UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Seminário do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química

IX Oktoberfórum – PPGEQ

19, 20 e 21 de outubro de 2010

ESTUDO DA LIMPEZA DE GASES ATRAVÉS DO USO DE FILTROS GRANULARES

Letícia Xavier Corbini[1], Nilson Romeu Marcílio[2]

[1] Lasim – Laboratório de Simulação
[2] LPR – Laboratório de Processamento de Resíduos
Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)
R. Eng. Luis Englert, s/n. Campus Central. CEP: 90040-040 - Porto Alegre - RS - BRASIL,
E-MAIL: {lcorbini, nilson}@enq.ufrgs.br

Resumo: *Em sistemas de geração de energia a partir de carvão (IGCC), um dos maiores problemas está na retenção de particulados à jusante da combustão e à montante da turbina, para evitar incrustações e minimizar as emissões atmosféricas de poluentes. A principal proposta deste trabalho consiste no estudo de um sistema de remoção a seco deste particulado, utilizando um filtro granular. O estudo consiste, neste primeiro momento, na simulação em estado estacionário, usando o software CFX 11.0®, para avaliar a perda de carga no sistema proposto.*

Palavras-chave: *filtros granulares; filtração de gases; particulados; CFD*

1. Introdução

O Brasil possui reservas significativas de carvão mineral apesar disso, este combustível representa apenas 6% da demanda total de energia no país. Esta baixa participação na matriz energética do país se deve às características do carvão presente no solo brasileiro, como o baixo poder calorífico, elevado teor de cinzas e alto teor de enxofre. Apesar destas desvantagens, existem tecnologias promissoras para a geração de energia a partir do carvão, entre elas destaca-se o sistema integrado de gaseificação e ciclo combinado (Integrated Gasification Combined Cycle System - IGCC). Neste ciclo ocorre inicialmente a gaseificação do carvão e posteriormente a combustão dos gases em uma turbina. A produção de energia pelo IGCC prescinde da remoção do material particulado e dos gases ácidos em regiões de alta temperatura com a vantagem de não utilizar a água como veículo, minimizando custos de tratamento e impacto ambiental. O projeto que engloba este trabalho consiste na execução e experimentação de um sistema de remoção a seco de material particulado e gases ácidos, provenientes da combustão dos carvões minerais em estudo, em escala laboratorial.

Sistemas de geração de energia utilizadas em termelétricas à carvão, como o IGCC, requerem uma remoção eficiente de partículas finas oriundas de altas temperaturas e altas pressões de gás. A remoção destas partículas é um ponto crítico deste sistema, pois além de proteger à jusante do trocador de calor e componentes da turbina a gás de incrustações e da erosão, vai também de encontro as exigências ambientais.

Existem diversos técnicas para remoção de partículas em escoamento de gases à altas temperaturas, como ciclones, lavadores de gases, precipitadores eletrostáticos, etc. Porém, para o caso de plantas termoelétricas são utilizados, em sua maioria, filtros granulares de leito fixo ou móvel, devido à alta temperatura aplicada nestes processos (Yang e ZHOU, 2007).

Além disso, filtros granulares se mostram mais atrativos devido ao baixo custo de operação e construção, confiabilidade em operação a altas temperaturas e com potencial para remoção simultânea de sólidos ou contaminantes. Os filtros granulares podem ser divididos em leitos fixos ou móveis.

Anteriormente a este trabalho, um modelo de filtro foi proposto considerando estas características e estudos recentes que abordam a remoção de particulados (Patente Prof. Celso Martins). O modelo a ser estudado é um filtro de leito granular composto por esferas de vidro com o objetivo de reter partículas de cinza de carvão. O sistema proposto está apresentado nas Figuras 1 e 2.

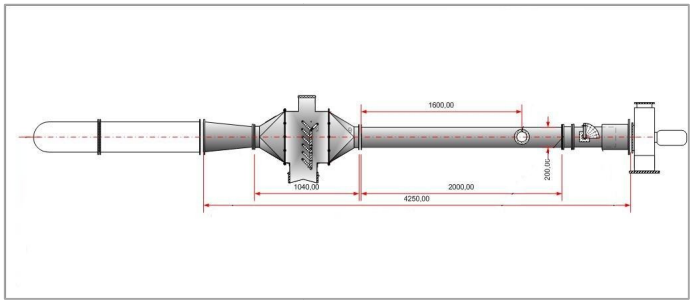

Figura 1. Sistema completo com filtro, tubulações e ventilador.

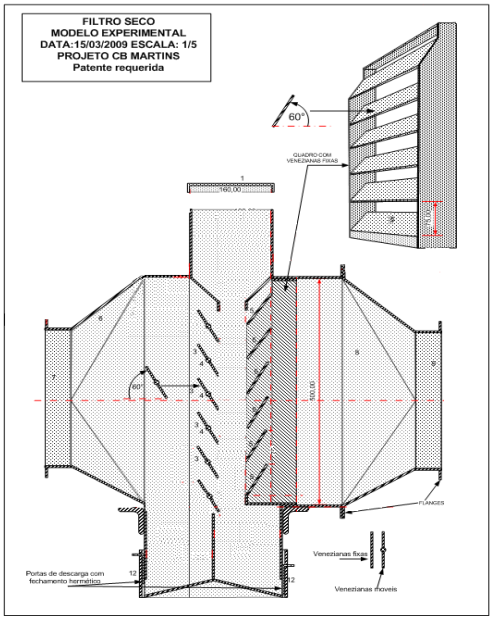

Figura 2. Detalhe interno do filtro estudado e calhas que retêm o meio filtrante.

O ar entra pela tubulação e o particulado (cinza) é injetado na linha. Ambos entram no filtro pelo bocal esquerdo e cruzam o meio filtrante granular, composto de esferas de vidro, e saem pelo bocal direito. O meio filtrante é inserido no filtro na parte inferior e fica distribuído entre das calhas podendo ser retirado, quando saturado, pelo fundo através das aberturas. As calhas do lado direito são fixas e as do lado esquerdo, móveis, o que permite a variação do ângulo destas, aumentando, assim, a espessura do meio filtrante.

O principal objetivo desse trabalho é avaliar a queda de pressão dentro deste filtro de leito fixo granular e com isso verificar a eficiência de remoção de partículas superiores a 5μm. Para fazer esta análise será utilizada a ferramenta computacional CFD (Computational Fluid Dynamics) na simulação numérica deste processo.

O principal emprego da simulação computacional é a investigação da influência da velocidade de filtração e a máxima queda de pressão no leito, como pode ser visto na maioria dos estudos para diferentes tipos de filtros com limpeza de gases como é o caso de Dittler e Kasper (1999) que simularam um modelo de filtro bidimensional em regime semi-estacionário para prever a queda de pressão em distintas eficiências de regeneração, levando em conta também a espessura e a resistência do meio filtrante. Deuschle et al. (2008) estudaram um dispositivo chamado de DPF (Diesel Particulate Filter) filtro para retenção de particulados oriundos da queima do diesel e investigaram o depósito e a regeneração deste filtro através de ferramentas computacionais. Na pesquisa de Tanthapanichakoon et al. (2008), foi estudado o comportamento dinâmico do fluxo de gás em um protótipo de um filtro duplo cerâmico utilizando ferramentas computacionais (CFD). E no trabalho de Li et al. (2006) é simulado o fluxo de gás em um vaso contendo três filtros vela para prever a evolução da velocidade do gás e temperatura durante a filtração e a limpeza do filtro.

Neiva e Goldstein (2002) realizaram um estudo de perda de carga e acúmulo de torta em um filtro com meio filtrante de fibra cerâmica e particulados oriundos de carbono fixo provenientes de um gaseificador de carvão e os resultados foram comparados com diferentes modelos matemáticos da literatura. Maier et al. (1999) utilizou métodos de simulação para modelar o escoamento em um leito de esferas empacotadas e comparou os resultados obtidos com a teoria de distribuição de tamanho de poros sob diferentes condições de operação.

Um estudo experimental realizado por Yang e Zhou (2007) mostra que um filtro granular de duas camadas (areia e perlita) para altas temperaturas teve um aumento de eficiência de coleta de 99,9% devido ao acúmulo de torta na superfície do meio. Stanghelle et al. (2007) realizaram um estudo que investigou a limpeza de gases à altas temperaturas oriundos da gaseificação de biomassa utilizando um filtro granular (leito constituído de esferas de óxido de alumínio) e obtiveram resultados com baixa perda de carga e elevadas eficiências de remoção de cinzas volantes.

Um estudo completo de leitos granulares foi realizado por Colver et al. (2002) para melhorar o desempenho do leito móvel e otimizar o desempenho do processo analisando o tamanho de partículas, taxas de alimentação etc.

Um estudo semelhante ao que será feito neste trabalho, porém em escala industrial foi realizado por Porciúncula et al. (2009), no qual foram realizadas diferentes simulações do escoamento em meio poroso em estado estacionário e dinâmico verificando a perda de carga com o tempo.

2. Filtração - Principais Conceitos

A filtração atua na remoção de partículas sólidas de um fluido que passa através de um meio filtrante onde as partículas sólidas, acima de certo diâmetro ficam depositadas e as de diâmetros menores passam pela barreira. O fluido escoa através do meio filtrante devido a uma diferença de pressão aplicada neste meio. A eficiência de separação é determinada pelo meio filtrante.

A maioria dos sistemas que envolvem a remoção de contaminantes está focada nas partículas finas, ou seja, partículas finas o suficiente para ficarem suspensas na atmosfera por longos períodos de tempo. Por este motivo, tanto o tamanho médio da partícula, como sua distribuição de tamanho, têm grande influência sobre o tipo de filtro que será escolhido, considerando a eficiência de filtração, energética e rentabilidade.

Os filtros são classificados de acordo com as pressões aplicadas a montante e a jusante do meio filtrante. Os filtros são divididos em três principais grupos: filtros de torta, filtros de clarificação e de fluxo tangencial. Filtros de torta separam relativamente grandes quantidades de sólidos na forma de tortas ou lama. Nos filtros clarificadores são removidas pequenas quantidades de sólidos para se obter um gás limpo. As partículas sólidas ficam retidas no interior do meio filtrante ou em sua superfície externa. Estes filtros diferem dos filtros em torta, pois os poros do meio filtrante são muito maiores em diâmetro que as partículas a serem removidas.

Nos filtros de fluxo tangencial o fluxo de alimentação das partículas sólidas passa tangencialmente ao meio filtrante a uma velocidade bastante elevada. O meio filtrante utilizado pode ser metálico, cerâmico ou

uma membrana polimérica de poros pequenos. Alguma parte do fluido passa através do meio como um filtrado limpo, deixando uma suspensão mais concentrada para trás.

Outro ponto importante a ser considerado na filtração é a escolha do meio filtrante, ele deve ser de um material compatível com a suspensão de particulados e seus componentes, por exemplo, na filtragem de ar quente ou de um líquido corrosivo (ácido mineral) ou sólidos abrasivos.

2.1. Filtração de Gases

Os filtros de ar são classificados de acordo com sua eficiência de filtração, medidas em condição padrão definidas. Porém não existe um padrão internacional único para essa classificação, mas se utiliza como padrão as normas dotadas pelos comitês europeus e americanos, como por exemplo, CEN (Comité Européen des Normalisations) e EUROVENT (Comité Europeu da Air Handling & Refrigeration Equipment Manufacturers), bem como nos Estados Unidos pela ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) (Sutherland, 2008). Estas classificações são consideradas adequadas como métodos comprovados para concepção de meios de filtragem de ar de acordo com a massa média de poeira.

A unidade de filtro de ar deve ser selecionada com base nos seguintes pontos:

- Nível de filtragem necessária;
- Custo-efetividade;
- Eficiência de coleta estável;
- Capacidade de armazenamento de pó a um nível de pressão baixa.

As condições que devem ser seguidas no processo são:

- Fluxo de ar deve ser mantido uniforme tanto quanto possível em toda a face do filtro;
- Utilização de pré-filtros em conjunto com filtros de alta eficiência para aumentar a vida útil desses;
- Possibilidade de instalação de persianas e telas para otimizar o escoamento do ar através do filtro.

2.2. Filtração Granular

Dentro da filtração, ou limpeza de gases se destacam os filtros granulares. O princípio básico da filtração granular é a remoção de partículas suspensas de um fluxo gás-sólido que passa através do meio filtrante composto pelo material granular. As partículas do fluxo ficam retidas sobre a superfície externa dos grânulos devido à interceptação mecânica ou outros fatores como inércia, gravidade, resistência, difusão, etc. O leito granular pode ser inerte ou quimicamente ativo utilizado para remoção de componentes gasosos (como por exemplo, os gases ácidos).

Também chamado de filtro de lavagem a seco, este filtro tem como principais aplicações o tratamento de gases ácidos, remoção de poeira e cinza e tratamento de gases provenientes de processos de incineração e combustão. Pode ser combinado com outros tipos de filtros para uma maior eficiência de remoção de gases ácidos, metais pesados e dioxinas.

O tamanho das partículas é o principal parâmetro que limita a eficiência da coleta de partículas. A velocidade relativa do gás, ou a velocidade de impacto, também é um fator importante a ser considerado na eficiência de filtração. Para eficiências iguais a velocidade do gás é inversamente proporcional ao quadrado do diâmetro das partículas, o que significa um aumento na exigência enérgica com a diminuição do tamanho das partículas, principalmente para diâmetros menores que 1 μm. Este fenômeno se deve à turbulência que, devido à alta energia, incentiva a aglomeração através do efeito browniano e as forças eletrostáticas de Van der Waals. Estes fatores são decisivos para partículas menores que 2 μm.

Os filtros granulares podem ser divididos em leito móvel e fixo. Em filtros de leito fixo a queda de pressão aumenta continuamente com a retenção das partículas de poeira no filtro, devido à formação de uma torta. A filtração é continua até que seja necessário parar o processo para a regeneração e/ou limpeza do meio filtrante. Quanto menor o tamanho dos grânulos do meio filtrante, maior a eficiência de retenção. Consequentemente, o tamanho das partículas que formam o leito é escolhido com a intenção de conciliar a eficiência de retenção e a queda de pressão no leito. Usualmente, o tamanho dos grânulos não é menor que 1 mm em filtros com leito de uma camada.

Já a filtração em leito móvel é mais eficiente comparada com leitos fluidizados, já que este último exige um fluxo de gás uniforme, porém não tão eficiente quanto aos processos em leito fixo. Além disso, a filtração em leito móvel também é útil na captura de outros contaminantes presentes no carvão, através da utilização de leitos reativos (absorventes).

Na operação em leito móvel o meio filtrante é constituído de um material granular disposto verticalmente e mantido por grades ou venezianas. Os grânulos do leito descem e são removidos no fundo do filtro, enquanto o gás passa horizontalmente através do meio filtrante. O fluxo do leito deve ser mantido constante e uniforme, sem zonas estagnadas. Estas zonas são um problema neste tipo de filtração, pois elas causam um aumento da queda de pressão no filtro com o tempo. Para corrigir este problema, muitos estudos tem se mostrado eficientes, testando um novo design para as paredes e venezianas (Hsiau et all, 2008) ou até utilização de peças corretoras no interior da zona do leito (Chou e Chen, 2006).

A utilização das venezianas, tanto para leito móvel ou fixo, aumenta em duas vezes a superfície de filtragem, comparada com a área frontal do filtro.

3. Escoamento através de leitos compactos

A taxa de transferência do fluido para as partículas sólidas e, portanto, a perda de pressão no escoamento através do leito, está relacionada aos mecanismos físicos de ocorrência do escoamento. Num leito completo a trajetória do fluxo é constituída por muitos canais preferenciais. No escoamento através destas passagens a fase fluida é repetidamente acelerada e desacelerada e sofre repetidas perdas de energia cinética.

Nas velocidades de escoamento baixas (como é o caso da velocidade utilizada neste trabalho) através de passagens muito pequenas, as perdas de energia cinética

são pequenas em comparação com as perdas pelo arraste.

A equação conhecida como Kozeny-Carman é usada com êxito no cálculo da perda de carga através de leitos compactos. Foi originalmente deduzida por Kozeny, que utilizou um modelo simplificado, com diversos tubos capilares de comprimentos e diâmetros iguais para descrever o leito compacto.

$$\Delta \boldsymbol{P} = \left[\frac{36\beta(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^2}\right]\left[\frac{1}{(\varphi d_p)^2}\right]\boldsymbol{\mu L u} \quad (1)$$

Onde $\Delta \boldsymbol{P}$ é a perda de carga no meio poroso (Pa), $\boldsymbol{\varepsilon}$ é a porosidade do meio (adimensional) , d_p é o diâmetro médio das partículas (m), φ é a esfericidade das partículas (adimensional) e o parâmetro β, denominado fator de forma (adimensional), é calculado de acordo com a geometria de filtração transversal ao escoamento (Berker, 1963 apud Massarani, 2002). Nesta equação tem-se também $\boldsymbol{\mu}$ que representa a viscosidade (Pa.s) e $\boldsymbol{u}$ a velocidade superfical do fluido no meio poroso (m.s^{-1}).

De acordo com a lei de Darcy a velocidade superficial do fluido sobre um meio poroso é diretamente proporcional à perda de carga através do meio:

$$\Delta \boldsymbol{P} = \left(\frac{1}{k}\right)\boldsymbol{\mu L u} \quad (2)$$

Onde L é a espessura da camada de leito (m) e k é a permeabilidade hidráulica (m^2) que depende das características estruturais do meio poroso. A inclinação da curva de dados experimentais de velocidade de filtração u versus a perda de carga $\Delta \boldsymbol{P}$ é uma das formas de se estimar a permeabilidade hidráulica. Existem, também, correlações que possibilitam estimar a permeabilidade com base na geometria de filtração, como por exemplo, a equação de Blake-Kozeny (3), obtida igualando as equações (1) e (2) e isolando k.

$$\boldsymbol{k} = \frac{(\varphi d_P)^2 \varepsilon^3}{36\beta(1-\varepsilon^2)} \quad (3)$$

Esta equação relaciona a permeabilidade (k) com a porosidade ($\boldsymbol{\varepsilon}$) e propriedades estruturais das partículas do meio filtrante.

4. Modelagem Matemática

As equações de Navier- Stokes representam o transporte de quantidade de movimento.

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t}\left(\rho u_j u_i\right) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right) + S^{u_i} \quad (4)$$

Na equação (4) o primeiro termo do lado esquerdo representa o acúmulo da propriedade e o segundo termo corresponde à parcela advectiva, de onde surgem as fortes não-linearidades destas equações. Os termos difusivos estão no lado direito das equações, representados pela difusividade de quantidade de movimento. Nesta equação tem-se $\boldsymbol{u_i}$ e $\boldsymbol{u_j}$ que representam as velocidades em m.s^{-1}, $\boldsymbol{t}$ o tempo em segundos e **P** a pressão em Pa.

O termo $\boldsymbol{S}$ representa a geração ou consumo de cada propriedade e tem origem distinta em cada uma das equações de conservação. Nas equações de energia e massa, o termo de geração está relacionado com a geração térmica de energia e a geração de componente via reação química. Já na equação de quantidade de movimento, Equação (4), o termo de geração está associado ao campo gravitacional em uma direção especificada. Então, neste caso, $\boldsymbol{S^{u_i}}$ representa a fonte de quantidade de movimento dada em kg.m^{-2}.s^{-2}.

A equação de conservação de massa no sistema de coordenadas cartesianas, na forma conservativa é representada abaixo.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (5)$$

Onde $\boldsymbol{\rho}$ é a massa específica do fluido (kg.m^{-3}).

A geometria utilizada neste problema é tridimensional e foi adotado um modelo de turbulência k-$\boldsymbol{\omega}$ que tem como uma de suas vantagens o tratamento próximo a parede pra baixos valores de número de Reynolds. Este modelo não envolve as complexas e não-lineares funções de amortecimento requeridas pelo modelo k-$\boldsymbol{\varepsilon}$, portanto, mais robusto e de convergência mais fácil, estão expressas especialmente para malhas com qualidade inferior.

As equações do modelo de turbulência da energia cinética k e da dissipação turbulenta $\boldsymbol{\omega}$ nas equações (6) e (7) respectivamente.

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \nabla.(\rho u_i) = \nabla\left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k}\right)\nabla k\right] + P_k - \beta'\rho k\omega \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \nabla(\rho u_i \omega) = \nabla.\left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\omega}\right)\nabla\omega\right] + \alpha\frac{\omega}{k}P_k - \beta\rho k\omega^2 \quad (7)$$

Onde $\boldsymbol{\mu_T}$ é viscosidade turbulenta (Pa.s) e P_k é a produção turbulenta (kg.m^{-1}.s^{-3}).

A equação utilizada para descrever o transporte de particulados é baseada na 2ª lei de Newton, como está apresentado na equação (8):

$$m_P\frac{du_P}{dt} = \frac{C_D\rho_f A_P|u_f - u_P|(u_f - u_P)}{2} + \frac{\pi {d_P}^3(\rho_P - \rho_f)g}{6} \quad (8)$$

Nesta equação $\boldsymbol{m_P}$ representa a massa da partícula (kg), $\boldsymbol{u_P}$ a velocidade da partícula (m.s^{-1}), $\boldsymbol{u_f}$ a velocidade do fluido (m.s^{-1}), $\boldsymbol{C_D}$ o coeficiente de arraste (dimensional), $\boldsymbol{\rho_f}$ a massa específica do fluído (kg.m^{-3}), $\boldsymbol{A_P}$ a área transversal da partícula (m^2), $\boldsymbol{\rho_P}$ a masa específica da partícula do leito (kg.m^{-3}) e $\boldsymbol{g}$ a aceleração da gravidade (m.s^{-2}).

O termo do lado esquerdo da igualdade na equação (8) representa a aceleração da partícula, enquanto que os termos do lado direito representam, respectivamente, as forças de arraste e de campo gravitacional. O balanço de massa para cada componente está representado na equação (9):

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j C_i)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(D\frac{\partial C_i}{\partial x_j}\right) \quad (9)$$

Onde C_i representa a concentração do componente *i* (kg.m^{-3}) e D a difusividade (m^2.s^{-1})

4.1. Geometria do Problema

Neste projeto está sendo estudado um filtro seco de baixa temperatura cujo objetivo é a retenção de particulados da queima de carvão (cinzas volantes). Foi construída uma versão bancada deste filtro (Figura 3), na qual serão realizados experimentos sob diferentes condições para validação dos resultados das simulações. Este filtro está localizado no laboratório LETA (Laboratório de Ensaios Térmicos e Aerodinâmicos) pertencente à Escola de Engenharia Mecânica da UFRGS. Para este projeto foi desenvolvido e neste momento está sendo calibrado e otimizado um dosador de partículas para o filtro (Zimmer, 2009).

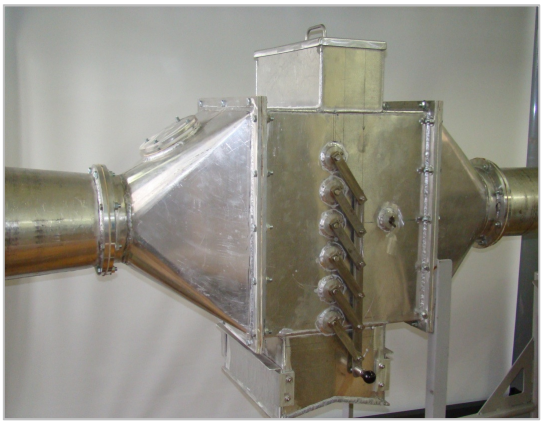

Figura 3. Filtro em escala de bancada.

Foram realizadas até agora dois testes de malha para esta geometria. Um malha mais grosseira (Malha 1) e outra mais refinada (Malha 2) como mostra a Tabela 1.

Tabela 1. Dados das malhas geradas para o filtro.

Testes	Tetraedros	Prismas	Meio Poroso (Tetraedros)	TOTAL
Malha 1	2896801	122	994405	2908495
Malha 2	2889221	142	1627337	3602890

O filtro é formado por duas seções cônicas ligadas por um sistemas de 6 conjuntos de calhas, cuja função é sustentar o meio filtrante. A introdução do meio filtrante é feita pela parte superior e a retirada do leito saturado é feita pela parte inferior do filtro pelas aberturas laterais. O sistema de calhas tem a capacidade de aumentar a espessura do meio filtrante, pois uma parte das calhas é móvel, como pode ser visto na Figura 3.

A espessura do meio filtrante pode variar de 100 mm a 150 mm e o comprimento total do filtro (equipamento) é em torno de 750 mm.

As condições de operação consideradas na simulação deste filtro são:

- Regime de escoamento: estado estacionário;
- Vazão de alimentação na entrada: 144 m^3.h^{-1};
- Velocidade do ar na entrada do leito: 0,565m.s^{-1}
- Porosidade do meio filtrante: 0,4;
- Diâmetro médio das partículas do meio filtrante: 1e 2 mm;
- Temperatura da operação: 25°C;
- Particulado: Cinzas volantes (Fornecido pela Tractebel);
- Concentração mássica de particulados na alimentação: 140mg.m-^{3};
- Distribuição granulométrica (Realizada pelo LACER - Laboratório de Materiais Cerâmicos):
  - Diâmetro mínimo: 2,15 μm;
  - Diâmetro máximo: 54,51 μm;
  - Diâmetro médio: 23,10 μm;

Nas primeiras simulações realizadas considerou-se apenas ar na entrada do filtro, ou seja, os dados do particulado apresentados acima não foram levados em conta neste primeiro momento.

Na Figura 4 pode ser observada a vista lateral do filtro com o meio filtrante em destaque.

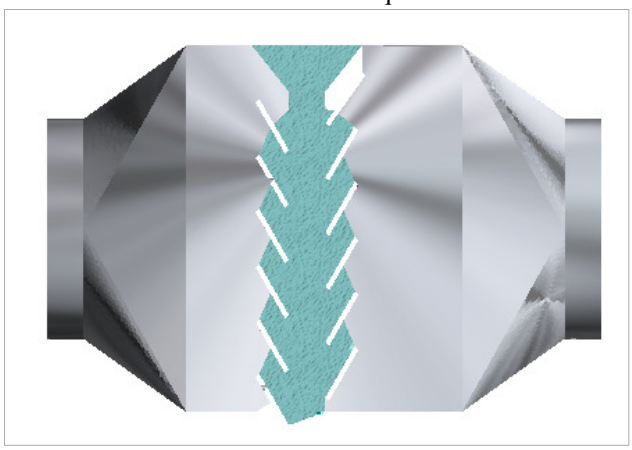

Figura 4. Vista lateral do filtro.

5. Resultados

Foram comparados os resultados das duas malhas e os valores não apresentaram uma grande diferença. Por este motivo, optou-se por trabalhar com a Malha 1, a qual não é tão refinada o que reduz o tempo para a simulação do problema.

O detalhe da malha utilizada está apresentado na Figura 5:

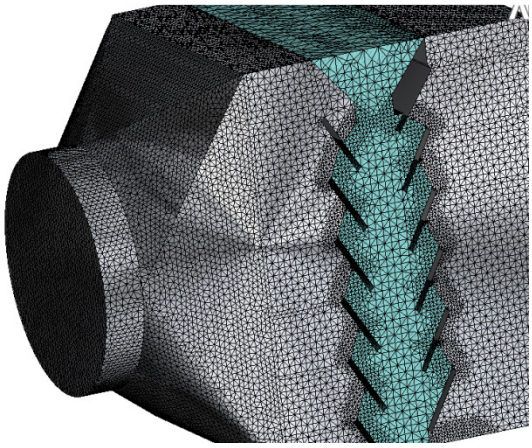

Figura5. Detalhe da malha do filtro.

Pode-se observar que a malha está mais refinada na

parte próxima as venezianas, na entrada do ar e na parede cônica, setores críticos da geometria, ou seja, de ocorrência de choques, maior turbulência, vórtices etc. No interior do leito optou-se por não refinar tanto a malha e assim facilitar a simulação, pois é impossível resolver as velocidades (u, v, w) exatamente como ocorrem no meio filtrante, apenas os valores médios destas.

O valor de perda de carga encontrado para a Malha 1 foi de 21504,77 mmH_2O.

A perda de carga consiste na diferença entre a média das pressões absolutas nas seções de entrada e saída do sistema.

Para que seja viável a operação é desejável que a filtração apresente a menor perda de carga possível e a maior eficiência possível de remoção de particulados.

O perfil de pressão obtido no filtro é apresentado na Figura 6.

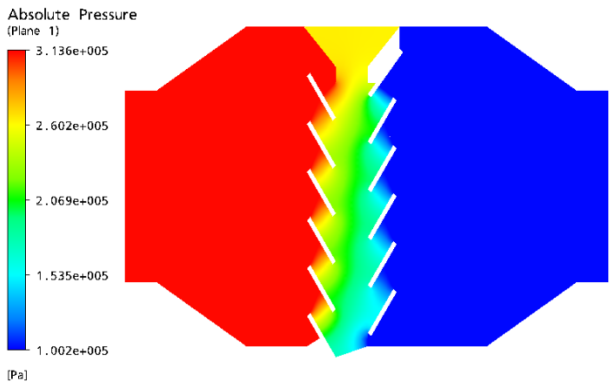

Figura 6. Perfil de pressão no filtro.

Observa-se que a queda de pressão nas seções cônicas é muito pequena se comparada com a queda de pressão no leito. Isto se deve ao fato da permeabilidade ser proporcional ao quadrado do diâmetro da partícula do elemento filtrante como mostra a equação (3), pois quanto menor seu valor, maior será a perda de carga, conforme a equação (2). Logo, a queda de pressão no leito é altamente dependente do tamanho da partícula.

As linhas de corrente de ar que circulam no filtro estão ilustradas na Figura 7 abaixo.

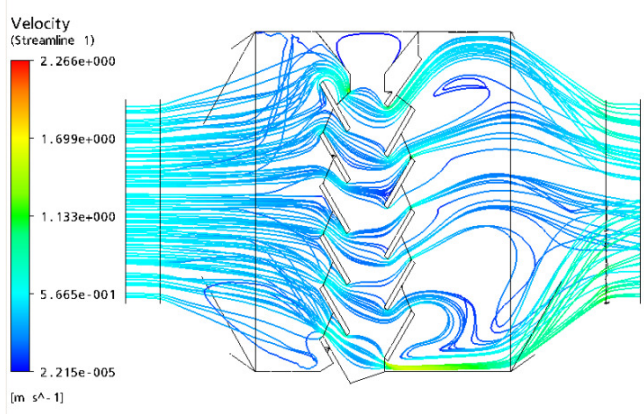

Figura7. Linhas de corrente de ar no filtro.

Observando a Figura 7, percebe-se que a velocidade do ar não é muito alta na maior parte do escoamento e menor ainda na seção cônica e na entrada do leito, porém, não são verificadas zonas de recirculação, o que poderia acontecer caso a velocidade sofresse um aumento (o que será verificado posteriormente).

6. Conclusões

Considerando o resultado encontrado de perda de carga, verifica-se que este apresentou um valor maior que o esperado para este modelo de filtro. Por este motivo serão realizados novos testes para confirmar este valor.

Para se obter resultados coerentes de pressão absoluta na saída do filtro, foram feitas algumas alterações na geometria para as simulações, como a retirada da parte inferior do filtro onde se acumulava um grande volume de esferas de vidro (meio filtrante).

7. Próximas Etapas do Trabalho

- Testar novas malhas para o filtro, para verificar os valores de pressão que foram obtidos nas primeiras simulações;
- Verificar se a parte da geometria desconsiderada nesta primeira etapa realmente influencia perda de carga;
- Variar o ângulo das venezianas, aumentando a espessura do meio filtrante e assim obter uma comparação para a perda de carga;
- Verificar a perda de carga para todo o intervalo de velocidade (0,2 a 1m.s^{-1}) com o qual se trabalhará em escala bancada;
- Realizar simulações considerando a injeção de particulados;
- Colocar em funcionamento o filtro de bancada para obtenção dos dados experimentais para futura comparação com os resultados computacionais.

7. Referências Bibliográficas

BERKER, J. Intégration des équations du mouvement d'un fluide visqueux incompressible. *Handbuch der Physik (Flügge, S., Ed.)*, v. VIII/2, Spring-Verlag, Berlin, p.384, 1963.

CHOU, C.; CHEN, S. Moving granular filter bed of quartz sand with louvered-walls and flow-corrective inserts. *Powder Technology*, v.172, p. 41-50. 2007.

COLVER, G.M.; SHI, H.; BROWN, R. C.; SOO, D. S. *Improving Efficiency of a Counter-Current Flow Moving Bed Granular Filter*. Relatório do trabalho realizado pelo grupo de estudo da universidade de Iowa, Departamento de Engenharia Mecânica, 2002.

DEUSCELE, T.; JANOSKE, U.; PIESCHE, M. A CFD model describing filtration, regeneration and deposit rearrangement effects in gas filter systems. *Chemical Engineering Journal*, v.135, p.49-55, 2008.

DITTLER, A.; KASPER, G. Simulation of operational behavior of patchily regenerated rigid gas cleaning filter media. *Chemical Engineering and*

Processing, v.38, p.321-327, 199.

HSIAU, S.S.; SMID, J.; TSAI, S.A.; TZENG, C.C; YU, Y.J. Flow of filter granules in moving granular beds with louvers and sublouvers. *Chemical Engineering and Processing* – Process Intensification, v. 47, p.2084-2097, 2008.

HSIAU, S.S.; SMID, J.; TSAI, F.H.; KUO, J.T.; CHOU, C.S. Placement of flow-corrective elements in a moving granular bed with louvered-walls. *Chemical Engineering and Processing*, v. 43, p. 1037-1045, 2004.

LI, H.;JI, Z.;WU, X.; CHOI, J. Numerical analysis of flow field in the hot gas filter vessel during the pulse cleaning process. *Powder Technology*, v.173, p.82-92, 2007.

MAIER, R.S.; KROLL, D.M.; DAVIS, H.T.; BERNARD, R.S. Simulation of flow in bidisperse sphere packings. *Journal of Colloid an Interface Science*, v. 217, p.70-73, 2002.

MASSARANI, G. *Fluidodinâmica em sistemas particulados*, 2ª Ed., Rio de Janeiro, p.70-73, 2002.

NEIVA, A.C.B.; GOLDSTEIN, L. A procedure for calculating pressure drop during the build-up of dust filter cakes. *Chemical Engineering and Processing*, v.42, p.495-501, 2003.

PORCIÚNCULA C.B.; MARCILIO, N.R.; GODINHO, M.; SECCHI, A.R. Flid dynamics simulation for desing of a biomassa gasifier. *Computer Aided Chemical Engineering*, v.27, p.1071-1076, 2009.

STANGHELLE, D.; SLUNGAARD, T; SONJU, O.K. Granular bed filtration of high temperature biomass gasification gas. *Journal of Hazardous Materials*, v.144, p.668-672, 2007.

SUTHERLAND, K. *Filters and Filtration Handbook*. 5ª ed., Burlington, USA, 2008. p. 369 - 481.

TANTHAPANICHAKOON, W.; CHARINPANITKUL, T.; JINYAWORN, W.; LAKASAMEEARUNOTAI, J.; AMORNKITBAMRUNG, M.; FUKUI, T.; YOSHIKAWA, M.; NAITO, M. CFD investigation of high-temperature gas filtration using twin ceramic candles. *Powder Technology*, v. 180, p.245-252, 2008.

YANG, G.; ZHOU, J. Experimental Study on a new dual-layer granular bed dilter for removing particulates. *Journal of China University of Mining and Technology*, v.17, p.201-204, 2007.

ZIMMER, L. *Projeto, construção e calibração de um dosador de poeira para ensaios de elementos filtrantes*. Trabalho de Conclusão de Curso – Departamento de Engenharia mecânica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2009.