

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE FILTRAGEM COMPACTO PARA USINAS DE ASFALTO

Ricardo Barbosa Damian, Eng.

CIBER Equipamentos Rodoviários Ltda. (empresa membro do Grupo Wirtgen) – Coordenador de Pesquisa & Desenvolvimento
Rua Senhor do Bonfim, 177 – 91140-380 Porto Alegre – RS – Brasil
rbdamian@yahoo.com

Horácio Antonio Vielmo, Dr.-Eng.

Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Departamento de Engenharia Mecânica – DEMEC
Rua Sarmento Leite, nº 425 – 90050-170 Porto Alegre – RS – Brasil
vielmoh@mecanica.ufrgs.br

Walter Rauen de Souza, Dr.-Ing.

CIBER Equipamentos Rodoviários Ltda. (empresa membro do Grupo Wirtgen) – Diretor Presidente
Rua Senhor do Bonfim, 177 – 91140-380 Porto Alegre – RS – Brasil
wrs@ciber.com.br

Elton Luis Antonello, Eng.

CIBER Equipamentos Rodoviários Ltda. (empresa membro do Grupo Wirtgen) – Gerente de Engenharia
Rua Senhor do Bonfim, 177 – 91140-380 Porto Alegre – RS – Brasil
antonello@ciber.com.br

Resumo. Atualmente a tendência do mercado de usinas de asfalto é exigir cada vez mais equipamentos com menor custo de operação e manutenção, menor emissão de poluentes e dimensões mais compactas para facilitar a locomoção. Neste trabalho é apresentado o desenvolvimento de um sistema de filtragem compacto para usinas de asfalto composto por um filtro de mangas e um pré-coletor de pó centrífugo. Análises de CFD (Dinâmica dos Fluidos Computacional) do escoamento dos gases de exaustão foram realizadas para melhorar o desempenho do sistema. O emprego desta moderna ferramenta de projeto aliado a novos conceitos de filtragem e automação de processos resultou em um produto inovador, que foi incorporado na linha de fabricação da empresa, já tendo sido fabricadas algumas unidades.

Palavras chave: Filtro de Mangas, Usina de Asfalto, Filtragem de Ar, Melhoria de Projeto, CFD.

1. Introdução

Atualmente a tendência do mercado de usinas de asfalto é exigir cada vez mais equipamentos com menor custo de operação e manutenção, menor emissão de poluentes e dimensões mais compactas para facilitar a locomoção. Por outro lado, devido ao aumento da competição de mercado entre os fabricantes de equipamentos de pavimentação em âmbito mundial, é necessário um trabalho constante no desenvolvimento de novos equipamentos agregando tecnologias modernas e reduzindo os custos.

Historicamente, o desenvolvimento de usinas de asfalto tem empregado métodos empíricos no desenvolvimento de seus produtos. Neste trabalho foram utilizadas análises de CFD (Dinâmica dos Fluidos Computacional) do escoamento dos gases de exaustão foram realizadas para melhorar o desempenho do sistema. O emprego desta moderna ferramenta de projeto aliado a novos conceitos de filtragem e automação de processos resultou em um produto inovador no mercado de pavimentação. A figura a seguir mostra o filtro de mangas (esq.) e pré-coletor de pó centrífugo (dir.).

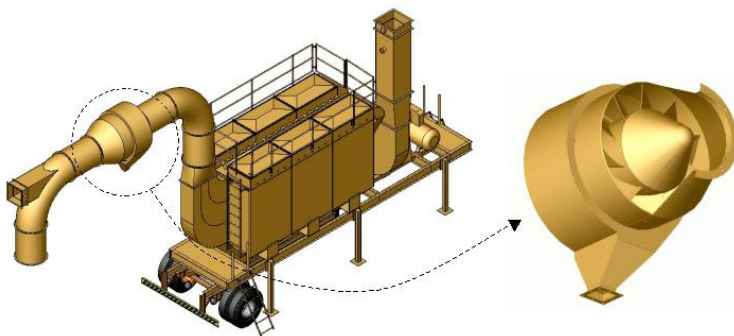


Figura 1-1 – Novo filtro de mangas e detalhe interno do novo pré-coletor.

2. Processo de Filtragem em Usinas de Asfalto

Denomina-se usina de asfalto a instalação utilizada para a fabricação da massa asfáltica a partir da mistura dos agregados (britas, areia, pó, entre outros) com o CAP (cimento asfáltico de petróleo). A figura 2-1 mostra os processos existentes em uma usina de asfalto.

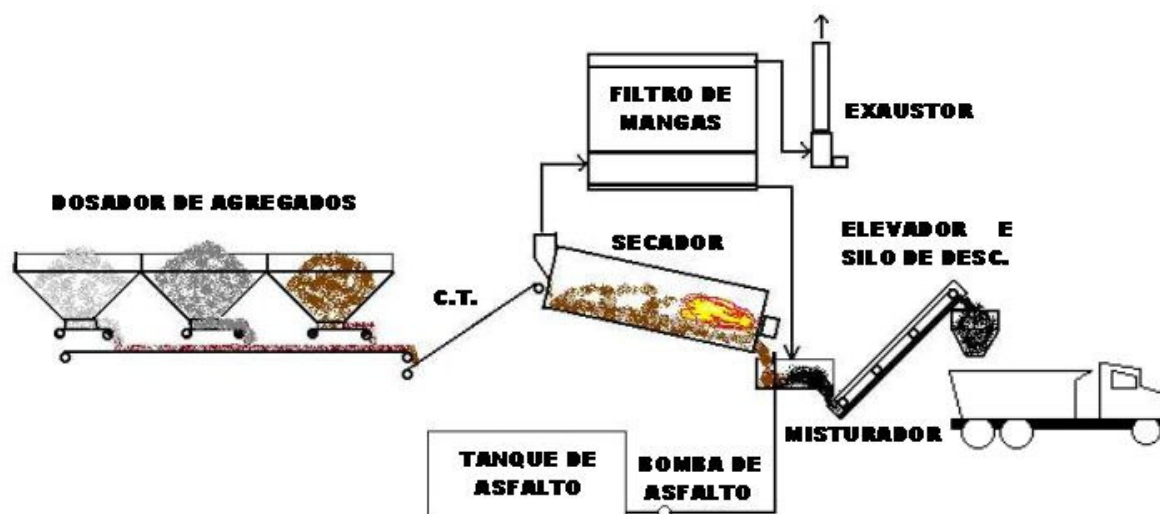


Figura 2-1 – Esquema de funcionamento de uma usina de asfalto.

Inicialmente os diferentes tipos de agregados que compõem a fórmula da mistura são dosados e transportados através de correias até o secador rotativo. O processo de mistura dos agregados com o CAP deve ocorrer isento de umidade e a uma temperatura em torno de 160 °C. Durante o processo de secagem, uma grande quantidade de pó é carregada pela exaustão dos gases de combustão do queimador. Este pó deve ser recolhido para que ocorra liberação limpa dos gases para atmosfera (seguindo normas ambientais), bem como para um reaproveitamento desse pó no processo. Após a secagem, os agregados vão para o misturador, onde são adicionados o asfalto líquido e o pó recuperado pelo sistema de filtragem.

O sistema de filtragem é normalmente composto pelas tubulações de exaustão, pelo filtro de mangas, exaustor e transportador helicoidal (caracol) de retorno do pó. É comum o emprego de um pré-coletor, normalmente um ciclone, para separar as partículas de maior granulometria, evitando o desgaste abrasivo prematuro do filtro de mangas.

Os gases de exaustão em usinas de asfalto contêm gases de combustão, poeira de agregado (normalmente granito, basalto ou calcário) e umidade (na forma de vapor) oriunda da secagem do agregado. A temperatura dos gases varia entre 100 e 200 °C, dependendo do tipo do secador (fluxo concorrente ou contra-fluxo) e da sua condição de operação. De conhecimento prático, procura-se evitar trabalhar abaixo de 100 °C para evitar a hidrólise (formação de ácido sulfúrico através da união dos resíduos de enxofre do combustível com a umidade condensada).

Os materiais mais empregados como meio filtrante são o Poliéster (suporta até 130 °C) e o *Nomex* (suporta até 220 °C e por sua vez, é bem mais caro que o Poliéster). O Poliéster é normalmente empregado em filtros de mangas para usinas de contra-fluxo, onde os gases de exaustão saem do secador com uma temperatura aproximada de 110 °C. Em usinas de fluxo concorrente os gases saem a 180 °C do secador, sendo necessário o uso de mangas de *Nomex*, e conseqüentemente, aumentando o custo do equipamento.

Atualmente os filtros de mangas possuem um sistema de limpeza automático de suas mangas do tipo jato pulsante reverso. Ar em alta pressão é soprado dentro da manga para expulsar o pó depositado em sua superfície externa.

3. Projeto Conceitual

O emprego de filtros de mangas em usinas de asfalto teve o seu início na década de 70 (Abad, 1991). Deste então vêm sendo feitas algumas evoluções de projeto, principalmente no sentido adicionar a automação de processo e facilitar o transporte e instalação em campo. Entretanto, de uma forma geral, o projeto destes sistemas tradicionais ainda carregam conceitos bastante conservadores em vista da tecnologia hoje disponível. O projeto deste novo sistema de filtragem teve como objetivo eliminar todos os superdimensionamentos existentes e incorporar conceitos modernos e inovadores.

A solução proposta neste trabalho é um modelo de filtro de mangas que utiliza mangas plissadas de Poliéster Laminado como elemento filtrante, operado automaticamente por um sistema de controle de temperatura dos gases de exaustão e um pré-coletor compacto de alta eficiência. A seguir serão descritas as inovações deste projeto.

3.1. Compactação das Dimensões

A chave para a compactação foi o emprego de pioneiro¹ de mangas plissadas. Esta foi a primeira vez que mangas plissadas foram empregadas com sucesso em filtros de mangas para usinas de asfalto. As vantagens dessa substituição estão no fato de que as mangas plissadas possuem cinco vezes mais área filtrante (diminuindo o número de mangas necessárias para uma mesma capacidade de filtragem) do que as mangas lisas convencionais. Desta forma, pode-se compactar bastante o filtro, reduzindo em muito o custo total do filtro.

A principal limitação do uso de mangas plissadas está no pequeno intervalo de temperaturas de trabalho à que estas podem ser submetidas (de 105 até 125 °C)². Para isto, foi desenvolvido em conjunto com o filtro um sistema de controle preciso da temperatura dos gases de exaustão que garante a utilização segura de mangas plissadas. Mais detalhes sobre a automação serão descritos no item 3.2.

No capítulo 4 serão discutidas as melhorias aerodinâmicas implementadas que possibilitaram também uma redução da área filtrante, e como conseqüência, uma redução no tamanho do filtro.

Para ilustrar a redução de dimensões, acompanhe na figura 3.1-1 à esquerda o filtro anterior e à direita o filtro novo, ambos com mesma capacidade de filtragem.

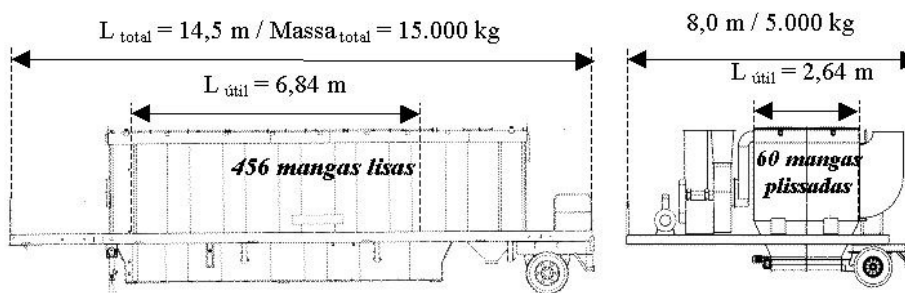


Figura 3.1-1 – Comparativo dimensional de filtros móveis entre o sistema tradicional e o novo.

Paralelo ao desenvolvimento dos filtros, foi desenvolvido também um modelo novo de pré-coletor, o Separador Estático (SE). Este possui dimensões bem menores que um ciclone convencional e não necessita de estrutura de suporte (figura 3.1-2), pois ele é instalado em linha com a tubulação de exaustão facilitando bastante o seu transporte e instalação. No capítulo 4 serão discutidas as técnicas de desenvolvimento do SE, bem como outras vantagens da sua aplicação.

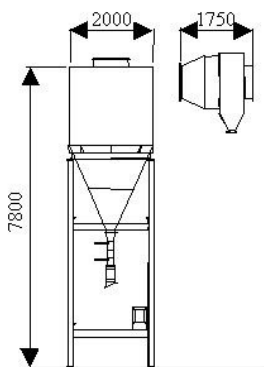


Figura 3.1-2 – Comparativo dimensional entre o ciclone e o separador estático [mm].

3.2. Automação do Processo

Devido à limitação de temperatura de trabalho das mangas plissadas foi desenvolvido um sistema de controle totalmente automático (sem necessidade de interferência do operador da usina) de temperatura e vazão dos gases de exaustão na entrada do filtro de mangas, conforme o esquema na figura 3.2-1.

¹ Foram feitas pesquisas intensas utilizando o banco de patentes, internet e contato com os fornecedores de mangas plissadas em todo o mundo;

² No caso da manga plissada a condensação de umidade junto com o pó causa o entupimento das plissas e 125 °C é a temperatura segura de utilização do Poliéster laminado;

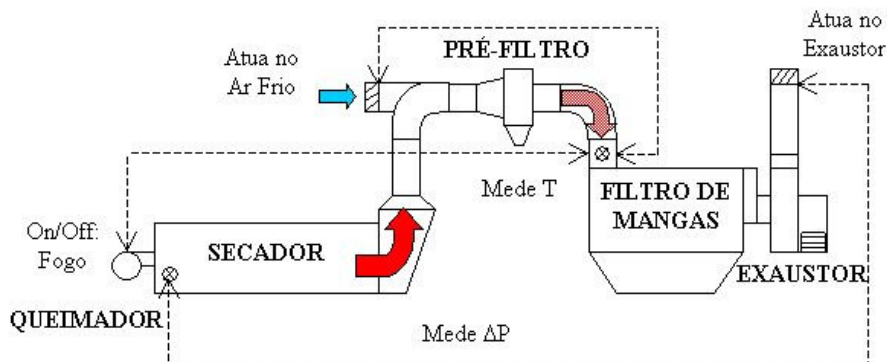


Figura 3.2-1 – Esquema de automação do controle da temperatura e da vazão.

Esse controle consiste num sensor de temperatura instalado na entrada do filtro de mangas que é ligado a um controlador (CLP) que atua sobre uma válvula de venezianas que adiciona ar frio (do ambiente) ao sistema conforme a necessidade, com o objetivo de manter a temperatura dos gases sobre as mangas dentro da faixa indicada de trabalho. Caso a temperatura dos gases continuar aumentando e a válvula do ar frio já estiver toda aberta, é cortado o fogo do queimador, pois deverá estar ocorrendo algum problema com a usina. Também, com a leitura da pressão na câmara de combustão é regulada a vazão de exaustão total da usina, via uma válvula de venezianas na chaminé do exaustor.

O controle da temperatura apresenta algumas vantagens importantes para o processo como o aumento da vida útil das mangas evitando os picos de temperatura ou a hidrólise (formação de ácidos por condensação de umidade). Já o controle de vazão mantém uma depressão constante (em torno de -50 Pa) na câmara de combustão, induzindo a entrada da quantidade ideal de ar secundário para a combustão, melhorando a sua eficiência e evitando a saída de pó na região do queimador.

3.3. Melhoria de Desempenho

O desempenho de um sistema de filtragem está relacionado a quatro fatores principais:

- Eficiência de filtragem;
- Consumo de energia elétrica;
- Vida útil das mangas;
- Influência na eficiência da combustão;

Neste projeto foram feitas algumas ações que melhoram o desempenho do sistema em cada um destes fatores, conforme será descrito a seguir:

A) MELHORIA DA EFICIÊNCIA DE FILTRAGEM: As mangas plissadas utilizam o conceito de filtragem de superfície, devido ao fato de serem confeccionadas em Poliéster Laminado. Este novo tecido apresenta melhores características de filtragem em relação às mangas lisas convencionais que são confeccionadas na forma de feltro agulhado (seja ela em Poliéster ou *Nomex*).

- *Filtragem de Profundidade*: O pó penetra na manga (Fig. 3.3-1 à esquerda), dificultando sua limpeza e a passagem do ar. A resistência mecânica do tecido é menor. Ao longo do tempo ocorre o entupimento irreversível da manga;
- *Filtragem de Superfície*: O pó se deposita apenas na superfície (Fig. 3.3-1 à direita). Menos ação mecânica é necessária para a limpeza. Menos perda de carga é gerada na passagem do ar. Menos partículas conseguem ultrapassar a manga;

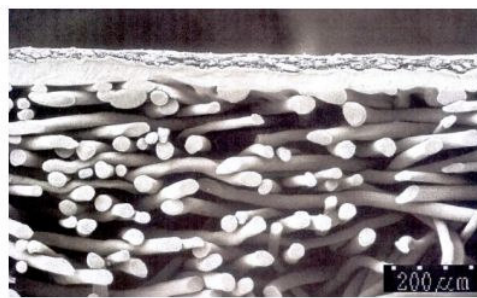


Figura 3.3-1: Detalhe da filtragem por profundidade (esq.) e filtragem por superfície (dir.).

B) **REDUÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA:** As melhorias na aerodinâmica interna do filtro e dutos de entrada e saída do mesmo e o emprego do conceito de filtragem de superfície reduziram a perda de carga do sistema, que reduziu a potência necessária do exaustor. Foi alterado o projeto do exaustor que era de pás radiais (eficiência de 55%) e passou a ser de pás curvadas para trás (eficiência de 85%). O menor número de mangas e o conceito de filtragem de superfície reduziram o consumo de ar de limpeza das mangas, possibilitando a redução do compressor de ar de limpeza das mangas. Todos estes fatores reduziram o consumo geral de energia elétrica do sistema em até 40%³;

C) **VIDA ÚTIL DAS MANGAS:** As melhorias na distribuição do ar em volta das mangas, a melhor resistência do Poliéster Laminado, a segurança conferida pelo sistema de automação do controle da temperatura dos gases e o emprego de um pré-coletor de alta eficiência (o Separador Estático) certamente auxiliam no aumento da vida útil das mangas. Outro ponto importante é a lavabilidade da manga plissada, que permite recuperá-las em casos de erros de operação da usina, como impregnação de resíduos de má combustão. Estimar quanto melhorou neste aspecto é ainda prematuro, pois é necessário muito tempo de acompanhamento. Espera-se conseguir comparar isto futuramente.

D) **INFLUÊNCIA NA EFICIÊNCIA DA COMBUSTÃO:** Conforme foi visto na seção 3.2., o controle automatizado da vazão da usina baseado no mantimento de uma depressão constante na câmara de combustão induz a quantidade ideal de ar secundário (excesso de ar de combustão, conhecido como o λ) para a chama, evitando a combustão incompleta ou resfriamento da chama;

4. Análise Aerodinâmica via CFD

Historicamente, a indústria de usinas de asfalto tem empregado métodos empíricos no desenvolvimento de seus produtos. Um desenvolvimento experimental de um componente de uma usina de asfalto (como um filtro de mangas) demanda tempo e é um processo caro, envolvendo custos com construção, operação e instrumentos de medição. Para reduzir o tempo e custos do desenvolvimento de novos produtos, foi empregada recentemente na CIBER a técnica de CFD.

Muitos processos fisicamente complexos estão envolvidos no funcionamento de uma usina de asfalto como combustão, secagem de sólidos, mistura sólido-líquido, separação e filtragem sólido-ar, transporte pneumático de partículas e muitos outros (Abad, 1991; Asphalt Institute, 1989). Análises numéricas utilizando CFD permitem um entendimento detalhado dos fenômenos físicos e processos químicos envolvidos dentro do equipamento, sendo mais rápida e barata quando comparada com outros métodos de desenvolvimento.

4.1 Objetivos da Simulação

A introdução de CFD na CIBER teve o seu início com a análise da forma de entrada dos gases em um filtro de mangas no modelo antigo (Damian et al., 2004). Foi verificado pela prática que este filtro apresentava problemas de desgaste prematuro nas mangas localizadas em regiões de altas velocidades (figura 4.1.-1).

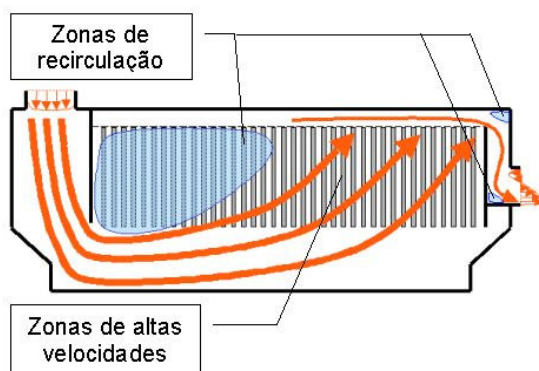


Figura 4.1-1 – Problemas observados na prática dos modelos tradicionais de filtro de mangas.

Após algumas simulações foi proposta uma nova forma da entrada dos gases de exaustão. A solução com defletores para o escoamento (figura 4.1.-2) foi adotada, ainda com uma certa insegurança quanto à validade da mesma, pois esta foi a primeira análise de CFD na empresa e teve várias simplificações geométricas (mangas em menor quantidade e em forma de paralelepípedo, por exemplo), servindo apenas como uma análise qualitativa.

³ Ex: Alguns modelos de filtros de mangas possuíam um motor de 60 c.v. no exaustor e um de 15 c.v. no compressor de ar. Neste novo projeto são empregados apenas 40 e 5 c.v., respectivamente;

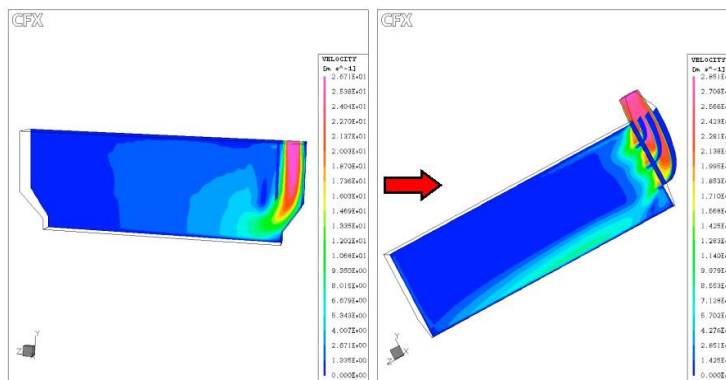


Figura 4.1-2 – Primeira análise de CFD na CIBER: modificação na entrada do filtro.

Após o funcionamento em campo de uma usina com este filtro de entrada modificada, verificou-se que para uma mesma área filtrante a perda de carga caiu de 800 Pa para 350 Pa. Isto se deveu unicamente ao fato da melhor uniformidade do escoamento do ar em volta das mangas. Esta análise, que teve grande resultado em campo, foi o “estopim” para o início de uma série de simulações de CFD em filtros de mangas. Atualmente, diversos outros componentes de usinas de asfalto vêm sendo estudados via CFD, em vista do potencial que esta ferramenta possui para melhorar o desempenho destes equipamentos.

Assim, para o desenvolvimento de uma nova linha de filtros desejou-se analisar com as simulações os seguintes pontos:

- Possibilidade de redução ainda maior da área filtrante em vista de estudos de uma melhor homogeneidade do escoamento em volta das mangas;
- Redução do desgaste por abrasão (tanto nas mangas quanto nas chapas do filtro) devido a altas velocidades;
- Redução da perda de carga desnecessária devida á altas velocidades e recirculações;
- Desenvolvimento de um pré-coletor mais eficiente e compacto, de modo a reduzir ainda mais a quantidade de partículas que vão para o filtro, aliviando o trabalho do mesmo;

4.2 Metodologia Aplicada

Todas as simulações apresentadas neste trabalho foram realizadas usando o código comercial (AEA Technology, 2002). Este código aplica o Método dos Volumes Finitos baseado em Elementos (Schneider and Raw, 1987; Maliska, 2003) para malhas não estruturadas com um solver acoplado totalmente implícito. Este acoplamento inclui as equações de massa, momento e acoplamento de fases no caso de escoamentos multifásicos, ou seja, é resolvido todo o sistema de equações para ambas as fases simultaneamente.

No CFX é possível o emprego de malhas não coincidentes ou diferentes (ex: tetraédrica e hexaédrica) utilizando o modelo de interface GGI (*Global Grid Interface*) que executa a interpolação das variáveis nas faces, resolvendo cada malha em matrizes diferentes.

A construção de malha não-estruturada no CFX 5 é feita conforme os seguintes passos:

- É gerada a malha superficial triangular de forma automática respeitando algumas lógicas de refino controladas pelo usuário;
- No caso de paredes, onde se deseja calcular efeitos como camada limite, os triângulos superficiais são inflados na direção normal à mesma formando uma camada progressiva de prismas;
- Após esta operação, é construído o resto da malha volumétrica utilizando volumes tetraédricos;

De forma geral, o CFX é um código bastante rápido, robusto e completo. A combinação de um *solver* acoplado totalmente implícito com um método de solução tipo *multigrid* permite a solução de casos grandes rapidamente e com poucas iterações. Os vários modelos físicos disponíveis e o emprego de malha não-estruturada tornam o CFX bastante eficaz na solução de casos industriais práticos.

A seguir será apresentada a metodologia empregada para cada caso de interesse. O apêndice 1 apresenta de forma detalhada as equações dos modelos utilizados nestas simulações.

A) SIMULAÇÕES DO FILTRO DE MANGAS:

As simulações do filtro de mangas foram feitas em regime estacionário, com geometria tridimensional, empregando o modelo *k-ε* para a turbulência. O fluido foi considerado como unifásico, incompressível e suas propriedades referentes ao ar 115 °C. Na entrada foi prescrita a vazão (40.000 m³/h), na saída foi dada a condição de *outlet* (gradientes nulos), nas paredes foi dada a condição de não-deslizamento com uma rugosidade de 500 μm e também foi adotado um plano de simetria, conforme o domínio de cálculo na figura 4.2-1 a seguir.

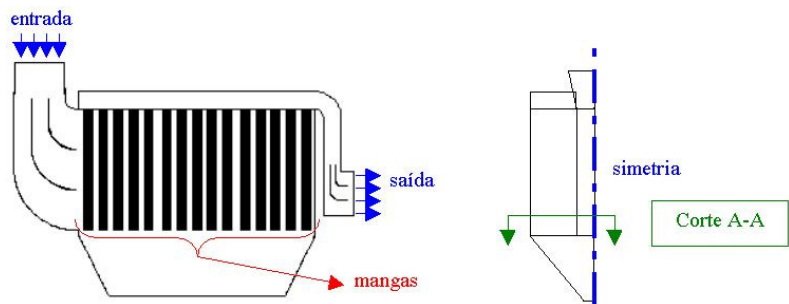


Figura 4.2-1 – Domínio de cálculo do filtro de mangas (vista lateral e frontal).

Na região das mangas, o meio poroso foi modelado com base na Lei de Darcy generalizada, que gera uma perda de carga linearmente proporcional à velocidade do escoamento nesta região, conforme a Equação 1. Esta condição foi implementada como uma fonte negativa nas equações de momento (AEA Technology, 2002; Piesch, 2000).

$$-\frac{\partial p}{\partial x_i} = K U_i, \quad K = \frac{\Delta p A}{Q e} \tag{1}$$

Onde “K [N.s/m⁴]” é a constante de permeabilidade do meio filtrante e “Δp [Pa]” é a perda de carga gerada pela passagem da vazão “Q [m³/s]” através da área de filtragem “A [m²]” de espessura “e [m]”. O dado da perda de carga em função da velocidade de passagem pelo meio filtrante foi informado pelo fabricante da manga plissada e confirmada em campo.

Na região das mangas foi utilizada malha hexaédrica visando à economia de volumes nesta região bem ordenada. Porém, nas demais regiões como curvas de entrada e saída, *plenum* e moega foram utilizadas malha tetraédrica com camada de prismas devido à complexidade de geometria e ao regime de altas velocidades.

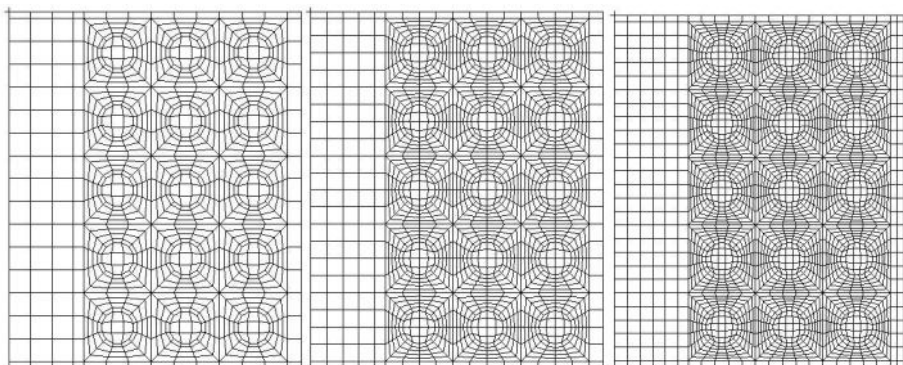


Figura 4.2-2 – Teste de independência de malha (corte A-A da figura 4.2-1).

Foi realizado o teste de independência de malha, conforme a figura acima. Observações dos resultados mostraram que perda de carga do filtro (medida pela pressão média ponderada na entrada menos na saída) é o valor mais sensível ao refino da malha. As três malhas da figura 4.2-2 foram testadas e conclui-se que a segunda malha já apresenta resultados satisfatórios de perda de carga, sendo portando o parâmetro de refino adotado para as simulações que se seguiram. As simulações, que utilizaram a malha de refino intermediário, utilizaram em torno de 1.500.000 volumes, foram rodadas em um computador *Pentium IV* com 2,4 GHz de processamento e 1 Gb de memória RAM. Foram necessárias cerca de 100 iterações até a convergência dos resíduos RMS de 10⁻⁴, procedimento que durou aproximadamente 4 horas.

B) SIMULAÇÕES DO PRÉ-COLETOR:

Nas simulações dos pré-coletores, foi adicionada ao fluido ar (fase gasosa contínua) uma fase sólida dispersa representando o material particulado. A transferência de momento entre as fases foi modelada com o modelo de partículas do modelo multifluido do CFX e foi utilizada a correlação do C_D (coeficiente de arraste) segundo Schiller-Naumann (AEA Technology, 2002). Foram consideradas as forças de empuxo devido à diferença de densidade entre as fases. Na entrada, foi prescrita a vazão de 40.000 m³/h de ar à 115 °C e na entrada e 1,25 kg/s de pó (equivalente à 3 % da produção de uma usina) com diâmetros de partícula variados (100, 74, 37 e 25 μm).

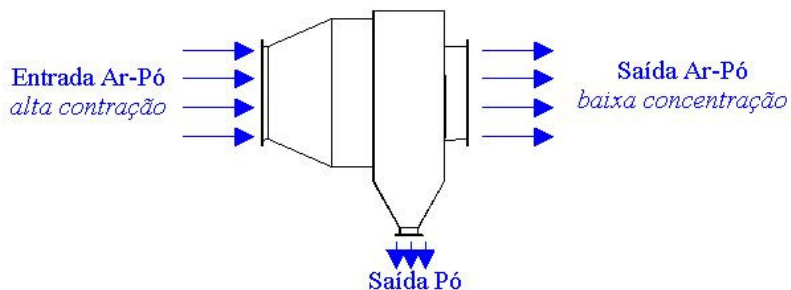


Figura 4.2-3 – Domínio de cálculo do pré-coletor.

No teste de independência da malha foi levado em conta a eficiência de coleta do pó e a perda de carga (Fig. 4.2-4). Desta forma foram testadas algumas malhas até se atingir um refinamento suficiente para não alterar os resultados.

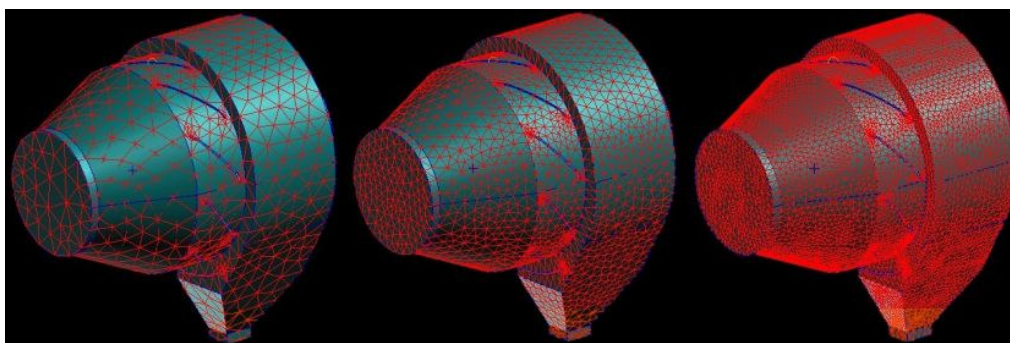


Figura 4.2-4 – Teste de independência de malha.

Usando a malha intermediária, que possui aproximadamente 500.000 volumes, as simulações duraram em torno de 2 horas.

4.3 Melhorias Implementadas

Como já foi comentado, umas das principais vantagens de simulações computacionais é a possibilidade de se testar várias configurações geométricas (ex: mostrado na figura 4.3-1) propostas desde a fase conceitual do projeto até as otimizações finais. Este procedimento de prototipagem virtual, possibilitou a identificação e o entendimento de alguns fatores que afetam o funcionamento do filtro e até então praticamente não eram citados na literatura sobre filtros de mangas disponível.

Evidenciou-se a importância da inserção de uma câmara de acalmo de velocidades logo após a entrada de gases, de forma a não expor diretamente as mangas aos gases em alta velocidade. Diversas simulações apontaram para a melhor forma de dispor esta câmara (figura 4.3-1 à direita), pois facilita inclusive questões de transporte do filtro.

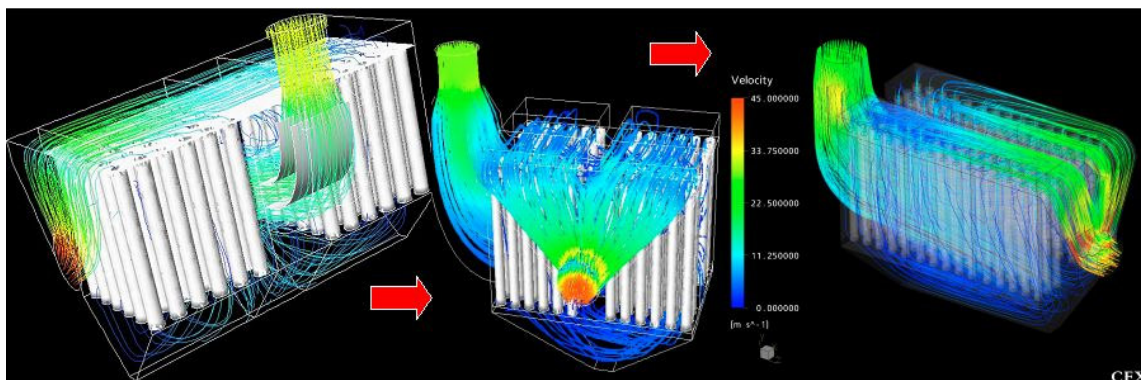


Figura 4.3-1 – Teste de configurações geométricas com a prototipagem virtual: em evidência as linhas de corrente do escoamento.

Outra questão importante, como já foi visto, é a forma da entrada dos gases no filtro. Neste caso, o casamento de uma entrada com três defletores de escoamento e a câmara de acalmo reduziram bastante os picos de velocidade e orientam a entrada no filtro, reduzindo a perda de carga.

Devido à necessidade de compactação, a saída do filtro foi projetada sem raio de curvatura, porém foram implementados também defletores para orientar a entrada no exaustor, pois uma curva abrupta causaria uma entrada não uniforme no mesmo, diminuindo a sua eficiência e gerando ruído e perda de carga.

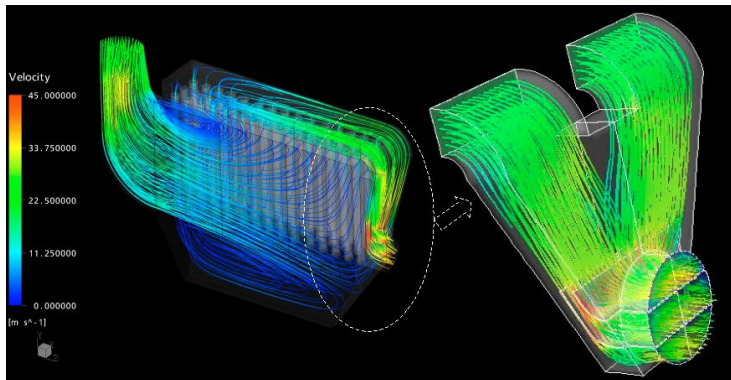


Figura 4.3-2 – Defletores na entrada e saída do filtro de mangas: menor perda de carga.

Para garantir que todas as mangas estão filtrando a mesma vazão de gases, deve-se primeiro garantir que todas as mangas possuem a mesma pressão antes (na câmara de mangas) e depois (no *plenum* superior) da mesma. Foram estudadas formas de distribuição e espaçamento de mangas, bem como a altura do *plenum* de modo a garantir a hipótese acima. O resultado está ilustrado na figura abaixo, que ressalta a uniformidade da pressão antes e depois das mangas.

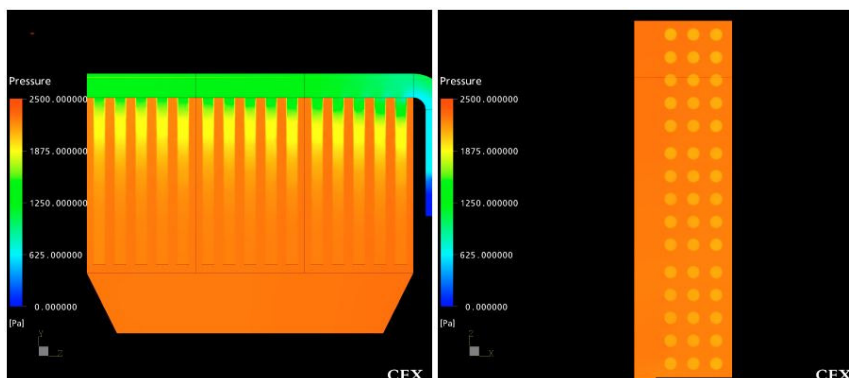


Figura 4.3-3 – Verificação de homogeneidade do campo de pressão: vista lateral e superior.

Ainda podemos verificar pela figura a seguir (Fig. 4.3-4) que o escoamento do ar na região das mangas está com baixas velocidades, entrando de maneira homogênea e lenta em todas as mangas.

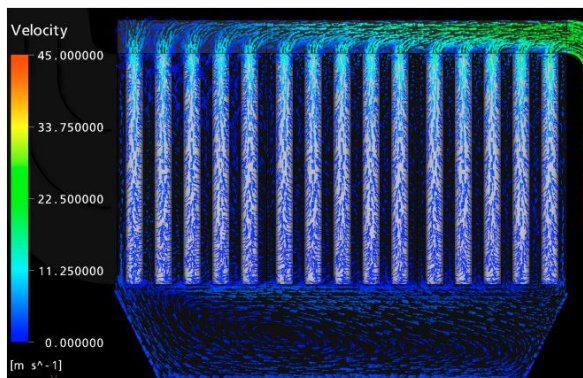


Figura 4.3-4 – Campo de vetores de velocidades: detalhe da entrada calma do ar nas mangas.

O separador estático foi um desenvolvimento totalmente novo. Ele apenas utiliza o mesmo princípio de centrifugação que o ciclone, porém sua forma é radicalmente diferente. O seu desenvolvimento foi totalmente virtual. Foram feitas mais de 80 diferentes simulações variando a sua forma (ângulo dos defletores, relações de diâmetro, formato da descarga,...) e observando a eficiência de coleta (para diversos diâmetros de partículas), perda de carga e pontos críticos de abrasão devido a altas velocidades.

O resultado final foi uma geometria compacta com eficiência superior ao ciclone e com uma perda de carga máxima de 1000 Pa. Não foram observados pontos com velocidades acima de 30 m/s, o que propicia um ambiente de menor abrasividade do que o ciclone (que apresenta velocidades de até 50 m/s na região de entrada (Damian et al., 2004)).

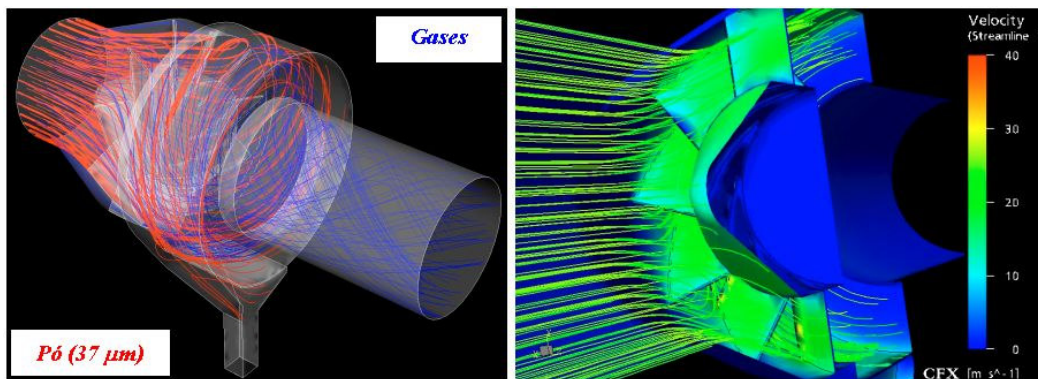


Figura 4.3-4 – SE: Detalhe das trajetórias na coleta de pó (esq.) e velocidade do pó nas paredes (dir.).

5. Homologação do Projeto

Foi construído um protótipo físico do sistema de filtragem e colocado em testes em uma usina de asfalto já existente. Foram feitas as devidas medições de processo (vazão, perda de carga, temperatura, eficiência de filtragem e consumo de energia elétrica e de combustível) para homologação do projeto. Os cálculos iniciais desviaram muito pouco (menor de 10%) dos valores medidos. Atualmente está sendo observado o desempenho do sistema ao longo do tempo, para analisar melhor as questões como o desgaste por abrasão e a vida útil dos elementos filtrantes.

Com o intuito de proteger o projeto do filtro de mangas e do separador estático, foram depositadas no INPI patentes de Modelo de Utilidade - MU (protegendo a aplicação deste sistema em usinas de asfalto) e de Desenho Industrial – DI (protegendo a forma construtiva) para ambos os equipamentos. As patentes de DI já foram concedidas.

6. Conclusões

Foi apresentado neste trabalho o desenvolvimento de uma nova linha de filtro de mangas compacta para usinas de asfalto. Motivado pelas tendências do mercado internacional e conhecendo as deficiências dos projetos tradicionais, este desenvolvimento incorporou modernos conceitos de filtragem, automação do controle de processo, portabilidade para instalação e transporte.

O ponto chave para a compactação das dimensões foi o emprego de mangas plissadas como elemento filtrante, em substituição às tradicionais mangas lisas até então empregadas em filtros de usinas de asfalto. As mangas plissadas, que possuem cerca de cinco vezes mais área filtrante, ainda agregam uma outra vantagem que é o processo de filtragem de superfície. A automação do controle da temperatura e vazão dos gases no filtro possibilitou a utilização segura destas mangas à condição de trabalho agressiva de gases quentes com poeira, vapor e resíduos de combustão presente nos gases de exaustão. Foi desenvolvido também um pré-coletor centrífugo compacto que possui eficiência de coleta maior que os ciclones anteriormente utilizados, aumentando a vida útil dos elementos filtrantes.

No entanto, o diferencial deste projeto foi o emprego da prototipagem virtual via simulações computacionais do comportamento do escoamento dos gases de exaustão no interior do sistema (filtro, pré-coletor, tubulações, etc.). Esta técnica, conhecida como CFD, permitiu analisar quase que de forma simultânea fenômenos como a distribuição do escoamento nas mangas, a abrasão localizada devido a altas velocidades, recirculações, desperdício de potência e perda de carga. Esta ferramenta de análise de projetos de alta tecnologia auxilia a desenvolver equipamentos mais confiáveis, eficientes e compactos com menor custo e em menor tempo que os métodos de projeto tradicionais.

O resultado da união de todas estas melhorias foi um produto compacto, prático, com melhor desempenho e inclusive com menor custo de fabricação. Desta forma, esta nova linha de filtros está bastante competitiva para o mercado internacional.

7. Referências

- Abab, I.M., 1991, "Plantas de Fabricacion de Aglomerado Asfaltico", Asociación Española de Construcción de Carreteras, Madrid, España.
- Asphalt Institute, 1989, "The Asphalt Handbook", Manual Series N° 4, USA.
- Brucato, A., Micale, G., Montante, G. and Scuzzarella, A., 2001, "Experimental investigation and CFD simulation of dense solid-liquid suspension in a fully baffled mechanically stirred tank", University of Palermo, Italy.
- CFX-5, "Solver Reference Manual", 2002, AEA Technology Engineering Software Ltd.
- Damian, R.B, Souza, W.R., Antonello, E.L., Portales, J. and dos Reis, M.F.V., 2004, "Improving the performance of asphalt plant components using CFD", Brazilian Congress of Thermal Engineering and Sciences, ENCIT. Rio de Janeiro, Brazil.
- Maliska, C.R., 2003, "Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional", 2ª ed., LTC Editora, Rio de Janeiro, Brasil.
- Piesch, M., 2000, "Mehrphasenströmungen", Skript, Universität Stuttgart, Deutschland.
- Schneider, G.E. and Raw, M.J., 1987, "Control-Volume Finite Element Method for Heat Transfer and Fluid Flow Using Co-located Variables – 1", Computational Procedure, Numerical Heat Transfer, Vol. 11.

DEVELOPMENT OF A COMPACT FILTERING SYSTEM FOR ASPHALT PLANTS

Ricardo Barbosa Damian, Eng.

CIBER Equipamentos Rodoviários Ltda. (member of the Wirtgen Group) – Research & Development Coordinator
Rua Senhor do Bonfim, 177 – 91140-380 Porto Alegre – RS – Brazil
rbdamian@yahoo.com

Horácio Antonio Vielmo, Dr.-Eng.

Federal University of Rio Grande do Sul – UFRGS, Mechanical Engineering Department – DEMEC
Rua Sarmento Leite, nº 425 – 90050-170 Porto Alegre – RS – Brazil
vielmoh@mecanica.ufrgs.br

Walter Rauen de Souza, Dr.-Ing.

CIBER Equipamentos Rodoviários Ltda. (member of the Wirtgen Group) – President Director
Rua Senhor do Bonfim, 177 – 91140-380 Porto Alegre – RS – Brazil
wrs@ciber.com.br

Elton Luis Antonello, Eng.

CIBER Equipamentos Rodoviários Ltda. (member of the Wirtgen Group) – Engineering Manager
Rua Senhor do Bonfim, 177 – 91140-380 Porto Alegre – RS – Brazil
antonello@ciber.com.br

Abstract: The current market of asphalt plants increasingly demands equipments with lower operation and maintenance costs, lower pollutants emission and more compact dimensions in order to facilitate its transportation. On this work the development of a compact filtering system for asphalt plants constituted by a bag house and a centrifugal air pre-cleaner is presented. A Computational Fluid Dynamics analysis of the exhausting gases was carried out in order to enhance the system performance. The use of this modern design tool allied to new concepts of filtration, process automation and portability resulted on an innovative product, which was incorporated to the manufacturing line of the company, and already having been manufactured some units.

Keywords: Bag house, Asphalt Plant, Air Filtration, Design Improvement, CFD.

APÊNDICE

A-1: EQUAÇÕES GOVERNANTES UTILIZADAS PELO CFX

Neste apêndice, serão descritas as equações empregadas nas simulações deste trabalho. Para um detalhamento mais completo sobre a implementação destas equações no *solver* do CFX, é sugerida a leitura do *CFX5.5 Solver Manual*. Elas são:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0 \quad (1)$$

Equação da continuidade, onde ρ é a massa específica, \mathbf{U} o vetor de velocidades, t o tempo.

$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \otimes \mathbf{U}) - \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla \mathbf{U}) = \nabla p' + \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla \mathbf{U})^T + \mathbf{B} \quad (2)$$

Equação da momento, onde μ_{eff} é a viscosidade efetiva, p' é a pressão modificada pela turbulência e \mathbf{B} é o vetor da soma das forças de corpo.

$$p' = p + \frac{2}{3} \rho k \quad \mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad \mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3, 4 e 5)$$

Equações da pressão modificada, viscosidade efetiva e viscosidade turbulenta (μ_t), respectivamente. C_μ é uma constante. O modelo de turbulência em questão é o k - ε ,

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} k) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (6)$$

$$\frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \varepsilon) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) \quad (7)$$

onde k é a energia cinética turbulenta e ε é a dissipação turbulenta. $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, σ_ε e σ_k são constantes do modelo. P_k é a produção de turbulência devido a efeitos viscosos e de empuxo.

$$P_k = \mu_t \nabla \mathbf{U} \cdot (\nabla \mathbf{U} + \nabla \mathbf{U}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \mathbf{U} (3\mu_t \nabla \cdot \mathbf{U} + \rho k) + P_{kb} \quad (8)$$

P_{kb} é o termo de empuxo na equação de produção, Pr_t é o número de Prandtl turbulento e \mathbf{g} é vetor da gravidade.

$$P_{kb} = \frac{\mu_t}{Pr_t} \mathbf{g} \cdot \nabla \rho \quad (9)$$

No caso do cálculo bifásico fluido-partículas, são implementados os termos de transferência de momento entre fases. $D_{\alpha\beta}$ é a força de arraste por unidade de volume e é dado por:

$$D_{\alpha\beta} = \frac{3}{4} \frac{C_D}{d} r_\beta \rho_\alpha |\mathbf{U}_\beta - \mathbf{U}_\alpha| (\mathbf{U}_\beta - \mathbf{U}_\alpha) \quad (10)$$

Onde α e β são os índices das fases contínua e discreta, respectivamente. O r é a fração volumétrica e d é o diâmetro da partícula. A correlação para o coeficiente de arraste da partícula (C_D) é a de Schiller-Naumann e é dada em função do número de Reynolds da partícula:

$$C_D = \frac{24}{Re} (1 + 0.15 Re^{0.687}) \quad Re = \frac{\rho_\alpha |\mathbf{U}_\beta - \mathbf{U}_\alpha| d_\beta}{\mu_\alpha} \quad (11 e 12)$$