

# ESTUDO FLUIDINÂMICO DO LEITO DE JORRO 2D PARA MATERIAIS ORGÂNICOS.

Ana Paula Silva Artur ✉

Elaine Cristina Batista da Silva

Tuane Tayrine Mendes Cardozo

Welberth Santos Laizo

Reimar de Oliveira Lourenço

Universidade Federal de São João del Rei – Campus Alto Paraopeba. Ouro Branco, MG

✉ anaps.artur@gmail.com

## RESUMO

O leito de jorro é um equipamento com ótima viabilidade devido ao eficiente contato fluido-partícula e das altas taxas de transferência de calor e massa, nas operações industriais. Devido essas boas características, uma das formas de uso desse equipamento é a secagem de grãos e a granulação de materiais, o que permite obtenção de produtos alimentícios com alta qualidade em menor tempo de contato. Entretanto, esse equipamento possui restrição de *scale-up*, o que restringe seu uso a processos de pequena e meso escalas. Uma eficiente forma de verificar e analisar desempenho operacionais de equipamento é por meio do uso de ferramentas computacionais sendo que estas apresentam baixos custos, as mesmas prevêm o comportamento dos equipamentos. O objetivo deste trabalho foi verificar, por meio da simulação CFD (*Computational Fluid Dynamics*), o comportamento fluidodinâmico de um leito de jorro convencional do tipo gás sólido, em escala de bancada para materiais orgânicos. As simulações apresentaram um perfil da dinâmica de escoamento

fluidodinâmico no interior do leito, esta foi estabelecida pelas medidas da queda de pressão no leito e velocidade de ar crescentes para diferentes tipos de partículas. Os estágios de fluidização do leito (leito fixo, jato interno, jorro mínimo, jorro estável e jorro pobre) foram obtidos por meio dos perfis de porosidade gerados e a posição das partículas no leito foi obtida a partir dos gráficos de posição-velocidade.

Palavras-chave: Leito de Jorro. CFD. Perfil da dinâmica de escoamento.

## ABSTRACT

*The spouted bed is an equipment with excellent viability due to the efficient fluid-particle contact and the high rates of mass and heat transfer in industrial operations. Due to these good characteristics one of the ways of using this equipment is the drying of grains and the granulation of materials which allows to obtain food-stuffs with high quality in less time of contact. However, this equipment has a scale-up restriction, which restricts its use to small-scale and meso-scale processes. An efficient way*

*of verifying and analyzing the operational performance of equipment is through the use of computational tools, since these present low costs, which foresee the behavior of the equipment. The objective of this work was to verify, through the CFD (*Computational Fluid Dynamics*) simulation, the fluid dynamics behavior of a conventional bed of solid gas type, bench scale for organic materials. The simulations presented a dynamic flow dynamics profile inside the bed, this was established by the measures of the pressure drop in the bed and increasing air velocity for different types of particles. The fluidization stages of the bed (fixed bed, internal jet, minimum jet, stable jet and poor jet) were obtained by means of the generated porosity profiles and the position of the particles in the bed was obtained from the position-velocity graphs.*

**Keywords:** Spouted bed. CFD. Profile of flow dynamics.

## INTRODUÇÃO

O leito de jorro é um equipamento com ótima viabilidade devido ao eficiente contato fluido-partícula e das

altas taxas de transferência de calor e massa, nas operações industriais. Devido a essas boas características, ele se torna mais vantajoso frente a equipamentos que operam em leito fixo (CHATERRJEE, 1970).

A secagem é uma das operações unitárias mais relevantes no processamento de alimentos, na qual a água é removida para inibir o crescimento de micro-organismos assim como evitar a ocorrências de reações químicas (CÁNOVAS, 1993). A aplicação do leito de jorro na indústria de alimentos tem aumentado devido ao fato de ele ter eficácia em tratar transformações físico-químicas, ou mesmo, reações que envolvem simultaneamente transferência de calor e massa em combinação com partículas de diversos tamanhos. Estes procedimentos são importantes em operações que envolvam aquecimento como, por exemplo: secagem, pirólise e combustão (LINK et al, 2005; SUTKAR et al., 2013).

O estudo e entendimento destas “não conformidades” de uso pode ser feito experimentalmente ou por meio da modelagem fenomenológica do problema. Uma rota interessante para analisar o comportamento fluidodinâmico do leito de jorro é a ferramenta numérica conhecida por CFD (*Computational Fluid Dynamics*), que possibilita a análise e o entendimento do comportamento de escoamentos de sistemas multifásico, como o caso do leito de jorro. A partir de estudos é possível descrever a fluidodinâmica das partículas e do gás no interior de equipamento utilizando uma Modelagem Euleriana Granular Multifásica, implementada computacionalmente.

O leito de jorro normalmente é dividido em três regiões: a região de jato interno na parte central do leito (baixa concentração de partículas), a região anular e região da fonte.

A fração de volume representa o espaço ocupado por fase e as leis de

conservação de massa e momento devem ser satisfeitas para cada fase individualmente.

As equações são obtidas a partir da conservação de massa, energia e de momento, aplicadas a cada elemento de volume da formulação Euler-Euler, consistindo nas equações da Continuidade e de Navier-Stokes para fases gasosa e sólida. Estas equações são necessariamente transformadas em sistemas de equações na forma discreta. O método de discretização utilizado foi o de volumes finitos.

A flexibilidade com qual a malha irá se adaptar ao sistema é inversamente proporcional a precisão, quanto maior a precisão, menor a flexibilidade do sistema. Por isso é importante que o refinamento de *mesh* seja feito nas regiões de interesse, ou seja, nas regiões onde o fluxo é desconhecido, nas regiões onde o escoamento é previsível ou onde não é o centro do problema analisado podemos usar uma malha menos refinada e assim ganhar em esforço computacional e precisão.

A pesquisa desenvolvida neste trabalho teve como objetivo estudar, por meio de simulações via CFD, o

escoamento no interior de um leito de jorro, bem como alguns de seus parâmetros de projeto, dentre os quais a Velocidade de mínimo jorro ( $V_{mj}$ ) e a Queda de Pressão de mínimo jorro ( $\Delta P_{mj}$ ).

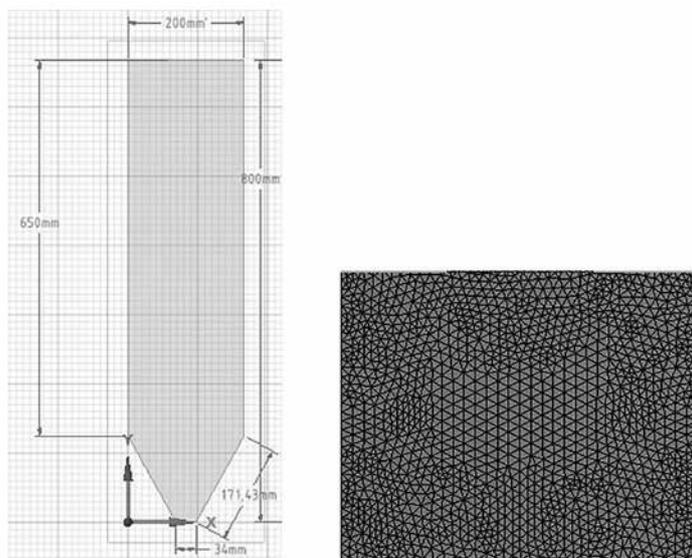
## OBJETIVOS

Verificar, por meio de simulação CFD (*Computational Fluid Dynamics*), o comportamento fluidodinâmico de um leito de jorro convencional do tipo gás sólido, em escala de bancada para diferentes materiais orgânicos, além de verificar se a malha, modelo de arraste (Gidaspow) e incremento de tempo adotados proporcionará resultados satisfatórios.

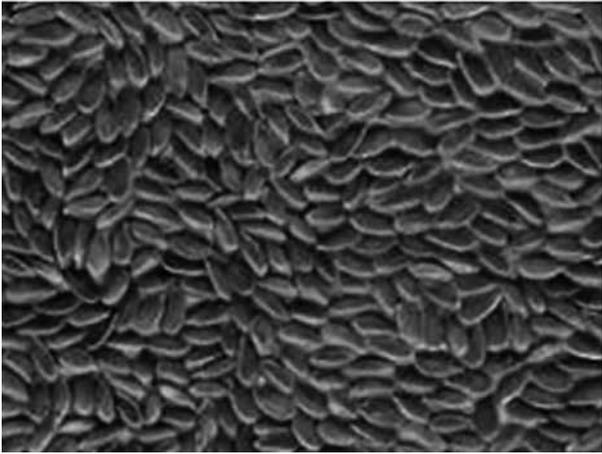
## MATERIAL E MÉTODOS

No estudo usou-se como base um leito de jorro do tipo convencional, com dimensões conforme descritas na Figura 1. A estratégia de simulação adotada para o presente trabalho, face a capacidade de processamento disponível, foi a simulação 2D, com uso de um pacote comercial de CFD que usa a técnica de Volumes Finitos

Figura 1 - Leito de Jorro cotado e apresentação da malha triangular *mesh* de 0,005.



Fonte: Autores, 2018.

**Figura 2** - Sementes de Linhaça; Fonte: MARQUES, 2008**Figura 3** - Grãos de Painço; Fonte: TERRAPIA, 2011

para o processamento numérico do problema.

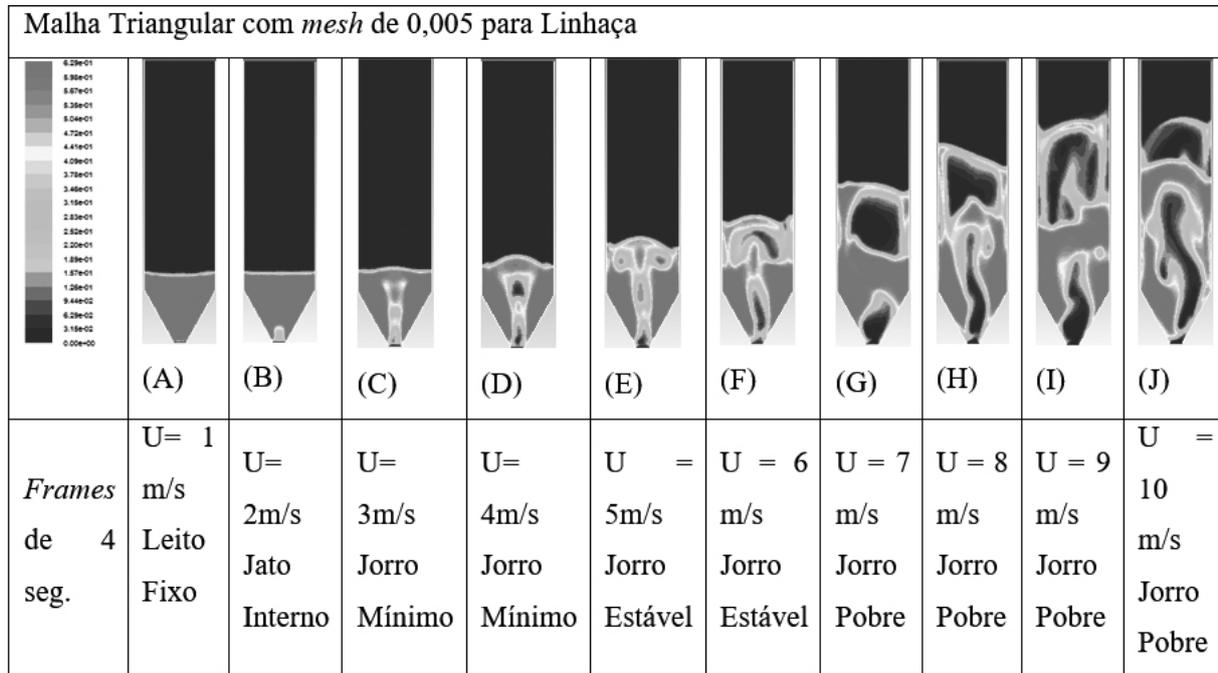
No presente estudo fez-se uso de diferentes materiais orgânicos (Linhaça e Painço), nas Figura 2 e 3 são apresentadas as imagens dos particulados, as características de interesse para a simulação dos materiais utilizados neste projeto, junto com os parâmetros, apresentados na Tabela 1. No estudo de simulação via CFD, foi utilizada configuração de malha, não-estruturada (triangular), com aproximadamente 382.990 células. Foi adotado o modelo Euleriano Granular Multifásico, que considera as fases gás e sólida como mutuamente interpenetradas, o que torna necessário o uso do conceito de fração de volume para cada uma das fases envolvidas, no caso adotou-se que a fração de partícula é de 60%, logo a de ar foi de 40%. As leis de conservação de massa e momento devem ser satisfeitas para cada fase individualmente.

O critério de convergência e o *time step* são aplicados no *software* para que os mesmos retratem a realidade do escoamento no equipamento. Estudos indicam que resíduos acima de  $10^{-4}$  são muito pouco confiáveis e servem apenas para fornecer uma ideia superficial sobre o escoamento (CÓSTOLA 2011).

**Tabela 1** - Parâmetros e Condições de contorno utilizadas nas simulações para cada material.

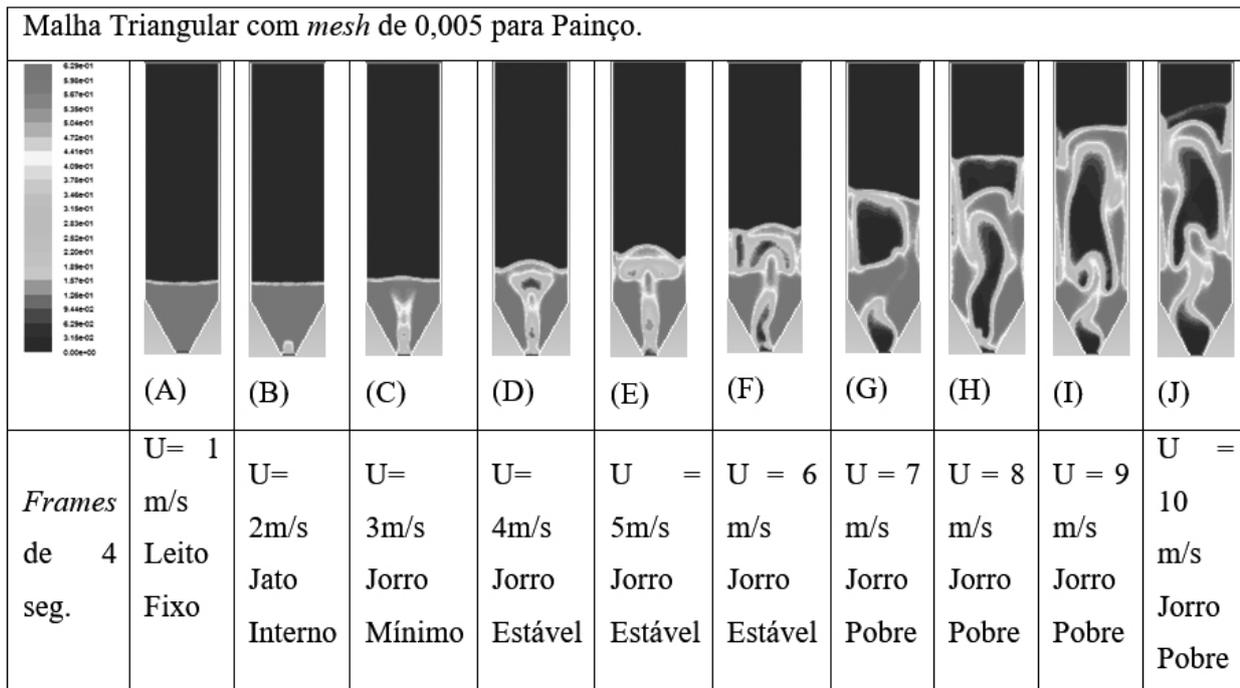
Modelo Euleriano Multifásico : (Implícito)	
Interação fluido - partícula : Gidaspow	
Partícula Granular	Viscosidade Granular: Gidaspow
	Viscosidade Bulk Granular: Lun-et-al
	Pressão de sólidos: Symlal-Obrien
	Distribuição radial: Lun-et-al
Condição de Entrada: Velocity Inlet	
Referência de Pressão à saída do Leito	
Parâmetros Relaxação	Pressão : 0,2
	Densidade: 1
	Forças de Corpo: 1
	Temperatura Granular : 0,2
	Momentum: 0,2
Fração Volumétrica : 0,2	
Máximo de Iteração / Passo de Tempo	200
Critério de Convergência dos Resíduos	$10^{-3}$
Passo de tempo (Time Step)	$10^{-3}$ s
Informações específicas para cada partícula do projeto	
Linhaça	Diametro partícula: 0,00173m
	Esfericidade: 0,528 m
	Massa Específica: 1114 Kg/m <sup>3</sup>
Painço	Diametro partícula: 0,0017m
	Esfericidade: 0,83 m
	Massa Específica: 1160 Kg/m <sup>3</sup>

Figura 4 - Perfil de Porosidade para Leitos de Jorro para malha triangular *mesh* de 0,005 para a partícula Linhaça.

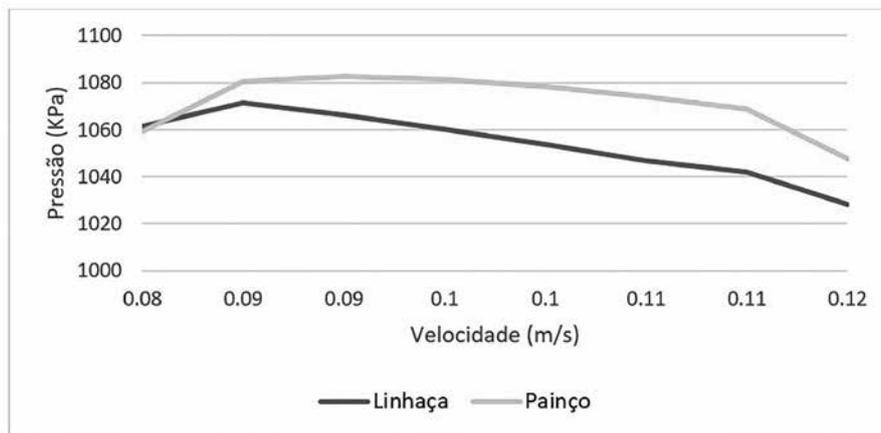


Fonte: Autores, 2018.

Figura 5 - Perfil de Porosidade para Leitos de Jorro para malha triangular *mesh* de 0,005 para a partícula Painço.



Fonte: Autores, 2018.

**Figura 6** - Gráficos de Pressão *versus* Velocidade para o Leito de Jorro. Fonte: Autores, 2018.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas Figuras 4 e 5 apresenta-se os perfis de porosidade do leito de jorro frente às condições de simulação. Dessa forma pode-se verificar a influência do refino da malha e o incremento de tempo adotado na qualidade dos resultados. Aumentando-se a velocidade nota-se que o leito passa da condição de jorro mínimo para jorro estável até que o mesmo em altas velocidades fique com o jorro pobre.

Com a estabilização do jorro, a queda de pressão no leito de jorro estável surge de duas resistências: a do jorro propriamente dito, em que o transporte ocorre em fluxo ascendente em um trecho de alta porosidade do leito; e da região anular, que é caracterizada pelo movimento descendente das partículas em um trecho com baixa porosidade, em contracorrente com o gás (MATHUR e EPSTEIN, 1974).

Com o aumento da vazão do gás observa-se a variação dos regimes de operação do leito, começando com a região de leito fixo (nesse caso o ar é insuficiente não sendo capaz de arrastar as partículas, ele simplesmente passa por elas sem perturbá-las) representado pelo frame A, avançando para a região de

jato interno conforme observado no frame B até a condição de mínimo jorro (frame C e D). Na sequência observa-se a tentativa de estabelecimento de jorro estável a partir dos frames E e F. Os resultados apresentados nos frames de G a J demonstram formação de jorro caracterizado como instável ou pobre, não sendo possível a visualização de forma clara da região de fonte característica do jorro estável.

Analisando os resultados e comparando os mesmos com a literatura (YANG, 2018; MELO 2013), percebe-se uma diferença nos *frames* de perfil de porosidade (não ocorreu a formação da fonte nos *frames* de jorro estável, nesse estudo teve a tentativa de formação do mesmo), alguns dos possíveis motivos dessa divergência é que no presente estudo realizou-se o projeto com a geometria completa no *software*, sendo que na literatura construiu-se metade da geometria do leito e aplicou-se eixo de simetria. Outro possível motivo do diferencial é o modelo de arraste aplicado, neste estudo fez-se uso do modelo de arraste de Gidaspow que é mais indicado para o leito de jorro, entretanto na literatura fez-se uso do modelo de Syamlal O'Brien indicado para leito fluidizado. E ainda, essa divergência pode

ter ocorrido devido a malha; no presente estudo empregou-se uma malha não-estruturada enquanto na literatura usou-se malha híbrida (na parte cônica malha não-estruturada, parte cilíndrica malha estruturada).

Para definir se a malha está adequada para o leito de jorro, analisou-se se ocorreu a formação do jorro estável e seus parâmetros característicos de elevada importância que são: a velocidade de mínimo jorro, a queda de pressão no leito e o tempo computacional necessário para a realização da simulação (Tempo de estabilização do regime no leito). Nos dois particulados observou-se que os parâmetros informados não foram completamente atendidos.

A Figura 6 representa as curvas características simuladas da queda de pressão *versus* velocidade do ar, para os diferentes materiais no modelo de arraste Gidaspow (1992), ela foi obtida por meio da média das diferentes velocidades de fluido alimentado. Com a estabilização do jorro, a queda de pressão no leito de jorro estável surge de duas resistências: a do jorro propriamente dito (transporte em fluxo ascendente em um setor de alta porosidade) e da região anular (movimentação descendente das partículas em um trecho com baixa porosidade), em

contracorrente com o gás (MATHUR e EPSTEIN, 1974).

Os resultados da queda de pressão para os materiais, quando observados na literatura, superestimaram os valores obtidos na região de leito fixo e na região de jorro estável (YANG, 2018; MELO 2013; NASCIMENTO 2013). Para melhora desses resultados faz-se necessário em estudos futuros refinar mais a malha a ser utilizada ou mudar o modelo de arraste utilizado.

Algumas discrepâncias que ocorreram podem ser justificadas pelo condicionamento da malha triangular, pois, como leitos de jorro normalmente apresentam uma base cônica e um corpo cilíndrico, uma malha triangular pode promover uma cobertura melhor do espaço, bem como em um leito fluidizado uma malha quadrada pode gerar resultados comparáveis aos de uma malha triangular com um esforço computacional menor.

## CONCLUSÃO

Neste trabalho foram realizados estudos do comportamento fluidodinâmico de um leito de jorro convencional por meio da ferramenta de CFD em diferentes materiais. Utilizou-se o Modelo Granular Euleriano Multifásico que descreve o comportamento das fases sólido e gás para o regime do equipamento em questão.

Foi avaliado se o modelo de arraste de Gidaspow empregado para os materiais orgânicos foi satisfatório, observando o padrão de escoamento característico do leito de jorro, identificado pela distinção entre as regiões de jorro, anular e fonte, sendo que levamos em consideração uma boa representação do sistema real e o tempo computacional necessário para estabilizar uma condição esperada.

Uma forma de avaliar se o modelo empregado obteve resultados satisfatório é por meio dos frames de perfil de porosidade, no presente estudo notou-se que ocorreu a tentativa de estabelecimento de jorro estável, sendo que os resultados encontrados nesse estudo ainda apresentam alguma concordância com os da literatura. Visto que se teve algumas diferenças nos frames adquiridos para os da literatura em estudos futuros necessita-se realizar uma investigação nos fatores geometria completa em vez de eixo de simetria e utilização de malha completa comparada com malha híbrida e modelo de arraste.

Para que os resultados se adequem mais na literatura necessita-se realização de novas simulações aplicando um diferente refinamento.

## REFERÊNCIAS

- BRANDÃO, ES. **Análise Experimental do Comportamento Fluidodinâmico e da Secagem de Sementes de Linhaça (*Linum usitatissimum* L.) em Leito de Jorro, 2011.** 170f. Tese de Mestrado, Universidade Federal de Pará, Belém - Pará.
- CÁNOVAS, BARBOSA, GV; IBARZ, A; PELLEGRINI, M. Propriedades reológicas de alimentos fluidos: **revisão. Alimentaria**, v. 241, p. 39-89, 1993
- CHATTERJEE, A. Spout-fluid bed technique. **Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.**, v. 9, p.340-341, 1970
- CÓSTOLA, DANIEL; PEINADO, MARCIA ALUCCI. Aplicação de CFD para o cálculo de coeficientes de pressão externos nas aberturas de um edifício, 2011.
- ERGUN, S. Fluid flow through packed columns, **Chem. Eng. Prog.**, Vol. 48(2), p. 89-94, 1952. LINK, JM; CUYPERS, LA; DEEN, NG; KUIPERS, JAM. Flow regimes in a spout-fluid bed: A combined experimental and simulation study. **Chemical Engineering Science**, v. 60, p. 3425-3442, 2005.
- FREIRE, JT; SARTORI, DJM. **Editores, Tópicos especiais em sistemas particulados.** São Carlos, Editora da UFSCar, 330p, 1992.
- GIDASPOW, D; BEZBURUAH, R; DING, J. **Hydrodynamics of circulating fluidized beds, kinetic theory approach in fluidization**, In: Proceedings of the 7th Engineering Foundation Conference on Fluidization, p. 75-82, 1992
- MARQUES, ANNE. **Propriedades Funcionais da Linhaça (*Linum usitatissimum* L.) em diferentes condições de preparo de uso da linhaça**, Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2008.
- MATHUR, KB; EPSTEIN, N. **Spouted beds.** New York: Academic Press, 1974.
- MELO, JLZ; MARQUES, IADR; BACELLOS, MS. Fluidodinâmica de Compósito de Polietileno e Alumínio em Leito de Jorro. Maceió, **Anais do XXXVI Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados**, 2013.
- NASCIMENTO, LD; BUTZGE, JJ; TARANTO, OP; ROCHA, SCS; COSTA, CML; FARIA, LJG. Estudo da Fluidodinâmica de Sementes de Painço (*setaria italica*) em Leito de Jorro Cônico. Maceió, **Anais do XXXVI Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados**, 2013.
- SUTKAR, VS; DEEN, NG; KUIPERS, JAM. Spout Fluidized Beds: Recent advances in experimental and numerical studies. **Chemical Engineering Science**. v. 86, p. 124-136, 2013.
- YANG, JINGSI; BREAU, RONALD W; WEBER, JUSTIN M; ROWAN, STEVEN L.; **Determination of flow patterns by a novel image analysis technique in a rectangular spouted bed**, Powder Technology, 2018.
- TERRAPIA, <http://terrapi.hospedagemdesites.ws/painco-ou-milho-alvo/> Acessado 04/06/2018