



## **COMPORTAMENTO FLUIDODINÂMICO E METODOLOGIA DE PROJETO DA CAMÂRA DE PLENUM DE UM LEITO FLUIDIZADO**

**Estumano, Diego Caroso, diegoestumano@hotmail.com<sup>1</sup>**  
**Lourenço, Reimar Oliveira, reimar@ufpa.br<sup>1</sup>**  
**Macêdo, Emanuel Negrão, enegrao@ufpa.br<sup>1</sup>**  
**Mesquita, André Luiz Amarante, andream@ufpa.br<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Universidade Federal do Pará, Campus Guamá, Rua Augusto Correa 01, 66075-110, Belém, PA, Brasil. Telefax: (55) (91) 32017960

<sup>2</sup>Solve, Sistemas Industriais, Engenharia e Representações Ltda, Rua Curuçá 260, Umarizal, 66050-080, Belém, PA, Brasil. Telefax: (55) (91) 32234469.

***Resumo:** O Leito fluidizado é um equipamento que pode ser frequentemente utilizado nos mais diversos ramos da indústria, com uma boa diversidade de aplicações, destacando-se, dentre outras, a síntese de reações catalíticas, combustão e gaseificação, recobrimento e secagem. Uma parte importante e que merece destaque neste tipo de equipamento é a câmara de plenum, visto que o dimensionamento desta parte do equipamento pode influenciar de forma determinante a operação de fluidização das partículas no leito. Neste trabalho nós iremos estudar o comportamento fluidodinâmico, em duas dimensões, da câmara de plenum, de um leito fluidizado convencional, usando a técnica dos volumes finitos em um código de CFD (Computational Fluid Dynamics). Os dados simulados foram obtidos através do uso de um pacote comercial de CFD, sendo obtidos perfis de velocidade e pressão. Uma revisão da metodologia de projeto do plenum será apresentada e discutida juntamente com as simulações numéricas.*

***Palavras Chaves:** plenum, leito fluidizado, fluidodinâmica computacional*

### **1. INTRODUÇÃO**

A fluidização começou a ser tratada como uma ciência por volta de 1922 durante a primeira guerra mundial. Ela teve início com foco na aplicação de equipamentos para a gaseificação do carvão, objetivando a produção de gás de síntese para a obtenção de combustíveis líquidos. Um dos primeiros equipamentos de gaseificação que se tem conhecimento foi o gaseificador Winkler (Marques, 2004).

Além do processo de gaseificação do carvão, os leitos fluidizados podem ser utilizados em outras aplicações importantes na indústria química como, por exemplo: regeneração catalítica, combustão, secagem de partículas, recobrimento e granulação de sólidos, secagem de pastas, reatores catalíticos, dentre outros. (Marques, 2004).

O processo de fluidização apresenta vantagens e desvantagens. Dentre as principais vantagens pode-se destacar: i) o favorecimento nas taxas de transferências de calor e massa em virtude do aumento da área de contato da partícula com o gás, promovendo grande velocidade de reação quando comparado a reatores de leito fixo, ii) fácil escoamento em dutos e favorecimento de transporte de energia. Dentre as principais desvantagens pode-se destacar: i) a dificuldade de manter um gradiente de temperatura e concentração axial, dificultando o favorecimento de uma reação específica no caso de reações múltiplas; ii) a produção de pó, em função do forte atrito entre partículas, tornando necessária a reposição de material no processo e obrigando, com isso, a instalação de equipamentos de limpeza de gás na saída do equipamento, envolvendo um aumento de custo do processo. Além disso, após determinado tempo de uso o equipamento poderá sofrer erosão devido ao frequente impacto que o sólido faz sobre as paredes do mesmo. Por fim, há um aumento no consumo de energia devido à alta perda de carga e as dimensões do equipamento. (Kunii e Levenspiel, 1991)

O processo de fluidização de partículas é fortemente dependente de fatores referentes ao fluido utilizado (p.ex: massa específica, viscosidade,...), as características e propriedades da partícula (p.ex: massa específica, esfericidade, fator de forma, diâmetro da partícula, rugosidade,...), e à geometria do leito (p. ex. forma, tipo do distribuidor, plenum,...). Mais especificamente, a geometria de um leito fluidizado contempla uma coluna cilíndrica ou retangular, usada para acondicionar o material (partículas), um dispositivo distribuidor de gás (Placa perfurada, manta,...), que possui a função de distribuir uniformemente o gás no leito fluidizado, bem como suportar a carga de partículas e uma câmara de plenum.

Alguns autores destacam a importância do bom dimensionamento de uma câmara de plenum, bem como a escolha do melhor dispositivo de distribuição do gás, na melhoria da eficiência no processo de fluidização de partículas. Isto posto, este trabalho tem por objetivo, estudar o comportamento fluidodinâmico de uma câmara de plenum, bem como o distribuidor de gás de um leito fluidizado cilíndrico, utilizando a técnica de CFD (*Computational Fluid Dynamics*). Os resultados simulados serão verificados com dados experimentais obtidos no equipamento instalado no Laboratório de Fluidização de Partículas (LTP), da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pará (LABEM/FEM/UFPA).

## 2. METODOLOGIA

Com a finalidade de se ter uma idéia do perfil de escoamento de ar no interior da câmara de plenum do leito fluidizado instalado no LTP/LABEM/UFPA foram realizadas simulações numéricas com a ajuda de um software comercial de fluidodinâmica computacional – CFD (FLUENT 6.1). Para o cálculo de valores discretos da variável a ser estudada no volume de controle utilizou-se o método UPWIND de primeira ordem. Este método evita o aparecimento de oscilações numéricas e produz soluções fisicamente coerentes. Para a questão do acoplamento pressão-velocidade foi utilizado o método SIMPLE. Neste procedimento a pressão é escrita como sendo a soma da melhor estimativa da pressão disponível,  $P^*$ , mais uma correção  $P'$ , a qual é calculada de maneira a satisfazer a equação da continuidade, ou seja: (Santos, 2008)

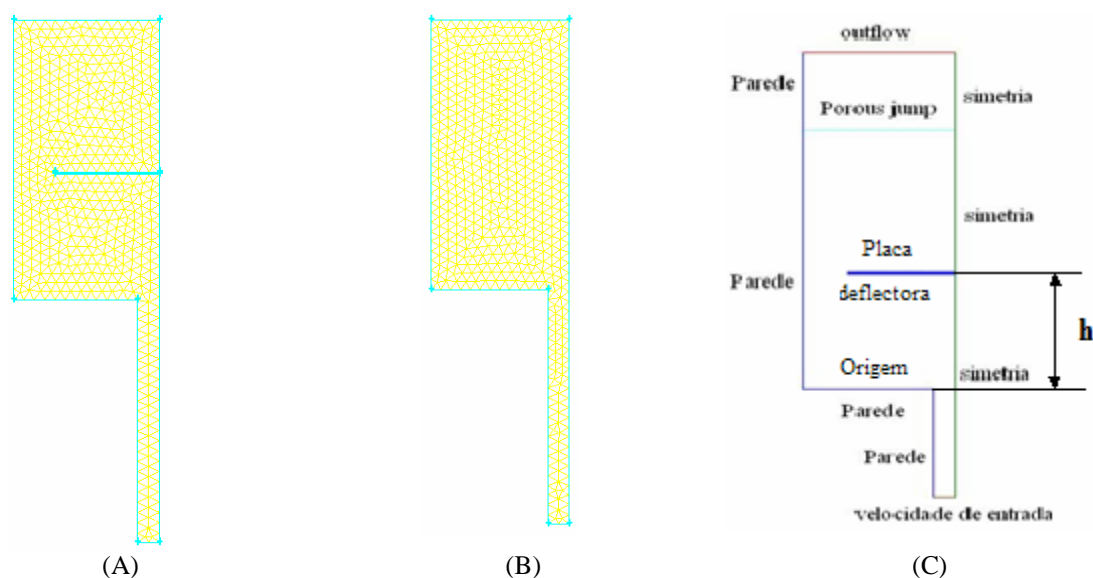
$$P = P^* + P' \quad (1)$$

Uma das vantagens deste método é o fato de não ser necessária solução de um sistema linear para determinar a pressão. Entretanto, a velocidade de convergência é pequena (Maliska, 2004).

### 2.1. Malha Computacional e Condições de Contorno

A malha construída possui um eixo de simetria com a finalidade de reduzir a quantidade de células e consequentemente o esforço computacional. Desta forma, foi simulado apenas a metade do sistema compreendido pela câmara de plenum, distribuidor de ar e o leito.

Foram testadas malhas estruturadas, em bloco único, em multiblocos bem como malhas não estruturadas. Para este trabalho, optou-se pelo uso de uma malha não estruturada com elementos triangulares do tipo pave. Os aspectos típicos das malhas adotadas neste trabalho podem ser vistos na figura 1. Na figura 1A, tem-se a malha utilizada para o caso do plenum com a placa defletora. A Figura 1B, mostra a malha utilizada para o caso do plenum sem a placa defletora.



**Figura 1: Malha e condições de contorno adotadas na simulação.**

As condições de contorno utilizadas neste trabalho foram apresentadas na Fig.1C (velocidade de entrada, parede, simetria, e escoamento livre - *outflow*).

Na condição velocidade de entrada do ar é necessário fornecer a magnitude e a direção da velocidade em que o ar está entrando no sistema e é calculada da através da seguinte equação:

$$V_m = \frac{\int V.dA}{\int dA} \quad (2)$$

A condição de parede foi inferida como condição limitante, pois é essa condição que determina os contornos do problema e tem a propriedade de não deslizamento, ou seja, a velocidade do fluido é nula sobre o seguimento que esta com esta condição. A condição simetria é utilizada para reduzir o esforço computacional e fazer com que seja necessário apenas simular a metade do problema, no seguimento com esta condição o gradiente das propriedades é nulo. A condição *porous jump* é utilizada para reproduzir o efeito da manta, nesta condição foi utilizada uma aproximação linear para o cálculo da permeabilidade. Ainda na condição de contorno *porous jump*, fez-se necessário conhecer a espessura e a permeabilidade da manta, obtidas experimentalmente e ajustados pela equação de Darcy (Eq. 3).

$$\frac{\Delta P}{L} = \left[ \frac{\mu}{k} + \frac{c\rho}{\sqrt{k}} q \right] q \quad (3)$$

Sendo:

$P$  a pressão,  $L$  é a espessura da manta,  $\mu$  é a viscosidade dinâmica do fluido,  $k$  é a permeabilidade da manta,  $c$  parâmetro de ajuste,  $\rho$  massa específica do fluido e  $q$  é a velocidade superficial do gás.

A condição escoamento livre foi usada para simular o escoamento com a parte superior livre, ou seja, a pressão ambiente. Com estas condições é possível determinar o perfil de várias propriedades físicas como, por exemplo: pressão estática; pressão dinâmica; pressão total; viscosidade; densidade; velocidade.

## 2.2. Aparato Experimental

A Figura 2 mostra uma imagem ilustrativa da Câmara de Plenum do leito fluidizado usado no LTP/LABEM/UFPA, construída em acrílico, e a tabela 1 apresenta as características da Câmara de Plenum que foi objeto de estudo deste trabalho. A placa defletora utilizada para ajudar na melhor distribuição do gás foi construída em aço-carbono e os pontos de tomada de pressão utilizados para medir a queda de pressão no sistema estão localizados imediatamente abaixo da manta (TAP de alta) e próximo à saída do leito (TAP de baixa).



**Figura 2: Imagem ilustrativa da Câmara de Plenum.**

**Tabela 1: Características da Câmara de Plenum**

Dimensões da Câmara de Plenum	Valores (m)
Altura do Plenum	0,138
Altura da Placa Deflectora	0,062
Diâmetro da Placa Deflectora	0,100
Diâmetro do duto de Entrada	0,021
Diâmetro do Plenum	0,140

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Em todas as situações estudadas foram realizadas uma análise de convergência de malha. A situação mais crítica de convergência foi o caso da variação de pressão, devido a presença da manta. Nas tabelas 2 e 3 são apresentados, respectivamente, os valores dessa variação de pressão em determinadas posições nas condições de velocidades do ar de 0,0036 e 0,0282 m/s. Por limitação do software, que permitiu um máximo de 100000 células por face, não foi possível refinar mais as malhas. Da tabelas 2 observa-se uma convergência em três casas decimais, para a queda de pressão, com 80010 células. Entretanto, na tabela 2 observou-se a necessidade de um número menor de células. Portanto, a malha utilizada nas demais situações foi de 80010 células.

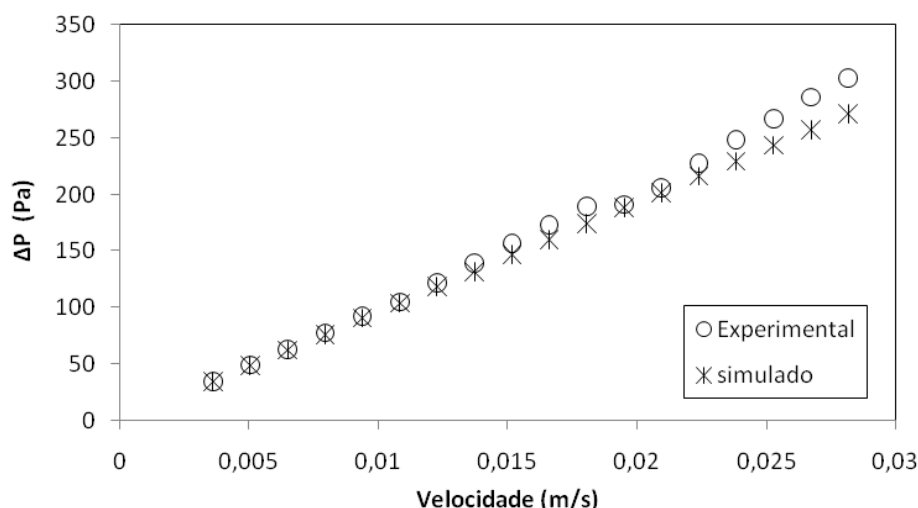
**Tabela 2: Variação de pressão (Pa) para o caso de  $v = 0,0036$  m/s.**

	Posição (m)								
células	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	
354	28,91	28,91	28,91	28,91	28,91	28,91	28,91	28,91	28,91
1254	34,82	34,82	34,82	34,82	34,82	34,82	34,82	34,82	34,82
5020	34,83	34,83	34,83	34,83	34,83	34,83	34,83	34,83	34,83
7822	34,86	34,86	34,86	34,86	34,86	34,86	34,86	34,86	34,86
20106	29,18	29,18	29,18	29,18	29,18	29,18	29,18	29,18	29,18
31307	29,15	29,15	29,15	29,15	29,15	29,15	29,15	29,15	29,15
80010	29,14	29,14	29,14	29,14	29,14	29,14	29,14	29,14	29,14

**Tabela 3: Variação de pressão (Pa) para o caso de  $v = 0,0282$  m/s.**

	Posição (m)								
células	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	
354	269,4	269,4	269,4	269,4	269,4	269,4	269,4	269,4	269,4
1254	277,9	277,9	277,9	277,9	277,9	277,9	277,9	277,9	277,9
5020	273,4	273,4	273,4	273,4	273,4	273,4	273,4	273,4	273,4
7822	273,1	273,1	273,1	273,1	273,1	273,1	273,1	273,1	273,1
20106	273,1	273,1	273,1	273,1	273,1	273,1	273,1	273,1	273,1

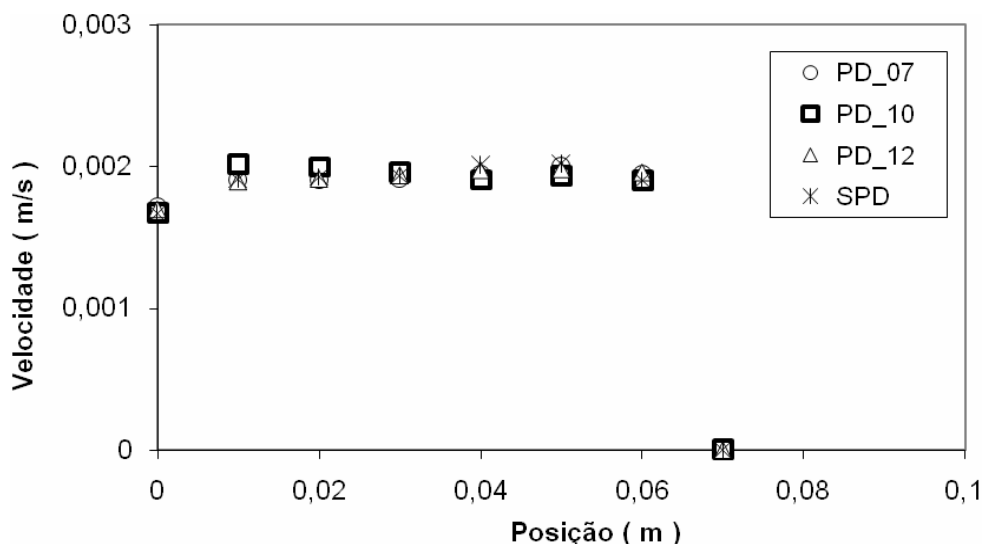
A seguir estão apresentados os resultados obtidos a partir das simulações da câmara de plenum e manta distribuidora de ar, do leito fluidizado usado no LTP/LABEM/UFPA. A Figura 3 apresenta os resultados da queda de pressão na manta distribuidora de ar do sistema de fluidização, obtidos experimentalmente e comparados com as simulações.



**Figura 3: Queda de pressão na Manta Distribuidora de ar do sistema de fluidização (Experimental versus simulado).**

Fazendo uma análise do desvio dos resultados simulados em relação aos resultados obtidos experimentalmente (figura 3), observa-se um desvio médio de aproximadamente 5,7 %. Qualitativamente, o desvio tende a ser maior à medida que há um aumento na vazão de ar do sistema.

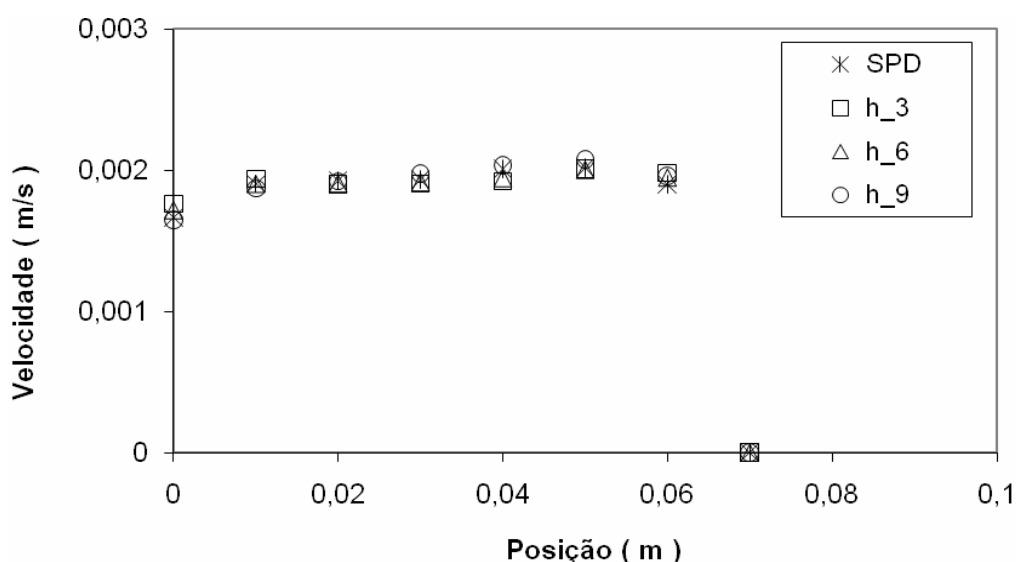
Outra etapa foi a simulação dos perfis de velocidade do ar no plenum. Foram simuladas diferentes velocidades de entrada de ar no plenum, para diferentes configurações. A figura 4 mostra a influência do diâmetro da placa defletora para uma velocidade de entrada de ar no plenum de 0,013 m/s, mantendo uma distância de 0,06 m acima da origem do distribuidor. Nesta figura as placa deflectoras de diâmetros 0,07; 0,10 e 0,12 m são representadas respectivamente por PD\_07, PD\_10 e PD\_12 e a câmara sem placa defletora é representada por SPD.



**Figura 4: Influência do diâmetro da placa defletora, a uma altura de 0,06 m, para uma velocidade de entrada de ar no plenum de 0,013 m/s.**

Analisando a Fig. 4, percebe-se que a configuração do plenum com placa defletora a 0,06 m de altura e diâmetro de 0,07 m, foi a que proporcionou melhor distribuição de ar no plenum, dentre os diâmetros estudados, para uma velocidade de 0,013 m/s.

A Figura 5, apresenta a distribuição de velocidade do ar variando com a posição radial do plenum, analisado junto à manta distribuidora de ar, para configuração do plenum com placa defletora posicionada a 0,06 m de distância da entrada de ar e diâmetro de 0,07 m.



**Figura 5: Influência da altura da placa defletora, com diâmetro de 0,07m, para uma velocidade de entrada de ar no plenum de 0,013 m/s.**

Analisando a figura. 5, observa-se uma tendência de aumento da velocidade a partir do centro do plenum junto à parede do plenum, em função da condição de não deslizamento, a velocidade do ar se aproxima de zero.

Os perfis de velocidade obtidos pela simulação podem ser observados nas figuras. 6 e figuras.7, para configurações sem e com placa defletora, respectivamente, variando o diâmetro da placa ( $\phi$ ), mantendo altura fixa e velocidade do ar na entrada fixos (figura. 6), bem como a posição da placa, mantendo fixas a velocidade do ar na entrada e o diâmetro da placa defletora.

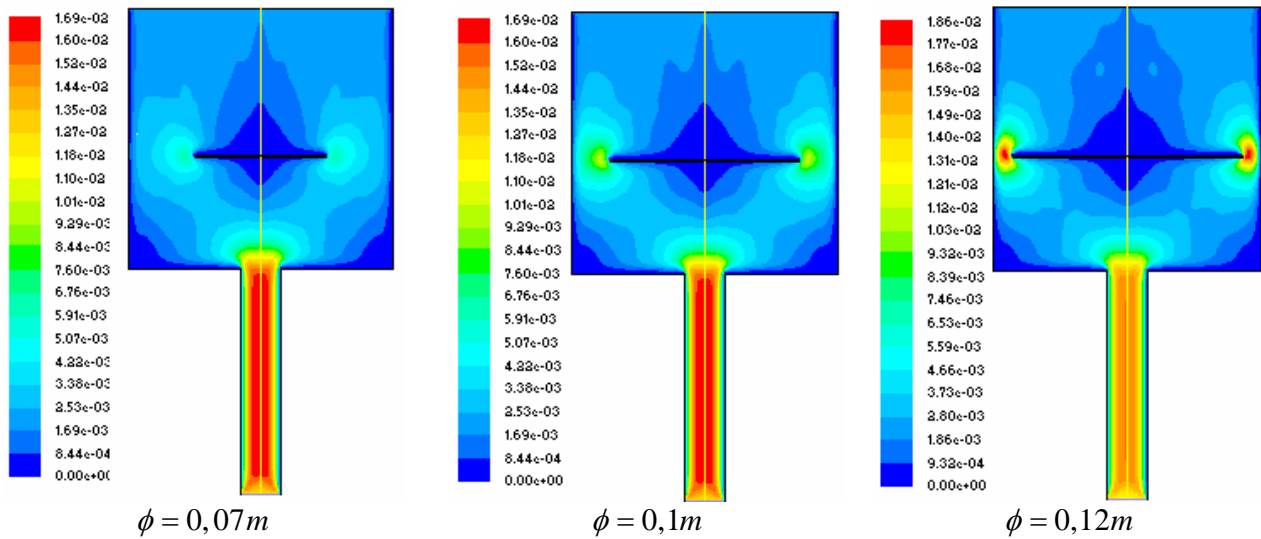


Figura 6: Perfis de velocidade do ar para diferentes diâmetros da placa defletora ( $h_{PD} = 0,06$  m e  $U_{ent} = 0,013$  m/s).

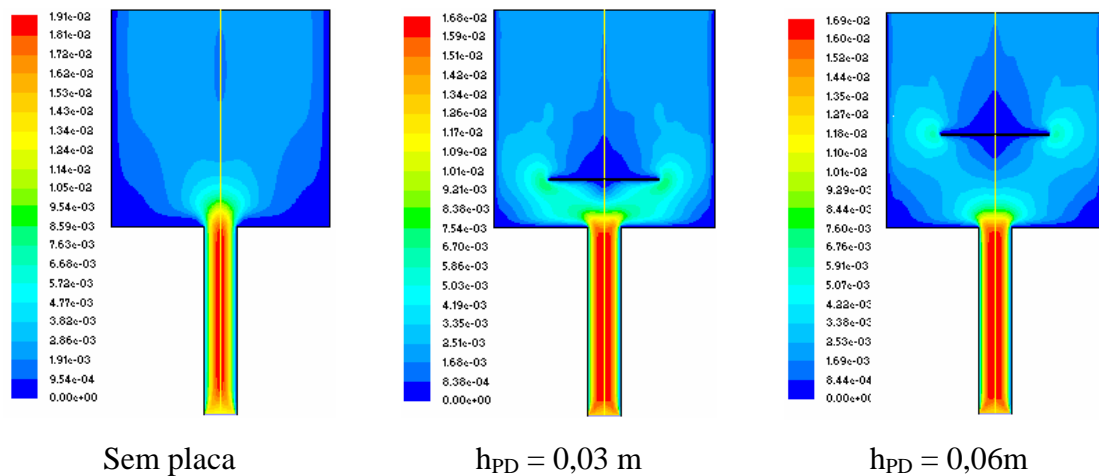


Figura 7: Perfis de velocidade do ar para diferentes alturas da placa defletora ( $\phi = 0,07$  m e  $U_{ent} = 0,013$  m/s).

Comparando os perfis de velocidade com e sem placa defletora, Fig. 6 e Fig.7, observa-se que a colocação da placa proporciona melhor distribuição do ar na câmara de plenum. Contudo, uso da placa promove o aparecimento em regiões centrais, próximo à manta de distribuição do ar, de pequenas zonas de recirculação de ar que por vezes podem ser indesejáveis ao processo de fluidização de partículas. Considerando apenas as posições e os diâmetros da placa objeto de estudo deste trabalho, observa-se que a distribuição do ar no plenum é melhorada quando este se apresenta na configuração com uso da placa distribuidora a uma altura de 0,03 m e diâmetro de 0,07 m.

#### 4.CONCLUSÕES

Neste trabalho simulou-se uma câmara de plenum de um leito fluidizado instalado no LTP/LABEM/UFGA, com e sem o uso de uma placa defletora de ar. As simulações numéricas foram realizadas mediante o software comercial de fluidodinâmica computacional – CFD (FLUENT 6.1). Foi realizada uma análise de convergência de malha onde a

malho 80010 célula foi adotada como a malha padrão para a simulação de todos os casos. Os resultados obtidos, via simulação computacional, para a queda de pressão (na manta distribuidora de ar do sistema de fluidização) foram comparados com dados experimentais coletados no LTP/LABEM/UFPA, apresentando um desvio médio de aproximadamente 5,7 %. Qualitativamente, o desvio mostrou uma tendência de aumento à medida que há um aumento na vazão de ar do sistema.

Foram estudadas várias configurações de plenum, no que diz respeito a altura e diâmetro da placa. A configuração com placa a 0,03 m de altura e diâmetro de 0,07 m, foi a qual proporcionou uma melhor distribuição de ar no plenum.

Comparando os perfis de velocidade com e sem placa defletora, observou-se melhor distribuição do ar na câmara de plenum com a placa defletora. Contudo, uso da placa promove o aparecimento de pequenas zonas de recirculação de ar, em regiões centrais do plenum, que por vezes podem ser indesejáveis ao processo de fluidização. Por fim, observa-se que a distribuição do ar no plenum é melhorada quando este se apresenta na configuração com uso da placa distribuidora a uma altura de 0,03 m e diâmetro de 0,07 m.

## 5.REFERÊNCIAS

- Gama, M. S., 2008. Estudo de um Sistema de Limpeza de Gases usando um Lavador de Venturi de Seção Circular, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG.
- Kunii, D. e Levenspiel, O., 1991. Fluidization Engineering, J. Wiley & Sons, New York, 534p.
- Maliska, C.R., 2004. Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional, 2ªed., Rio de Janeiro, Editora: LTC.
- Marques, F. C., 2004. Caracterização dos Regimes de Fluidização de Partícula Finas através da Análise de Flutuação de Pressão no Leito, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG.
- Santos, K. G., 2008. Estudo da Fluidodinâmica do Leito de Jorro por CFD com Malhas Tridimensionais, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG.
- Wen, C. Y. and Yu, Y. H., 1966. "Mechanics of Fluidization". Chem. Eng. Prog. Symp.
- Osório, A.G.S Projeto e construção de um secador intermitente de fluxo concorrente e sua avaliação na secagem de café. 1982. Tese (Mestrado em Engenharia Agrícola). Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa

## FLUID DYNAMIC BEHAVIOR AND DESIGNER METHODOLOGY OF FLUIDIZED BED PLENUM

Estumano, Diego Caroso, [diegoestumano@hotmail.com](mailto:diegoestumano@hotmail.com)<sup>1</sup>

Lourenço, Reimar Oliveira, [reimar@ufpa.br](mailto:reimar@ufpa.br)<sup>1</sup>

Macêdo, Emanuel Negrão, [enegrão@ufpa.br](mailto:enegrão@ufpa.br)<sup>1</sup>

Mesquita, André Luiz Amarante, [andream@ufpa.br](mailto:andream@ufpa.br)<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Chemical Engineering School, Federal University of Pará, Campus Guamá, Augusto Correa Street 01, 66075-110, Belém, PA, Brazil. Telefax: (55) (91) 32017960

<sup>2</sup> Solve, Sistemas Industriais, Engenharia e Representações Ltda, Curuçá Street 260, Umarizal, 66050-080, Belém, PA, Brazil. Telefax: (55) (91) 32234469.

**Abstract.** Fluidized beds are widely used for particle coating and granulation in the pharmaceutical and chemical industries; among typical examples of fluidized beds some applications could be outlined: the syntheses and catalytic reactions, the catalytic regeneration, the coal combustion and gasification, coating, drying, etc. In this equipment the plenum is the chamber immediately below the gas distributor. For bed-pressure-drop-to-grid-pressure-drop ratio is high enough, the plenum design will not be that important. However, for the case where this ratio is marginal, the plenum design may determine whether the bed will operate satisfactorily. In this paper we will study of the fluid dynamics compartment of a plenum chamber in a conventional fluidized bed using a CFD technique. The simulated data were obtained through the commercial CD (computational fluid dynamics), where the velocity profile and pressure profile will be calculated by using a 2D numerical simulation. A review of the design plenum methodology will be presented and will be discussed together the numerical simulations.

**Keywords:** plenum, fluidized bed, computational fluid dynamics