

# ANÁLISE NUMÉRICA DO ESCOAMENTO E DA TRAJETÓRIA DE PARTÍCULAS ATRAVÉS DE UM IMPACTADOR INERCIAL

**Claudia Marcia Ferreira Costa**

Departamento de Engenharia Mecânica, PUC-Rio, CEP 22453-900, Rio de Janeiro, RJ, Brasil  
[cmarcia@mec.puc-rio.br](mailto:cmarcia@mec.puc-rio.br)

**Aline Guidry**

Departamento de Engenharia Mecânica, PUC-Rio, CEP 22453-900, Rio de Janeiro, RJ, Brasil  
[aline\\_guidry@yahoo.com](mailto:aline_guidry@yahoo.com)

**Marcos Sebastião de Paula Gomes**

Departamento de Engenharia Mecânica, PUC-Rio, CEP 22453-900, Rio de Janeiro, RJ, Brasil  
[mospgomes@mec.puc-rio.br](mailto:mospgomes@mec.puc-rio.br)

*Resumo.* Este trabalho tem como objetivo apresentar os resultados obtidos através de análises numéricas tri-dimensionais de um impactador inercial em cascata projetado para coletar partículas de 10  $\mu\text{m}$  quando operando a uma vazão de 30 lpm. As análises incluem a solução do escoamento e da trajetória de partículas e fornecem resultados valiosos sobre a deposição indesejável de partículas sobre as paredes internas do instrumento, além das curvas de eficiência de coleta.

*Palavras chave:* aerosol, impactador inercial, análise numérica, deposição indesejável, curva de eficiência de coleta

## 1. Introdução

Os estudos relacionados aos instrumentos utilizados para amostrar e classificar as partículas em suspensão no ar estão cada vez mais avançados. Hoje, procura-se não somente desenvolver novas tecnologias, mas também maximizar a eficiência dos instrumentos já disponíveis no mercado.

No caso específico dos impactadores inerciais, o grande desafio é diminuir as perdas por deposição indesejáveis nas paredes, uma vez que a eficiência deste instrumento é diretamente influenciada pela inércia das partículas, que faz com que estas consigam ou não acompanhar a trajetória do fluido no qual estão inseridas.

Neste contexto de aprimoramento do desempenho dos impactadores, as simulações numéricas CFD têm contribuído muito, porque permitem modificações rápidas na geometria do instrumento e viabilizam análises que, se fossem realizadas experimentalmente, seriam muito mais dispendiosas.

O presente trabalho apresenta os resultados obtidos através de simulações numéricas para um estágio de um impactador inercial com  $d_{p50}$  (diâmetro aerodinâmico com eficiência de coleta de 50%) de 10  $\mu\text{m}$ , operando com uma vazão de 30 lpm e pressão atmosférica. Em nosso trabalho buscamos resolver o escoamento e a trajetória de partículas para levantar a curva de eficiência de coleta do instrumento e enfatizamos o estudo das perdas por deposição indesejável nas paredes internas do instrumento.

Avaliamos cada componente da geometria de um coletor de partículas em potencial e, ao final, apresentamos sugestões para modificações na geometria que diminuam as perdas de partículas nas paredes.

## 2. O impactador

O impactador inercial em cascata do presente estudo possui um único estágio, cujo  $d_{p50}$  é 10  $\mu\text{m}$ , quando operando a uma vazão de 30 lpm e pressão atmosférica. O projeto deste instrumento foi realizado de acordo com Costa (2005).

O instrumento é composto por 3 partes: entrada, estágio e saída. O estágio é composto por um bloco externo, uma placa de orifícios e uma placa de impactação posicionada abaixo da outra placa. A figura mostra o projeto do instrumento.

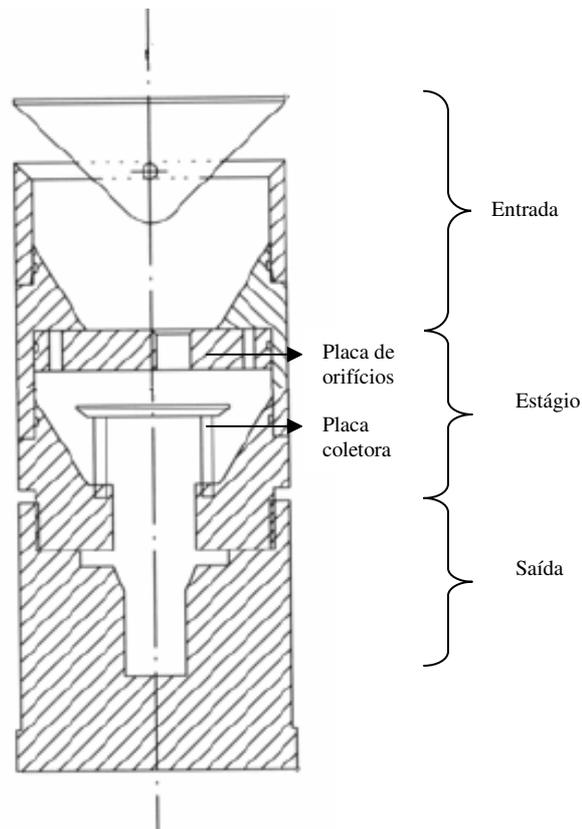


Figura 1 Desenho esquemático do impactador

### 3. As equações

Conforme apresentado em Costa (2005), a solução do escoamento num impactador inercial envolve a solução das seguintes equações:

- I – Continuidade (ou conservação de massa)
- II – Conservação da quantidade de movimento linear (3 equações, uma para cada direção principal)
- III – Conservação de energia (não utilizada no desenvolvimento deste trabalho, pois foi considerado um sistema isotérmico).

Deste sistema derivam as equações de Navier-Stokes, que representam a conservação de quantidade de movimento linear considerando hipóteses simplificadoras, tais como fluido contínuo, tensor das tensões simétrico; fluido isotrópico e newtoniano, não deslizamento na parede (velocidade nula). Considerando tratar-se de um escoamento turbulento escolhemos o modelo k- $\epsilon$ , para completar o sistema e tornar possível sua solução.

Para a solução da trajetória de partículas, por outro lado, realizamos a integração do balanço de forças na partícula para descrever sua trajetória.

### 4. A simulação numérica

Para simplificar a simulação numérica foram implementadas algumas modificações no desenho do projeto original: na geometria computacional os blocos de entrada e saída foram substituídas por cilindros de comprimento longo, para que os efeitos de entrada e saída pudessem ser desprezados, e as hastes que sustentam a placa foram desconsideradas.

A solução CFD foi obtida através do FLUENT (versão 6.0.12) que utiliza técnica de volumes de controle para integração das equações de conservação e a malha foi desenhada no pré-gerador Gambit. A malha é composta de elementos hexagonais e contém cerca de 350.000 volumes de controle. A figura a seguir mostra a distribuição de volumes de controle na superfície externa da geometria (Fig. 2).

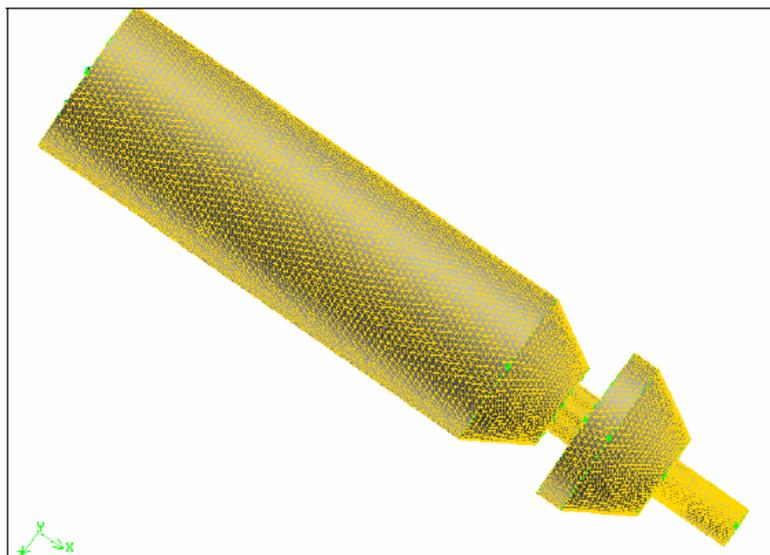


Figura 2. Distribuição da malha na superfície externa do instrumento.

A solução do escoamento e da trajetória de partículas de impactadores envolve a solução das equações de Navier-Stokes e a integração dos balanços de forças nas partículas. O modelo de turbulência escolhido para a solução do sistema foi o modelo k-ε e foi utilizada a técnica de solução desacoplada, ou seja, primeiramente resolvemos o escoamento e depois aproveitamos seus resultados para resolver a trajetória de partículas, uma vez que estas são muito pequenas e aparecem em concentração extremamente reduzida, não afetando portanto o escoamento.

#### 4.1 Resultados para o escoamento

Na solução do escoamento utilizamos como condições de entrada para o problema a pressão atmosférica e a velocidade na entrada, calculada a partir da vazão previamente definida (30 lpm). O sistema de equações foi resolvido iterativamente em todos os volumes de controle do domínio.

Foi aplicado um critério de convergência de  $10^{-6}$  para o resíduo relativo das equações de conservação (em relação ao valor do resíduo na primeira iteração da solução) e foram necessárias 5.000 iterações para obter a solução.

Os resultados obtidos para o escoamento serão apresentados através das figuras a seguir (Fig. 3 até Fig. 6), que representam os vetores velocidade e contornos de velocidade e de pressão no interior do instrumento.

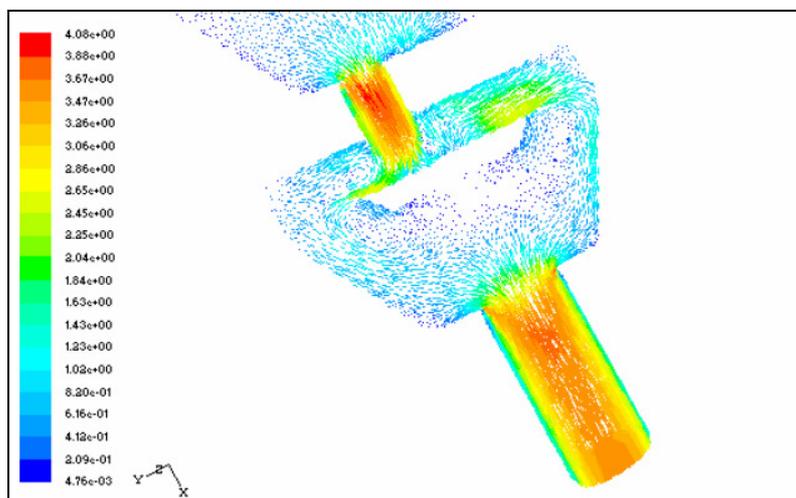


Figura 3. Vetores velocidade(m/s) – plano z

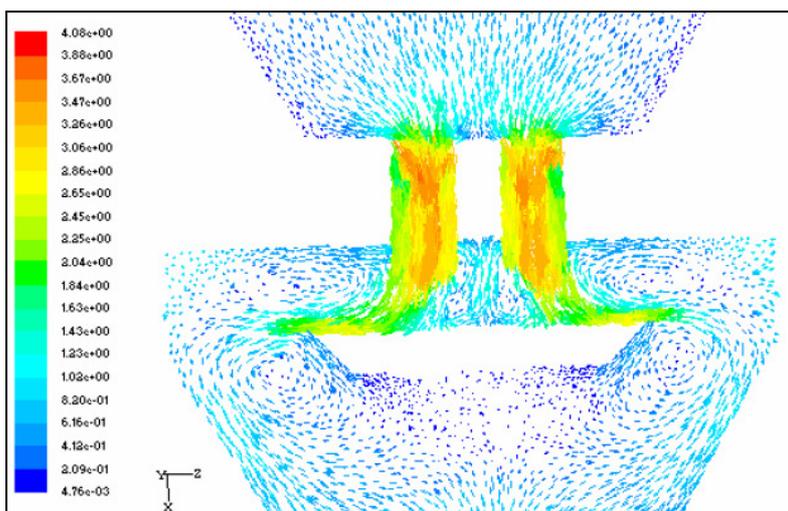


Figura 4. Vetores velocidade (m/s)– plano y

A análise das imagens acima mostra que a trajetória executada pelo escoamento na tentativa de contornar a placa é afetada por intensas zonas de recirculação. Estas zonas também ocorrem entre os orifícios e podem afetar o desempenho do instrumento, pois modificam a trajetória das partículas, que podem ficar presas nelas ou serem lançadas contra outras paredes.

Analisando o contorno de velocidade apresentado a seguir, verificamos, o desenvolvimento do escoamento bem antes deste encontrar a primeira placa de orifícios, o que significa que nossa solução não foi afetada pela condição de entrada adotada.

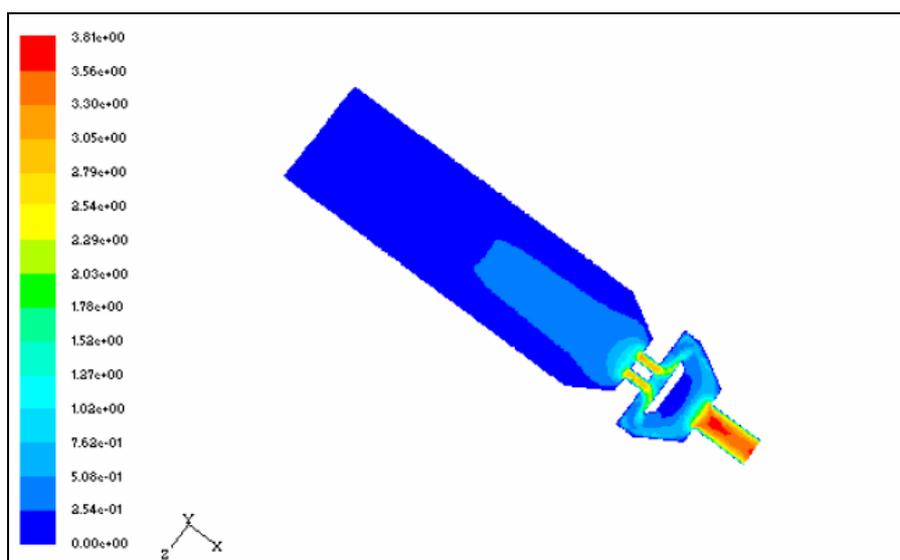


Figura 5. Contorno de velocidade. (m/s)

Finalizando a análise de resultados do escoamento do impactador, temos o contorno de pressão que indica uma mínima queda ao longo do instrumento, conforme já era esperado, no valor médio de 24 Pa entre entrada e saída para este estágio. Além disso, observamos que a queda de pressão nos orifícios é não uniforme, em função das características de convergência do escoamento.

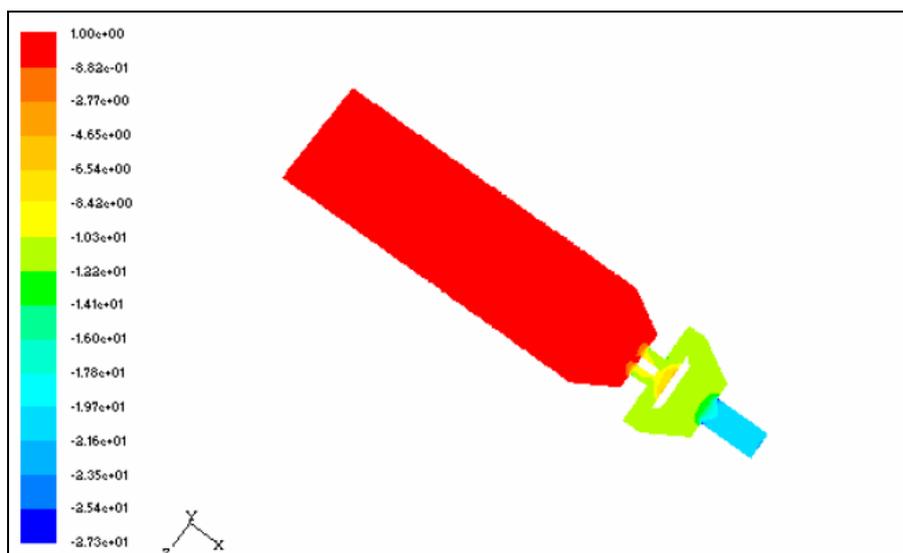


Figura 6. Contorno de pressão (Pa)

#### 4.2 Resultados para a trajetória de partículas

Conforme já foi dito, a trajetória de partículas foi calculada a partir dos resultados para o escoamento (pós-processamento). Para isso criamos 21 injeções de partículas a serem lançadas a partir da entrada do instrumento. Estas injeções levam em conta o diâmetro da partícula, sua densidade ( $1000 \text{ kg/m}^3$ ), as 100 posições de lançamento e o coeficiente de Cunningham.

Conforme mostra a tabela a seguir Tab. (1), o coeficiente de Cunningham é mais importante para partículas de menor diâmetro. Conforme McMurry (1999), este coeficiente é importante quando o diâmetro da partícula é da mesma ordem de grandeza do caminho livre médio entre as moléculas e corrige a força de arraste agindo sobre as partículas.

É importante destacar que nas simulação da trajetória de partículas os efeitos da gravidade, efeitos de salto e outros efeitos que afetam negativamente o desempenho do instrumento foram desprezados. Além disso, todas as superfícies foram tratadas com uma situação ideal: sempre que a partícula tocar uma superfície, ela adere a esta (coeficiente de restituição zero).

Tabela 1. Características das injeções.

Injeção	Diâmetro ( $\mu\text{m}$ )	Cunningham
A	0,10	2,91
E	0,50	1,33
J	1,00	1,16
O	2,00	1,08
P	2,50	1,07
Q	3,00	1,05
R	4,00	1,04
S	5,00	1,03
T	6,00	1,03
U	7,00	1,02
V	8,00	1,02
W	9,00	1,02
Y	10,00	1,02
X	11,00	1,02
Z	12,00	1,01
AA	13,00	1,01
AB	14,00	1,01
AC	15,00	1,01
AD	16,00	1,01
AE	18,00	1,01
AF	20,00	1,01

A análise da trajetória das partículas comprovou a preocupação com a existência das zonas de recirculação. A figura 7 a seguir mostra um exemplo de trajetória de uma partícula presa numa dessas zonas. Observe que a partícula executa um movimento circular e pode vir a se alojar na parede da placa de orifícios.

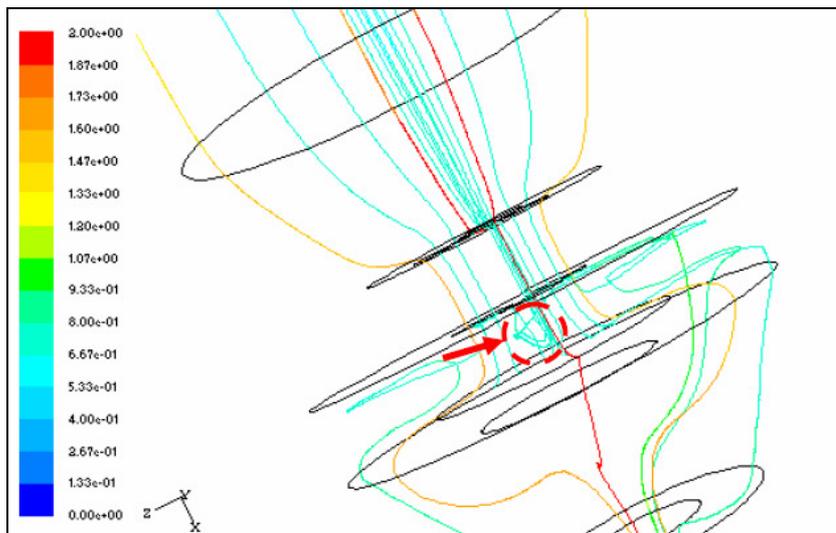


Figura 7. Exemplo da partícula presa numa zona de recirculação. Cada linha representa uma linha de trajetória em função do tempo de residência (s).

Dessa forma, para melhor avaliar a trajetória das partículas, isolamos separadamente cada superfície interna do instrumento e avaliamos o seu poder de reter partículas quando as diferentes condições de injeção eram ativadas. Para facilitar a visualização dessas diferentes superfícies, indicamo-las na figura a seguir (Fig. 8) através de um código de cores.

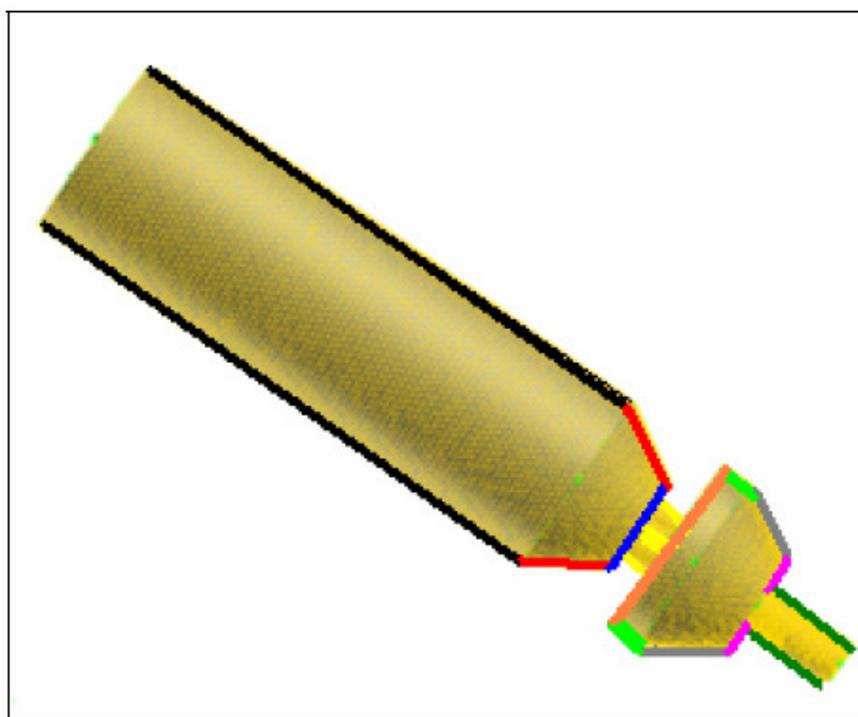


Figura 8. Indicação das paredes do instrumento. Cada cor representa uma parede, por exemplo, amarelo representa as paredes dos orifícios.

Onde, a parede vertical de entrada está em cor negra, o vermelho indica a parede inclinada acima dos orifícios, as cores azul e laranja indicam as paredes horizontais acima e abaixo dos orifícios respectivamente, o amarelo refere-se às paredes dos orifícios propriamente ditos, verde claro indica a parede vertical abaixo dos orifícios, as cores cinza e rosa referem-se às paredes inclinada e horizontal após os orifícios respectivamente e a cor verde escuro representa a parede vertical de saída.

Analisando as superfícies individualmente, observamos que há maior deposição indesejável de partículas nas mais próximas às zonas de recirculação, conforme já era esperado, ou seja, nas paredes superfícies vertical e horizontal logo abaixo dos orifícios e no trecho inclinado em torno da placa de impactação.

É importante destacar que os percentuais de partículas retidas nessas superfícies foi considerado razoável e não chega a afetar o desempenho do instrumento, conforme comprova a curva de eficiência de coleta sobre a placa mostrada na figura a seguir (Fig. 9). A curva de eficiência de coleta do instrumento atendeu às expectativas apresentando um formato S e um diâmetro  $d_{p50}$  equivalente a 9,4  $\mu\text{m}$ .

Fora a questão da deposição indesejável, as zonas de recirculação também causam outro problema, pois funcionam como “prisões” de partículas e, com isso, há partículas que nunca abandonam o domínio durante o cálculo computacional. Estas partículas são indicadas no gráfico da Fig. 9 como tendo trajetórias incompletas, pois não saem e nem se depositam durante o tempo total estabelecido para a integração da equação de trajetória.

No entanto, é importante destacar que é preciso tomar medidas para eliminar, ou pelo menos diminuir estas zonas de recirculação, uma vez que é razoável imaginar que para diâmetros menores haverá menor área para escoamento de fluido dentro do instrumento e, com isso, a probabilidade de deposição indesejável sobre as paredes indicadas seria ainda maior.



Figura 9. Curva de deposição de partículas nas superfícies

Algumas possíveis soluções foram propostas para resolver o problema da deposição. Uma delas consiste em aumentar a região para a circulação de fluido aumentando o diâmetro externo do instrumento, o que reduziria a velocidade do escoamento. Outra opção que está sendo investigada é fazer pequenos furos na placa coletora, fornecendo uma rota de fuga para o escoamento, evitando desta forma as recirculações sobre a placa de coleta. Esta solução, entretanto, por não se ter ainda um resultado definitivo sobre seus efeitos em relação à eficiência de coleta e quanto à deposição indesejável, será apresentada em um trabalho futuro.

Enquanto as simulações fornecem resultados numéricos para o desempenho do instrumento, antes de levá-lo a um campo de amostragem para iniciar a coleta, é preciso levá-lo a um laboratório para calibração. Conforme Costa (2005), no laboratório, utiliza-se um gerador de partículas conhecidas e um amostrador capaz de determinar a concentração de partículas dentro de uma câmara limpa antes e após o instrumento ser utilizado. Com isso, pode-se levantar a curva de eficiência real do impactador que determina o  $d_{p50}$  do instrumento sob as condições controladas impostas e, também, comprovar os resultados obtidos numericamente.

## 5. Conclusão

Neste trabalho avaliamos numericamente a coleta de partículas em um estágio de um impactador inercial em cascata. Verificamos que o instrumento apresenta bons resultados e a diferença entre o valor esperado e o valor encontrado não ultrapassa 10%.

Os resultados numéricos foram considerados muito bons. Além disso, a simulação nos forneceu importantes informações acerca das características do escoamento e da trajetória de partícula, especialmente sobre a formação de zonas de recirculação que poderiam afetar os resultados.

Embora os resultados tenham sido bastante satisfatórios, uma vez que encontramos um diâmetro de coleta  $d_{p50}$  de 9,4  $\mu\text{m}$ , é recomendável propor e implementar modificações no projeto do instrumento a fim de reduzir tais problemas, pois desta forma esperamos encontrar resultados cada vez mais refinados.

## 6. Referências

- Costa C.M.F., 2005, "Projeto, simulação numérica e teste experimental de um impactador inercial em cascata para amostragem de aerossóis atmosféricos". Rio de Janeiro: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- Costa C.M.F., Ledo T.G., Barbosa R.F., Gomes, M.S.P., 2004, "Desenvolvimento de um impactador em cascata de oito estágios para amostragem de aerossóis", ENCIT.
- Costa C.M.F., Gomes M.S.P., 2006, "Projeto, simulação numérica e teste experimental de um impactador inercial em cascata para amostragem de aerossóis atmosféricos. CONEM.
- Costa C.M.F., Gomes M.S.P., 2006, "Design, numerical simulation and experimental evaluation of an inertial impactor used to collect atmospheric aerosols", IAC, Minnesota, USA.
- Gomes, M.S.P., Cardoso, R., 2001. "Flow and particle trajectories simulation within an inertial impactor sampler. COBEM, Rio de Janeiro.
- 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.
- Hinds W.C., 1995, "Aerosol Technology – Properties, Behavior and Measurement of Airborne Particles", John Wiley and Sons, New York.
- Huang C.H., Tsai, C.J., 2001, "Influence of impaction plate diameter and particle density on the collection efficiency of round nozzle inertial impactor." Aerosol Science and Technology. Vol. 36, pages 714-720.
- Kwon S.B., Lim K.S., Lee K.W., 2002, "Effect of the jet configuration on the performance of multi-nozzle impactors. Journal of Aerosol Science. Vol. 33, pages 859-869.
- McMurry P.H., 1999, "A review of atmospheric aerosol measurements". Atmospheric Environment. Vol. 34, pages 1959-1999.

## NUMERICAL ANALYSIS OF FLOW AND PARTICLE TRAJECTORIES WITHIN AN INERTIAL IMPACTOR

Claudia Marcia Ferreira Costa

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

Aline Mendonça Guidry

Departamento de Engenharia Mecânica, PUC-Rio, CEP 22453-900, Rio de Janeiro, RJ, Brasil  
aline\_guidry@yahoo.com

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

Inertial impactors have been widely used in atmospheric studies. Nowadays, the big challenge is to improve the instrument performance by reducing wall losses, creating trapping surfaces with special characteristics and so on.

The main objective of this paper is to present the numerical results describing the flow of air and the particle trajectories obtained for an inertial impactor designed to collect  $\text{PM}_{10}$  particles when operating with 30 lpm and atmospheric pressure.

Our analysis includes velocity and pressure data and a study of wall losses within the instrument. Besides the collection efficiency curve, we identified recirculation regions and their impact on the instrument performance and presented a comparative plot indicating the efficiency for collecting particles in each internal surface of the instrument.

At the end, some modifications on the impactor design were proposed in order to reduce those problems.

Keywords: aerosol, inertial impactor, wall losses, efficiency curve, numerical analysis