



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA FRONTEIRA SUL  
CAMPUS DE CERRO LARGO  
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL**

**FERNANDA ELIS DOS SANTOS**

**DESCRIÇÃO MACROSCÓPICA DA FILTRAÇÃO GRANULAR DE MATERIAL  
PARTICULADO EM LEITO MÓVEL**

**CERRO LARGO**

**2014**

**FERNANDA ELIS DOS SANTOS**

**DESCRIÇÃO MACROSCÓPICA DA FILTRAÇÃO GRANULAR DE MATERIAL  
PARTICULADO EM LEITO MÓVEL**

Trabalho de conclusão de curso de graduação  
apresentado como requisito para obtenção de  
grau de Bacharel em Engenharia Ambiental da  
Universidade Federal da Fronteira Sul.

Orientador: Prof. Dr. Bruno München Wenzel

**CERRO LARGO**

2014

**DGI/DGCI - Divisão de Gestão de Conhecimento e Inovação**

Santos, Fernanda Elis dos  
Descrição Macroscópica da Filtração Granular de  
Material Particulado em Leito Móvel/ Fernanda Elis dos  
Santos. -- 2014.  
61 f.:il.

Orientador: Bruno München Wenzel.  
Trabalho de conclusão de curso (graduação) -  
Universidade Federal da Fronteira Sul, Curso de  
Engenharia Ambiental , Cerro Largo, RS, 2014.

1. Trabalho de Conclusão de Curso. I. Wenzel, Bruno  
München, orient. II. Universidade Federal da Fronteira  
Sul. III. Título.

**FERNANDA ELIS DOS SANTOS**

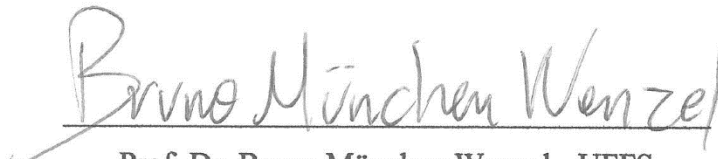
**DESCRIÇÃO MACROSCÓPICA DA FILTRAÇÃO GRANULAR DE MATERIAL  
PARTICULADO EM LEITO MÓVEL**

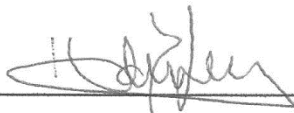
Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito para obtenção de grau de Bacharel em Engenharia Ambiental da Universidade Federal da Fronteira Sul.


Orientador: Prof. Dr. Bruno München Wenzel

Este trabalho de conclusão de curso foi defendido e aprovado pela banca em: 02/12/2014

**BANCA EXAMINADORA**

  
Prof. Dr. Bruno München Wenzel - UFFS

  
Prof(a). Dr(a). Adriana Dervanoski da Luz – UFFS

  
Prof. Dr. Thiago de Cacio Luchese – UFFS

*Dedico à minha querida amiga Tacia  
Milanesi (in memoriam), um anjo que  
Deus, na sua infinita sabedoria, colocou em  
meu caminho, para me ensinar o  
significado da palavra amizade.  
Para sempre em meu coração, saudades  
enquanto eu viver!*

## AGRADECIMENTOS

A Deus pelo Dom da vida, pela família, pela força nos momentos difíceis, pela perseverança, pela esperança e pela fé.

Aos meus pais, Cleusa e Moacir, pelo amor incondicional. Meu esteio não somente nesses 5 anos, mas por 24 anos. Meu porto seguro, meu exemplo, meu orgulho, meu amor. Obrigada por tudo, jamais chegaria até aqui sem vocês.

À minha irmã Amanda, pela sua existência, pois não se sabe o que é amar sem medidas até se ter um irmão. Amo você mana!

Aos demais familiares pelo apoio e incentivo.

Ao prof. Dr. Bruno München Wenzel pela orientação, confiança, parceria, disponibilidade e amizade.

Ao prof. Dr. Fernando Henrique Borba, coordenador do curso, por ser um esteio diante das dificuldades.

Aos demais professores que, mesmo não envolvidos diretamente nesse trabalho, me prepararam para esse momento através dos seus ensinamentos, especialmente à prof. Alcione, pois quando penso no tipo de profissional que quero ser, logo o seu nome me vem à cabeça.

Aos meus amigos e colegas de curso, pois a engenharia não seria a mesma sem vocês.

E a todos que, de alguma forma, me conduziram até aqui.

## SUMÁRIO

<b>Lista de Símbolos e Abreviaturas</b> .....	i
<b>Resumo</b> .....	iii
<b>Abstract</b> .....	iv
<b>1 Introdução</b> .....	1
<b>2 Objetivos</b> .....	3
2.1 Objetivo geral .....	3
2.2 Objetivos específicos.....	3
<b>3 Referencial Teórico</b> .....	4
3.1 Filtração .....	4
3.2 Filtração Granular (FG).....	4
3.2.1 Remoção de partículas em um FG.....	5
3.2.2 Formas de operação de um FG .....	5
3.3 Dados de filtração granular em leito móvel para gases .....	8
<b>4 Fundamentos Teóricos e Descrição Macroscópica de um FGLM</b> .....	11
4.1 Balanço material – equação da continuidade .....	11
4.2 Taxa de remoção de material particulado na filtração granular .....	14
4.3 Fluidodinâmica do sistema e gradiente de pressão .....	16
4.4 Outras relações importantes .....	18
4.5 Determinação do coeficiente de filtro inicial .....	19
<b>5 Materiais e Métodos</b> .....	22
5.1 Dados da suspensão, material granular e desempenho do filtro utilizados nas simulações .....	22
5.1.1 Material granular e suspensão .....	22
5.1.2 Coeficiente médio relativo do filtro e queda de pressão relativa .....	22
5.2 Parâmetros e variáveis .....	23
5.2.1 Parâmetros fixos .....	23
5.2.2 Variáveis estudadas .....	24

5.2.3 Variáveis de resposta.....	25
5.3 Solução do problema .....	26
<b>6 Resultados e Discussões.....</b>	<b>28</b>
6.1 Simulações do funcionamento de um FGLM e indicadores de operação .....	28
6.2 Melhores resultados associados aos parâmetros de operação de um FGLM .....	32
6.2.1 Combinação 25: 0.25 m s <sup>-1</sup> de velocidade superficial, 300 mm de profundidade do leito e 3x10 <sup>-5</sup> m s <sup>-1</sup> de velocidade de renovação dos grânulos.....	32
6.2.2 Combinação 3: 0.1 m s <sup>-1</sup> de velocidade superficial, 100 mm de profundidade do leito e 5x10 <sup>-4</sup> m s <sup>-1</sup> de velocidade de renovação dos grânulos .....	36
6.2.3 Combinação 19: 0.25 m s <sup>-1</sup> de velocidade superficial, 100 mm de profundidade do leito e 3x10 <sup>-5</sup> m s <sup>-1</sup> de velocidade de renovação dos grânulos .....	40
6.2.4 Combinação 4: 0.1 m s <sup>-1</sup> de velocidade superficial, 200 mm de profundidade do leito e 3x10 <sup>-5</sup> m s <sup>-1</sup> de velocidade de renovação dos grânulos.....	43
<b>7 Conclusões.....</b>	<b>47</b>
<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>48</b>



## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

$\alpha$	parâmetro vetorial da função $\bar{F}$
$\beta$	parâmetro vetorial da função $G$
$\mu$	viscosidade do fluido
$\eta$	eficiência média ponderada dos coletores individuais
$\eta_0$	eficiência individual inicial de coleta
$\lambda$	coeficiente de filtro
$\bar{\lambda}$	coeficiente de filtro médio
$\lambda_0$	coeficiente de filtro inicial
$\gamma$	probabilidade de adesão
$\varepsilon$	porosidade do leito
$\rho$	densidade do fluido
$\rho_g$	densidade dos grânulos
$\bar{\sigma}_m$	depósito específico mássico médio
$\bar{\bar{\sigma}}_m$	depósito específico mássico médio dos médios
$\Delta P$	queda de pressão
$(\Delta P/L)$	queda de pressão do filtro por unidade de comprimento do leito
$(\Delta P/L)_0$	queda de pressão inicial do filtro por unidade de comprimento do leito
inicial	
$A$	área do filtro
$A, B$	constantes da equação de Ergun generalizada
$C$	concentração de material particulado na corrente gasosa
$C_{in}$	concentração de material particulado na entrada do filtro
$C_{out}$	concentração de material particulado na saída do filtro
$C_{out,dy}$	concentração de material particulado na saída do elemento de filtro $dy$
$c_s$	fator de correção de Cunningham
$D$	largura do leito
$DH$	relação entre a largura e a altura do filtro
$d_g$	diâmetro médio de Sauter para grânulos
$d_p$	diâmetro médio de Sauter para partículas
$dy$	elemento diferencial
$E$	eficiência total de coleta

$E_y$	eficiência de coleta que varia ao longo da altura $dy$
$E_0$	eficiência inicial de coleta
$e$	eficiência de coleta unitária
$e_0$	eficiência de coleta unitária inicial
$\bar{F}$	coeficiente médio relativo do filtro
$\bar{G}$	taxa da queda de pressão média
$H$	altura do leito
$L$	profundidade do leito
$l$	comprimento periódico
$\dot{m}_g$	taxa mássica de grânulos no leito
$\dot{m}_{part}$	taxa mássica de partículas
$m_{part}$	massa de partículas
$m_g$	vazão mássica de grânulos
$N$	número de interações
$N_{St}$	número de Stokes
$N_{St_{eff}}$	número efetivo de Stokes
$N_R$	número de interceptação
$N_{Re}$	número de Reynolds
$Q$	vazão de gás
$Q_{dy}$	vazão no elemento $dy$
$r$	taxa de remoção de material particulado
$t$	tempo
$\bar{u}_s$	velocidade superficial média do fluido
$u_s$	velocidade superficial do fluido
$\dot{V}$	vazão de renovação do leito
$V$	volume do filtro
$v$	velocidade de escoamento
$v_g$	velocidade de escoamento dos grânulos
EDO	equação diferencial ordinária
EDP	equação diferencial parcial
FG	filtro granular
FGLM	filtro granular de leito móvel
LF	leito fixo

## RESUMO

Autor(a): Fernanda Elis dos Santos. Título do trabalho: Descrição macroscópica da filtração granular de material particulado em leito móvel.

A filtração granular é uma importante e eficiente técnica de remoção de partículas suspensas de um fluxo gás-sólido, através da sua passagem por um meio filtrante composto por um material granular. O Filtro Granular de Leito Móvel (FGLM) destaca-se pela operação com regeneração contínua do leito. Tendo em vista que na literatura não são encontrados modelos para descrição do processo de filtração em leito móvel, este trabalho foi desenvolvido com o objetivo geral de obter um modelo matemático em regime transiente, adequado à descrição macroscópica de um FGLM, com fluxo cruzado de efluente gasoso. Sua operação foi descrita por uma série de equações inter-relacionadas por variáveis e suas derivadas, gerando um sistema de Equações Diferenciais Parciais (EDP's) - partindo do princípio de conservação da massa - e uma equação diferencial adicional, para descrição da fluidodinâmica do sistema. Para solucionar o sistema, a EPD foi discretizada pelo método das diferenças finitas em uma série de Equações Diferenciais Ordinárias (EDO's), que foram acopladas a equação diferencial da fluidodinâmica e resolvidas pelo Método de Runge-Kutta Implícito. Com o modelo proposto, foram realizadas simulações para determinar o comportamento do filtro para o processamento de uma suspensão e do meio filtrante (esferas de vidro como meio filtrante e uma suspensão de microesferas de vidro com concentração de  $4 \text{ g cm}^{-3}$ ). Foram selecionadas três variáveis-chave do processo (velocidade superficial do gás, profundidade do leito e velocidade de renovação do leito) que geraram vinte e sete diferentes situações operacionais e algumas variáveis de resposta, capazes de indicar a performance do processo. A partir das simulações, foram verificadas as melhores condições de operação e dimensões do filtro para alguns requisitos convencionais dos processos de filtração. No regime permanente, mais da metade das combinações, apresentou eficiência total de coleta de material particulado superior a 99%. As quedas de pressão no filtro variaram de 87.98 Pa até 1775.60 Pa, e a vazão mássica de grânulos, necessária à operação, de  $3.94 \text{ kg h}^{-1}$  até  $311.95 \text{ kg h}^{-1}$ .

**Palavras-Chave:** Filtro granular. Leito móvel. Descrição macroscópica. Depósito específico.

## ABSTRACT

Author's name: Fernanda Elis dos Santos. Title: Macroscopic description of the granular filtration of particulate matter in moving bed.

The granular filtration is an important and efficient technique for removing suspended particles from a gas-solid flow, via its passage through a filter medium comprises a granular material in which the particles present in the stream are retained on the outer surface of granules, for several mechanisms. Granular Moving Bed Filter (FGLM) stands out for operation with continuous regeneration of the bed. Given that the literature are not found models for describing the process of moving bed filtration, this work was developed with the overall goal of obtaining a mathematical model for transient, appropriate to macroscopic description of a FGLM, crossflow effluent gas. Its operation is described by a series of coupled variables for equations and their derivatives, generating a system of equations - Partial Differential Equation (PDE) - assuming conservation of mass - and an additional differential equation involving the solution of integrals, for description of the fluid dynamics of the system. To solve the system, the PDE was divided by the finite difference method in a number of Ordinary Differential Equations (ODE's), which were coupled to the differential equation of fluid dynamics and solved by the Implicit Runge-Kutta Method. With the proposed model, simulations were performed to determine the behavior of the filter for the processing of a suspension and the filter media (glass beads as filter medium and a suspension of glass beads with a concentration of  $4 \text{ g cm}^{-3}$ ). Three key process variables (superficial gas velocity, bed depth, and refresh rate of the bed) that generated twenty-seven different operating situations and some response variables, able to indicate the performance of the process were selected. From the simulations, the best operating conditions and dimensions of the filter to some conventional filtration process requirements were verified. At steady state, over half of the combinations showed high collection efficiency of particulate matter exceeding 99%. The pressure drops in the filter ranged from 87.98 Pa to 1775.60 Pa, and the mass flow of granules necessary to the operation of  $3.94 \text{ kg h}^{-1}$  to  $311.95 \text{ kg h}^{-1}$ .

**Keywords:** Granular filter. Moving bed. Macroscopic description. Specific deposit.

## 1 INTRODUÇÃO

Após a Revolução Industrial, pôde notar-se um aumento significativo na produção mundial em larga escala, proporcionando crescimento econômico e, também, o aumento dos padrões de consumo da sociedade e da demanda por energia, a fim de sustentar a economia e assegurar a qualidade desses padrões. Assim, a exploração acelerada e inadequada de recursos naturais, para geração de energia e produtos rentáveis, através dos mais diversos tipos de processos industriais, gerou inúmeros tipos de poluentes e/ou contaminantes.

Se por um lado o sistema de produção de bens e energia se expandia a “passos largos”, por outro, a geração de resíduos sólidos e as emissões atmosféricas e de efluentes, provenientes desses processos, não eram sequer uma preocupação no setor industrial. Acreditava-se que os recursos naturais eram infinitos e que o meio ambiente não se prejudicaria com a desenfreada exploração e as descargas de variados tipos e misturas de efluentes.

Com a qualidade do meio ambiente e a saúde humana comprometidas pela industrialização, a sociedade começou a pressionar as indústrias através da criação de órgãos regulamentadores, que tem a função de fiscalizar e exigir dos empreendimentos medidas atenuantes e/ou mitigadoras para os possíveis impactos ambientais, decorrentes de seus processos industriais. Nesse contexto, criaram-se diversas técnicas de tratamento de correntes gasosas, principalmente para recuperação energética.

A filtração granular é uma importante e eficiente técnica de remoção de partículas suspensas de um fluxo gás-sólido, em que esse fluxo passa por um meio filtrante composto por um material granular e as partículas presentes no fluxo são retidas na superfície externa dos grânulos, por diversos mecanismos. Uma característica importante desse tipo de filtro, é que o material granular que o compõe pode ser inerte ou quimicamente ativo, servindo também, como um adsorvente (CORBINI, 2012). Sua operação pode se dar de quatro formas: leito fixo, leito fluidizado, leito móvel intermitente e leito móvel contínuo (SAXENA, HENRY e PODOLSKI, 1985).

O Filtro Granular de Leito Móvel (FGLM) destaca-se pela operação contínua, com regeneração do leito, e de baixo custo (se comparado às outras tecnologias). Na sua operação, o material granular é disposto verticalmente, sendo mantido por grades ou venezianas (o que aumenta a superfície de filtração) e escoam por gravidade, sendo removido no fundo do filtro. O fluxo de gás, relacionado ao fluxo granular, pode ser classificado como fluxo cruzado, co-corrente ou contracorrente (WENZEL, 2013).

No presente estudo, foi proposto um novo modelo de descrição macroscópica, a partir do princípio de conservação da massa, para um FGLM com fluxo cruzado de efluente gasoso. A taxa de filtração baseou-se no modelo macroscópico proposto por Wenzel *et al.* (2014) para um FG de leito fixo. Chegou-se a uma Equação Diferencial Parcial (EDP), que foi transformada em uma série de Equações Diferenciais Ordinárias (EDO's) e solucionadas pelo Método de Runge-Kutta Implícito.

A partir dos dados obtidos por Wenzel *et al.* (2014) – suspensão e filtro/meio filtrante específico – a filtração granular em leito móvel da suspensão foi investigada através de simulações com o modelo proposto para determinar o comportamento do filtro frente às mudanças nos valores das variáveis, verificando-se melhores condições de operação e de dimensionamento do filtro.

As variáveis investigadas do FGLM, foram: (i) a velocidade superficial do fluido (gás); (ii) a profundidade do leito; e (iii) a velocidade de renovação do leito. A velocidade de renovação do leito, é a velocidade dos grânulos no filtro. As variáveis de resposta monitoradas, a fim de verificar a aplicabilidade do modelo, foram: (i) a área do filtro; (ii) o volume; (iii) a vazão mássica de grânulos necessária; (iv) a queda de pressão do leito no regime permanente; e (v) a eficiência total de coleta do filtro no regime permanente.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

O objetivo geral do presente trabalho, foi a obtenção de um novo modelo matemático capaz de descrever o comportamento transiente de um Filtro Granular de Leito Móvel com fluxo cruzado para filtração de uma suspensão gasosa.

### **2.2 Objetivos específicos**

- (i) simular o funcionamento do FGLM, para diversas condições operacionais de velocidade superficial, profundidade do leito e velocidade de renovação do leito;
- (ii) determinar o comportamento das principais variáveis do processo frente à alteração das variáveis estudadas;
- (iii) determinar as melhores condições de operação do modelo do FGLM e as suas dimensões, através das variáveis de resposta escolhidas: área, volume, eficiência total de coleta em regime permanente, perda de carga no regime permanente e vazão mássica de grânulos.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 Filtração

Dentro da separação física de sólidos, 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 diâmetro menores passam pela barreira (CORBINI, 2012).

O tamanho da partícula que deseja-se remover de um fluido, tem grande influência na escolha do filtro que será utilizado para tal fim. Pode-se dividir os principais mecanismos de um filtro, em três: (i) filtro de torta, onde separa-se grandes quantidades de sólidos na forma de lama ou torta; (ii) de clarificação, em que remove-se pequenas quantidades de sólidos, a fim de obter-se gás limpo; e (iii) de fluxo tangencial, onde “o fluxo de alimentação das partículas sólidas passa tangencialmente ao meio filtrante a uma velocidade bastante elevada [...]” (CORBINI, 2012).

O meio filtrante é um ponto importante para se levar em conta na escolha do filtro, pois deve ser compatível com o tipo de fluido gasoso a ser filtrado e com a suspensão do particulado, presente nesse gás.

#### 3.2 Filtração Granular (FG)

Segundo Brown *et al.* (2003), a filtração granular é um processo sólido-fluido, comumente utilizado para remover partículas suspensas, através da passagem de um fluido por um meio filtrante, composto por material granular. Pode-se operar um FG de quatro maneiras: em leito fixo, em leito móvel intermitente, leito móvel contínuo e leito fluidizado (SAXENA, HENRY e PODOLSKI, 1985).

Filtros granulares fixos, móveis e fluidizados podem ser aplicados na limpeza de gases destinados à obtenção de energia, onde o gás entra em contato com o material granular do filtro e suas partículas ficam retidas. Ainda, por meio do filtro, pode-se recuperar a energia do gás, dependendo da sua composição (HENRIQUEZ E MACHIN, 1997).

Conforme Wenzel (2013), pode-se apontar como as principais vantagens na utilização de um FG para remover material particulado de correntes gasosas, em relação às outras tecnologias: (i) a remoção de partículas pequenas, 5 a 10  $\mu\text{m}$  (COURY, THAMBIMUTHU e CLIFT, 1987); (ii) a utilização em elevadas temperaturas e pressões (HENRIQUEZ E MACHIN, 1997); (iii) a possibilidade de operar a seco; (iv) a remoção simultânea de



particulados e alcatrão; (v) a possibilidade de dessulfurização dos gases (CHOU e CHEN, 2007); (vi) alta eficiência de remoção de particulado (CHEN et al, 2009); e (vii) a baixa perda de carga (WENZEL, 2013).

De acordo com Wenzel (2013), “[...] várias tecnologias de filtração granular têm sido desenvolvidas para as mais diversas aplicações [...]”. Os filtros de leito móvel contínuos, pela grande aplicabilidade em processos de gaseificação e combustão, são os equipamentos mais investigados.

### **3.2.1 Remoção de partículas em um FG**

Xiao *et al.* (2013) dizem que a remoção de partículas em uma suspensão, através de um leito com material granular, dá-se pelos mecanismos de interceptação, impacto inercial, difusão, sedimentação gravitacional e atração eletrostática, onde cada mecanismo possui um determinado nível de influência sobre a eficiência do leito na remoção das partículas. Assim, geralmente, as eficiências de um FG podem ser dadas em função de números adimensionais dos fenômenos de transporte.

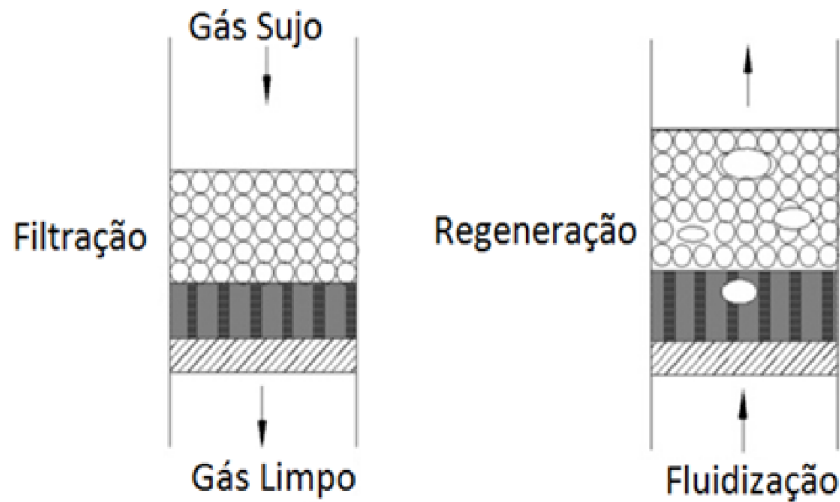
Porém, em algumas aplicações, negligencia-se alguns desses mecanismos adimensionais e adota-se correlações empíricas, com base no tamanho das partículas a serem filtradas. A difusão Browniana é adotada para nano-partículas, já a interceptação é utilizada para partículas acima de 1  $\mu\text{m}$ , acima de 10  $\mu\text{m}$  considera-se impacto inercial e sedimentação gravitacional e quanto ao efeito eletrostático, investiga-se sua importância, comparando-o com os demais mecanismos de remoção de particulado (XIAO *et al.*, 2013).

### **3.2.2 Formas de operação de um FG**

Em filtros granulares de leito fixo, há o aumento contínuo da queda de pressão pela retenção de partículas, que acabam ocupando os espaços vazios e ainda, formando uma torta. Opera-se o filtro até que a regeneração do leito faça-se necessária. Para uma melhor eficiência na remoção de particulado, deve-se usar materiais granulares com tamanhos menores. Sendo assim, escolhe-se o tamanho dos grânulos, afim de conciliar a eficiência do filtro e a sua queda de pressão (CORBINI, 2012). A necessidade de limpeza do filtro, interrompendo o fluxo do gás, é sua maior desvantagem (XIAO *et al.*, 2013).

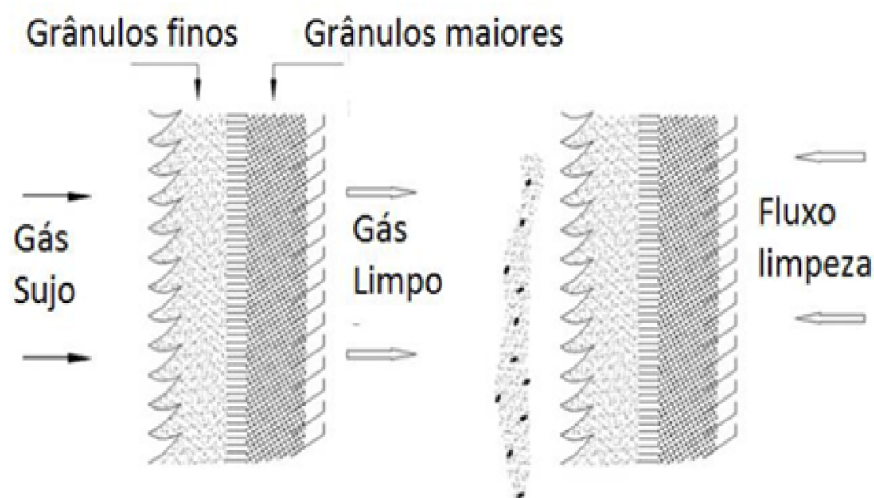
Pode-se operar um FG de leito fixo de diferentes formas. Na Figura 3.1, o gás flui pelo meio poroso, mantido suspenso por um suporte, e as partículas suspensas são depositadas até

que forme-se uma torta e a eficiência, assim como a queda de pressão, aumentem. Usa-se fluidização do leito, no sentido contrário ao do fluxo do gás, para regenerar o leito.



**Figura 3.1.** Operação de um FG de leito fixo com suporte. Fonte: Xiao *et al.* (2013) *apud* Wenzel (2013).

Já, na Figura 3.2, o gás passa pelo meio filtrante (composto por materiais com granulometrias diferentes) com o fluxo cruzado e os grânulos são sustentados por painéis, constituídos por venezianas adjacentes. A regeneração do leito se dá de maneira análoga a do primeiro modelo.



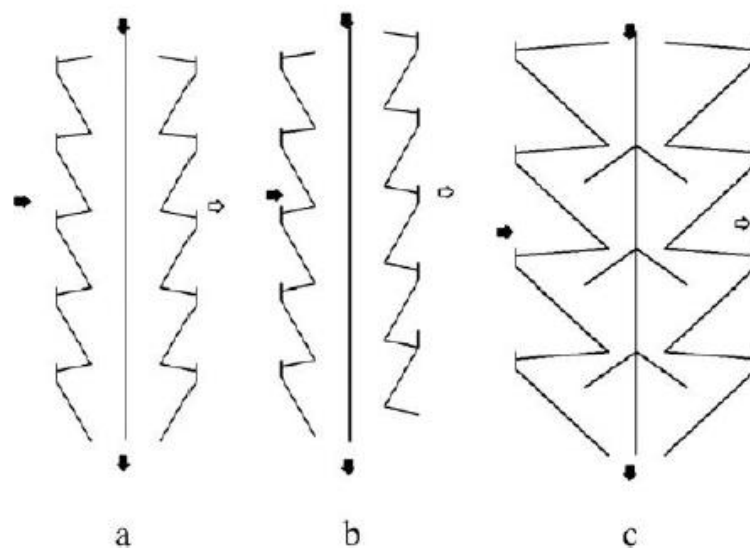
**Figura 3.2.** Operação de um FG de leito fixo de venezianas. Fonte: Xiao *et al.* (2013) *apud* Wenzel (2013).

De acordo com Saxena, Henry e Podolski (1985), em relação aos filtros granulares de leito fluidizado, indica-se a sua utilização em processos onde necessita-se capturar gases ácidos, compostos orgânicos, metais pesados e partículas de menor tamanho. O material granular limpo é alimentado continuamente pelo topo do filtro e os grânulos utilizados saem pela base, regenerando-o e tornando seu funcionamento contínuo.

Para os Filtros Granulares de Leito Móvel (FGLM), o material granular é disposto verticalmente, sendo mantido por grades ou venezianas (o que aumenta a superfície de filtragem) e escoam por gravidade, sendo removido no fundo do filtro. O fluxo de gás, relacionado ao fluxo granular, pode ser classificado como fluxo cruzado, co-corrente ou contracorrente. Ainda, deve-se ter cuidado para que não haja zonas de estagnação no filtro, pois delas origina-se a perda de carga (CORBINI, 2012).

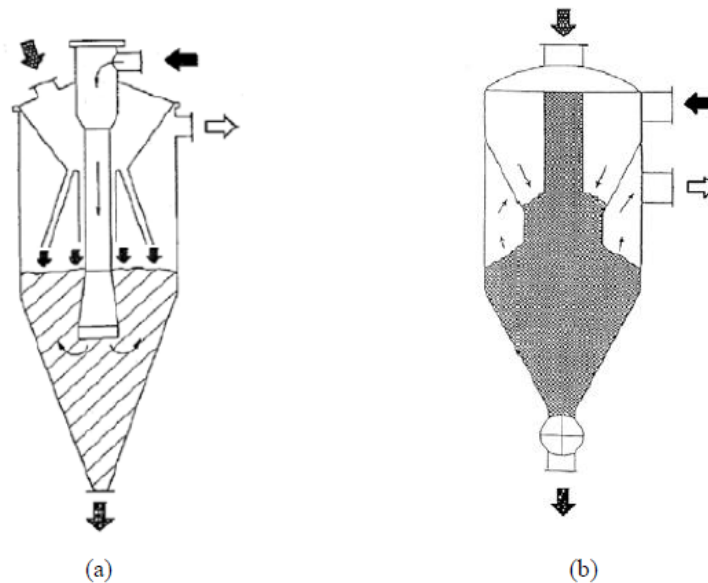
Conforme Corbini (2012), a principal vantagem do FGLM é a regeneração do leito, que ao contrário dos filtros de leito fixo, cerâmicos e de mangas, permite que sua operação siga continuamente, sem que necessite-se interromper o processo para realizar sua limpeza. Também, pode-se utilizar material adsorvente no filtro, para capturar outros tipos de contaminantes.

Na Figura 3.3, estão representados três tipos de FGLM: (a) com venezianas simétricas, (b) com venezianas assimétricas; e (c) com inserção de elementos para a correção do fluxo de grânulos.



**Figura 3.3.** Filtros granulares com fluxo cruzado em leito móvel (FGLM), com diferentes configurações. Fonte: Smid *et al.* (2005) *apud* Wenzel (2013).

A Figura 3.4 apresenta outros dois modelos de FGLM: (a) contracorrente; e (b) co-corrente.



**Figura 3.4.** Filtros Granulares de Leito Móvel (FGLM): (a) contra corrente; e (b) co-corrente.

Fonte: Smid *et al.* (2005) *apud* Wenzel (2013).

### 3.3 Dados de filtração granular em leito móvel para gases

Buscou-se na literatura, dados que pudessem simular o funcionamento de um FGLM para várias situações diferentes, mas com o mesmo tipo de fluido, gás. Assim, foram encontrados os resultados da Tabela 3.1, com valores diferentes e que, em muitos casos, variavam bastante entre si.

A partir destes dados, pode-se analisar o comportamento do FGLM com o modelo numérico proposto, fazendo-se necessário encontrar a faixa de valores, para a qual o modelo fosse mais apropriado.

**Tabela 3.1.** Relação de dados importantes às simulações numéricas do FGLM.

Referência	Velocidade superficial do fluido, $u_s$ ( $m s^{-1}$ )	Velocidade de renovação do leito, ou, velocidade granular, $v_g$ ( $m s^{-1}$ )	Vazão mássica de grânulos, $m_g$ ( $kg s^{-1}$ )	Altura do leito, H (m)	Profundidade do leito, L (m)	Largura do leito, D (m)
BROWN <i>et al.</i> (2003)	0,2	-	0,0034	-	-	-
CHEN <i>et al.</i> (2009)	0,3	-	0,0075	1,07	0,5	0,38
CHEN, CHYOU e LI (2014)	0,20 - 0,35	-	0,01	1,07	0,20	0,38
HENRIQUEZ e MACIAS-MACHIN (1997)	0,475	$4,833 \times 10^{-4}$	-	1,78	-	-
HSIAU <i>et al.</i> (2001)	-	$3,305 \times 10^{-4}$	0,00351	1	0,048	0,38
HSIAU <i>et al.</i> (2008)	-	-	0,002	1,16	0,05	0,38
HSIAU <i>et al.</i> (2013)	-	-	0,0051	1,16	0,05	0,38
PAENPONG e PATTIYA (2013)	-	-	0,000133	-	-	-
PAENPONG, INTHIDECH e PATTIYA (2013)	-	-	0,0001	-	0,04	-
WAN <i>et al.</i> (2013)	0,276	-	-	-	-	-
YANG, CHUNG e WU (2012)	0,277	-	0 – 0,00183	0,45	-	0,15
ZHAO <i>et al.</i> (2008)	0,1	$2,78 \times 10^{-5}$	-	-	0,3	-

Dos dados encontrados para a velocidade superficial do fluido, optou-se por escolher uma faixa menos ampla, de valores mais baixos – 0.1 à 0.25  $m s^{-1}$ . Foram realizados testes com velocidades máximas, nível 1, mais altas, porém, os resultados encontrados não foram plenamente satisfatórios para todas as variáveis de resposta adotadas.

A velocidade de renovação do leito é um dado que pode ser encontrado diretamente na literatura, ou pode ser obtido através da vazão mássica de grânulos. Analogamente à velocidade superficial do fluido, obteve-se melhores resultados com valores mais baixos. A faixa estabelecida,  $3 \times 10^{-5} - 5 \times 10^{-4} m s^{-1}$ , ficou aproximada dos limites mínimo e máximo dos dados da Tabela 3.1, para a velocidade granular.

As dimensões do leito (representadas na Figura 4.1), altura e largura, foram pesquisadas para ter-se uma ideia do seu tamanho, em diversos estudos. A maior parte dos

dados eram muito similares. Para a profundidade do leito, os dados pesquisados possuíam uma faixa mais ampla de valores. A faixa escolhida, 0.1 – 0.4 m, foi estabelecida após testes com outros valores não apresentarem o desempenho almejado.

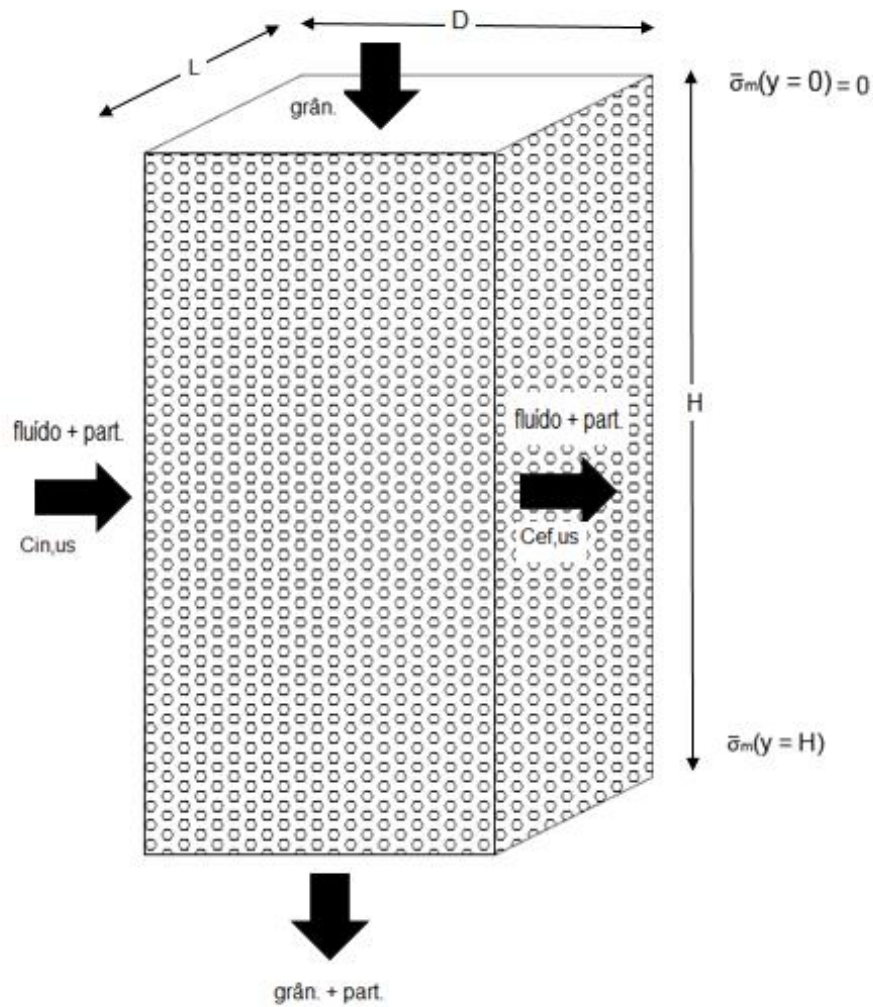
## **4 FUNDAMENTOS TEÓRICOS E DESCRIÇÃO MACROSCÓPICA DE UM FILTRO GRANULAR DE FLUXO CRUZADO COM LEITO MÓVEL**

A aplicação da filtração granular em equipamentos de leito móvel, tem sido exaustivamente investigada, principalmente para tratamento de correntes gasosas. Entretanto, devido à complexidade da descrição matemática do sistema, as alternativas de modelagem do mesmo tem sido incipientes. Neste capítulo é apresentada uma proposta para a descrição macroscópica do sistema, que permite um adequado dimensionamento dos filtros para aplicação em maiores escalas. A solução das equações governantes do sistema foi possível a partir da abordagem proposta por Wenzel *et al.* (2014) para a filtração granular em leito fixo. Neste trabalho, fizeram-se algumas modificações em relação à modelagem descrita em Tien e Ramarao (2007) sendo a principal delas a substituição da variável depósito específico de material no leito (que para determinado problema é funcionalmente dependente do tempo e da profundidade do leito), por um depósito específico mássico médio,  $\bar{\sigma}_m$  (em que para determinada situação é dependente apenas do tempo).

O Capítulo 4 foi assim organizado: (Tópico 4.1) partiu-se do balanço material para o sistema; (Tópico 4.2) apresenta-se uma expressão para a taxa de remoção de partículas; (Tópico 4.3) aborda-se a fluidodinâmica, a partir da queda de pressão no leito; (Tópico 4.4) outras relações úteis são apresentadas; e, finalmente, (Tópico 4.5) determina-se o coeficiente de filtro inicial.

### **4.1 Balanço material – equação da continuidade**

O filtro granular de fluxo cruzado com leito móvel (FGLM) consiste em um equipamento destinado a remoção de partículas de um fluido através de sua passagem por um leito empacotado por grânulos em movimento contínuo, com direções predominantes perpendiculares entre o meio granular e o fluido. Diferentemente de um filtro de leito fixo, o FGLM ocorre em regime contínuo, onde os grânulos vão se renovando com determinada vazão. A Figura 4.1 apresenta de forma simplificada este comportamento.

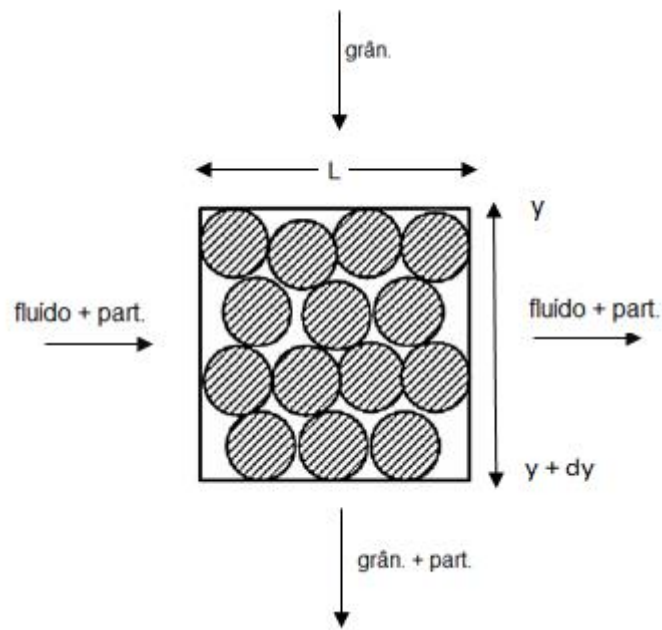


**Figura 4.1.** Esquema simplificado do funcionamento de um FGLM.

Na Figura 4.1, as dimensões do filtro são representadas por L (profundidade), D (largura) e H (altura).

Um modelo que representa o princípio de conservação da massa de material particulado no filtro, pode ser obtido a partir de um balanço material em um elemento diferencial de volume no FGLM, conforme mostra a Figura 4.2.





**Figura 4.2.** Elemento diferencial  $dy$  do FGLM. Fonte: adaptado de Zhao *et al.* (2008).

O balanço material para o particulado pode ser representado pela Equação 4.1.

$$(\text{Entra} - \text{Sai})_{\text{fluido}} + (\text{Entra} - \text{Sai})_{\text{gran}} = \text{Acúmulo} \quad (4.1)$$

O termo de entrada e saída de material particulado junto com o fluido pode ser representado como uma taxa volumétrica de remoção de material particulado. Ou seja:

$$(\text{Entra} - \text{Sai})_{\text{fluido}} = r (dy L D) \quad (4.2)$$

Onde:  $r$  é a taxa de remoção de material particulado;  $dy$  é a altura diferencial do leito (direção vertical);  $L$  é a profundidade total do leito; e  $D$  é a largura total do leito.

Considerando um fluxo de grânulos em regime permanente, os termos de entrada e saída de material particulado carregado com o leito granular pode ser representado por:

$$(\text{Entra})_{\text{gran}} = v D L \bar{\sigma}_m|_y \quad (4.3)$$

$$(\text{Sai})_{\text{gran}} = v D L \bar{\sigma}_m|_{y+dy} \quad (4.4)$$

Onde:  $\bar{\sigma}_m$  é o depósito específico mássico médio de material particulado nos grânulos do leito; e  $v$  é a velocidade de escoamento ou de renovação dos grânulos no leito (na direção vertical).

A velocidade de renovação do leito pode ser obtida através de:

$$v = \frac{\dot{m}_g}{(1 - \varepsilon) \rho_g D L} \quad (4.5)$$

Onde:  $\dot{m}_g$  é a taxa mássica de grânulos no leito;  $\varepsilon$  é a porosidade do leito; e  $\rho_g$  é a densidade do material granular utilizado.

O termo de acúmulo, por sua vez, pode ser representado por:

$$\text{Acúmulo} = (dy L D) \frac{\partial}{\partial t} (\bar{\sigma}_m) \quad (4.6)$$

Onde  $t$  é o tempo.

Substituindo os termos na Equação 4.1, dividindo pelo volume e tomando o limite quando  $dy \rightarrow 0$ , obteve-se:

$$\frac{\partial}{\partial t} \bar{\sigma}_m = r + v \frac{\partial}{\partial y} \bar{\sigma}_m \quad (4.7)$$

Para obtenção desta representação matemática foi considerada a hipótese de que o escoamento dos grânulos é uniforme na superfície D-L perpendicular ao fluxo (escoamento *plug-flow*).

## 4.2 Taxa de remoção de material particulado na filtração granular

No trabalho de Wenzel *et al.* (2014) foi desenvolvido um balanço material para a filtração granular em leito fixo. Tendo em vista que, ao escoar no meio poroso, a concentração de material particulado varia pela deposição do material no meio granular, o depósito específico mássico também irá variar nesta direção. Conforme Tien e Ramarao (2007), pode-se propor uma lei de primeira ordem em relação à concentração de material particulado para a taxa de remoção, de acordo com a Equação 4.8.

$$\frac{\partial C}{\partial z} = \lambda C \quad (4.8)$$

Onde:  $C$  é a concentração de material particulado na corrente gasosa,  $\lambda$  é o coeficiente de filtro e a coordenada  $z$  representa a profundidade do leito.

O coeficiente de filtro varia com a profundidade do leito, ou seja, com a quantidade de material particulado depositada nos grânulos do filtro e representa, em última instância, a habilidade do filtro em recolher partículas.

A partir disto, Wenzel *et al.* (2014) assumiram deposição de partículas uniforme ao longo do leito, ou seja, assumiram que a lei da taxa de primeira ordem é válida. Outras hipóteses do modelo foram: área transversal constante e distribuição de velocidades

homogênea. Estas hipóteses foram a base para obtenção do modelo apresentado na Equação 4.9.

$$\left(\frac{\partial \bar{\sigma}_m}{\partial t}\right)_{LF} = \frac{u_s C_{in}}{L} (1 - e^{-\lambda_0 \bar{F} L}) \quad (4.9)$$

Onde:  $u_s$  é a velocidade superficial do fluido;  $C_{in}$  é a concentração de material particulado na entrada do filtro;  $\lambda_0$  é o coeficiente inicial do filtro (coeficiente de filtro limpo); e  $\bar{F}$  é o coeficiente de filtro médio relativo. O subscrito LF indica que leito fixo.

O coeficiente de filtro médio relativo,  $\bar{F}$ , é uma expressão utilizada para relacionar o coeficiente de filtro médio ( $\bar{\lambda}$ ) com o coeficiente de filtro inicial, de acordo com a Equação 4.10. Segundo Tien e Ramarao (2007) e Wenzel *et al.* (2014), o coeficiente de filtro relativo é função da deposição de partículas, ou seja, do depósito específico mássico médio – Equação 4.9. Note-se que  $\underline{\alpha}$  é o vetor dos parâmetros do modelo.

$$\bar{F} \equiv \frac{\bar{\lambda}}{\lambda_0} = f(\underline{\alpha}, \bar{\sigma}_m) \quad (4.10)$$

Diversas funções são propostas para descrever a variação do coeficiente de filtro relativo com o depósito específico, as quais dependem das características da suspensão a ser filtrada e do filtro/meio granular utilizados.

A partir da definição de eficiência – Equação 4.11 – e combinando-a com as expressões anteriores, chega-se na Equação 4.12, onde  $C_{out}$  é a concentração na saída do filtro e  $C_{in}$  é a concentração na entrada.

$$E = 1 - \frac{C_{out}}{C_{in}} \quad (4.11)$$

$$(E)_{LF} = 1 - e^{-\lambda_0 \bar{F} L} \quad (4.12)$$

Tanto para a situação de leito fixo, como para a situação de leito móvel, a partir de uma análise da quantidade do que entra e do que sai de particulado através do leito (expresso em termos de eficiência de coleta), obteve-se as Equações 4.13 e 4.14. Estas equações apresentam algumas diferenças. No filtro de leito móvel o material granular é inserido limpo no topo e, ao escoar, vai removendo partículas e, desta forma,  $\bar{\sigma}_m$  irá aumentar nesta direção. Com isto,  $\bar{F}$  irá se alterar e, conseqüentemente, também  $\bar{\lambda}$ , que representa a habilidade de remoção de partículas por parte do leito. Assim, a eficiência de remoção de partículas irá variar na direção y (vertical), por isto foi representado como  $E_y$ . Enquanto que no leito fixo, tendo em vista a homogeneidade na seção perpendicular ao fluxo, a eficiência permanece a mesma em qualquer ponto.

$$(Entra - Sai)_{\text{fluido}}|_{LF} = u_s C_{in} A E \quad (4.13)$$

$$(Entra - Sai)_{\text{fluido}}|_{LM} = u_s C_{in} A E_y \quad (4.14)$$

A representa a área da seção transversal.

Assim, pôde-se obter uma expressão para a taxa de filtração a partir de uma analogia entre a modelagem apresentada por Wenzel *et al.* (2014), em leito fixo, com a situação de leito móvel:

$$r (dy L D) = u_s C_{in} (dy D) (1 - e^{-\lambda_0 \bar{F}L}) \quad (4.15)$$

$$r = \left( \frac{\partial \bar{\sigma}_m}{\partial t} \right)_{LF} = \frac{u_s C_{in}}{L} (1 - e^{-\lambda_0 \bar{F}L}) \quad (4.16)$$

### 4.3 Fluidodinâmica do sistema e gradiente de pressão

O conhecimento da dinâmica do gradiente de pressão durante a operação de um filtro granular é de suma importância. Deve-se entender seu mecanismo de funcionamento, para projetá-lo da melhor maneira possível.

Tendo em vista que o aumento do depósito específico no filtro granular irá alterar a porosidade do leito, além de outras propriedades, é esperado um aumento da queda de pressão. De acordo com Tien e Ramarao (2007) e considerando a proposta de Wenzel *et al.* (2014), a queda de pressão pode ser representada por uma função  $\bar{G}$ , denominada queda de pressão relativa do filtro, conforme Equação 4.17.  $\bar{G}$  é definida como a razão entre a queda de pressão por unidade de comprimento do leito ( $\Delta P/L$ ), em relação a queda de pressão por unidade de comprimento do leito inicial ( $\Delta P/L$ )<sub>0</sub>. Esta função é funcionalmente dependente do depósito específico médio,  $\bar{\sigma}_m$ , e do seu formato, como os parâmetros do modelo ( $\underline{\beta}$ ), dependem das características da suspensão a ser filtrada e do filtro/material granular utilizado. Diversos formatos para esta função têm sido propostos, os quais podem ser conferidos em Tien e Ramarao (2007).

$$\bar{G} \equiv \frac{(\Delta P/L)}{(\Delta P/L)_0} = f(\bar{\sigma}_m, \underline{\beta}) \quad (4.17)$$

A determinação da queda de pressão inicial, ( $\Delta P/L$ )<sub>0</sub>, ou seja, a queda de pressão do leito limpo, é necessária para que, conhecendo-se a função  $\bar{G}$  para determinados casos, se obtenha a dinâmica da queda de pressão no leito. Um dos modelos disponíveis para a determinação da queda de pressão inicial do leito é o modelo proposto por McDonald *et al.* (1979) – Equação 4.18, o qual consiste em uma generalização da Equação de Ergum, onde os

parâmetros 170 e 1,75 são substituídos por parâmetros ajustáveis, A e B, para o meio granular em questão.

$$\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_0 = A \frac{(1 - \varepsilon_0)^2 \mu}{\varepsilon_0^3 d_G^2} u_s + B \frac{\rho(1 - \varepsilon_0)}{\varepsilon_0^3 d_G} u_s^2 \quad (4.18)$$

Onde:  $\varepsilon_0$  é a porosidade inicial do leito,  $d_g$  é o diâmetro médio dos grânulos,  $\mu$  é a viscosidade do fluido,  $\rho$  é a densidade do fluido e A e B são os parâmetros adimensionais do modelo.

Tendo em vista que no filtro de leito móvel o depósito específico mássico médio varia ao longo da altura, ter-se-ia diferentes resistências ao fluxo de fluido (perdas de carga), caso a velocidade do escoamento do fluido fosse a mesma em cada elemento diferencial de altura. Após a passagem do fluido pelo leito, entretanto, a pressão absoluta, pelas características do escoamento, será a mesma em toda a altura do leito. Assim, visando manter esta homogeneidade da queda de pressão, ocorrerá uma maior velocidade de escoamento nos pontos em que há menor perda de carga – no topo do leito, e menores velocidades no fundo, onde, devido ao maior depósito de material, haverá maior resistência ao fluxo. A representação deste comportamento pode ser realizada por meio da determinação da velocidade ao longo da altura, em função do depósito específico mássico médio (ou seja, a função  $\bar{G}$ ). Isto pode ser feito por meio da substituição de  $\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_0$  na Equação 4.17 e pela solução, por Báskara, da velocidade superficial  $u_s$ . Chega-se em:

$$u_s = -\frac{AA}{2 BB} + \left[ \frac{1}{4} \left(\frac{AA}{BB}\right)^2 + \frac{1}{BB} \frac{\Delta P/L}{\bar{G}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.19)$$

Onde  $AA = A \frac{(1-\varepsilon_0)^2 \mu}{\varepsilon_0^3 d_G^2}$  e  $BB = B \frac{\rho(1-\varepsilon_0)}{\varepsilon_0^3 d_G}$ . Ignorou-se o sinal negativo da Báskara, pois as velocidades negativas não têm relevância para o estudo do FGLM.

Nesta equação, enquanto  $\Delta P/L$  é constante ao longo da altura, a função  $\bar{G}$  varia de acordo com  $\bar{\sigma}_m$ . Desta forma, é possível a representação da velocidade superficial ao longo da altura.

Em aplicações da filtração granular, normalmente temos uma vazão de fluido que devemos tratar – que depende da aplicação em questão. Desta forma, a variável conhecida será a velocidade superficial média de escoamento do fluido,  $\bar{u}_s$ , obtida pela razão entre a vazão volumétrica de gás e a área da seção do filtro. Pode-se representar a velocidade média, em função das velocidades ao longo da altura, da seguinte forma:

$$\bar{u}_s = \frac{1}{H} \int_0^H u_s dy \quad (4.20)$$

Onde H é a altura total do leito.

Substituindo a Equação 4.19 na Equação 4.20, derivando-se em relação ao tempo e explicitando  $\frac{d(\Delta P/L)}{dt}$ , obtém-se:

$$\frac{d(\Delta P/L)}{dt} = \frac{\int_0^H \left\{ \frac{1}{2 BB} \left[ \frac{1}{4} \left( \frac{AA}{BB} \right)^2 + \frac{1}{BB} \frac{\Delta P/L}{\bar{G}} \right]^{-\frac{1}{2}} \frac{\Delta P/L}{\bar{G}^2} \frac{\partial \bar{G}}{\partial \bar{\sigma}_m} \frac{\partial \bar{\sigma}_m}{\partial t} \right\} dy}{\int_0^H \left\{ \frac{1}{2 \bar{G} BB} \left[ \frac{1}{4} \left( \frac{AA}{BB} \right)^2 + \frac{1}{BB} \frac{\Delta P/L}{\bar{G}} \right]^{-\frac{1}{2}} \right\} dy} \quad (4.21)$$

Esta equação diferencial expressa a variação da queda de pressão por unidade de comprimento do leito, em função do tempo. A obtenção de uma solução depende do conhecimento da variação do depósito específico mássico médio,  $\bar{\sigma}_m$ , ao longo da altura e do tempo de operação do leito. Com isto, têm-se um sistema de equações diferenciais para solução.

A derivada da função  $\bar{G}$  em relação ao tempo, necessária à Equação 4.21, pode ser vista na Equação 4.22.

$$\frac{d\bar{G}}{dt} = \frac{\beta_2 \beta_1 \left( 1 + \frac{\beta_1 \bar{\sigma}_m}{\rho_P \varepsilon_0} \right)^{\beta_2} \left( 1 - \frac{\bar{\sigma}_m}{\rho_P \varepsilon_0} \right)^{\beta_3}}{\rho_P \varepsilon_0 \left( 1 + \frac{\beta_1 \bar{\sigma}_m}{\rho_P \varepsilon_0} \right)} - \frac{\beta_3 \left( 1 + \frac{\beta_1 \bar{\sigma}_m}{\rho_P \varepsilon_0} \right)^{\beta_2} \left( 1 - \frac{\bar{\sigma}_m}{\rho_P \varepsilon_0} \right)^{\beta_3}}{\rho_P \varepsilon_0 \left( 1 - \frac{\bar{\sigma}_m}{\rho_P \varepsilon_0} \right)} \quad (4.22)$$

#### 4.4 Outras relações importantes

Após a solução do sistema de equações diferenciais (Equações 4.7 e 4.21), têm-se como resultado a variação de  $\bar{\sigma}_m$  com o tempo e posição vertical, e a variação do  $\Delta P/L$  com o tempo. Assim, uma das variáveis de interesse é a velocidade superficial ao longo da altura com o tempo. Esta pode ser calculada a partir da aplicação dos resultados na Equação 4.20.

Outra variável importante neste contexto, fundamental ao projeto e especificação deste tipo de equipamento, é a eficiência total de filtração, E. Tendo em vista a variação do depósito específico mássico médio,  $\bar{\sigma}_m$ , com a altura e o fato do coeficiente de filtro (habilidade do filtro em remover partículas) ser dependente deste, a eficiência de filtração também irá variar com a altura. A Equação 4.22 apresenta a relação para o cálculo da eficiência de filtração em determinado instante de tempo e altura, conforme visto em tópico anterior.

$$E_y = 1 - e^{-\lambda_0 \bar{F}L} \quad (4.22)$$

A partir do conhecimento da eficiência de filtração em determinado instante de tempo ao longo da altura, a eficiência total de filtração pode ser calculada por:

$$E = \frac{1}{H} \int_0^H E_y dy \quad (4.23)$$

#### 4.5 Determinação do coeficiente de filtro inicial

A partir da lei de primeira ordem para remoção de partículas ao longo da profundidade do leito, sua integração, definição da eficiência e assumindo-se a situação inicial (de leito limpo), onde a eficiência é a mesma em toda a altura e profundidade do leito, pode-se obter:

$$\lambda_0 = \frac{1}{L} \ln \left( \frac{1}{1 - E_0} \right) \quad (4.24)$$

Onde  $E_0$  é a eficiência inicial de coleta de particulado no filtro.

A determinação de  $\lambda_0$  envolve, portanto, a determinação de  $E_0$ . Para obter-se a eficiência inicial de coleta, utilizou-se as mesmas correlações do estudo de Wenzel *et al.* (2014)

O modelo adotado por Wenzel *et al.* (2014) foi adaptado do trabalho de Tien e Ramarao (2007), onde subdivide-se a profundidade do leito em elementos unitários em série, de espessura  $l$  (conhecido como comprimento periódico), em um meio granular homogêneo disposto de forma aleatória – Equação 4.25.

$$l = \left[ \frac{\pi}{6(1 - \varepsilon)} \right]^{1/3} d_g \quad (4.25)$$

Nesta equação,  $\varepsilon$  é a porosidade e  $d_g$  é o diâmetro médio dos grânulos. A partir deste comprimento, o número de elementos unitários,  $N$ , é calculado por:

$$N = \frac{L}{l} \quad (4.26)$$

Assim, assumindo-se uma eficiência de coleta para cada um destes elementos ( $e_i$ ), a eficiência total de coleta através da equação pode ser avaliada por:

$$E = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - e_i) \quad (4.27)$$

Na situação inicial, onde não há depósito de material (leito limpo), todos os elementos individuais terão a mesma eficiência de coleta. Assim:

$$E_0 = 1 - (1 - e_0)^N \quad (4.28)$$

Assumindo-se o modelo de Happel para representação do meio granular, o valor da eficiência de coleta nos elementos unitários ( $e$ ), pode ser expressa em função da eficiência dos coletores individuais,  $\eta$ , por:

$$e_0 = 1.209 \eta_0 \quad (4.29)$$

A eficiência dos coletores individuais,  $\eta_0$ , por sua vez, pode ser avaliada por diversos modelos, empíricos e semi-empíricos, que dependem dos mecanismos de remoção de partícula preponderantes para a situação em questão.

Wenzel *et al.* (2014) escolheu um modelo proposto por Jung *et al.* (1989) para determinar  $\eta_0$  - Equação 4.30. Este modelo assume que os mecanismos de remoção preponderantes são a interceptação e a impactação inercial.

$$\eta_0 = 0.2589 N_{St_{eff}}^{1.3437} N_R^{0.23} \gamma \quad (4.30)$$

Onde:  $N_{St_{eff}}$  é o número de Stokes efetivo;  $N_R$  é o número de interceptação; e  $\gamma$  a probabilidade de adesão.

O número, Stokes efetivo pode ser calculado através da Equação 4.31.

$$N_{St_{eff}} = [A_s + 1.14 N_{Re}^{1/2} \varepsilon^{-3/2}] \frac{N_{St}}{2} \quad (4.31)$$

O parâmetro  $A_s$  pode ser calculado pela Equação 4.32;  $N_{Re}$  é o número de Reynolds – Equação 4.33; e  $N_{St}$  é o número de Stokes – Equação 4.34.

$$A_s = \frac{2[1 - (1 - \varepsilon)^{5/3}]}{2 - 3(1 - \varepsilon)^{1/3} + 3(1 - \varepsilon)^{5/3} - 2(1 - \varepsilon)^2} \quad (4.32)$$

$$N_{Re} = \frac{\rho u_s d_g}{\mu} \quad (4.33)$$

$$N_{St} = \frac{\rho_p d_p^2 u_s c_s}{9 \mu d_g} \quad (4.34)$$

Nestas equações:  $c_s$  é o fator de correção de Cunningham – avaliado pela Equação 4.35, onde os valores numéricos são para o ar;  $d_p$  é o diâmetro médio das partículas,  $\mu$  é a viscosidade do fluido e  $\rho$  é a densidade do fluido.

$$c_s = 1 + \left( \frac{6.635 \times 10^{-8}}{d_p/2} \right) \left( 1.252 + 0.399 e^{-1.10 \left( \frac{d_p/2}{6.635 \times 10^{-8}} \right)} \right) \quad (4.35)$$

O número de interceptação é definido pela razão entre  $d_p$  e  $d_g$ , ou seja:



$$N_R = \frac{d_p}{d_g} \quad (4.36)$$

Para aplicação desta correlação, de acordo com Jung *et al.* (1989), o número de interceptação deve estar na faixa de  $1.5 \times 10^{-4} < N_R < 4.5 \times 10^{-2}$ .

Já, para obter-se a probabilidade de adesão,  $\gamma$ , Wenzel *et al.* (2014) utilizou a correlação de Yoshida e Tien (1985), válida para  $N_{St} \geq 0.01$  - Equação 4.37.

$$\gamma = 0.00318 N_{St}^{-1.248} \quad (4.37)$$

Através desses modelos, consegue-se calcular, para dada suspensão e filtro utilizado, a eficiência inicial de coleta,  $E_0$ , e, conseqüentemente, o coeficiente de filtro inicial,  $\lambda_0$ .

## 5 MATERIAIS E MÉTODOS

No presente estudo, faz-se uma nova abordagem do trabalho realizado por Wenzel *et al.* (2014), aplicando-o à um FGLM. Assim, o funcionamento do filtro dá-se em outras condições, modificadas pelo movimento dos grânulos.

### 5.1 Dados da suspensão, material granular e desempenho do filtro utilizados nas simulações

#### 5.1.1 Material granular e suspensão

Wenzel *et al.* (2014) utilizaram esferas de vidro como material granular, com as características apresentadas na Tabela 5.1. Para simular o material particulado encontrado em gases, foram utilizados dois tipos de materiais: microesferas de vidro e precipitado de sílica. Neste trabalho utilizamos os dados obtidos nos experimentos dos autores com microesferas de vidro. Os testes foram realizados com ar em condição ambiente. As características básicas da suspensão podem ser conferidas também, na Tabela 5.1.

**Tabela 5.1.** Características do meio granular e da suspensão.

Parâmetro	Símbolo	Unidade	Valor
Diâmetro médio de Sauter do material granular	$d_g$	mm	1,87
Densidade do material granular	$\rho_g$	$\text{g cm}^{-3}$	2.45
Porosidade do leito	$\varepsilon$	-	0.387
Diâmetro médio de Sauter da suspensão	$d_p$	$\mu\text{m}$	16.84
Densidade da suspensão	$\rho_p$	$\text{g cm}^{-3}$	2.5

#### 5.1.2 Coeficiente médio relativo do filtro e queda de pressão relativa

Como visto anteriormente, o coeficiente médio relativo do filtro,  $\bar{F}$ , que descreve a habilidade do filtro de coletar partículas, depende do depósito específico mássico médio (TIEN e RAMARAO, 2007). Sua forma funcional depende das características da suspensão a ser filtrada e do meio granular filtrante utilizado.

Wenzel *et al.* (2014) apresentaram um modelo modificado em relação ao proposto por Ives (1969) *apud* Wenzel *et al.* (2014), resultando no modelo apresentado na Equação 5.1.

$$\bar{F} = \left(1 + \alpha_1 \frac{\bar{\sigma}_m / \rho_P}{\varepsilon_0}\right)^{\alpha_2} \left(1 - \frac{\bar{\sigma}_m / \rho_P}{\varepsilon_0}\right)^{\alpha_3} \quad (5.1)$$

Onde  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  e  $\alpha_3$  são os parâmetros do modelo. O modelo foi validado para uma ampla faixa de  $\bar{\sigma}_m$ , cujas estimação dos parâmetros resultou nos valores apresentados na Tabela 5.2.

Nas mesmas condições de obtenção do modelo para  $\bar{F}$ , Wenzel *et al.* (2014) propuseram uma função para descrever a queda de pressão média relativa,  $\bar{G}$ , com base na equação proposta por Ives (1969) *apud* Wenzel *et al.* (2014). Esta função pode ser conferida na Equação 5.2.

$$\bar{G} = \left(1 + \beta_1 \frac{\bar{\sigma}_m / \rho_P}{\varepsilon_0}\right)^{\beta_2} \left(1 - \frac{\bar{\sigma}_m / \rho_P}{\varepsilon_0}\right)^{\beta_3} \quad (5.2)$$

O ajuste deste modelo resultou nos valores dos parâmetros apresentados na Tabela 5.2.

Ainda, em se tratando da estimativa da dinâmica da queda de pressão no leito, deve-se conhecer os parâmetros da equação de Ergun generalizada (Equação 4.18). Os valores dos parâmetros A e B, estimados por Wenzel *et al.* (2004), também podem ser conferidos na Tabela 5.2.

**Tabela 5.2.** Valores dos parâmetros de  $\bar{F}$ ,  $\bar{G}$  e  $(\Delta P/L)_0$ .

Parâmetros do modelo $\bar{F}$			Parâmetros do modelo $\bar{G}$			Parâmetros da equação $(\Delta P/L)_0$	
$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	A	B
$2.906 \times 10^5$	0.1374	4.338	28.92	1.254	4.2171	140	4.90

## 5.2 Parâmetros e variáveis

### 5.2.1 Parâmetros fixos

Para a simulação do comportamento de um filtro granular de fluxo cruzado de leito móvel, uma das determinações iniciais consiste na verificação da escala na qual se deseja projetar/simular o desempenho do filtro e das condições da suspensão a ser filtrada. A escala do equipamento pode ser definida para a aplicação em questão pela vazão volumétrica de gás a ser tratada. A condição da suspensão diz respeito à concentração de material particulado na corrente gasosa, bem como as condições de temperatura e de pressão da mesma. Foram adotadas vazão volumétrica de gás e concentração de material particulado correspondentes ao processo de gaseificação de resíduos em planta piloto, dados estes medidos por Wenzel (2013). Os valores podem ser conferidos na Tabela 5.3. Esta tabela também apresenta os

dados de temperatura e de pressão utilizados na simulação, a densidade do gás (considerando gás ideal e ar como fluido) e a viscosidade (calculada pela equação de Sutherland, dos estados correspondentes).

Ao contrário da filtração granular em leito fixo, na situação de leito móvel as características geométricas do equipamento influenciam no desempenho do mesmo. Neste estudo, consideramos uma seção retangular constante do leito, com a razão entre a largura,  $D$ , e a altura,  $H$ , de 0,5 – ver Tabela 5.3. Desta forma, estas dimensões são alteradas proporcionalmente quando há a utilização de diferentes velocidades superficiais, em vista da manutenção da vazão volumétrica de gás constante.

**Tabela 5.3.** Características dos parâmetros fixos.

Parâmetro	Símbolo	Unidade	Valor
Vazão volumétrica de gás processado	$Q$	$\text{Nm}^3 \text{h}^{-1}$	106,53
Concentração da suspensão na entrada do leito	$C_{in}$	$\text{g cm}^{-3}$	4
Densidade do gás	$\rho$	$\text{Kg m}^{-3}$	1.1617
Viscosidade	$\mu$	cP	0.018649
Temperatura	$T$	K	298.82
Pressão	$P$	Pa	100316.7
Relação entre $D$ e $H$	$DH$	-	0.5

A relação entre as variáveis vazão volumétrica ( $Q$ ), velocidade superficial média ( $\bar{u}_s$ ) e a seção do leito  $DH$  ( $DH=D H^{-1}$ ), pode ser conferida na Equação 5.3.

$$Q = \bar{u}_s(D H) = \bar{u}_s(DH H^2) \quad (5.3)$$

### 5.2.2 Variáveis Estudadas

Dentre todas as informações necessárias para o estudo de um FGLM, três variáveis foram classificadas como principais responsáveis pelo seu funcionamento: a velocidade superficial média ( $\bar{u}_s$ ), a profundidade do leito ( $L$ ) e a velocidade de escoamento dos grânulos ( $v$ ).

Através de pesquisas na literatura estabeleceram-se faixas de valores tradicionalmente empregadas para as três variáveis, a fim de simular o comportamento, averiguando os melhores resultados para a aplicação do FGLM.

Na Tabela 5.4 a seguir, apresentam-se as três variáveis estudadas, com as respectivas faixas de valores obtidas na literatura (nível).

**Tabela 5.4.** Variáveis estudadas e seus respectivos níveis de valores.

Variáveis Estudadas	Unidade	Nível		
		-1	0	1
$\bar{u}_s$	m s <sup>-1</sup>	0.1	0.175	0.25
L	m	0.1	0.35	0.6
$v$	m s <sup>-1</sup>	0.00003	0.000515	0.001

### 5.2.3 Variáveis de resposta

Para decisão das melhores condições operacionais para o FGLM foram selecionadas informações capazes de trazer subsídios e indicativas das melhores condições operacionais.

Por um lado, temos a vazão mássica de grânulos necessária durante a operação. Tendo em vista que o material granular a ser utilizado entra limpo, pelo topo do equipamento, e que na base sairá com uma elevada quantidade de material particulado que foi retido na operação, é necessária a limpeza dos grânulos, para sua posterior reutilização. Assim, quanto maior a vazão mássica de grânulos requerida, maiores serão os custos para a limpeza deste material e ainda, custo ambiental, tendo em vista que o mesmo deve ser limpo com água, gerando um efluente a ser tratado. A vazão mássica de grânulos possui relação com a profundidade L do leito, velocidade de renovação do leito,  $v$ , e largura do leito, D. Foi avaliada através da Equação 5.4.

$$\dot{m}_g = v (1 - \varepsilon) \rho_g D L \quad (5.4)$$

Uma das grandes virtudes dos equipamentos de leito móvel é o fato de que, após certo tempo de operação, atingirá o regime estacionário. Quando atingido o regime permanente, as variáveis do sistema permanecem constantes com o passar do tempo. Assim, em certa aplicação, na maior parte do tempo, o sistema operará nesta situação. O valor das variáveis, portanto, são de suma importância para a especificação e dimensionamento do filtro.

Além disso, outro indicativo para verificação das melhores condições de funcionamento dos FGLM consiste na queda de pressão, bem como a eficiência de filtração em regime estacionário -  $(\Delta P)_{\text{estacionário}}$  e  $E_{\text{estacionário}}$ , respectivamente. Neste trabalho, apesar de ser possível obter estes valores a partir da modelagem apresentada no Capítulo 4, tomando  $\partial \bar{\sigma}_m / \partial t \rightarrow 0$  e  $d(\Delta P/L)/dt \rightarrow 0$ , os mesmos foram calculados a partir da média dos últimos 10% do tempo de simulação.

### 5.3 Solução do problema

Em um FGLM, além do movimento do fluido têm-se, também, o movimento dos grânulos. Como visto no Capítulo 4, a solução do modelo deve levar em conta ambas as análises apresentadas – fluidodinâmica, equação da continuidade para os grânulos/material particulado, além da taxa de filtração. Ou seja, dependem da solução de uma série de equações inter-relacionadas que geram, ao final da análise, uma equação diferencial parcial (EDP – Equação 4.7) acoplada com uma equação diferencial que necessita a avaliação de integrais (Equação 4.21).

Para solucionar este sistema, optou-se pela transformação da EDP (Equação 4.7) em uma série de Equações Diferenciais Ordinárias (EDO's) através da sua discretização ao longo da altura (coordenada  $y$ ). A altura total  $H$  foi dividida em  $nd = 100$  intervalos igualmente espaçados,  $h$ :

$$h = \frac{H}{nd} \quad (5.5)$$

Assim, utilizando-se o método das diferenças finitas, as seguintes aproximações foram tomadas (diferenças finitas progressiva, centrada e regressiva, respectivamente):

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{\sigma}_{m,i}}{\partial y} &\approx \frac{\bar{\sigma}_{m,i+1} - \bar{\sigma}_{m,i}}{h} & i = 1 \\ \frac{\partial \bar{\sigma}_{m,i}}{\partial y} &\approx \frac{\bar{\sigma}_{m,i+1} - \bar{\sigma}_{m,i-1}}{h} & 1 < i < nd + 1 \\ \frac{\partial \bar{\sigma}_{m,i}}{\partial y} &\approx \frac{\bar{\sigma}_{m,i} - \bar{\sigma}_{m,i-1}}{h} & i = nd + 1 \end{aligned}$$

A condição de contorno utilizada na implementação do método das diferenças finitas consiste em:

$$\bar{\sigma}_m(y = 0) = 0 \text{ ou } \bar{\sigma}_{m,1} = 0$$

Ou seja, no topo do filtro, onde o material granular é alimentado limpo, o depósito específico é nulo.

Com esta aproximação, foi obtido um sistema de 102 equações diferenciais ordinárias para resolução simultânea. Consiste em 101 equações resultantes da discretização da altura  $H$  – da EPD, somada a mais 1 equação proveniente da fluidodinâmica do sistema (Equação 4.21). Este sistema foi resolvido pelo Método de Runge-Kutta Implícito – algoritmo TR-BDF2 (SHAMPINE, 1996).

As integrais envolvidas na equação diferencial da queda de pressão do leito (Equação 4.21) foram solucionadas numericamente com o método de Simpson.

## **6 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **6.1 Simulações do funcionamento de um FGLM e indicadores de operação**

Conforme descrito na Metodologia do trabalho, foram selecionadas três variáveis para o estudo do comportamento do sistema de filtração granular com fluxo cruzado em leito móvel: a velocidade superficial,  $u_s$ , comprimento do leito,  $L$ , e velocidade de escoamento dos grânulos,  $v_g$ . Também, foram escolhidos com base em dados da literatura, três níveis, igualmente espaçados, de valores que incluíssem a maioria dos trabalhos consultados na literatura. Foram realizadas simulações a partir da combinação destas 3 variáveis em 3 níveis, resultando em 27 situações ( $3^3 = 27$ ).

As demais variáveis foram mantidas fixas, conforme descrito anteriormente, na metodologia do trabalho.



**Tabela 6.1.** Combinações entre as variáveis  $u_s$ ,  $L$  e  $v_g$ , e seus respectivos valores utilizados nas simulações.

Combinações	$\bar{u}_s$ (m s <sup>-1</sup> )	L (m)	$v_g$ (m s <sup>-1</sup> )
1	0.1	0.1	0.00003
2	0.1	0.1	0.000265
3	0.1	0.1	0.0005
4	0.1	0.2	0.00003
5	0.1	0.2	0.000265
6	0.1	0.2	0.0005
7	0.1	0.3	0.00003
8	0.1	0.3	0.000265
9	0.1	0.3	0.0005
10	0.175	0.1	0.00003
11	0.175	0.1	0.000265
12	0.175	0.1	0.0005
13	0.175	0.2	0.00003
14	0.175	0.2	0.000265
15	0.175	0.2	0.0005
16	0.175	0.3	0.00003
17	0.175	0.3	0.000265
18	0.175	0.3	0.0005
19	0.25	0.1	0.00003
20	0.25	0.1	0.000265
21	0.25	0.1	0.0005
22	0.25	0.2	0.00003
23	0.25	0.2	0.000265
24	0.25	0.2	0.0005
25	0.25	0.3	0.00003
26	0.25	0.3	0.000265
27	0.25	0.3	0.0005

De forma a obter-se alguns indicadores do funcionamento de um FGLM, foram selecionadas algumas variáveis, conforme descrito na seção 5.2.3. Na indústria, a quantidade de material granular, necessária ao equipamento para se tratar determinada quantidade de fluido, e a eficiência, geralmente capaz de para atender a legislação vigente, são fatores preponderantes. Ainda, ao se atender a legislação vigente, outras características necessárias ao filtro serão: (i) o tamanho do equipamento (volume e área de filtração); e (ii) a queda de pressão do equipamento.

Resumindo, no caso de um FGLM, a área  $A$  e o volume  $V$  do filtro, bem como a vazão mássica de grânulos  $m_g$  e a queda de pressão  $\Delta P$ , além da sua eficiência total de coleta  $E$ , são variáveis que determinam seu custo e regime de operação.

A área e o volume do filtro dependem da vazão do fluido a ser filtrado e influenciam nas demais variáveis. A vazão mássica de grânulos estabelecida em um FGLM, é um dos fatores que determina o custo de operação do filtro, pois quanto menos material for utilizado, menos material precisará ser tratado e repostado no filtro. A queda de pressão é a variável que descreve a resistência que o fluxo de gás irá enfrentar ao ser filtrado. Todas essas variáveis são interdependentes e regulam o funcionamento do filtro.

Para avaliar a perda de carga, ou queda de pressão, do FGLM, utilizou-se os resultados no regime permanente, estabelecido como a média dos últimos resultados obtidos, logo após o filtro atingir 90% do tempo total da sua operação. Procedeu-se do mesmo modo para estimar a eficiência do FGLM, também no regime permanente.

Os resultados obtidos através das combinações das variáveis  $u_s$ ,  $L$  e  $v_g$ , encontram-se na Tabela 6.2, representados pelos parâmetros que indicam as condições de operação do FGLM ( $A$ ,  $V$ ,  $m_g$ ,  $\Delta P$  e  $E$ ), já comentadas nos parágrafos acima. A escolha de um FGLM na indústria, baseia-se nesses parâmetros, atendendo as suas necessidades frente a sua produção e operação, bem como, das características de seu efluente gasoso e material particulado.

**Tabela 6.2.** Resultados das combinações de  $u_s$ ,  $L$  e  $v_g$ , em termos de parâmetros que influenciam a operação de um FGLM.

Combinações	Área (m <sup>2</sup> )	Volume (m <sup>3</sup> )	m <sub>g</sub> (kg h <sup>-1</sup> )	ΔP <sub>permanente</sub> (Pa)	E <sub>permanente</sub>
1	0.2959	0.0296	6.2391	191.1279	0.9588
2	0.2959	0.0296	55.1118	94.6701	0.9535
3	0.2959	0.0296	103.9845	87.9820	0.9437
4	0.2959	0.0592	12.4781	289.2819	0.9972
5	0.2959	0.0592	110.2236	176.7336	0.9956
6	0.2959	0.0592	207.9691	169.5620	0.9940
7	0.2959	0.0888	18.7172	374.3162	0.9996
8	0.2959	0.0888	165.3354	257.7778	0.9994
9	0.2959	0.0888	311.9536	250.5263	0.9991
10	0.1691	0.0169	4.7163	490.5332	0.9623
11	0.1691	0.0169	41.6606	225.4739	0.9672
12	0.1691	0.0169	78.6049	205.5623	0.9619
13	0.1691	0.0338	9.4326	739.5517	0.9975
14	0.1691	0.0338	83.3212	413.6777	0.9973
15	0.1691	0.0338	157.2098	392.1628	0.9967
16	0.1691	0.0507	14.1489	941.3277	0.9997
17	0.1691	0.0507	124.9818	598.5799	0.9996
18	0.1691	0.0507	235.8148	576.7870	0.9996
19	0.1184	0.0118	3.9459	927.1557	0.9639
20	0.1184	0.0118	34.8558	409.7170	0.9726
21	0.1184	0.0118	65.7656	368.5207	0.9699
22	0.1184	0.0237	7.8919	1406.7	0.9978
23	0.1184	0.0237	69.7115	743.4215	0.9979
24	0.1184	0.0237	131.5312	698.3501	0.9977
25	0.1184	0.0355	11.8378	1775.6	0.9999
26	0.1184	0.0355	104.5673	1069.2	0.9997
27	0.1184	0.0355	197.2968	1023.5	0.9997

A decisão das condições operacionais mais adequadas não é feita de modo trivial. Uma situação ideal envolveria obter-se: máxima eficiência; mínima vazão de grânulos; tamanho do equipamento mínimo; e mínima queda de pressão. Entretanto, não temos como garantir todas estas situações ao mesmo tempo.

Dependendo da aplicação, uma queda de pressão baixa, mas que garanta uma concentração na saída em determinado nível - que pode até significar uma baixa eficiência - pode ser a melhor escolha. Por outro lado, podemos querer eficiência máxima, de forma que a

concentração na saída seja mínima (aplicação em motores de combustão interna ou turbinas a gás por exemplo), sem nos importarmos com as demais variáveis. Enfim, o melhor depende de vários fatores e não necessariamente significa a minimização ou maximização de somente uma variável. Por vezes, para isto, utilizamos a otimização multi-objetivo, de acordo com a aplicação.

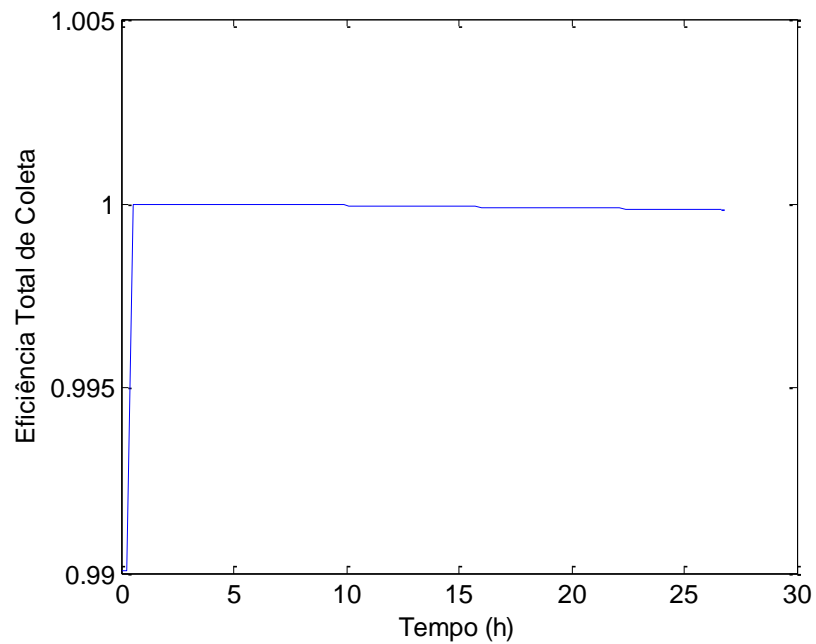
Por isto, a partir das simulações realizadas – cujos indicativos da operação encontram-se na Tabela 6.2 – foram selecionadas algumas para avaliação mais detalhada.

## **6.2 Melhores resultados associados aos parâmetros de operação de um FGLM**

As faixas das condições operacionais, utilizadas para simulação com o modelo proposto à um FGLM, resultaram em eficiências de filtração acima de 94%, onde mais de 65% das eficiências ficaram acima de 99% no regime permanente. A queda de pressão variou bastante, apresentando valores numa faixa de 87.9820 a 1775.6 Pa, também no regime permanente. Houve diferenças consideráveis entre as vazões mássicas de grânulos, variando de 3.9459 kg h<sup>-1</sup> a 311.9536 kg h<sup>-1</sup>. Quanto a área e o volume do FGLM, como manteve-se uma vazão constante para o gás, eles variaram conforme a velocidade superficial adotada para o fluido (gás) e a profundidade do leito, L, que eram variáveis estudadas.

### **6.2.1 Combinação 25: 0.25 m s<sup>-1</sup> de velocidade superficial, 300 mm de profundidade do leito e 3x10<sup>-5</sup> m s<sup>-1</sup> de velocidade de renovação dos grânulos**

A combinação 25 (ver Tabelas 6.1 e 6.2), apresentou a melhor eficiência total dentre todas as outras combinações. A Figura 6.1 apresenta o comportamento da variação da eficiência de remoção de partículas em função do tempo.

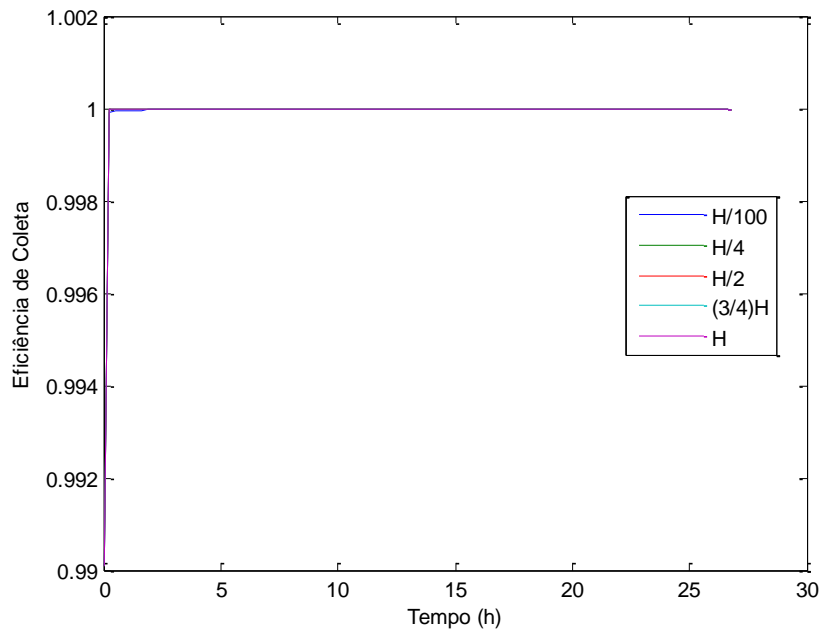


**Figura 6.1.** Comportamento da Eficiência Total de Coleta no FGLM com o Tempo – Combinação 25:  $u_s=0.25 \text{ m s}^{-1}$ ,  $L=300 \text{ mm}$  e  $v_g=3 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ .

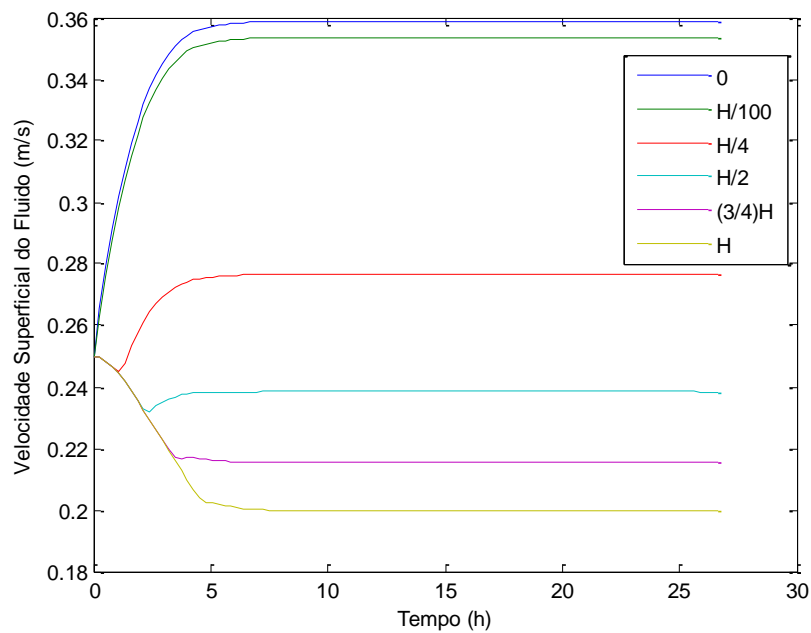
Se o foco do tratamento da corrente de gás é a obtenção de máxima remoção de poluentes, esta seria uma situação em que obtemos máxima eficiência. Geralmente, quando opta-se por uma tecnologia desse tipo, é porque as tecnologias usuais não conseguem atender os padrões de emissão estipulados pelas legislações vigentes.

Como visto na seção 4, neste tipo de equipamento temos eficiências variáveis ao longo da altura. O comportamento desta variável pode ser verificado na Figura 6.2.

Ainda, como visto anteriormente, em virtude de diferentes resistências ao fluxo ao longo da altura, as velocidades de escoamento da corrente gasosa variam, conforme mostra a Figura 6.3.

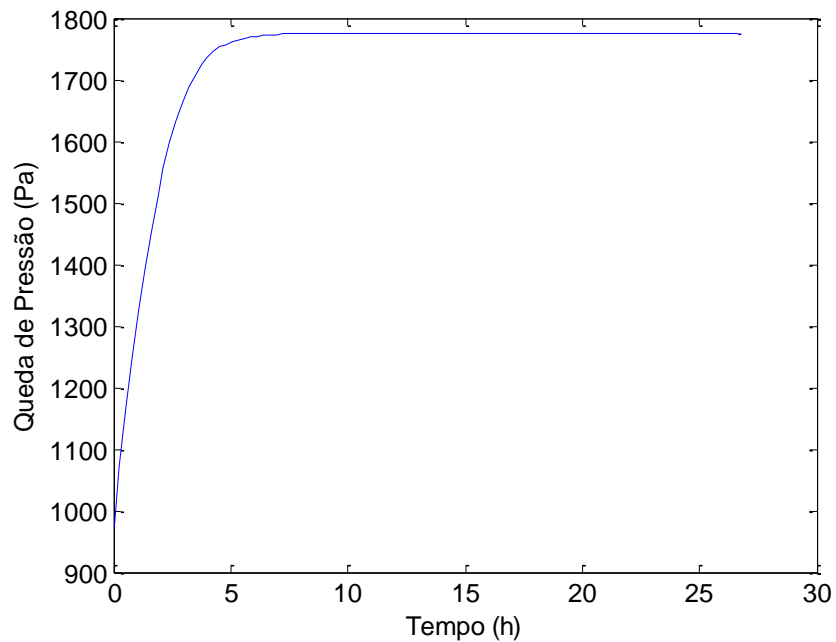


**Figura 6.2.** Comportamento da Eficiência de Coleta para diferentes alturas do FGLM com o Tempo – Combinação 25:  $u_s=0.25 \text{ m s}^{-1}$ ,  $L=300 \text{ mm}$  e  $v_g=3 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ .



**Figura 6.3.** Comportamento da velocidade superficial do fluido ao longo da altura do FGLM com o Tempo - Combinação 25:  $u_s=0.25 \text{ m s}^{-1}$ ,  $L=300 \text{ mm}$  e  $v_g=3 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ .

Ainda, a dinâmica da queda de pressão é mostrada na Figura 6.4, chegando em 1775.6 Pa.

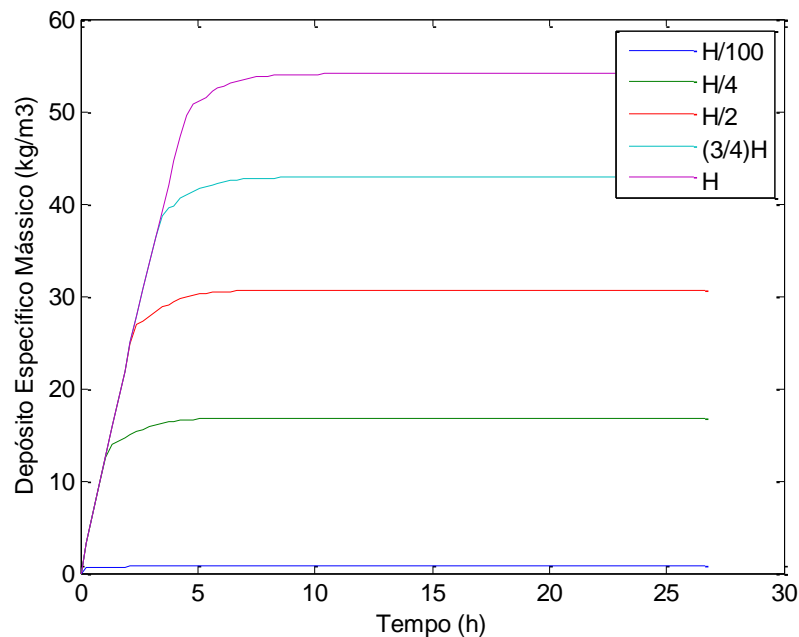


**Figura 6.4.** Comportamento da Queda de Pressão do FGLM com o Tempo – Combinação 25:  $u_s=0.25 \text{ m s}^{-1}$ ,  $L=300 \text{ mm}$  e  $v_g=3 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ .

Se a eficiência do processo não for a prioridade, permitindo a emissão de maiores concentrações de poluentes, uma queda de pressão mais elevada pode ser uma desvantagem, fazendo com que se opte por outro equipamento. Porém, deve-se lembrar que as vantagens de um filtro granular estão justamente na operação a altas temperaturas, remoção de material particulado de pequenas dimensões e operação à seco, geralmente as condicionantes da escolha pelo filtro granular e não outros equipamentos (WENZEL, 2013).

Vale ressaltar que, na Combinação 25, a vazão mássica de grãos foi de  $11.8378 \text{ kg h}^{-1}$ , um dos menores valores obtidos para esse parâmetro. Com uma menor vazão, a quantidade de grânulos a serem tratados é menor, o que diminui os custos de operação do FGLM, um fator favorável à escolha destas condições.

Outra variável que depende da altura é o depósito específico mássico médio, comportamento este, que pode ser verificado na Figura 6.5. No fundo do equipamento há um maior depósito específico de material em relação ao topo, conforme é mostrado nesta figura.



**Figura 6.5.** Comportamento do Depósito Específico Mássico para diferentes alturas do FGLM com o Tempo - Combinação 25:  $u_s=0.25 \text{ m s}^{-1}$ ,  $L=300 \text{ mm}$  e  $v_g=3 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ .

Para esta operação, é necessária uma área de filtração de  $0.1184 \text{ m}^2$  (a menor nas simulações) e um volume do equipamento de  $0.0355 \text{ m}^3$ , um valor mediano se comparado aos outros resultados. Quanto menores forem as dimensões do filtro, menos gastos a sua confecção irá requerer e, dependendo do seu ponto de instalação, mais facilmente ele poderá ser instalado.

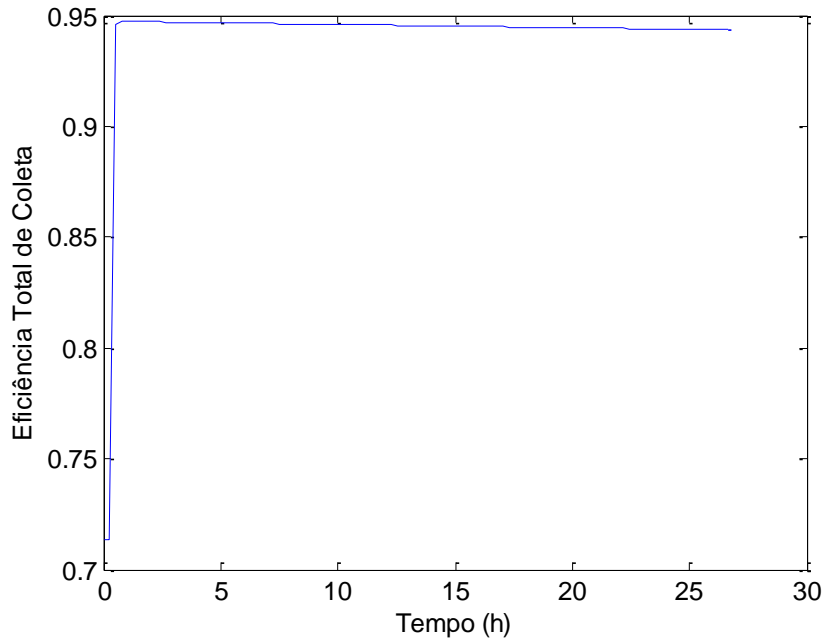
### 6.2.2 Combinação 3: $0.1 \text{ m s}^{-1}$ de velocidade superficial, $100 \text{ mm}$ de profundidade do leito e $5 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$ de velocidade de renovação dos grânulos

O atrativo da Combinação 3 é a baixa perda de carga (queda de pressão) do equipamento,  $87.9820 \text{ Pa}$ , a mais baixa encontrada nos resultados do modelo do FGLM. Para que haja fluxo de gás entre um ponto e outro no filtro, deve haver diferenças de pressão. Com uma perda de carga menor, o equipamento não necessita operar em pressões muito elevadas.

Porém, a eficiência dessa combinação foi a mais baixa encontrada nos resultados,  $94,4\%$ , e a vazão mássica de grânulos foi elevada,  $103.9845 \text{ kg h}^{-1}$ , maior inclusive, que o da Combinação 25. Com isso, a combinação torna-se mais interessante para os processos produtivos nos quais esta eficiência for suficiente para a operação



O comportamento do FGLM, para as variáveis da Combinação 3, pode ser visto nos gráficos abaixo.

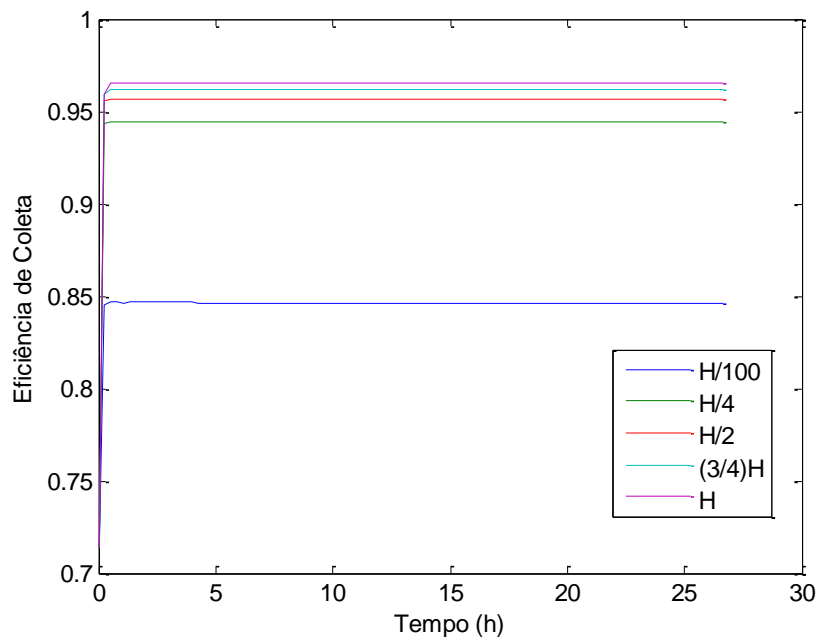


**Figura 6.6.** Comportamento da Eficiência Total de Coleta no FGLM com o Tempo. Combinação 3:  $u_s=0.1 \text{ m s}^{-1}$ ,  $L=100 \text{ mm}$  e  $v_g=5 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$ .

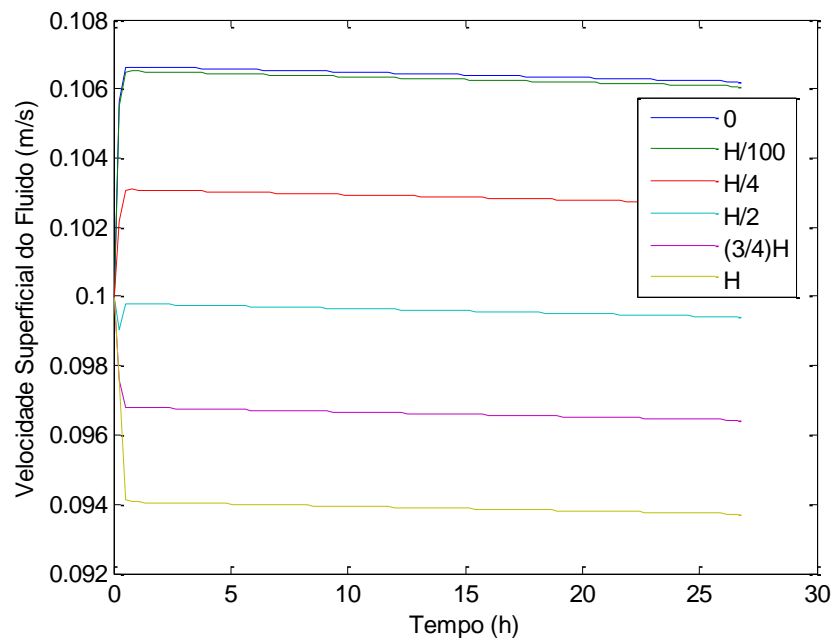
Como já mencionado, a Figura 6.6 mostra a eficiência total de coleta, 0.9437, o pior resultado encontrado para esse parâmetro.

Na Figura 6.7, as eficiências de coleta mostram que no ponto H/100, obteve-se uma eficiência bem abaixo das outras para diferentes alturas, pois nessas condições houve pouco depósito específico de partículas. E na Figura 6.8, as velocidades superficiais do fluido estabilizaram-se nos primeiros momentos de operação do filtro, com valores diferentes, para diferentes pontos da sua altura total.

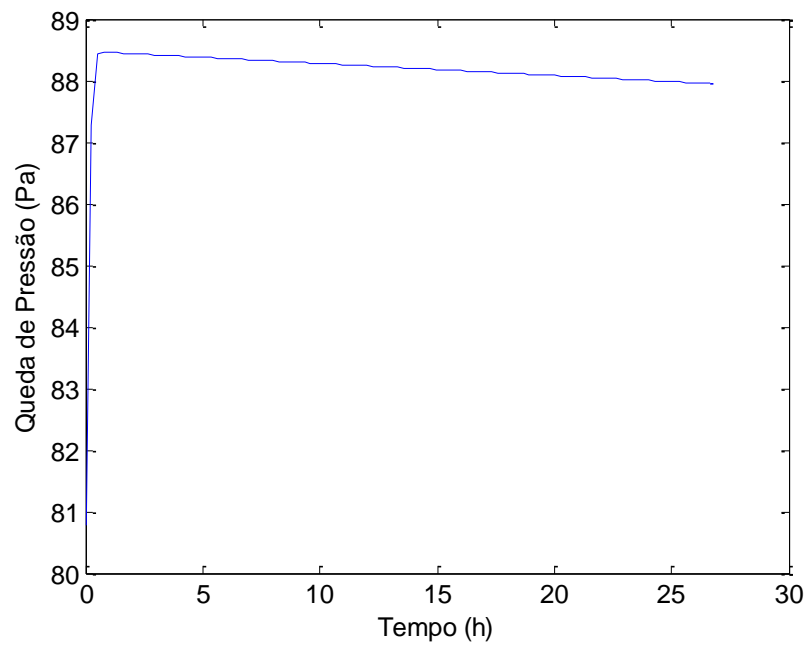
Na Figura 6.9, a perda de carga (a menor dentre todas as simulações) foi influenciada pelo depósito específico, pois há uma menor obstrução do leito. E, para o depósito específico mássico, Figura 6.10, os valores obtidos foram pequenos se comparados a outras simulações, variando de, aproximadamente, 0 a  $6 \text{ kg m}^{-3}$ .



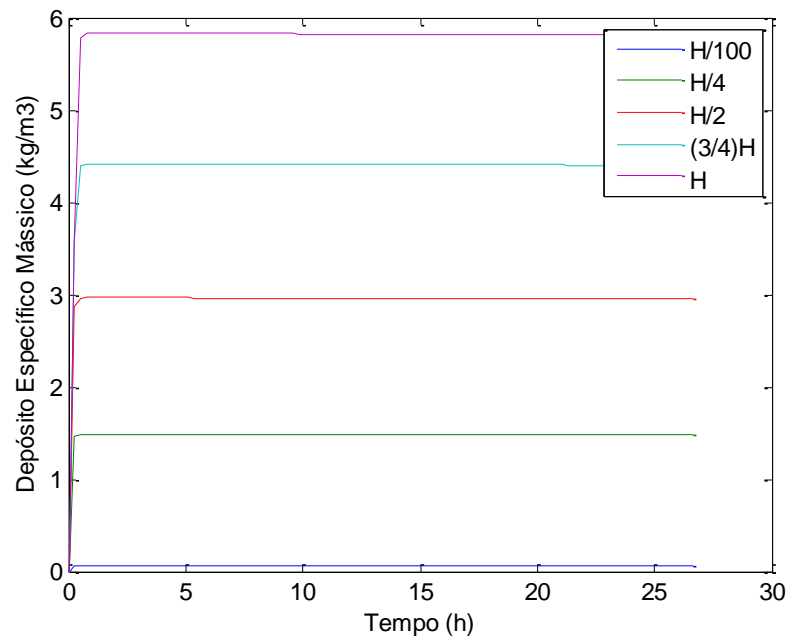
**Figura 6.7.** Comportamento da Eficiência de Coleta para diferentes alturas do FGLM com o Tempo – Combinação 3:  $u_s=0.1 \text{ m s}^{-1}$ ,  $L=100 \text{ mm}$  e  $v_g=5 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$ .



**Figura 6.8.** Comportamento da Velocidade Superficial do Fluido para diferentes alturas do FGLM com o Tempo – Combinação 3:  $u_s=0.1 \text{ m s}^{-1}$ ,  $L=100 \text{ mm}$  e  $v_g=5 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$ .



**Figura 6.9.** Comportamento da Queda de Pressão do FGLM com o Tempo - Combinação 3:  $u_s=0.1 \text{ m s}^{-1}$ ,  $L=100 \text{ mm}$  e  $v_g=5 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$ .



**Figura 6.10.** Comportamento do Depósito Específico Mássico para diferentes alturas do FGLM com o Tempo – Combinação 3:  $u_s=0.1 \text{ m s}^{-1}$ ,  $L=100 \text{ mm}$  e  $v_g=5 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$ .

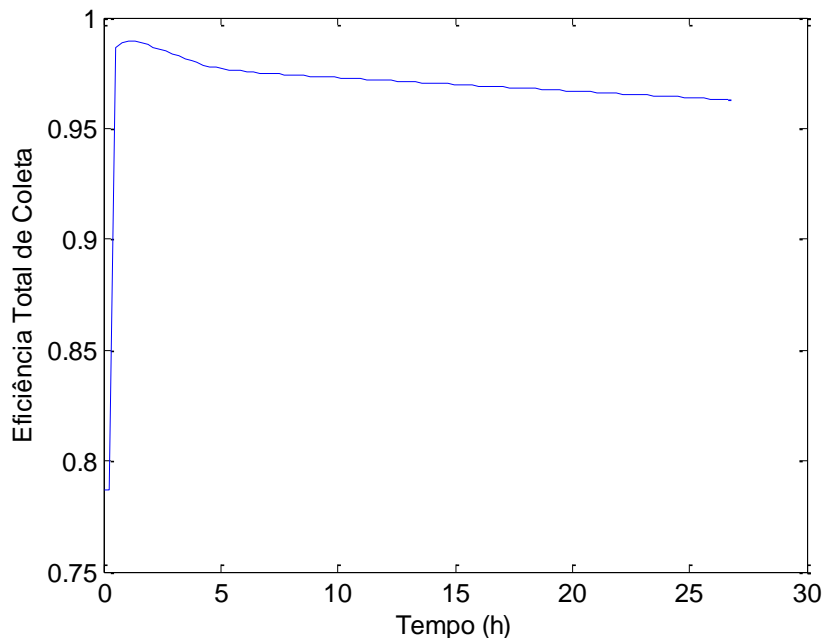
A área na Combinação 3 é de  $0.2959 \text{ m}^2$ , a maior dentre as combinações, e o volume é de  $0.0296 \text{ m}^3$ . As dimensões interferem nos custos de confecção do filtro e podem dificultar sua instalação, dependendo do local desejado e da saída do gás.

### 6.2.3 Combinação 19: $0.25 \text{ m s}^{-1}$ de velocidade superficial, $100 \text{ mm}$ de profundidade do leito e $3 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ de velocidade de renovação dos grânulos

Na Combinação 19, a menor vazão mássica de grânulos foi obtida,  $3.9459 \text{ kg h}^{-1}$ . Se a indústria não necessita de uma remoção de material particulado acima de 96% e o fluido pode suportar uma perda de carga de  $927.1557 \text{ Pa}$ , então essa é a combinação ideal.

Com uma menor vazão mássica de grânulos, a quantidade de grânulos que deverá ser tratada para reutilização será proporcionalmente menor, assim como a quantidade de material novo à ser repostado, e o custo de operação do FGLM será reduzido. Também, nessa combinação, atinge-se o menor tamanho do filtro ( $A=0.1184 \text{ m}^2$  e  $V=0.0118 \text{ m}^3$ ), outra vantagem frente a sua instalação e custos.

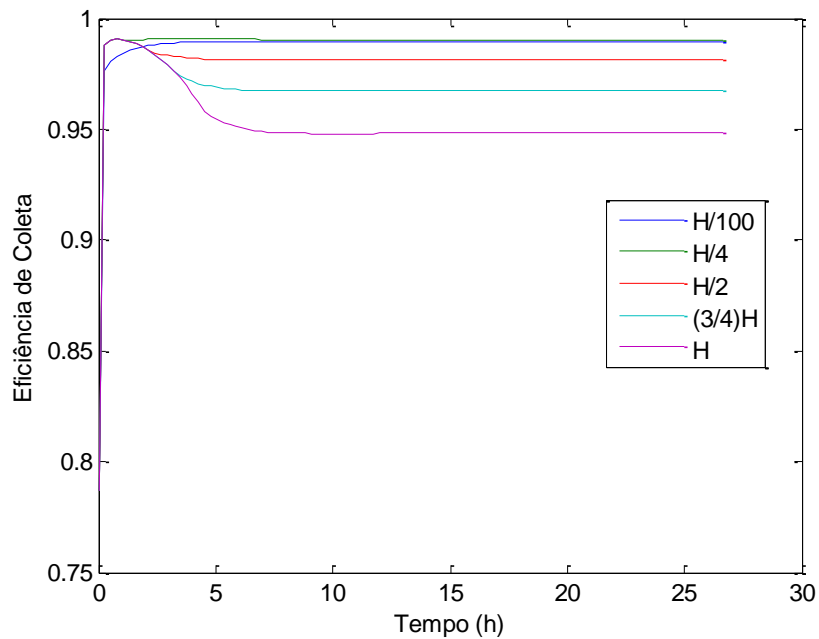
O comportamento da Combinação 19, está expresso pelos gráficos abaixo.



**Figura 6.11.** Comportamento da Eficiência Total de Coleta no FGLM com o Tempo – Combinação 19:  $u_s=0.25 \text{ m s}^{-1}$ ,  $L=100 \text{ mm}$  e  $v_g=3 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ .

Na Figura 6.11 pode-se observar uma queda mais evidente da eficiência total de coleta, logo que atinge seu valor máximo. A eficiência de coleta para diferentes alturas, Figura 6.12, mostrou comportamento semelhante ao da eficiência total de coleta.

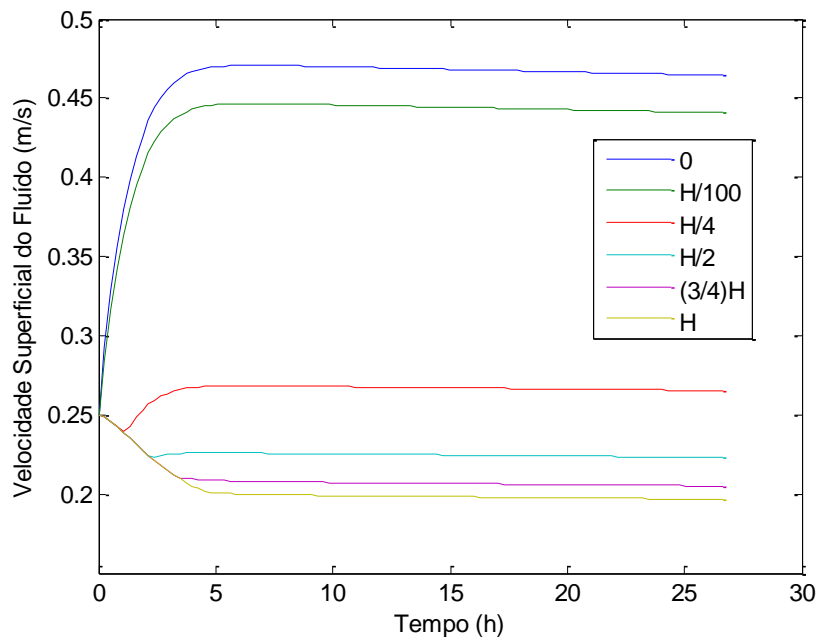
Pode-se observar o comportamento da velocidade superficial do fluido, para diferentes alturas, no Gráfico 6.13. Abaixo da altura  $H/4$  as velocidades praticamente duplicaram seus valores para as alturas restantes.



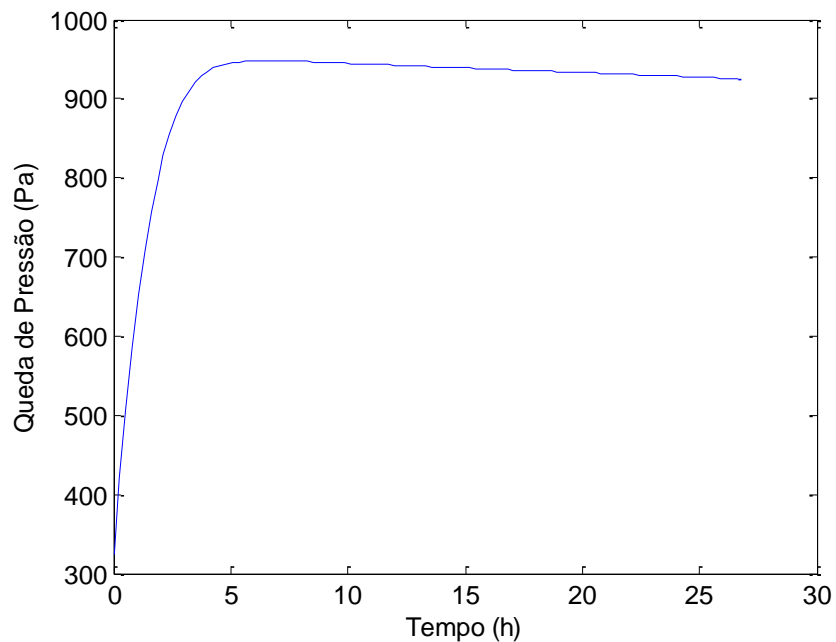
**Figura 6.12.** Comportamento da Eficiência de Coleta para diferentes alturas do FGLM com o Tempo – Combinação 19:  $u_s=0.25 \text{ m s}^{-1}$ ,  $L=100 \text{ mm}$  e  $v_g=3 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ .

A comportamento da queda de pressão, 927.1557 Pa, com o tempo, pode ser analisado na figura 6.14.

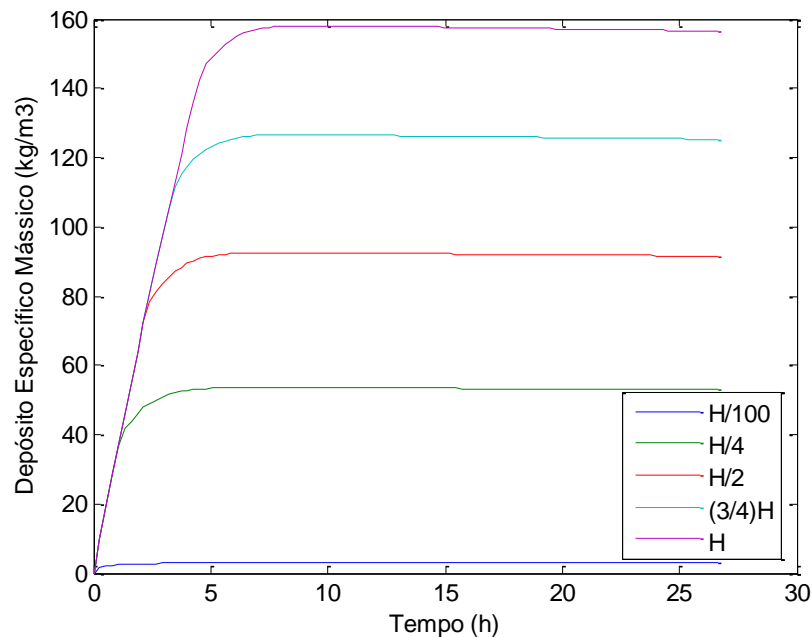
O depósito específico mássico teve uma grande variação com a altura, atingindo valores próximos de  $160 \text{ kg m}^{-3}$ . Seu comportamento pode ser visto na Figura 6.15.



**Figura 6.13.** Comportamento da Velocidade Superficial do Fluido para diferentes alturas do FGLM com o Tempo – Combinação 19:  $u_s=0.25 \text{ m s}^{-1}$ ,  $L=100 \text{ mm}$  e  $v_g=3 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ .



**Figura 6.14.** Comportamento da Queda de Pressão do FGLM com o Tempo – Combinação 19:  $u_s=0.25 \text{ m s}^{-1}$ ,  $L=100 \text{ mm}$  e  $v_g=3 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ .

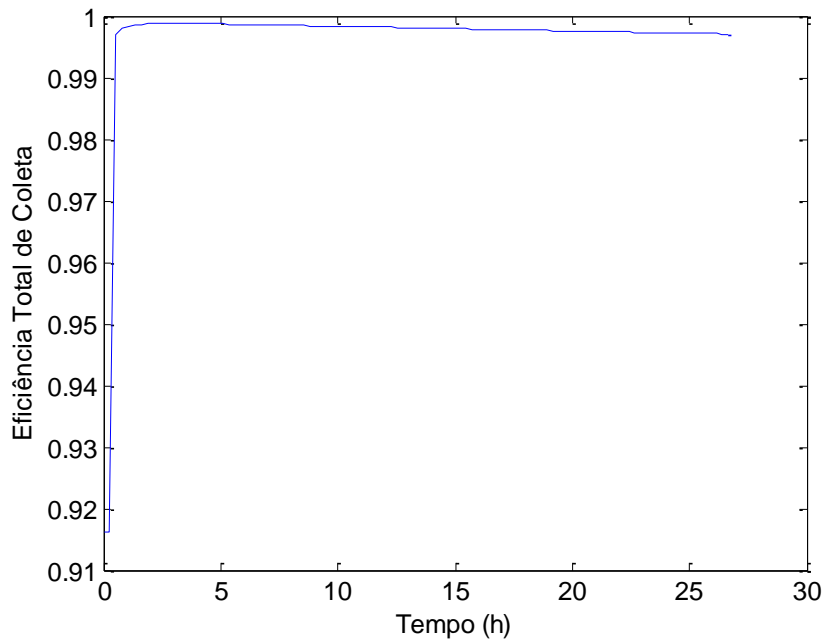


**Figura 6.15.** Comportamento do Depósito Específico Mássico para diferentes alturas do FGLM com o Tempo – Combinação 19:  $u_s=0.25 \text{ m s}^{-1}$ ,  $L=100 \text{ mm}$  e  $v_g=3 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ .

#### 6.2.4 Combinação 4: $0.1 \text{ m s}^{-1}$ de velocidade superficial, $200 \text{ mm}$ de profundidade do leito e $3 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ de velocidade de renovação dos grânulos.

Na Combinação 4, têm-se uma eficiência total de coleta alta ( $E=0.9972$ ), uma vazão mássica de grânulos baixa ( $m_g=12.4781 \text{ kg h}^{-1}$ ) e uma queda de pressão de  $289.2819 \text{ Pa}$ , um valor abaixo da maioria dos resultados obtidos. Descartou-se a área e o volume do filtro, como condicionantes do uso do FGLM.

Nessa combinação tentou-se estabelecer, como exemplo, um conjunto satisfatório de parâmetros que funcionem, quando aplicados nos processos produtivos, como uma otimização da operação do FGLM, onde priorizou-se a obtenção de valores intermediários dos parâmetros indicativos da operação. Deve-se considerar sempre se a eficiência de coleta, para a concentração de poluentes que indústria deve remover, é adequada e se a queda de pressão é pertinente ao processo produtivo em questão.



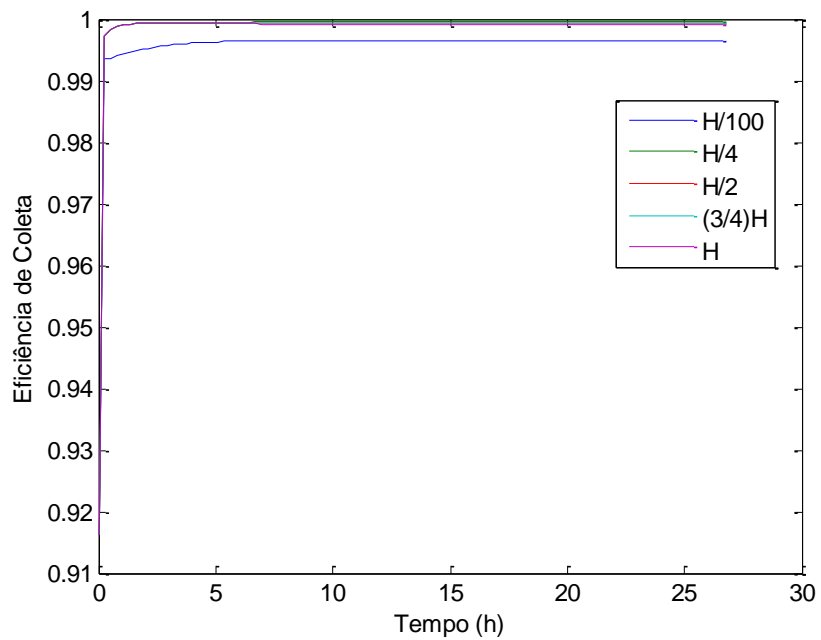
**Figura 6.16.** Comportamento da Eficiência Total de Coleta no FGLM com o Tempo – Combinação 4:  $u_s=0.1 \text{ m s}^{-1}$ ,  $L=200 \text{ mm}$  e  $v_g=3 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ .

Na Figura 6.16, pode-se perceber como a eficiência total de coleta estabilizou-se na primeira hora de funcionamento, continuando constante ao longo do tempo. As eficiências de coleta, Figura 6.17, apresentaram semelhante comportamento ao longo das diferentes alturas estabelecidas para o filtro, quase não variando entre si, parecidas com a eficiência total de coleta.

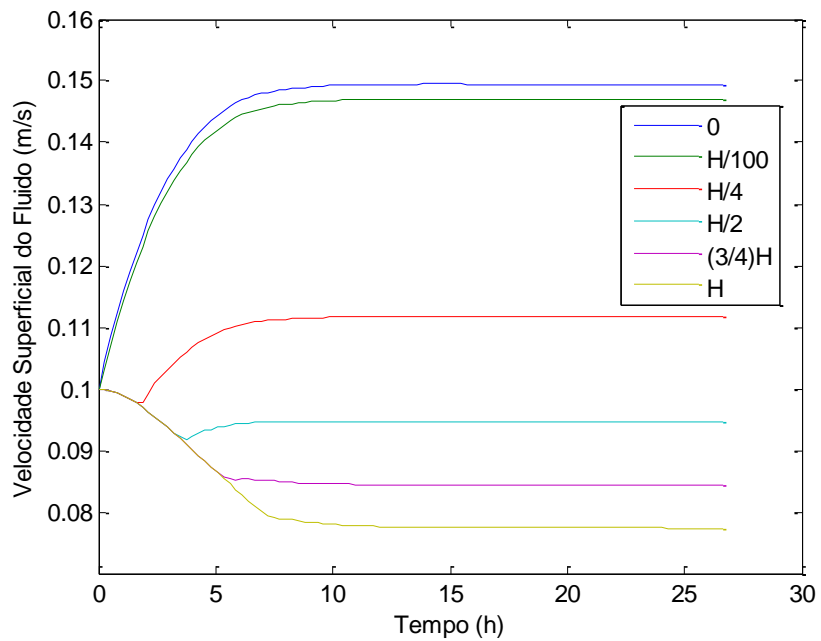
Para as velocidades superficiais do fluido, Figura 6.18, nota-se um tempo maior se comparado as outras simulações apresentadas, até haver a estabilização dos seus valores para cada altura estudada.

A queda de pressão, Figura 6.19, e o depósito específico para diferentes alturas, Figura 6.20, levaram praticamente o mesmo tempo para entrar no regime permanente.

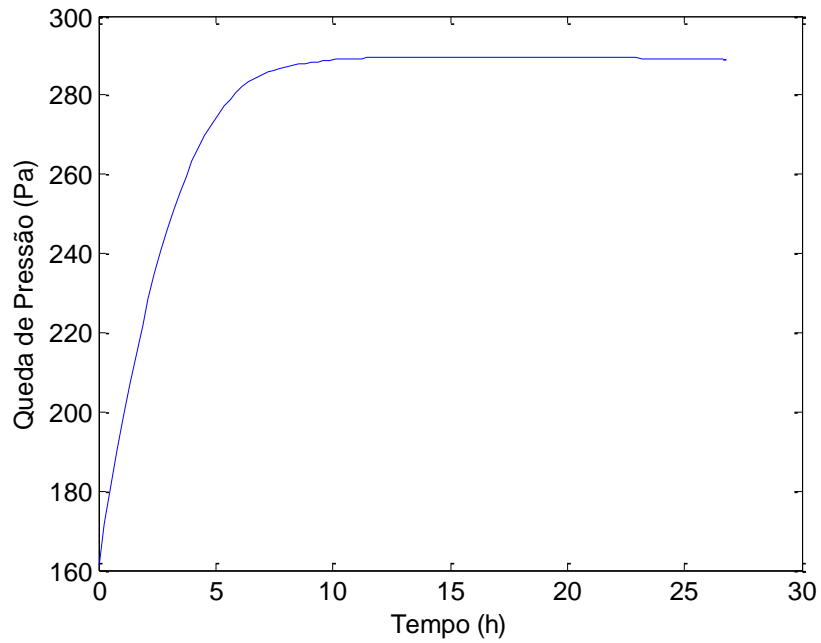




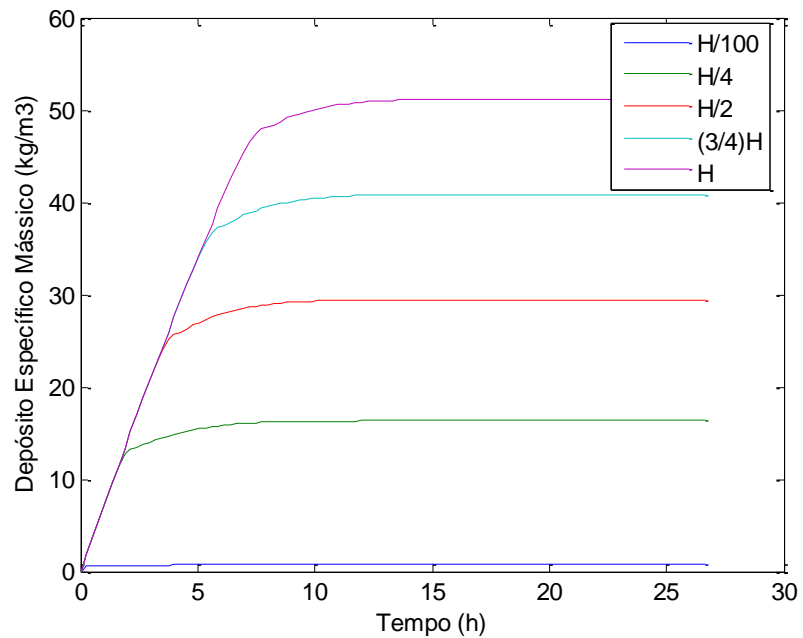
**Figura 6.17.** Comportamento da Eficiência de Coleta para diferentes alturas do FGLM com o Tempo – Combinação 4:  $u_s=0.1 \text{ m s}^{-1}$ ,  $L=200 \text{ mm}$  e  $v_g=3 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ .



**Figura 6.18.** Comportamento da Velocidade Superficial do Fluido para diferentes alturas do FGLM com o Tempo – Combinação 4:  $u_s=0.1 \text{ m s}^{-1}$ ,  $L=200 \text{ mm}$  e  $v_g=3 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ .



**Figura 6.19.** Comportamento da Queda de Pressão do FGLM com o Tempo - Combinação 4:  $u_s=0.1 \text{ m s}^{-1}$ ,  $L=200 \text{ mm}$  e  $v_g=3 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ .



**Figura 6.20.** Comportamento do Depósito Específico Mássico para diferentes alturas do FGLM com o Tempo – Combinação 4:  $u_s=0.1 \text{ m s}^{-1}$ ,  $L=200 \text{ mm}$  e  $v_g=3 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ .

## 7 CONCLUSÕES

O principal objetivo do presente trabalho foi obter um novo modelo numérico adequado à descrição macroscópica transiente de um Filtro Granular de Leito Móvel, com fluxo cruzado de efluente gasoso, a fim de conhecer o comportamento do filtro através da alteração de 3 variáveis-chave do processo: velocidade superficial média ( $\bar{u}_s$ , de  $0.1 \text{ m s}^{-1}$  até  $0.25 \text{ m s}^{-1}$ ), profundidade do leito ( $L$ , de  $0.1 \text{ m}$  até  $0.3 \text{ m}$ ) e velocidade de renovação do material granular ( $v_g$ , de  $3 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$  até  $5 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$ ).

A partir dos resultados das simulações foram selecionadas algumas variáveis de resposta (área de filtração,  $A$ , volume do equipamento,  $V$ , vazão mássica de grânulos,  $m_g$ , queda de pressão em regime permanente,  $\Delta P_{\text{permanente}}$  e eficiência em regime permanente,  $E_{\text{permanente}}$ ), que demonstraram que uma otimização completa das variáveis não é possível. Assim, diversas situações que poderiam ser escolhidas, em virtude da necessidade do usuário do FGLM, foram simuladas.

No regime permanente, mais da metade das situações simuladas (2/3) tiveram uma eficiência total de coleta superior a 99%. Com isso, diversas combinações de condições operacionais e de dimensionamento podem ser escolhidas, sem comprometer de forma radical a eficácia do filtro na remoção de material particulado. Nenhuma das situações simuladas apresentou eficiência menor que 94%.

Foi demonstrado também que, caso uma menor queda de pressão no filtro, uma menor vazão mássica de grânulos, ou ainda um filtro com dimensões mais compactas seja prioridade, podem ser obtidas, através de simulações com o modelo desenvolvido neste trabalho, as condições mais adequadas.

Portanto, através das simulações computacionais, pode-se demonstrar uma coerência das diversas variáveis, como o depósito específico mássico médio, a velocidade superficial e a eficiência – que variam ao longo da altura do filtro neste tipo de modelo. De forma geral, o modelo desenvolvido e testado deve ser validado com resultados experimentais, podendo ser utilizado para realização do *scale-up* de filtros granulares de leito móvel com fluxo cruzado.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BROWN, R. C.; SHI, H.; COLVER, G.; SOO, S. **Similitude study of a moving bed granular filter.** *Powder Technology*, v. 138, p. 201-210, 2003.
- CHEN, Y. S.; CHYOU, Y. P.; LI, S. C. **Hot gas clean-up technology of dust particulates with a moving granular bed filter.** *Applied Thermal Engineering*, p. 1-10, 2014.
- CHEN, Y. S.; HSIAU, S. S.; LAI, S. C.; CHYOU, Y. P.; LI, H. Y.; HSU, C. J. **Filtration of dust particulates with a moving granular bed filter.** *Journal of Hazardous Materials*, v. 171, p. 987-994, 2009.
- CHOU, C.; CHEN, S. **Moringa granular filter bed of quartz sand with louvered-walls and flow-corrective inserts.** *Powder Technology*, v. 172, p. 41-49, 2007.
- CORBINI, L. X. **Avaliação da perda de carga em um filtro granular em escala bancada para remoção de particulados oriundos da gaseificação/combustão de carvões.** 2012. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.
- COURY, J. R.; THAMBIMUTHU, K. V., CLIFT, R. **Capture and rebound of dust in granular bed gas filters.** *Powder Technology*, v. 50, p. 253-265, 1987.
- HENRIQUEZ, V.; MACIAS-MACHIN, A. **Hot gas filtration using a moving bed heat exchanger-filter (MHEF).** *Chemical Engineering and Processing*, v. 36, p. 353-361, 1997.
- HSIAU, S. S.; CHYOU, Y. P.; LIU, T. C.; HUANG, T. C.; HSU, C. J. **Impact of flow-corrective insert on flow patterns in two-dimensional moving bed.** *Chemical Engineering and Processing*, v. 73, p. 7-15, 2013).
- HSIAU, S. S.; SMID, J.; TSAI, F. H.; KUO, J. T.; CHOU, C. S. **Velocities in moving granular bed filters.** *Powder Technology*, v. 114, p. 205-212, 2001.
- 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*, v. 47, p. 2084-2097, 2008.
- IVES, K. J. **Theory of filtration, in: international water supplycongress and exhibition.** Special subject, n. 7, Viena, 1969.
- JUNG, Y.; WALATA, S. A.; TIEN, C. **Experimental Determination of the initial collection efficiency of granular beds in the inertial-impaction-dominated region.** *Aerosol Science and Technology*, v. 11, p. 168-182, 1989.
- MACDONALD, I. F.; EL-SAYED, M. S.; MOW, K.; DULLIEN, F. A. L. **Flow through porous media - the Ergun Equation Revisited.** *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, v. 18, p. 199-208, 1979.

- PAENPONG, C.; INTHIDECH, S.; PATTIYA, A. **Effect of filter media size, mass flow rate and filtration stage number in a moving-bed granular filter on the yield and properties of bio-oil from fast pyrolysis of biomass.** *Bioresource Technology*, v. 139, p. 34-42, 2013.
- PAENPONG, C.; PATTIYA, A. **Filtration of fast pyrolysis char fines with a cross-flow moving-bed granular filter.** *Powder Technology*, v. 245, p. 233-240, 2012.
- SAXENA, S. C.; HENRY, R. F.; PODOLSKI, W. F. **Particulate removal from high-temperature, high-pressure combustion gases.** *Progress Energy Combustion Science*, v. 11, p. 193-251, 1985.
- SHAMPINE, L. F.; HOSEA, M. E. **Analysis and implementation of TR-BDF2.** *Applied Numerical Mathematics* 20, 1996.
- SMID, J.; HSIAU, S. S.; PENG, C. Y.; LEE, H. T. **Granular moving bed filters and adsorbers (GM-BF/A) – patent review: 1970-2000.** *Advanced Powder Technology*, v. 16, p. 301-345, 2005.
- TIEN, C.; RAMARAO, B. V. **Granular filtration of aerosols and hydrosold.** 2. ed. Elsevier/Butterworths, 2007.
- WAN, H. P.; YANG, T. Y.; CHUNG, I. L.; LEE, H. T. **Hydrodynamic behavior in a moving granular bed filter for modeling on char separation during the biomass fast pyrolysis process.** *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, v. 44, p. 1016-1021, 2013.
- WENZEL, B. M. **Tratamento térmico de resíduos da indústria calçadista: estudo da gaseificação, tratamento dos gases e aproveitamento das cinzas.** 2013. 200 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.
- WENZEL, B. M.; PORCIÚNCULA, C. B.; MARCILIO, N. R.; MENEGOLLA, H. B.; DORNEMANN, G. M.; GODINHO, M.; MARTINS, C. B. **Filtration of dust in an intermittent moving granular bed filter: performance and modeling.** *Separation and Purification Technology*, v. 133, p. 108-119, 2014.
- XIAO, G.; WANG, X.; ZHANG, J.; NI, M.; GAO, X.; LUO, Z.; CEN, K. **Granular bed filter: a promising technology for hot gas clean-up.** *Powder Technology*, v. 244, p. 93-99, 2013.
- YANG, S. I.; CHUNG, I. L.; WU, S. R. **An experimental study of the influence of temperature on char separation in a moving granular bed.** *Powder Technology*, v. 228, p. 121-127, 2012.
- YOSHIDA, H.; TIEN, C. **A new correlation of the initial collection efficiency of granular aerosol filtration.** *AIChE J.*, v. 31, p. 1752-1754, 1985.

ZHAO, J.; HUANG, J.; WU, J.; FANG, Y.; WANG, Y. **Modeling and optimization of the moving granular bed for combined hot gas desulfurization and dust removal.** Powder Technology, v. 180, p. 2-8, 2008.



# UNIVERSIDADE FEDERAL DA FRONTEIRA SUL

Secretaria Especial de Tecnologia e Informação  
Diretoria de Gestão da Informação  
Departamento de Gestão de Bibliotecas  
Biblioteca do Campus Correia Lopes

Ministério da Educação  
Universidade Federal da  
Fronteira Sul

Avenida Getúlio Vargas, 6095  
Edifício Engemed, 2º Andar  
Chapecó - Santa Catarina  
Brasil - CEP 89812-000

[www.ufff.edu.br](http://www.ufff.edu.br)  
[contato@ufff.edu.br](mailto:contato@ufff.edu.br)

## TERMO DE CESSÃO DE DIREITOS AUTORIAIS

TCDA nº \_\_\_\_/UFFS/2014

### 1. DADOS PESSOAIS DO AUTOR

Nome:

Ferrelis Galis dos Santos

CPF: 02514074037 E-mail: ferrelis90@hotmail.com

Telefone: (55) 3353-1414 Celular: (55) 8130-3727

Vínculo do Autor com a Instituição:

( ) Docente ( ) Técnico-Administrativo (X) Acadêmico

### 2. Tipo de Documento

(X) Texto (deve ser enviado em PDF-A)

Assinale abaixo o tipo de texto do documento

( ) Tese ( ) Dissertação ( ) Especialização ( ) E-book

(X) Outro – Qual? TCC

( ) Áudio (deve ser enviado em MP3)

( ) Vídeo (deve ser enviado em MOV)

( ) Imagem (deve ser enviado em TIFF ou JPEG)

Título:

Descrição Macroscópica da Filtração  
Granular de Material Particulado  
em Leite Móvel



Ministério da Educação  
Universidade Federal de  
Fronteira Sul

Avenida Getúlio Vargas, 609s  
Edifício Engenard, 2º Andar  
Chapecó - Santa Catarina  
Brasil - CEP 89812-000

[www.uffs.edu.br](http://www.uffs.edu.br)  
[contato@uffs.edu.br](mailto:contato@uffs.edu.br)

---

**2.1 Em caso de Tese ou Dissertação, informe:**

**Programa de Pós-Graduação** \_\_\_\_\_

**Instituição:** \_\_\_\_\_

**Agência de Fomento:** ( ) CAPES ( ) CNPq Outra: \_\_\_\_\_

**2.1.1 PERMISSÃO DE ACESSO AO DOCUMENTO:**

Total ( ) Parcial

Em caso de liberação parcial, deve estar claro que a pesquisa envolve patentes ou segredo industrial ou uma futura publicação. Para liberação parcial, envie os capítulos permitidos (neste caso os referidos capítulos devem estar em PDF-A, em arquivo único)

---

Na qualidade de titular dos direitos autorais do trabalho acima citado, em consonância com a Lei nº 9610/98, **autorizo** a Biblioteca da UFFS a disponibilizar gratuitamente, por tempo indeterminado, em sua fonte de informação institucional on-line, sem ressarcimento dos direitos autorais, o referido documento de minha autoria. Também concedo à biblioteca, a escolha do formato de disponibilização do conteúdo que julgar ser o mais adequado, para possibilitar seu acesso por meio de áudio, visualização, leitura, impressão e/ou download, conforme permissão assinalada. Quaisquer medidas judiciais ou extrajudiciais concernentes ao conteúdo serão de minha inteira responsabilidade.

Carre Largo, 12 de dezembro de 2014

Local

Fernanda Edis dos Santos

Assinatura