

## ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DO ESCOAMENTO MULTIFÁSICO GÁS-SÓLIDO EM CICLONES

**Priscila de Nunes Fabião, prisca\_nidra@yahoo.com.br**

**Vinicyus Rodolfo Wiggers, vwiggers@yahoo.com.br**

**Edelberto Luiz. Reinehr, edel@furb.br**

**Henry França Meier, meier@furb.br**

*FURB – Universidade Regional de Blumenau, Rua São Paulo 3250*

**Resumo.** *Escoamentos gás-sólido estão envolvidos em vários processos industriais, sobretudo pelo baixo consumo de energia no transporte de sólidos através de fluidos. Nestes processos a recuperação dos sólidos ou a purificação dos gases é obtida mediante separação ciclônica. Há variada literatura sobre o tema visando a melhoria de performance operacional em termos de baixa perda de carga e alta eficiência de separação. Este trabalho alia estudos experimentais com os de simulação numérica para validar modelo euleriano-euleriano multifásico (modelos EE<sub>1</sub>, EE<sub>3</sub> e EE<sub>5</sub>, com uma, três e cinco fases sólidas, respectivamente), em condições de alta turbulência, implementado em código computacional próprio (código CYCLO-HEXA), exaustivamente verificado em estudos anteriores. Os experimentos físicos são realizados em uma unidade de dutos e ciclones (UE-DC), composta por um exaustor, filtro mangas, ciclone com geometria combinada Lapple/Stairmand, alimentador de sólidos com distribuidor venturi, e sistema de controle e aquisição de dados. O material particulado utilizado é um argilo-mineral (caulim), com massa específica de 2.360 Kg/m<sup>3</sup>, comumente empregado na produção de catalisadores para a indústria química e petroquímica. As condições operacionais empregadas nos experimentos seguem um planejamento experimental fatorial 3<sup>2</sup>, tendo como variáveis controláveis as velocidades de entrada no ciclone de 8, 10 e 12 m/s, e a razão de carga de sólidos na faixa de 6 e 16 g/m<sup>3</sup>, e como respostas a perda de carga e as eficiências global e individual de coleta. Os resultados experimentais são confrontados com os numéricos visando à validação do modelo euleriano-euleriano hexafásico. Os resultados experimentais macroscópicos (perda de carga e eficiências) são confrontados com os numéricos reconstituídos a partir dos campos de pressão e de frações volumétricas, visando a validação dos modelos multifásicos dedicados à simulação numérica de ciclones. Os modelos multifásicos E-E3 e E-E5 mostraram-se superiores ao modelo bifásico E-E1 em todas as comparações com a performance experimental.*

### 1. INTRODUÇÃO

Os ciclones são equipamentos com ampla utilização em diversos processos das indústrias químicas, utilizados principalmente na separação de sólidos de uma corrente gasosa. Na indústria do petróleo, por exemplo, os ciclones são bastante utilizados em reatores e regeneradores nas unidades de craqueamento catalítico de petróleo (FCC), para recuperação de catalisadores (Bernardo, 2005).

A despeito da sua importância industrial, os métodos para o projeto e avaliação do desempenho dos ciclones utilizam metodologias de natureza empírica ou semi-empírica, particulares às situações em que os dados experimentais foram coletados, reduzindo sua capacidade de extrapolação e generalização.

No entanto, utilizando-se as técnicas da fluidodinâmica computacional (CFD) e os recursos computacionais de alto desempenho numérico disponíveis na atualidade, é possível prever o complexo comportamento fluidodinâmico nos ciclones que apresenta comportamentos como alta intensidade de giro, reversão de escoamento, alta turbulência multifásica com a presença de partículas de diferentes formas e tamanhos, entre outros. Com uma abordagem euleriana-euleriana para o escoamento multifásico gás-sólido dentro dos ciclones é possível não apenas prever os parâmetros de desempenho (perda de carga e eficiência de coleta), mas também obter os detalhes do escoamento interno destes equipamentos.

A proposta deste trabalho é desenvolver estudos de validação de modelos multifásicos sob condições de turbulência por comparação de resultados numéricos com dados experimentais obtidos na Unidade Experimental em Dutos e Ciclone (UE-DC) do Laboratório de Verificação e Validação (LVV) da Universidade Regional de Blumenau.

Utiliza-se como ferramenta numérica o código CYCLO-HEXA desenvolvido por Meier (1998), específico para ciclones, que apresenta a possibilidade de inclusão de até cinco fases sólidas num referencial euleriano, cada uma delas possuindo seu próprio campo de velocidade e de fração volumétrica. A turbulência é modelada na fase gasosa com modelo anisotrópico híbrido, onde parte dos componentes do tensor de Reynolds é predita com modelo de duas equações ( $k - \epsilon$  padrão) e os demais com modelo de zero equação (comprimento de mistura de Prandtl). As fases sólidas interagem com a fase gasosa por meio de uma força resistiva, e a turbulência não é modelada de tal forma que o modelo é considerado “invíscido” com as equações do tipo Euler resolvidas diretamente.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. Experimentação Física

As condições operacionais empregadas nos experimentos seguem um planejamento experimental fatorial  $3^2$ , tendo como variáveis controláveis as velocidades de entrada no ciclone de 8, 10 e 12 m/s, e a razão de carga de sólidos ( $R_c$ ) na faixa de 6 e 16 g/m<sup>3</sup>, conforme apresentado na Tab. 1. O material particulado utilizado é um argilo-mineral (caulim), com massa específica de 2360 Kg/m<sup>3</sup> e diâmetro médio de Sauter de 9 µm.

Tabela 1. Planejamento experimental fatorial  $3^2$ .

Experimento	Velocidade (m/s)	RC (g/cm <sup>3</sup> )
1	8	0
2	10	0
3	12	0
4	8	6
5	10	6
6	12	6
7	8	12
8	10	12
9	12	12

A Figura 1 esquematiza a UE-DC onde os experimentos foram realizados. Através de dutos o escoamento é direcionado até o ciclone que se encontra conectado a sensores de pressão para medida da perda de carga. Os sólidos maiores são coletados no coletor de sólido acoplado ao ciclone enquanto os sólidos menores são arrastados para o filtro de mangas, garantindo que apenas o ar livre de particulados seja emitido novamente para a atmosfera.

As leituras feitas pelos sensores acoplados nos equipamentos, como diferença de pressão diferencial em tubo Pitot para determinação da velocidade na entrada do ciclone, temperatura e pressão, frequências do alimentador de sólidos e do ventilador, são monitoradas e supervisionadas por um sistema automático de aquisição de dados e de controle. A Figura 2 ilustra o sistema supervisor da UE-DC.

O ciclone da UE-DC possui uma configuração híbrida que incorpora a baixa perda de carga do ciclone do tipo “Lapple” com a alta eficiência de coleta de ciclone do tipo “Stairmand”, apresentado na Fig. 3.

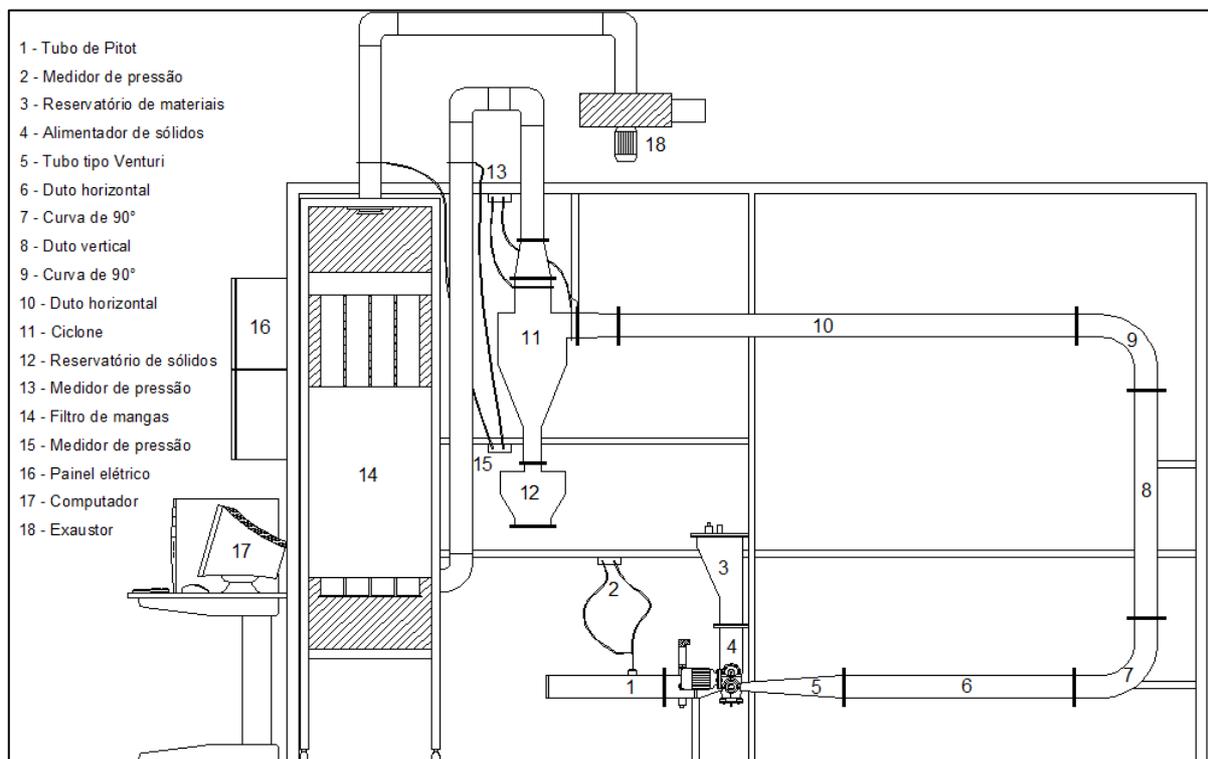


Figura 1. Unidade Experimental em Dutos e Ciclone (UE-DC)



Figura 2. Tela do sistema de aquisição de dados e de controle da UE-DC.

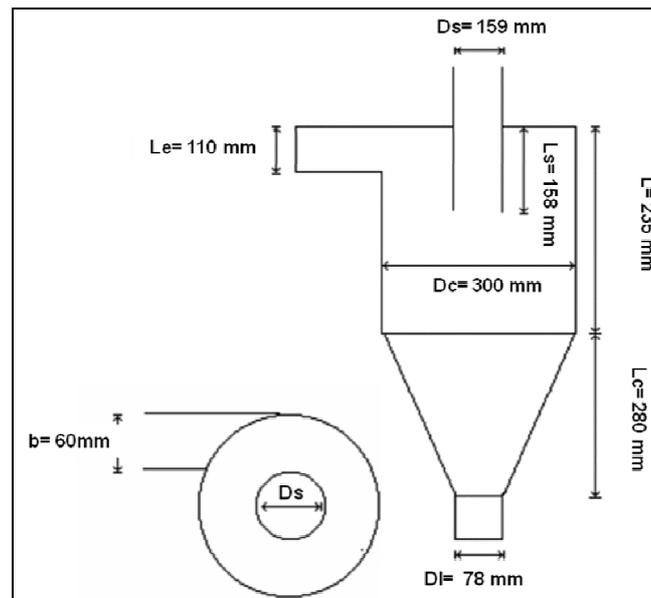


Figura 3. Características geométricas do ciclone Lapple/ Stairmand da UE-DC

## 2.2. Experimentação Numérica

Os experimentos numéricos no código computacional CYCLO-HEXA foram executados seguindo um planejamento experimental numérico, apresentado na Tab 2. As variáveis controláveis para o modelo euleriano-euleriano bifásico (E-E<sub>1</sub>), tetrafásico (E-E<sub>3</sub>) e hexafásico (E-E<sub>5</sub>) tais como as velocidades de entrada no ciclone a razão de carga de sólidos para cada velocidade foram adquiridas previamente através dos experimentos físicos na UE-DC.

As simulações consideram a fase gasosa e as fases sólidas particuladas com diferentes diâmetros definidos por análise da curva de distribuição de tamanhos de partículas da Fig. 4, obtida com um analisador de tamanho de partículas por difração à Laser (Mastersizer S, modelo S-MSM 5005-Malvern). Dessa forma, foi considerado para o modelo euleriano-euleriano bifásico (E-E<sub>1</sub>) uma fase gasosa e uma sólida com diâmetro de partícula  $d_{p3}$  de 9  $\mu\text{m}$ . O modelo tetrafásico (E-E<sub>3</sub>) é caracterizado por uma fase gasosa e três fases sólidas com diâmetros de partículas  $d_{p1}$  de 120,67  $\mu\text{m}$ ,  $d_{p3}$  de 9  $\mu\text{m}$  e  $d_{p5}$  de 2,89  $\mu\text{m}$ . E por sua vez o modelo hexafásico (E-E<sub>5</sub>) é caracterizado por uma fase gasosa e por 5 fases sólidas com diâmetros de partícula  $d_{p1}$  de 120,67  $\mu\text{m}$ ,  $d_{p2}$  de 24,64  $\mu\text{m}$ ,  $d_{p3}$  de 9  $\mu\text{m}$ ,  $d_{p4}$  de 5,19  $\mu\text{m}$  e  $d_{p5}$  de 2,89  $\mu\text{m}$ .

Tabela 2. Planejamento experimental numérico.

Caso	Modelo	Velocidade (m/s)	RC (g/m <sup>3</sup> )
1	E-E <sub>1</sub>	8	7,5
2		10	7,1
3		12	6,1
4		8	15
5		10	14,9
6		12	15,6
7	E-E <sub>3</sub>	8	7,5
8		10	7,1
9		12	6,1
10		8	15
11		10	14,9
12		12	15,6
13	E-E <sub>5</sub>	8	7,5
14		10	7,1
15		12	6,1
16		8	15
17		10	14,9
18		12	15,6

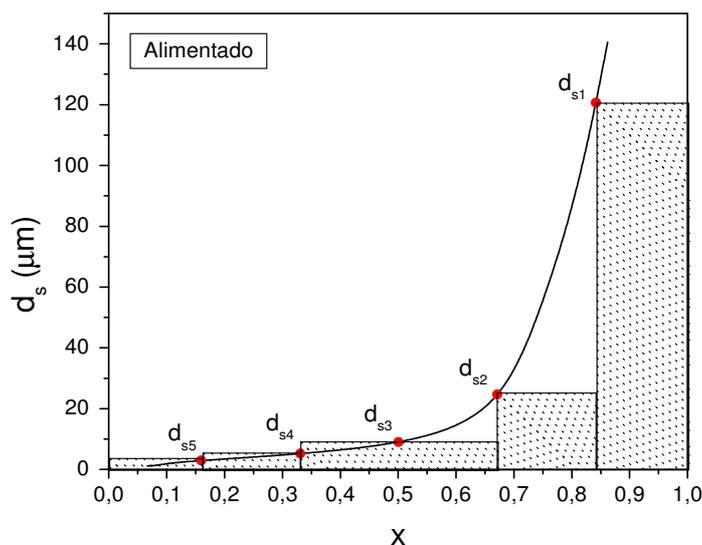


Figura 4. Distribuição granulométrica para a fase sólida.

### 2.2.1 Modelagem Matemática

A modelagem matemática aplicada na realização dos experimentos numéricos com escoamento multifásico gás-sólido em ciclones utilizando a abordagem euleriana-euleriana, é estabelecido com base nas equações de conservação da quantidade de movimento e da massa para as fases gasosa e sólidas.

Assume-se as hipóteses simplificadoras para formulação do modelo:

- interpenetrabilidade entre as fases contínuas, onde as mesmas ocupam o mesmo volume no espaço ao mesmo tempo;

- fases sólidas como fluidos hipotéticos, que adquirem comportamento fluidodinâmico devido às interações físico-químicas com o fluido real (fase gasosa);

- modelo “invíscido” para as fases sólidas, tal que a turbulência não é modelada;

- turbulência anisotrópica para a fase gasosa, predita pela combinação do modelo  $k-\epsilon$  padrão para os componentes axiais e radiais, e o modelo de comprimento de mistura de Prandtl para os componentes tangenciais;

- a força de pressão atua somente sobre a fase gasosa;

- a transferência de quantidade de movimento na interface é predita pela adoção de um modelo constitutivo de força de arraste e os efeitos de arraste entre as fases sólidas pode ser negligenciável.

## Equações de conservação

As Equações de conservação da massa, para a fase gasosa e sólidas apresentadas respectivamente por:

$$\frac{\partial}{\partial t} (f_g \rho_g) + \nabla \cdot (f_g \rho_g \mathbf{v}_g) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (f_{s_k} \rho_{s_k}) + \nabla \cdot (f_{s_k} \rho_{s_k} \mathbf{v}_{s_k}) = 0, \text{ com } k = 1, \dots, n_s \quad (5)$$

A conservação da quantidade de movimento, por sua vez pode ser expressa por:

$$\frac{\partial}{\partial t} (f_g \rho_g \mathbf{v}_g) + \nabla \cdot (f_g \rho_g \mathbf{v}_g \mathbf{v}_g) = -f_g \nabla \cdot (\mathbf{T}_g^{eff}) + f_g \rho_g \mathbf{g} - f_g \nabla p_g + \sum_{k=1}^{n_s} (\mathbf{F}_{res})_{g-s_k} \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (f_{s_k} \rho_{s_k} \mathbf{v}_{s_k}) + \nabla \cdot (f_{s_k} \rho_{s_k} \mathbf{v}_{s_k} \mathbf{v}_{s_k}) = f_{s_k} \rho_{s_k} \mathbf{g} - (\mathbf{F}_{res})_{g-s_k}, \text{ com } k = 1, \dots, n_s \quad (7)$$

Onde,  $\rho$  é a massa específica para cada fase, tanto sólida como gás,  $\mathbf{v}$  é o vetor velocidade de cada fase,  $f$  é a fração volumétrica de cada fase,  $\mathbf{T}^{eff}$  é a tensão cisalhante (efetiva) que atua sobre o fluido real,  $\mathbf{g}$  é a força de campo gravitacional,  $p$  é a pressão atuante na fase gasosa, e  $(\mathbf{F}_{res})_{g-s_i}$  é o termo de interação entre a fase gás e a fase sólida.

O fechamento do modelo para posterior resolução do modelo matemático necessita ainda da modelagem da turbulência sobre a fase gasosa e das equações constitutivas para predição da força resistiva entre as fases.

## Modelagem da Turbulência

O modelo é baseado na aproximação de Boussinesq, que consiste na analogia com a lei da viscosidade de Newton e assume que o tensor de Reynolds é proporcional ao gradiente de velocidade média. A viscosidade turbulenta depende das propriedades físico-químicas da fase e das condições de escoamento. Para fluidos newtonianos a relação entre tensão cisalhante e taxa de deformação é uma relação linear (Slattery, 1972 apud Meier 1998).

O tensor efetivo da fase gasosa é similar ao modelo de fluido newtoniano, por admissão da hipótese de Boussinesq, sendo ele diretamente proporcional a taxa de deformação, expresso por:

$$\mathbf{T}_g^{ef} = -2\mu_g^{ef} \mathbf{D}_g \quad (8)$$

onde  $\mu_g^{ef}$  é viscosidade efetiva e  $\mathbf{D}_g$  é a taxa de deformação.

O tensor taxa de deformação é expresso pela Eq. 6:

$$\mathbf{D}_g = \frac{1}{2} [\nabla \mathbf{v}_g + (\nabla \mathbf{v}_g)^T] \quad (9)$$

A viscosidade efetiva da fase gás é uma combinação entre a viscosidade molecular e a turbulenta:

$$\mu_g^{ef} = \mu_g + \mu_g^{(t)} \quad (10)$$

onde  $\mu_g^{(t)}$  é a viscosidade turbulenta.

A viscosidade turbulenta da fase gasosa é obtida com um modelo anisotrópico de turbulência composto pelo modelo de duas equações diferenciais, k-ε padrão, uma para a energia cinética turbulenta e outra para sua taxa de dissipação, como segue:

$$\frac{\partial}{\partial t} (f_g \rho_g k_g) + \nabla \cdot (f_g \rho_g \mathbf{v}_g k_g) = f_g \nabla \cdot \left( \frac{\mu_g^{ef}}{\sigma_k} \nabla k_g \right) + f_g (G_g - \rho_g \epsilon_g) \quad (11)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(f_g \rho_g k_g) + \nabla \cdot (f_g \rho_g \mathbf{v}_g k_g) = f_g \nabla \cdot \left( \frac{\mu_g^{ef}}{\sigma} \nabla k_g \right) + f_g (G_g - \rho_g \varepsilon_g) \quad (12)$$

Com,

$$G_g = -\mathbf{T}_g^{(t)} : \nabla \mathbf{v}_g \quad (13)$$

Tal que em coordenadas cilíndricas a viscosidade anisotrópica é calcula por,

$$(\mu_g^{(t)})_{r,z} = (\mu_g^{(t)})_{r,r} = (\mu_g^{(t)})_{z,z} = C_\mu \rho_g \frac{k_g^2}{\varepsilon_g} \quad (14)$$

Para os demais componentes a viscosidade turbulenta é predita pelo modelo de comprimento de mistura de Prandtl que em coordenada cilíndricas é expressa por:

$$(\mu_g^{(t)})_{\theta,\theta} = (\mu_g^{(t)})_{r,\theta} = (\mu_g^{(t)})_{z,\theta} = +\rho_g r^2 c^2 \left\{ \left( \frac{\partial u_g}{\partial r} \right)^2 + \left( \frac{u_g}{r} \right)^2 + \left( \frac{\partial w_g}{\partial z} \right)^2 + \left. \left. + \frac{1}{2} \left[ r \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{v_g}{r} \right) \right]^2 + \left( \frac{\partial u_g}{\partial z} + \frac{\partial w_g}{\partial r} \right)^2 + \left( \frac{\partial v_g}{\partial z} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

### Equações constitutivas

As forças de interação são compostas pela força de arraste ou resistiva entre as fases (Gidaspow, 1983 *apud* Meier, 1998). Um modelo para a força resistiva é expresso da seguinte forma:

$$(\mathbf{F}_{res})_{g-s_k} = \beta_{g,s_k} (\mathbf{v}_g - \mathbf{v}_{s_k}) \quad , \text{ com } k = 1, \dots, n_s \quad (16)$$

Onde,  $\beta_{g-s_k}$ , representa um coeficiente de interface entre a fase gás e as fases sólidas.

Para escoamentos concentrados onde a fração volumétrica da fase gás  $f_g$  é menor que 0,8, a conhecida equação constitutiva de Ergun estabelece que,

$$\beta_{g,s_k} = 150 \mu_g \left( \frac{f_{s_k}}{f_g d_{s_k} \phi_{s_k}} \right)^2 + 1.75 \frac{\rho_g f_{s_k} |\mathbf{v}_g - \mathbf{v}_{s_k}|}{d_{s_k} \phi_{s_k}} \quad (17)$$

Na qual  $d_{s_k}$  é o diâmetro da fase sólida  $k$ ,  $\phi_{s_k}$  é o coeficiente de esfericidade da fase sólida  $k$ , e  $|\mathbf{v}_g - \mathbf{v}_{s_k}|$  é a velocidade relativa entre a fase gás e a fase sólida  $k$ .

Para escoamentos diluídos onde  $f_g$  é maior que 0,8 o modelo proposto por Wen e Yu (1966), relaciona o coeficiente de interface com o coeficiente de arraste,  $C_{D_{g-s_k}}$ , entre a fase gás e a sólida  $k$ , da seguinte forma:

$$\beta_{g,s_k} = \frac{3}{4} C_{D_{g-s_k}} \frac{f_g \rho_g |\mathbf{v}_g - \mathbf{v}_{s_k}| f_{s_k}}{d_{s_k} \phi_{s_k}} \quad (18)$$

Na literatura há um grande número de correlações empíricas para o cálculo do coeficiente de arraste ( $C_{D_{g-s_k}}$ ) em função do número de Reynolds. Dentre as muitas correlações encontradas na literatura, faz-se uso daquela proposta por Coelho e Massarani (Massarani, 1997):

$$C_{D_{g-sk}} = \left[ \left( \frac{24}{K_1 \text{Re}_{g-sk}} \right)^{0.85} - K_2^{0.85} \right]^{1.18} \quad (19)$$

Com  $K_1$  e  $K_2$  levando em consideração o efeito do formato da particular sobre o coeficiente de arraste, sendo os mesmos preditos pelas seguintes correlações,

$$K_1 = 0,843 \log_{10} \left( \frac{\phi_{sk}}{0,065} \right) \text{ e } K_2 = 5,31 - 4,88 \phi_{sk} \quad (20)$$

O número de Reynolds para a fase sólida  $k$  sob ação da fase gás é definido conforme segue,

$$\text{Re}_{g-sk} = \frac{\rho_g |v_g - v_{sk}| d_{sk}}{\mu_g} \quad (21)$$

### 2.2.2 Condições de contorno

Algumas simplificações são estabelecidas nas fronteiras do ciclone para a solução do modelo proposto.

Para a entrada, adota-se um modelo 3D axissimétrico, entrada simétrica, com velocidade prescrita na entrada. Nas paredes utiliza-se condição de deslizamento para o gás e de deslizamento livre para as fases sólidas. As condições de continuidade do fluxo são empregadas nas saídas.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O primeiro experimento na tentativa de validação dos modelos numéricos do código CYCLO-HEXA consiste na comparação experimental-numérico da perda de carga obtida com o escoamento monofásico para diferentes vazões e velocidades de entrada no ciclone. A Figura 5 apresenta os resultados de comparação e deixa nítida a capacidade do modelo monofásico em prever a perda de carga para diferentes condições operacionais e, ao mesmo tempo, compõe mais uma situação de sucesso na verificação do código numérico.

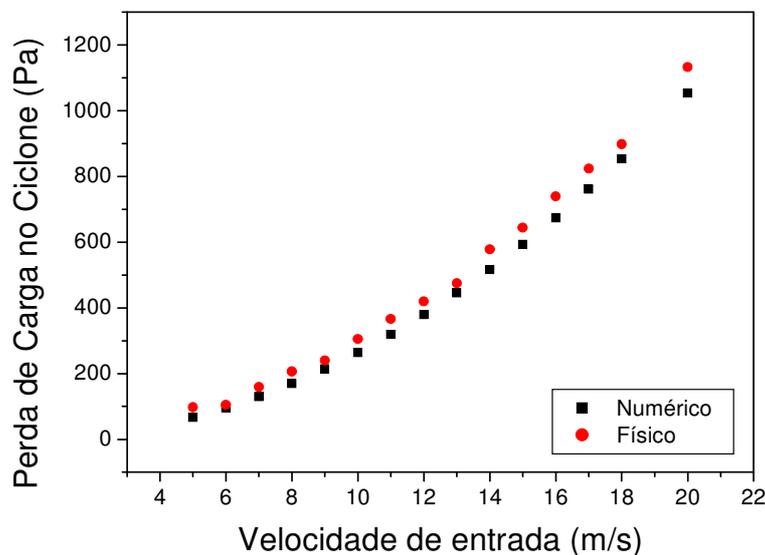


Figura 5. Comparativo da perda de carga monofásica experimental e numérica.

Os resultados das atividades de experimentação física com escoamento multifásico com medições da perda de carga e das eficiências global e individual de separação, foram produzidos com o auxílio de medidas de distribuição granulométrica sobre o material alimentado e o material coletado no “underflow” do ciclone, obtidos através de ensaio físico com o analisador de tamanho de partículas por difração à Laser (Mastersizer S, modelo S-MSM 5005-Malvern). A Tabela 3 apresenta os valores das eficiências por diâmetro de partícula para os experimentos multifásicos de 4 a 9 da Tab. 1 e a Figura 6 ilustra graficamente estes resultados experimentais.

Tabela 3. Valores experimentais de eficiências de coleta por diâmetro de partícula.

Diâmetro $d_p$ ( $\mu\text{m}$ )	Fração Alimentada	Eficiência Individual de Coleta					
		Exp. 4	Exp. 5	Exp. 6	Exp. 7	Exp. 8	Exp. 9
120,67	15,87	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
24,64	17,06	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
9	34,13	95,90	95,04	100,00	81,93	96,87	100,00
5,19	17,06	64,73	60,67	87,10	39,99	79,64	90,66
2,89	15,87	50,83	45,99	71,40	25,96	64,63	70,05
Eficiência Global		81,96	88,24	92,38	86,23	92,61	91,5

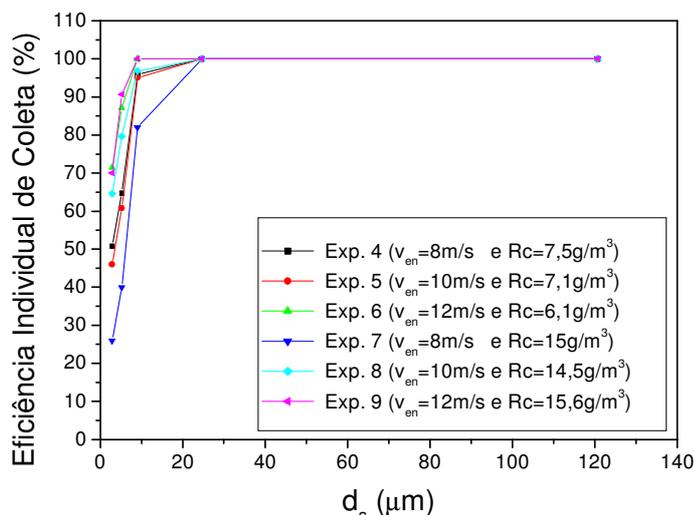


Figura 6. Curva experimentais de eficiência individual de coleta.

Os resultados experimentais de perda de carga, eficiência global de separação e curva de eficiência por diâmetro de partícula, apresentados formam a base empírica ou experimental deste trabalho a ser utilizada nas atividades de simulação numérica para estudos de validação de modelos multifásicos para o escoamento gás-sólido em ciclones.

A Tabela 4 apresenta valores de eficiência global de coleta e de perda de carga no ciclone obtidas com os modelos numéricos E-E<sub>1</sub>, E-E<sub>3</sub> e E-E<sub>5</sub> e nos experimentos físicos para as três (3) velocidades de entrada no ciclone e para as duas (2) razões de carga.

Tabela 4. Valores de eficiência de coleta global e de perda de carga dos Modelos E-E<sub>1</sub>, E-E<sub>3</sub> e E-E<sub>5</sub> e dos experimentos físico para as três velocidade de entrada e para as duas razões de carga.

Caso	Velocidade média (m/s)	Razão de Carga	Numérico			Experimental	
			Modelo	Eficiência (%)	$\Delta p$ (Pa)	Eficiência (%)	$\Delta p$ (Pa)
1	8	7,5	E-E1	98,1	144,6	81,96	153,24
2	10	7,1		99,01	223,99	88,24	203,8
3	12	6,1		99,43	320,42	92,38	312,46
4	8	15	E-E1	98,21	144,74	86,23	155,67
5	10	14,9		99,08	224,14	92,61	221,4
6	12	15,6		99,48	320,88	91,5	248,36
7	8	7,5	E-E3	88,5	145,13	81,96	153,24
8	10	7,1		89,66	201,01	88,24	203,8
9	12	6,1		90,15	321,47	92,38	312,46
10	8	15	E-E3	88,49	145,58	86,23	155,67
11	10	14,9		89,78	210,52	92,61	221,4
12	12	15,6		90,61	315,5	91,5	248,36
13	8	7,5	E-E5	83,1	144,68	81,96	153,24
14	10	7,1		85,53	224,67	88,24	203,8
15	12	6,1		87,56	320,28	92,38	312,46
16	8	15	E-E5	83,1	144,86	86,23	155,67
17	10	14,9		85,6	220,41	92,61	221,4
18	12	15,6		87,4	314,13	91,5	248,36

As condições para os diferentes casos sofrem alteração apenas na entrada das fases particuladas (frações volumétricas) e nas propriedades físicas (diâmetro das fases sólidas). A eficiência de coleta global para a experimentação física e numérica com os modelos E-E<sub>1</sub>, E-E<sub>3</sub> e E-E<sub>5</sub>, para a razão de carga de sólidos de 6 g/m<sup>3</sup> e 16 g/m<sup>3</sup>, são apresentadas na Fig. 7.

Por inspeção da Figura 7 verifica-se que o modelo E-E<sub>1</sub> que considera todo o material particulado sendo representado por um diâmetro médio, produz resultados de eficiência global de separação bastante superiores aos observados nos experimentos, comprovando a necessidade de inclusão de novas fases sólidas para representação do escoamento multifásico em ciclones. Comparando-se os resultados obtidos pelos modelos E-E<sub>3</sub> e E-E<sub>5</sub> observa-se uma melhor representação do modelo E-E<sub>3</sub> principalmente para condições de maiores velocidades de entrada. Este resultado contradiz o que se esperaria com o aumento do número de fases sólidas, e sugere que fenômenos adicionais devem ser inseridos no modelo E-E<sub>6</sub> para que a física seja mais bem representada. Uma possibilidade em investigação é a inclusão de modelos constitutivos para interação sólido-sólido do tipo força resistiva entre as fases.

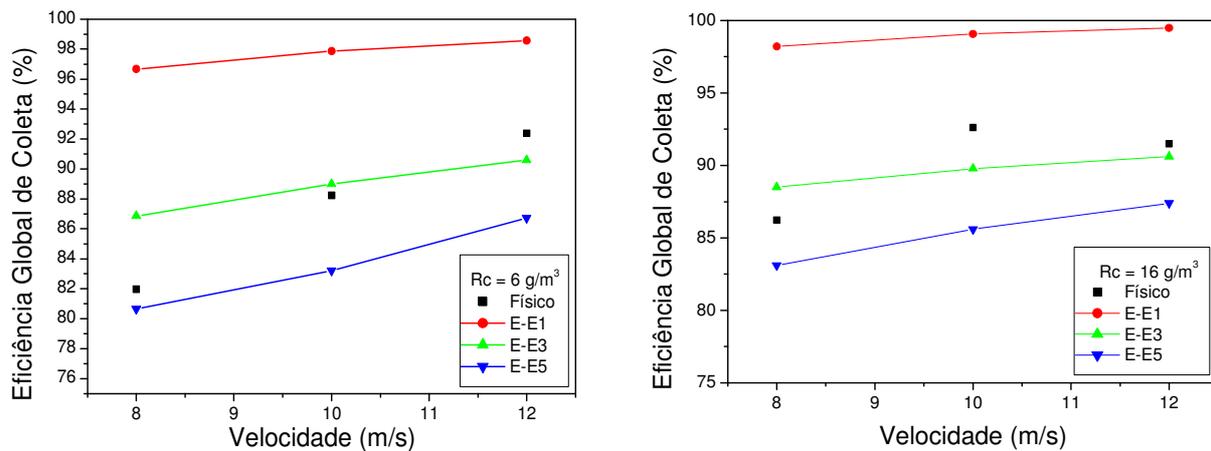


Figura 7. Eficiência global de separação: numérico versus experimental

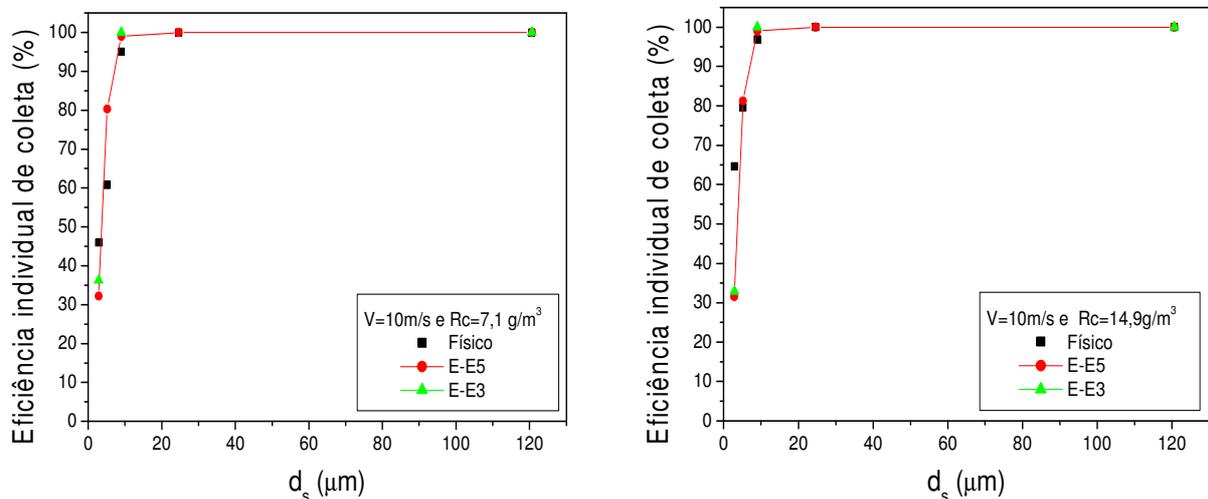


Figura 8. Curva de eficiência individual de coleta experimental versus numérica com os modelos EE<sub>3</sub> e EE<sub>5</sub>.

As curvas de eficiência experimentais e preditas com os modelos EE<sub>3</sub> e EE<sub>5</sub> apresentadas na Figura 8 demonstram que a representação obtida foi semelhante para os modelos EE<sub>3</sub> e EE<sub>5</sub>.

A Figura 9 apresenta uma comparação dos valores de perda de carga para o escoamento multifásico, nas diferentes condições experimentais de razão de carga e velocidade de entrada. Percebe-se que a sensibilidade dos modelos para predição de perda de carga é bastante inferior quando comparado com os resultados de eficiência global. Mesmo assim pode-se dizer que o modelo tetrafásico E-E3 também apresentou melhor desempenho que os demais.

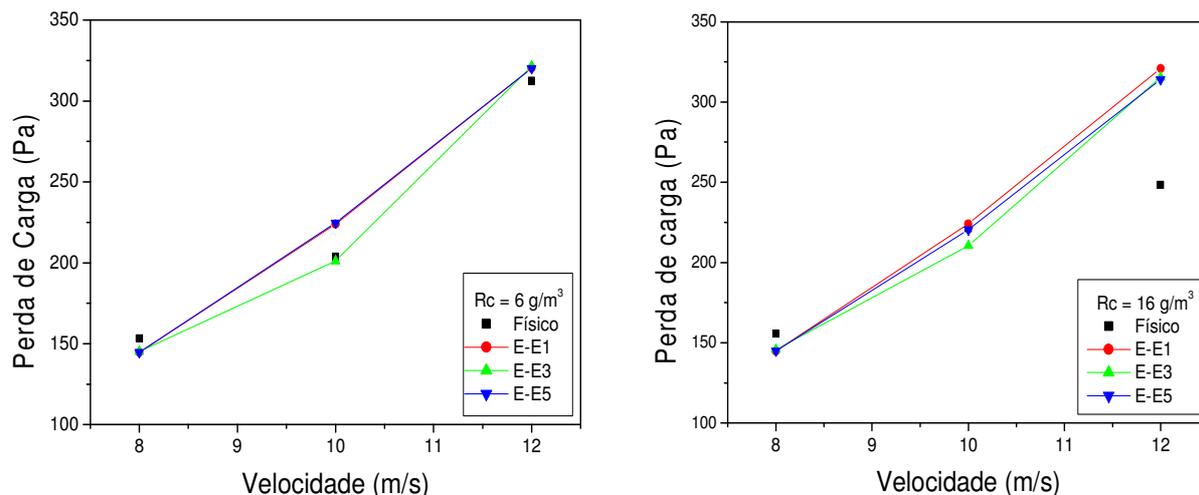


Figura 9. Perda de carga: numérica versus experimental.

#### 4 CONCLUSÕES

Com a execução das atividades experimentais e numéricas deste trabalho as seguintes conclusões foram obtidas:

- os experimentos físicos realizados em uma unidade experimental de dutos e ciclones produziram uma base empírica com medidas de perda de carga, eficiência global de separação e curva de eficiência por diâmetro de partícula, que podem ser utilizadas em estudos de verificação e validação em fluidodinâmica computacional (V&V in CFD);
- o modelo de turbulência híbrido empregado na fase gasosa, composto por uma combinação entre o modelo k- $\epsilon$  padrão e comprimento de mistura de Prandtl, que confere uma característica anisotrópica ao tensor de Reynolds, produziu resultados bastante próximos aos experimentais por análise da capacidade do modelo em prever a perda de carga no escoamento monofásico em ciclones;
- os modelos “inviscidos” para as fases sólidas interagindo com a fase gasosa por meio de uma força resistiva, apresentaram desempenho bastante satisfatório na predição da perda de carga em escoamento gás-sólido em ciclones, com pouca sensibilidade ao aumento do número de fases sólidas;
- o modelo tetrafásico E-E<sub>3</sub> apresentou melhor desempenho na predição da eficiência global de coleta com resultados muito próximos aos experimentais;
- os resultados obtidos com modelo hexafásico E-E<sub>5</sub> sugerem que com a inclusão de novas fases os fenômenos de interação sólido-sólido, não considerados no modelo, necessitam de atenção principalmente quando se deseja prever a eficiência de separação;
- de uma forma geral este trabalho procurou aliar técnicas experimentais com técnicas numéricas para avaliar fenômenos associados aos escoamentos multifásicos turbulentos em ciclones, e isto foi alcançado com sucesso.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESQ, convênio CON16051/2007-2, ao MCT/FINEP/CT-PETRO – GENE-PETRO, convênio número 01.08.0115.00, e a PETROBRAS, termo de cooperação 0050.0045549.08.4, pelo suporte financeiro que tornou possível a realização deste trabalho.

#### 6. REFERÊNCIAS

- Bernardo, S. Estudo dos Escoamentos Gasoso e Gás-Sólido em Ciclones pela Aplicação de Técnicas de Fluidodinâmica Computacional. PhD thesis, Campinas State University (UNICAMP), Campinas-SP-Brazil, 2005, 244 pp.
- Gidaspow, D. and ETTEHADIEH, B., “Fluidization in Two-Dimensional Beds with a Jet. 2. Hydrodynamic Modeling”, Ind. Eng. Chem. Fundamentals, Vol. 22, pág. 193-201, 1983.
- Massarani, G. Fluidodinâmica em Sistemas Particulados. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 1997.
- Meier, H.F. Modelagem Fenomenológica e Simulação Bidimensional de Ciclones por Técnicas da Fluidodinâmica Computacional. PhD thesis, Campinas State University (UNICAMP), Campinas-SP-Brazil, 1998, 210 pp.
- Slattery, J. C., Momentum, Energy, and Mass Transfer in Continua, Ed. McGraw-Hill Book Co., New York, 1972.
- Wen, C.H.; Yu, Y.H. Generalized method for predicting the minimum fluidization velocity, *AICH*. v.12, p.610, 1966.