

AVALIAÇÃO NUMÉRICA DO DESEMPENHO DE UM IMPACTADOR INERCIAL EM CASCATA PARA A AMOSTRAGEM DE AEROSSÓIS

Claudia Márcia Ferreira Costa

Departamento de Engenharia Mecânica, PUC-Rio, CEP 22453-900, Rio de Janeiro, RJ, Brasil
cmarcia@mec.puc-rio.br

Thiago Gonçalves Ledo

Departamento de Engenharia Mecânica, PUC-Rio, CEP 22453-900, Rio de Janeiro, RJ, Brasil
thiagoledo@click21.com.br

Rodrigo Freitas Barbosa

Departamento de Engenharia Mecânica, PUC-Rio, CEP 22453-900, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Marcos Sebastião de Paula Gomes

Departamento de Engenharia Mecânica, PUC-Rio, CEP 22453-900, Rio de Janeiro, RJ, Brasil
mospgomes@mec.puc-rio.br

Este trabalho tem como objetivo apresentar os resultados obtidos na simulação numérica do escoamento e trajetória das partículas para os quatro primeiros estágios de um impactador em cascata de oito estágios. O equipamento foi projetado para coletar aerossóis, cujas dimensões variem entre 0,5 e 17 microns a uma vazão de 30 l/min. A partir destes resultados, será possível avaliar a eficiência de coleta, reconhecer zonas de recirculação e áreas de deposição indesejáveis. Estas informações serão utilizadas no projeto de nossos próximos impactadores em cascata.

Palavras chave: impactador em cascata, aerosol, simulação numérica

1. Introdução

Nos estudos de qualidade do ar, o uso de impactadores em cascata é de grande importância, devido especialmente à sua capacidade de capturar, separar e classificar partículas em suspensão nos gases em função de dimensões como tamanho ou massa.

O impactador em cascata é um equipamento composto por múltiplos estágios. O design mais simples para um estágio é aquele que envolve um único orifício e a placa coletora posicionados perpendicularmente ao jato. No entanto, a fim de se obter instrumentos mais compactos que operem com vazões relativamente altas e quedas de pressão moderadas, geralmente utiliza-se múltiplos orifícios de dimensões iguais Fang et al. (1991).

O princípio de funcionamento do equipamento consiste em fazer com que uma amostra de ar contaminada com poluentes atravesse todos os estágios. No final de cada estágio, há uma redução progressiva de área para entrada nos orifícios que gera um acréscimo de velocidades. Tendo atravessado os orifícios, o escoamento se depara com a placa coletora e o jato é forçado a mudar de direção para contorná-la. Como as partículas de maior inércia preservam a direção do escoamento original, não conseguem contornar os obstáculos e acabam sendo depositadas sobre estas placas.

A cada estágio o tamanho dos orifícios é diminuído a fim de que a velocidade do escoamento aumente cada vez mais, e com isso, partículas cada vez menores possam ser depositadas sobre as placas.

A habilidade das partículas seguirem perfeitamente o movimento do fluido é governada pelo número de Stokes (Stk), que relaciona o tempo de relaxação da partícula (τ) e o tempo característico do escoamento. Quanto maior for o número de Stokes, maior inércia da partícula, o que resulta em trajetórias diferentes entre a partícula e o fluido. Considerando uma eficiência de coleta de 50%, pode-se definir o número de Stokes correspondente de acordo com a equação 1 Hinds (1982).

$$Stk_{50} = \frac{\rho_p V_o d_{50}^2 C}{9\mu W} \quad (1)$$

Onde ρ_p é a densidade da partícula, V_o é a velocidade média nos orifícios, C é a coeficiente de Cunningham, μ é a viscosidade absoluta do fluido e W é o diâmetro ou comprimento dos orifícios circulares ou retangulares respectivamente.

A teoria utilizada neste trabalho é baseada na análise numérica das equações de Navier-Stokes para caracterização do escoamento, integração numérica das equações de movimento para obtenção da trajetória de partículas e levantamento das curvas de eficiência de coleta.

Devido à sua simplicidade, muitos estudos já foram desenvolvidos nesta área, seja para analisar casos específicos e levantar curvas de eficiência de coleta seja apenas para coletar partículas numa determinada região. No entanto, muito ainda há de ser feito em termos de simplificações de geometria, diminuição de perdas por deposição nas paredes, eliminação das zonas de recirculação e efeitos de salto para otimização de performance do equipamento.

2. A solução do escoamento e da trajetória de partículas

Os modelos para solução numérica do impactador envolvem as equações de dinâmica dos fluidos e trajetória de partículas Gomes (1997).

A partir de 1970, com a utilização de computadores mais velozes e dos métodos de diferenças finitas foi possível entender completamente o escoamento e a trajetória de partículas através dos impactadores. Trabalhos desta época mostram que, baseado em certas instruções de construção, os impactadores poderiam separar e classificar partículas em função dos seus diâmetros aerodinâmicos Marple (2004).

Utilizando o código comercial FLUENT foram resolvidas as equações de conservação de massa e de quantidade de movimento linear e o modelo k-ε de turbulência para a solução do escoamento. A partir da solução do escoamento pode-se avaliar a trajetória das partículas lançadas de diferentes pontos do domínio.

O modelo k-ε de turbulência considera duas equações de transporte, o que permite determinar separadamente dois parâmetros importantes: a velocidade turbulenta e o comprimento de escala. Foi assumido ainda *Enhanced Wall Treatment*, o que implica em considerar que a malha próxima às paredes é refinada o suficiente para ser considerada como uma sub-camada laminar ($y^+ \approx 1$).

O cálculo da trajetória de partículas é feito através da integração dos balanços de forças agindo na partícula, utilizando aproximação Lagrangeana. Este balanço de força pode ser escrito em coordenadas cartesianas na direção x conforme a equação 2.

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x \quad (2)$$

Onde $F_D(u - u_p)$ é a força de arraste por unidade de massa da partícula, sendo u a velocidade do fluido; u_p a velocidade da partícula e F_D expresso pela equação 3

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D Re}{24} \quad (3)$$

Onde μ e ρ são a viscosidade e a densidade do fluido respectivamente; ρ_p é a densidade da partícula, d_p é o diâmetro da partícula; C_D é o coeficiente de arraste e Re é o número de Reynolds, definido pela equação 4

$$Re = \frac{\rho d_p |u_p - u|}{\mu} \quad (4)$$

3. Modelagem da geometria e da malha do impactador

A geometria das simulações foi desenhada obedecendo ao projeto desenvolvido por Gomes (2001). Este projeto corresponde a um impactador em cascata de oito estágios operando a uma vazão de 30 l/min e cujos diâmetros de coleta variam entre 0,5 e 17 μm . A tabela 1 a seguir sintetiza as características do equipamento, onde N é o número de orifícios, W é o diâmetro dos orifícios, P/P_{ent} é a razão de pressão para cada estágio, Re é o número de Reynolds e d_{50} é o diâmetro aerodinâmico da partícula para eficiência de coleta de 50%.

Tabela 1 – Características do impactador

Estágio	N	W (mm)	Vo (m/s)	P/Pent	Re	d50 (mm)
1	1	17	2,2	1	2493	17,3
2	3	8,5	2,94	1	1662	10,5
3	3	6,1	5,7	1	2316	6,4
4	5	3,7	9,3	1	2291	3,8
5	7	2,4	15,8	1	2523	2,3
6	10	1,6	24,9	0,99	2649	1,5
7	14	1	45,7	0,98	3027	0,85
8	18	0,7	73,5	0,95	3364	0,53

Nas simulações numéricas foram considerados somente os quatro primeiros estágios do equipamento, onde são coletadas as partículas de maior diâmetro, pois acredita-se que nestes haja maior deposição em regiões indesejadas e zonas de recirculação mais evidentes. A figura 1 mostra a geometria utilizada nas simulações.

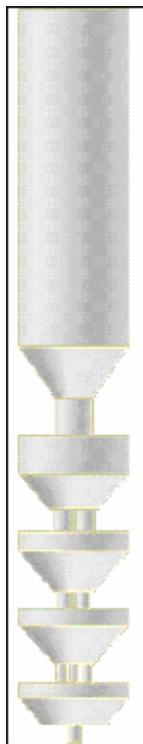


Figura 1 – Geometria do impactador

Como o interesse principal deste estudo era a investigação do desempenho dos diferentes estágios do impactador e não a eficiência de coleta na entrada do equipamento, esta foi substituída por um trecho reto de tubo de forma a se evitar os efeitos da entrada na solução. A malha tridimensional foi feita com 505.229 volumes de controle.

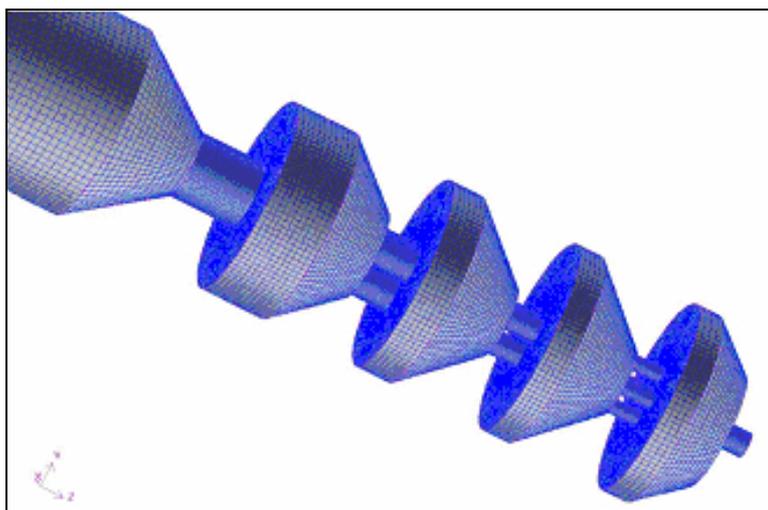


Figura 2 – Visualização da malha do impactador

4. Apresentação dos resultados

4.1 Resultados para o escoamento

A partir da geometria e da malha mostradas anteriormente foram realizadas simulações tridimensionais com as seguintes condições de contorno na entrada: (1) viscosidade do ar $\mu = 1,81 \times 10^{-5}$ Pa.s, (2) velocidade do escoamento na direção principal $v = 0,255$ m/s, (3) 2% de intensidade de turbulência, (4) comprimento de escala de 0,005 m, (5) pressão de referência $P = 1,01 \times 10^5$ Pa, (6) regime permanente e (7) escoamento turbulento.

Os efeitos de gravidade foram considerados. Os resultados obtidos para o escoamento são apresentados através dos contornos de velocidade e pressão nas figuras 3 até 5 a seguir.

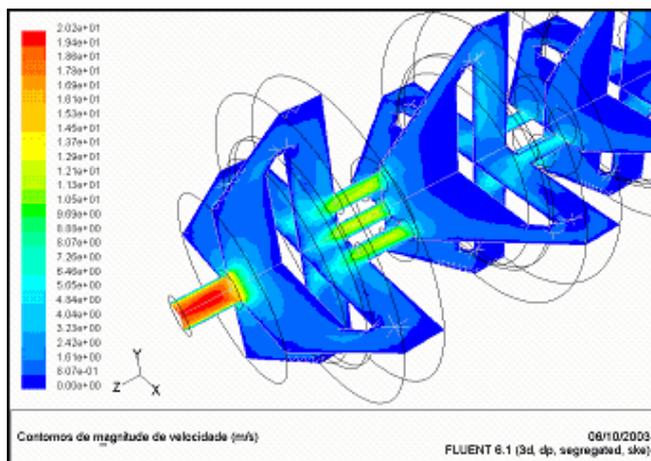


Figura 3 – Contorno de velocidade no impactador

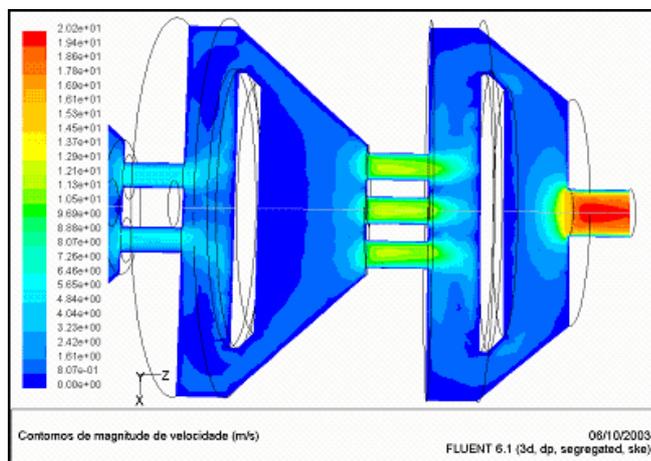


Figura 4 – Contorno de velocidade no impactador

Pela análise das imagens apresentadas, observa-se que ao ser forçado a penetrar nos orifícios, o escoamento aumenta a velocidade. Este aumento torna-se mais acentuado à medida que se avança no equipamento e, com isso, partículas cada vez menores sofrem impactação. Vale a pena ressaltar que, uma parcela deste incremento de velocidade é devido à contribuição da brusca redução de área entre as placas coletoras e as paredes.

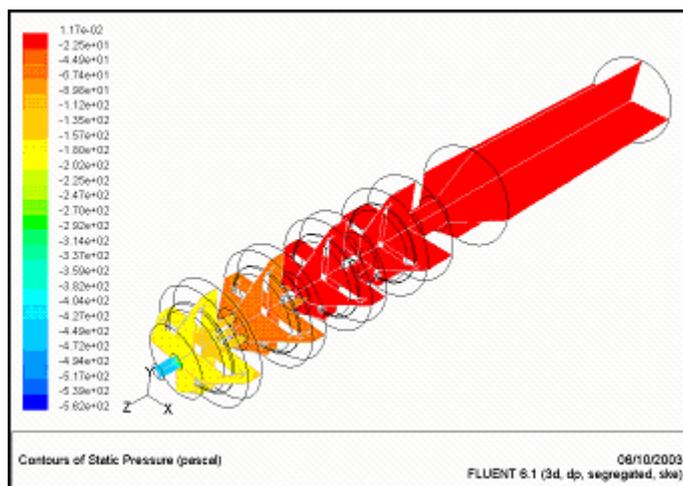


Figura 5 – Contorno de pressão estática no impactador

Com relação ao contorno de pressão, observe que o equipamento tem uma pequena perda de carga apresentando uma diferença de pressão total de 179,5 Pa.

Esta diferença é função de sucessivas quedas de pressão distribuídas ao longo do equipamento da seguinte forma: a pressão é constante entre a entrada e os dois primeiros estágios, há então uma redução de 44,9 Pa entre as saídas do segundo e terceiro estágios e outra de 134,6 Pa entre as saídas do terceiro e quarto estágios. Tais quedas ocorrem, especialmente, devido às perdas de energia e por atrito e pelo aumento de velocidade.

Outras informações podem ser obtidas através dos vetores velocidades em cada estágio apresentados nas figuras 6 até 8.

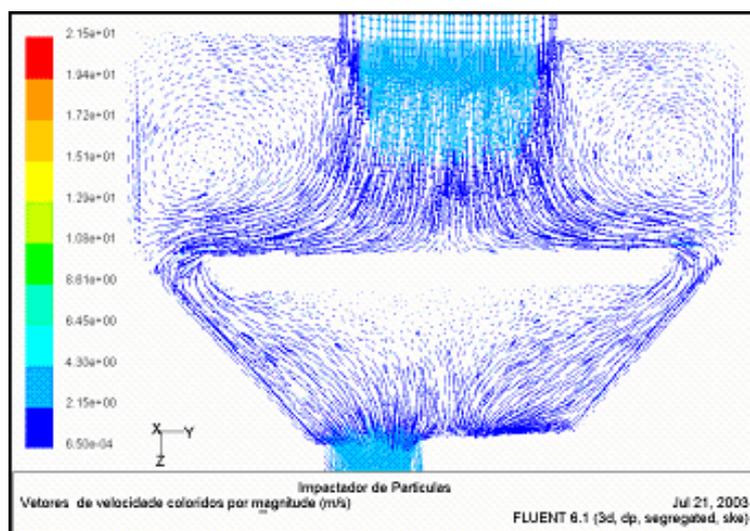


Figura 6 – Vetores velocidade no primeiro estágio do impactador

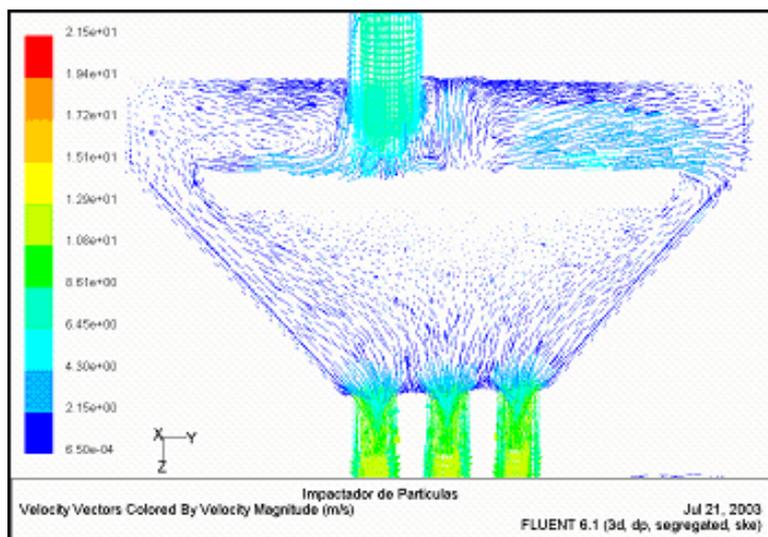


Figura 7 – Vetor velocidade no segundo estágio do impactador

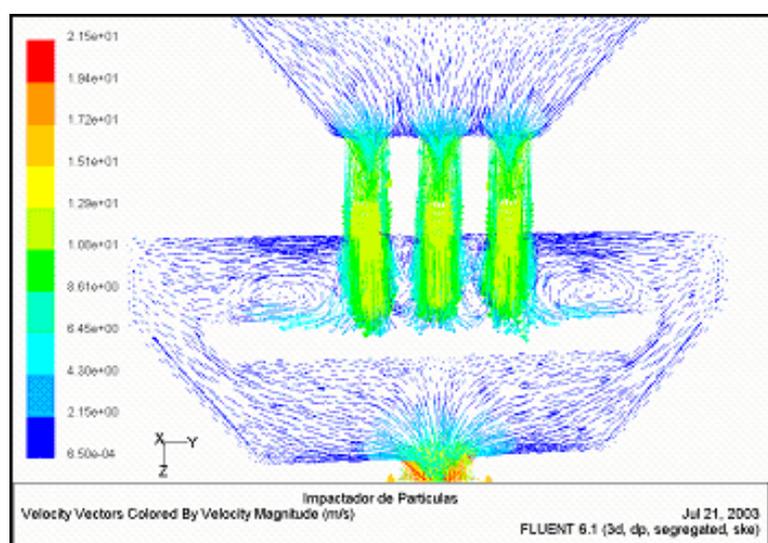


Figura 8 – Vetores velocidade no terceiro estágio do impactador

Note que quanto maior for a distância entre o jato e a placa coletora, mais intensas são as zonas de recirculação. Isto poderia ser facilmente evitado se a geometria fosse desenhada considerando um trecho inclinado ou curvo. Outra modificação bastante apropriada ao projeto seria eliminar os trechos retos entre os orifícios, pois desta forma haveria redução da deposição indesejável nestas regiões.

4.2 Resultados para a trajetória de partículas

A análise da trajetória de partículas foi realizada visando dois objetivos principais: avaliar a eficiência de coleta do equipamento e estimar as perdas por deposição nas paredes. Nos dois casos foram consideradas injeções de partículas em diferentes pontos do domínio a uma vazão de $q = 8,2 \times 10^{-11}$ kg/s e velocidade na direção principal $v_z = 0,255$ m/s. Os diâmetros de partículas variaram entre 1 e 22 μm conforme mostra a tabela 2 a seguir.

Tabela 2 - Diâmetros de partículas utilizados nas injeções

Denominação da injeção	Diâmetros (µm)
Injection-0	1,0
Injection-1	2,5
Injection-2	3,8
Injection-3	4,5
Injection-4	5,6
Injection-5	6,4
Injection-6	8,0
Injection-7	10,5
Injection-8	12,0
Injection-9	15,0
Injection-10	17,5
Injection-11	20,0
Injection-12	22,0

A figura 9 a seguir ilustra a trajetória de partículas de um determinado diâmetro ao longo do impactador e permite visualizar a trajetória das partículas ao longo do equipamento.

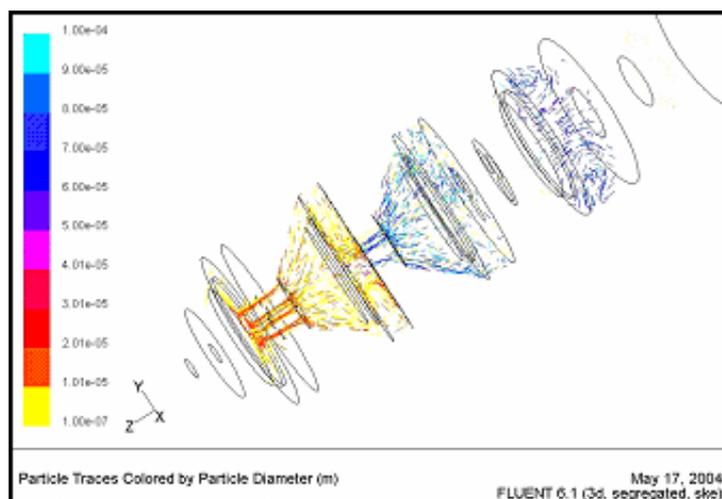


Figura 9 – Trajetória das partículas ao longo do impactador

A eficiência de coleta foi avaliada em cada estágio a partir da injeção de partículas cujos diâmetros era iguais ao diâmetro de partícula projetado para cada estágio. Embora no caso real haja deposição em todas as superfícies, a fim de mensurar o efeito da deposição indesejável sobre as paredes, foram realizadas simulações de três situações:

- (1) Coleta somente nas paredes
- (2) Coleta somente nas placas coletoras
- (3) Coleta nas placas e nas paredes

Como a eficiência global não é produto das eficiências individuais, foi utilizado o conceito de penetração que permite avaliar o percentual de material que atravessou o equipamento e, com isso, determinar a eficiência do sistema em série. A penetração foi calculada conforme a equação (5) abaixo:

$$p = \frac{\text{partículas que escaparam}}{\text{partículas efetivas}} \frac{\text{partículas que escaparam}}{(\text{partículas lançadas} - \text{partículas que não completaram o processo})} \quad (5)$$

Calculando a penetração para os casos (1), (2) e (3) pode-se verificar que os efeitos eram efetivamente independentes. A tabela 3 a seguir mostra os resultados obtidos para a eficiência de coleta em cada estágio nas três situações simuladas.

Tabela 3 - Eficiência de coleta em cada estágio

1º estágio ($d_{p50} = 17,5 \times 10^{-6} \text{ m}$)	Lançadas	Coletadas	Escapam	Incompletas	Eficiência de coleta	Penetração	p1xp2	Eficiência da placa
Somente paredes grudando (1)	611	80	480	51	14,3%	85,7%	3,9%	95,4%
Somente placa grudando (2)	611	582	28	1	95,4%	4,6%		
Placa e paredes grudando (3)	611	594	16	1	97,4%	2,6%		
2º estágio ($d_{p50} = 10,5 \times 10^{-6} \text{ m}$)								
Somente paredes grudando (1)	611	43	522	46	7,6%	92,4%	49,7%	46,2%
Somente placa grudando (2)	611	271	316	24	46,2%	53,8%		
Placa e paredes grudando (3)	611	312	280	19	52,7%	47,3%		
3º estágio ($d_{p50} = 6,4 \times 10^{-6} \text{ m}$)								
Somente paredes grudando (1)	611	203	380	28	34,8%	65,2%	27,3%	58,1%
Somente placa grudando (2)	611	350	252	9	58,1%	41,9%		
Placa e paredes grudando (3)	608	438	167	3	72,4%	27,6%		
4º estágio ($d_{p50} = 3,8 \times 10^{-6} \text{ m}$)								
Somente paredes grudando (1)	611	177	415	19	29,9%	70,1%	40,9%	41,6%
Somente placa grudando (2)	611	246	345	20	41,6%	58,4%		
Placa e paredes grudando (3)	611	349	245	17	58,8%	41,2%		

Note que o estágio 1 apresentou uma eficiência de coleta na placa muito alta. Isto merece atenção, haja vista que o projeto do equipamento espera que partículas com diâmetros de 17,5 µm tenham uma eficiência de coleta de 50%. Os outros estágios apresentaram resultados aceitáveis dentro das tolerâncias de projeto.

Admitindo que os efeitos eram efetivamente independentes, dado que as penetrações para o sistema global (p3) e para o sistema em série (p1xp2) podem ser consideradas iguais, foram levantadas as curvas de eficiência de coleta da placa para cada estágio. A eficiência de coleta foi calculada conforme a equação (6) a seguir.

$$\eta = \frac{\text{partículas coletadas na placa}}{\text{partículas efetivas}} = \frac{\text{partículas coletadas na placa}}{(\text{partículas lançadas} - \text{partículas que não completaram o processo})} \quad (6)$$

Vale a pena ressaltar que todas as informações foram obtidas para as partículas que efetivamente completaram a trajetória, a pequena parcela de partículas que não completaram o processo foi desprezada. Tais partículas seriam aquelas que poderiam ter ficado “presas” em zonas de recirculação ou de baixa velocidade. As curvas obtidas para cada estágio estão mostradas nas figuras 10 até 13 a seguir.

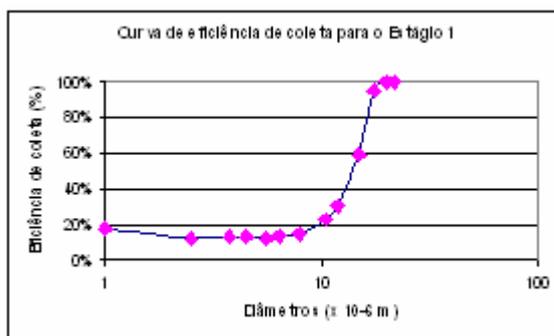


Figura 10 – Curva de eficiência de coleta para o estágio 1

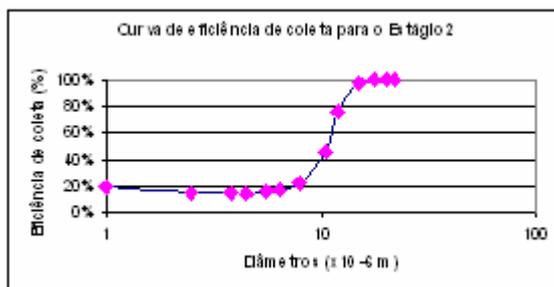


Figura 11 – Curva de eficiência de coleta para o estágio 2

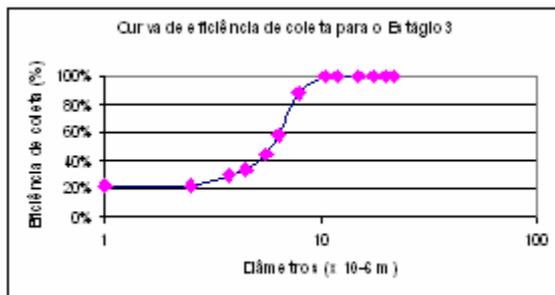


Figura 12 – Curva de eficiência de coleta para o estágio 3

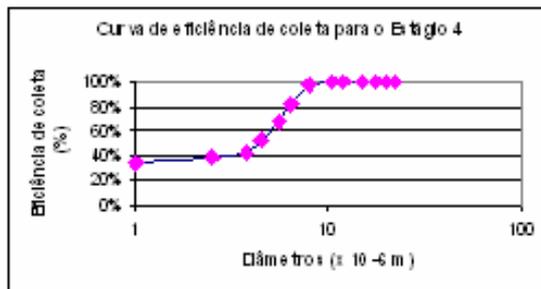


Figura 13 – Curva de eficiência de coleta para o estágio 4

De maneira análoga, foram levantadas as curvas de perdas por deposição indesejável nas paredes. Estas curvas são apresentadas nas figuras 14 até 17 a seguir.

Para diâmetros menores ou iguais aos diâmetros de projeto do estágio, as perdas por deposição nas paredes do estágio chegam a alcançar em média 20%, o que é bastante significativo. Isto mostra que são recomendáveis modificações na geometria e outras providências no projeto dos próximos equipamentos.

No levantamento destes gráficos diâmetros cuja eficiência de coleta era maior do que 50% foram desprezados porque numa situação real, é provável que estas partículas sejam coletadas previamente em estágios anteriores.



Figura 14 – Curva de perdas por deposição indesejável nas paredes do Estágio 1



Figura 15 – Curva de perdas por deposição indesejável nas paredes no Estágio 2



Figura 16 – Curva de perdas por deposição indesejável nas paredes no Estágio 3



Figura 17 – Curva de perdas por deposição indesejável nas paredes no Estágio 4

5. Conclusões

Neste trabalho foram avaliados o escoamento e trajetória de partículas através de um impactador em cascata. A análise dos resultados obtidos nas simulações mostrou que pequenas alterações na geometria do equipamento podem trazer avanços significativos em sua performance.

Suavizando a região entre o jato e as placas coletoras em cada estágio, através de um trecho inclinado por exemplo, pode-se reduzir as regiões de recirculação e com isso, evitar que as partículas penetrem nos vórtices não completando o percurso e também os efeitos de salto.

Outra modificação na geometria seria aumentar a distância entre as paredes e as placas coletoras poderia-se evitar uma redução tão drástica nesta área do escoamento, e com isso, o aumento excessivo de velocidades que poderia evitar deposição indesejável nas paredes.

Quanto à trajetória de partículas pode-se concluir que, de forma geral, apresentou condições de operação satisfatórias, exceto o estágio 1 cuja eficiência de coleta obtida foi muito maior do que a projetada. Com relação às perdas por deposição indesejável nas paredes, recomenda-se modificações que possam diminuir seus efeitos.

6. Referências

- Fang C.P., Marple V.A. e Rubow K.L., 1991, “Influence of cross-flow on particle collection characteristics of multi-nozzle impactors”, *Journal of Aerosol Science*, Vol. 22, pp. 403-415.
- Gomes M.S. e Cardoso R., 2001, “Flow and particle trajectories simulation within an inertial aerosol sampler”, COBEM, Uberlândia, São Paulo, Brazil.
- Gomes M.S., 1997, “Design of an eight-stages cascade impactor for the classification of airborne particles”, COBEM, Hinds W.C., 1995, “Aerosol Technology – Properties, Behavior and Measurement of Airborne Particles”, John Wiley and Sons, New York.
- Manual do FLUENT.
- Marple V.A., 2004, “History of Impactors – The first 110 years”, *Aerosol Science and Technology*, Vol. 38, pp. 247-292.
- Tsai C., Huang C., 2001, “Effect of gravity on particle collection efficiency of inertial impactors”, *Journal of Aerosol Science*, Vol. 32, pp. 375-387.

NUMERICAL EVALUATION OF THE PERFORMANCE OF AN INERTIAL CASCADE IMPACTOR FOR SAMPLING AEROSOLS

Claudia Marcia Ferreira Costa

Departamento de Engenharia Mecânica, PUC-Rio, CEP 22453-900, Rio de Janeiro, RJ, Brasil
cmarcia@mec.puc-rio.br

Thiago Gonçalves Ledo

Departamento de Engenharia Mecânica, PUC-Rio, CEP 22453-900, Rio de Janeiro, RJ, Brasil
thiagoledo@click21.com.br

Rodrigo Freitas Barbosa

Departamento de Engenharia Mecânica, PUC-Rio, CEP 22453-900, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Marcos Sebastião de Paula Gomes

Departamento de Engenharia Mecânica, PUC-Rio, CEP 22453-900, Rio de Janeiro, RJ, Brasil
mspgomes@mec.puc-rio.br

Abstract

Cascade impactors are widely employed in air sampling and in the characterization of atmospheric aerosols. This work is concerned with the development of an eight stages cascade impactor for sampling aerosols in the range of aerodynamic diameters between 0,5 and 17 microns, while operating with a nominal flow rate of 30 l/min.

It is presented 3D numerical simulation results obtained for the flow field and the particle trajectories within the first four stages of the impactor, which represent the critical region with respect to the unwanted deposition of particles outside the deposition substrates.

These results will provide us with information about the collection efficiency and how to avoid the undesirable recirculation regions inside the instrument. The information will be taken into account in the design of the next prototype, which is expected to be more easily constructed and as effective as the previous one. The new prototype will be designed, built and calibrated at PUC-Rio.

Keywords: cascade impactor, aerosol, numerical simulation