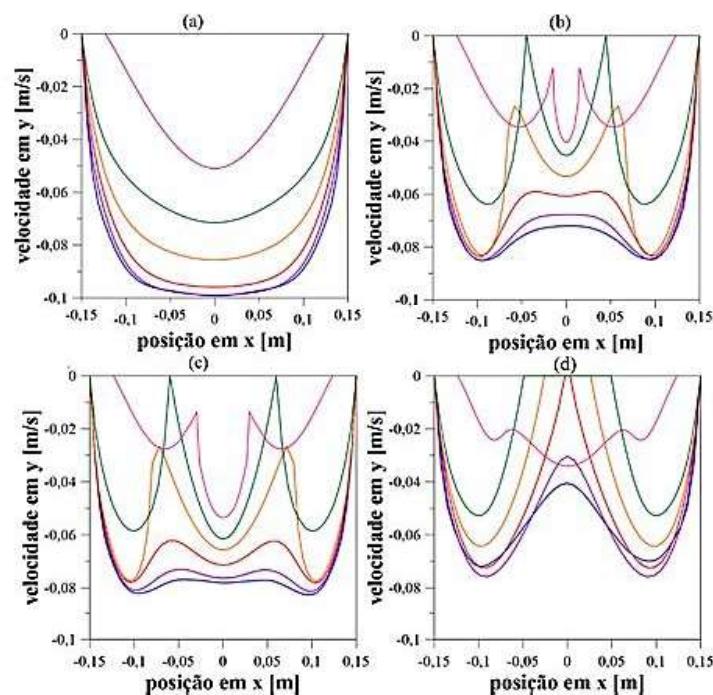
Utilizando uma altura de partículas de 27 cm, os perfis de velocidade para cada um dos quatro silos de diferentes configurações de inserto ao fim de simulações de 7 segundos foram obtidos. Uma legenda especificando as alturas nas quais cada linha dos gráficos foi obtida, bem como uma representação destas alturas demarcadas em um silo modelo está apresentada na Figura 9. Os perfis de velocidade para cada silo podem ser observados na Figura 10.

Figura 9 – Alturas dos perfis de velocidade obtidos



Fonte: Autoria própria (2020)

Figura 10 – Perfis de velocidade para silo de configuração *noinsert* (a), BINSERT® (b), BINSERT 6cm (c), *conical insert* (d)



Fonte: Autoria própria (2020)

Comparando os resultados obtidos, na Figura 10, para as quatro configurações, é possível perceber que o silo sem adição de inserto possui, no geral, velocidades de maior intensidade. Apesar de apresentar um perfil de velocidade relativamente uniforme em seu centro, nas extremidades do equipamento devido à condição de não deslizamento o movimento das partículas é comprometido, resultando no afunilamento do escoamento ou *funnel flow*. Na tentativa de reduzir os efeitos do *funnel flow* no fluxo do particulado, os insertos são utilizados. Na configuração BINSERT®, as velocidades mostram-se menores e com comportamento variante ao longo do comprimento do silo. Nas áreas interiores do inserto, entretanto, observa-se velocidades menores que as mais próximas à extremidade do equipamento, o que indica a formação de regiões preferenciais de fluxo nas regiões mais externas do equipamento, fora do inserto.

No caso do inserto de configuração BINSERT 6cm, o perfil de velocidade se mostra consideravelmente mais estável ao longo do comprimento do silo, com velocidades semelhantes tanto no interior quanto no exterior do inserto. Isso aponta para um fluxo mais aproximado ao idealizado fluxo *massflow*. Por fim, analisando os perfis obtidos para a configuração *conical insert*, é possível observar uma uniformidade razoável para as velocidades obtidas, apontando também para uma aproximação ao fluxo *massflow*.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após os testes realizados com variadas malhas, conclui-se que, para o sistema do silo nas dimensões apresentadas, a discretização com um número de células em torno de 80.000 foi um bom valor, que apresentou simulações relativamente rápidas e boa convergência. A convergência das simulações indica que os métodos numéricos escolhidos foram representativos, assim como previsto por trabalhos anteriores de simulação computacional para materiais granulares em leito fixo.

Com a análise dos resultados de vazão para as simulações de 1 segundo de escoamento dos silos sem inserto com altura de partículas diferentes foi possível concluir que a altura de partículas não influencia no resultado da vazão. Além disso, as vazões mássicas simuladas mostraram-se convergentes com os valores experimentais, apontando também para a representatividade do método numérico escolhido.

Os resultados de vazão mássica para as simulações de 7,5 segundos de escoamento também apresentaram boa convergência com o valor experimental, principalmente para os silos sem insertos e o silo *conical insert*. Os silos de configuração BINSERT® apresentaram convergência razoável, com maiores desvios em contraste às outras configurações, o que aponta para a necessidade de uma revisão dos parâmetros utilizados nas simulações para este tipo de configuração.

Testes adicionais realizados mostraram que a mudança de pressão na saída do silo não alterou os resultados de vazão mássica para o silo *no insert 7,5s*, invalidando o ajuste de pressão como uma forma de obter a convergência do problema.

Aditivamente, indicou-se o coeficiente de especularidade como um parâmetro importante de grande influência nos resultados, entretanto a modificação de seu valor contribuiu para a divergência do problema, mostrando mais adequado seu valor padrão de zero.

Simulações com modificações no coeficiente de restituição também apontaram para grande influência deste nos resultados, sendo o valor de 0.95 o mais adequado para os sistemas de configuração BINSERT® e BINSERT 6cm. Para as outras configurações, existem algumas alternativas, dados os resultados obtidos. Para a configuração *no insert*, uma alternativa seria manter o valor de 0.9 para o coeficiente de restituição, que apresentou bons resultados. Para a configuração *conical insert*, a utilização de valores menores que 0.9 para o coeficiente de restituição, ou maiores que zero para o coeficiente de especularidade apresentariam maior convergência.

Por fim, a partir das análises dos perfis de velocidades ao longo de alturas pré-determinadas nos silos foi possível concluir que a adição dos insertos foi efetiva somente para as configurações BINSERT 6cm e *conical insert*, onde o fluxo mostrou-se mais aproximado do ideal fluxo *mass flow*, de forma a evitar o acúmulo de material no interior do equipamento.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio técnico-financeiro proporcionado pela FAPEMIG (APQ-00022-18), CNPq (427962/2018-8) e UFLA (PIDEG357-2018).

REFERÊNCIAS

- DAN, S.; SHUYAN, W.; GOUGDONG, L.; SHUAL, W.; YONGJIAN, L.; LIXIN, W. **Simulations of flow behavior of gas and particles in a spouted bed using a second-order moment method-frictional stresses model**. *Chemical Engineering Science*, v. 65, n. 9, p. 2635-2648, 2010.
- DU, W.; BAO, X.; XU, J.; WEI, W. Computational fluid dynamics (CFD) modeling of spouted bed: Influence of frictional stress, maximum packing limit and coefficient of restitution of particles. *Chemical Engineering Science*, v. 61, n. 14, p. 4558-4570, 2006.
- DUARTE, C.; OLAZAR, M.; MURATA, V. V.; BARROZO, M. A. S. Numerical simulation and experimental study of fluid-particle flows in a spouted bed. *Powder Technology*, v. 188, n. 3, p. 195-205, 2009.

- GIDASPOW, D. **Multiphase flow and fluidization**: continuum and kinetic theory descriptions. 1. ed. Academic press, 1994. 467p.
- KMIEC, A.; SZAFRAN, R. G. **Kinetics of drying of microspherical particles in a spouted bed dryer with a draft tube**. *Inzynieria Chemiczna i Procesowa*, v. 22, n. 3C, p. 729-734, 2001.
- LIMA, R. C. DE. **Simulação de grandes escalas de escoamentos incompressíveis com transferência de calor e massa por um método de elementos finitos de subdomínio**. 2005. 161 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista.
- LOHA, C.; CHATTOPADHYAY, H.; CHATTERJEE, P. K. Effect of coefficient of restitution in Euler-Euler CFD simulation of fluidized-bed hydrodynamics. **Particuology**, v. 15, p. 170-177, 2014.
- NEDDERMAN, R. **Statics and kinematics of granular materials**. 2. ed. Cambridge University Press, 1992. 352 p.
- NETO, J. P. L.; NASCIMENTO, J. W. B.; SILVA, V. R.; LOPES, F. F. M. Propriedade de fluxo e característica de escoabilidade de rações avícolas para dimensionamento de silos. **Ciênc. agrotec.**, v. 31, n. 3, p. 851-859, 2007.
- NÓBREGA, M. **Análise de vazão e fluxo de ração avícola em silos prismáticos com descarga excêntrica**. 2003. 109 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Campina Grande.
- SANTOS, D. A. DOS. **Contribuições ao estudo da fluidodinâmica em leito de jorro: estudos experimentais e de simulação via CFD**. 2011. 125 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia.
- SCALABRIN, L. A. **Dimensionamento de silos metálicos para armazenagem de grãos**. 2008. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul
- SCHUBERT, H. Food particle technology. Part I: Properties of particles and particulate food systems. **Journal of food engineering**, v. 6, n. 1, p. 1-32, 1987.
- SZAFRAN, R. G.; KMIEC, A. CFD modeling of heat and mass transfer in a spouted bed dryer. **Industrial & engineering chemistry research**, v. 43, n. 4, p. 1113-1124, 2004.
- VIEIRA, L. G. M. **Otimização dos processos de separação em hidrociclones filtrantes**. 2006. 323 f. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia.
- WANG, Z.; BI, H.; LIM, C. CFD simulation of spouted beds using a pressure source term. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 49, n. 11, p. 5053-5060, 2009.
- YANG, S.-C.; HSIAU, S.-S. The simulation and experimental study of granular materials discharged from a silo with the placement of inserts. **Powder Technology**, v. 120, n. 3, p. 244-255, 2001.