



2023  
XXIX **CREEM**

Congresso Nacional de Estudantes de  
Engenharia Mecânica  
Goiânia - GO



XXIX Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica  
12 a 16 de junho de 2023, Goiânia, Goiás, Brasil

## CONCEPÇÃO DE SISTEMA DE GERAÇÃO DE PARTÍCULAS PARA APLICAÇÃO EM VELOCIMETRIA POR IMAGEM DE PARTÍCULAS EM TÚNEL DE VENTO

Gilmara Batista Peixoto, [gilmara\\_batista@discente.ufg.br](mailto:gilmara_batista@discente.ufg.br)<sup>1</sup>  
Sigeo Kitatani Junior, [sigeojr@ufg.br](mailto:sigeojr@ufg.br)<sup>1</sup>  
Anderson Gomes Girardi, [andersongomes@ufg.br](mailto:andersongomes@ufg.br)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Goiás, Av. Esperança, s/n - Chácara de Recreio Samambaia, Goiânia - GO, 74690-900

**Resumo.** A técnica de Velocimetria por Imagem de Partículas será adotada para realizar a instrumentação de um túnel de vento aberto, onde ocorrerão análises para avaliar o potencial eólico em terrenos abertos para a empresa Furnas Centrais Elétricas S. A. O objetivo central do trabalho é viabilizar a implementação deste método de medição de velocidade, com a construção de um sistema de geração de partículas, para transportar as partículas traçadoras sólidas do ambiente externo para o interior do túnel de vento. Para isso foi utilizado o método de leito fluidizado. O sistema construído atende a finalidade apresentada, porém ainda é necessário realizar a integração com o túnel de vento para encontrar determinadas variáveis, como a máxima vazão em massa, ainda em aberto.

**Palavras chave:** Gerador de partículas. Partículas traçadoras. PIV. Leito fluidizado. Instrumentação.

**Abstract.** The technique of Particle Image Velocimetry will be implemented for an instrumentation of an open wind tunnel, where the objective of operating an open electric terrain for a Furnas Centrais electrical work company is feasible for a company. of artificial speed with the construction of a particle transmission system for the continuous particle generation environment or for the interior of the external wind tunnel. For this, the fluidized bed method. The planned system served the purpose presented, but it is still necessary to carry out with the wind to find variables, the maximum mass flow, still open.

**Keywords:** Particle generator. Tracer particles. PIV. Fluidized bed. Instrumentation.

### 1. INTRODUÇÃO

A Universidade Federal de Goiás possui uma parceria com a empresa Furnas Centrais Elétricas S. A. para a realização de estudos a respeito do potencial eólico em terrenos abertos, para isso a empresa disponibilizou um túnel de vento aberto para realização de análises experimentais.

Na realização destes experimentos é necessário conhecer parâmetros como a velocidade do fluxo de ar, dentro do túnel de vento, e para isso são utilizados medidores de velocidade como o tubo de pitot e anemômetros, todavia, esses equipamentos medem valores pontuais de velocidade, portanto, não são capazes de traçar diretamente todo o perfil de velocidade do escoamento.

Logo, é preciso que haja a instrumentação do túnel de vento, como uma técnica que forneça informações sobre o perfil de velocidade do escoamento, para isso existe uma técnica de medição de velocidade, chamada de Velocimetria por Imagem de Partícula (PIV, do inglês, Particle Image Velocimetry).

O PIV é um método óptico minimamente invasivo, que permite visualizar e analisar o escoamento a partir do movimento de partículas em um fluido, podendo elas ser líquidas ou sólidas. Nessa técnica, o escoamento contendo as partículas é iluminado por um sistema de laser, de forma que elas sejam visíveis. Em seguida, imagens do movimento das partículas são capturadas por câmeras, de alta definição e frequência, e posteriormente, elas passam pela etapa de processamento e análise. Este movimento é usado para calcular o campo de velocidades do escoamento estudado, portanto é considerado que as partículas possuem a mesma velocidade do escoamento presente no interior do túnel de vento onde serão inseridas.

Para que as partículas sejam inseridas no escoamento é preciso que exista um sistema de geração de partículas capaz de transportá-las do ambiente externo para o interior do túnel de vento, e visando esta necessidade foi desenvolvido este estudo, com o propósito de construir um sistema para a geração de partículas, com foco nas partículas sólidas.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1. Definição do equipamento

Para definição do tipo de equipamento, foi feita a revisão bibliográfica com foco em tipos de mecanismos já existentes utilizados para a geração de partículas sólidas, dentre os sistemas encontrados foi analisado, principalmente, a quantidade de componentes e a simplicidade geométrica.

Contudo, para atender ao objetivo de forma simples e eficaz o sistema construído utiliza como modelo o gerador de partículas sólidas proposto por Raffel et al. (2007), ilustrado pela Fig. 1, com adaptações para a problemática em estudo e seguindo os objetivos traçados para esse trabalho.

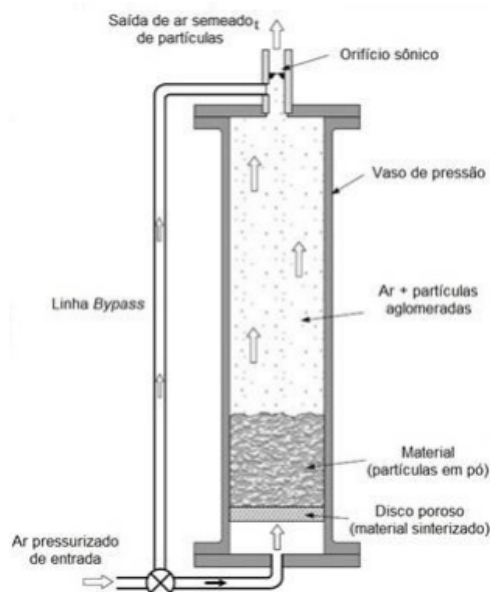


Figura 1. Dispositivo de sementeira de leito fluidizado para aplicações de alta pressão (Raffel et al., 2007)

### 2.2. Proposta de dimensionamento do sistema de geração de partículas

De acordo com o modelo escolhido para aplicação no projeto, foi proposto um esboço preliminar do gerador de partículas para ser utilizado como ferramenta de análise inicial dos componentes que precisam ser desenvolvidos para o sistema, mostrado na Fig. 2. Partindo das informações adquiridas, o passo seguinte foi o de estabelecer parâmetros de projeto.

O dimensionamento dos componentes do gerador de partículas baseado no princípio de leito fluidizado, deve seguir alguns parâmetros de projeto, como o escoamento compressível, com número de Mach igual a 1, para que atinja velocidade sônica na saída do gerador, portanto deve ser utilizada a teoria clássica de mecânica dos fluidos, além de escolher a máxima vazão em massa baseada em um equipamento de geração de partículas disponível no mercado e dimensionar os componentes com base no diâmetro encontrado para a placa porosa, placa esta que não será fabricado na Universidade Federal de Goiás, contudo deve-se adequar os demais componentes as suas dimensões.

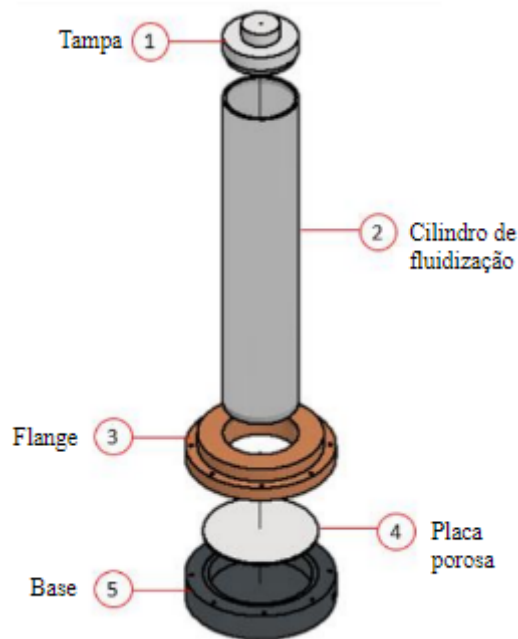


Figura 2. Esboço preliminar do gerador de partículas

### 2.2.1 Método para dimensionamento do orifício sônico

Da mesma forma como Raffel propôs, deve ser projetado um orifício sônico usando a teoria clássica de mecânica dos fluidos. Para a construção do leito, no interior do dispositivo as partículas estão inseridas em um escoamento considerado compressível, onde foi adotado número de Mach igual a 1 visando as características do escoamento transônico, em que as ondas de choque se iniciam, dividindo regiões subsônicas e supersônicas do escoamento para que as partículas atinjam a velocidade necessária na saída do gerador.

Para que a velocidade sônica fosse alcançada, foi necessário o estudo da Eq. (1), apresentada por White, (2011), que indica que  $dV$  só pode ser finito quando  $dA$  for igual a zero, ou seja, uma área mínima (garganta) ou uma área máxima (abaulamento). (White, 2011)

Com base nessa análise conclui-se que é necessário a construção de uma espécie de bocal convergente para que as partículas, que inicialmente se encontram no interior do gerador, atinjam a velocidade ideal na saída dele. Assim, foi preciso encontrar o diâmetro ideal para atingir a área mínima para o orifício sônico. Para isso utiliza-se a Eq. (2) de máxima vazão em massa combinada com a Eq. (3) referente a área da circunferência.

$$\frac{dV}{V} = \frac{dA}{A} \frac{1}{Ma^2 - 1} = - \frac{dp}{\rho V^2} \quad (1)$$

$$m_{\text{máx}} = \frac{0,6847 p_0 A^*}{\sqrt{(RT_0)}} \quad (2)$$

$$A^* = \frac{\pi d^2}{4} \quad (3)$$

Onde,  $V$  é a velocidade do escoamento (m/s),  $A$  é a área (m<sup>2</sup>),  $Ma$  é o número de Mach,  $\rho$  é a massa específica do fluido (kg/m<sup>3</sup>),  $m_{\text{máx}}$  é a máxima vazão em massa (kg/s),  $p_0$  é a pressão absoluta no interior do gerador (Pa),  $T_0$  é a temperatura no interior do gerador (K),  $R$  é a constante universal dos gases (J.kg.K<sup>-1</sup>),  $A^*$  é a área do furo de saída (m<sup>2</sup>) e  $d$  é o diâmetro de saída (m).

### 2.3. Método para estimativa de perda de carga

Na aplicação do método de transporte de partículas por leito fluidizado, as principais perdas de carga do sistema, são atribuídas a placa porosa e as partículas traçadoras, depositadas sobre a placa. Essas perdas reduzem a pressão interna no momento do transporte das partículas, diminuindo assim a eficiência do dispositivo, portanto, é necessário avaliar e quantificar essa perda de carga resultante.

Para identificar a perda de carga proveniente das partículas traçadoras, será utilizado o método numérico, através da Eq. (4), e para a aplicação desta equação será utilizada a Eq. (5) para calcular a porosidade, além da Eq. (6) para encontrar a massa específica das partículas.

Para a perda a placa porosa, serão realizados experimentos após a construção do dispositivo, onde será medido com auxílio de um manômetro convencional e um manômetro diferencial, a diferença de pressão entre a base e a tampa do gerador, imediatamente antes do orifício sônico, e neste caso a perda de carga do cilindro de fluidização será considerada desprezível.

$$\frac{\Delta P}{L} = (\rho_p - \rho)(1 - \varepsilon) g \quad (4)$$

$$\rho = \frac{m}{U} \quad (5)$$

$$\varepsilon = \frac{U_v}{U_t} \quad (6)$$

Onde,  $\Delta P$  é a perda de carga (Pa),  $\rho_p$  é a massa específica da partícula ( $\text{kg/m}^3$ ),  $g$  é a aceleração da gravidade ( $\text{m/s}^2$ ),  $m$  é a massa (kg),  $U$  é o volume ( $\text{m}^3$ ),  $\varepsilon$  é a porosidade,  $U_v$  é o volume de espaço vazio ( $\text{m}^3$ ) e  $U_t$  é o volume total ( $\text{m}^3$ ).

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Dimensionamento do sistema de geração de partículas

Seguindo a metodologia apresentada para o dimensionamento dos componentes, foram definidos os parâmetros de projeto, para a máxima vazão em massa adotada foi a mesma de um gerador de aerossol, modelo HSBRG da marca Vectus, de aproximadamente a  $4,6\text{E}(-3)$  kg/s, porém ressalta-se que a vazão real do gerador de partículas será conhecida apenas após a interação com o túnel de vento.

Em relação a condição do escoamento compressível, com número de Mach igual à 1, será construído um bocal sônico, e os valores do diâmetro de saída deste bocal dependem da pressão no interior do cilindro de fluidização, e encontram-se na Tab. 1.

Já a placa porosa foi o primeiro item escolhido, essa escolha foi feita após a análise de informações disponibilizada por fornecedores, a empresa selecionada foi a EG Filtros EireliMe que realizou a doação de três placas para o projeto, a primeira com 155 mm de diâmetro e 3 mm de espessura, a segunda com 160 mm de diâmetro e 6 mm de espessura, e a terceira com 280 mm de diâmetro e 6 mm de espessura. Onde a placa porosa destinada ao gerador de partículas foi a primeira citada, com essa definição foi possível realizar o dimensionamento dos outros componentes, e o material cuja placa porosa é feita é chamado de Polietileno Sinterizado.

A tampa do gerador de partículas foi dimensionada com orifício sônico de 2 mm e ângulo de  $30^\circ$ , altura de 52 mm, diâmetro externo de 102 mm e para facilitar a montagem foi feita uma rosca externa. E o material escolhido foi o Polióxido de Metileno, conhecido como Poliacetal, sua escolha se deve pelo fato de atender as propriedades necessárias especificadas na “seção 2”.

As dimensões do cilindro de fluidização foram escolhidas com base no diâmetro de 155 mm da placa porosa e com a disponibilidade comercial, a altura definida foi de 500 mm, 102 mm de diâmetro externo e 4 mm de espessura. Para a montagem foram feitas roscas nas extremidades da peça. Quanto ao material inicialmente foi escolhido o acrílico, porém devido a indisponibilidade da peça no comércio local e o prazo de fabricação e entrega por fornecedores de outras regiões ser incompatível com a cronograma do projeto o material foi substituído pelo alumínio por ser leve, resistente à corrosão e de baixo custo.

A flange foi dimensionada com 202 mm de diâmetro externo, diâmetro interno de 102 mm, altura de 40 mm, com rebaixo de 1,5 mm para encaixe da placa, rosca interna para fixação do cilindro e com oito furos para os parafusos que farão a ligação com a parte inferior. Como material, utilizou-se novamente o Poliacetal.

A base do gerador de partículas foi dimensionada com 202 mm de diâmetro externo, 38 mm de altura, rebaixo de 1,5 mm para encaixe da placa porosa e com seis furos com rosca interna para a união dos componentes. A entrada de pressão será por rosca de  $\frac{1}{4}$  NPT cônica, e ocorrerá em um ponto na lateral da peça, no modelo de Raffel a entrada de pressão é localizada no centro da face inferior, essa modificação foi feita para que não houvesse a concentração de pressão no centro da placa porosa, desta forma a fluxo ar será distribuído de forma uniforme.

#### 3.2. Diâmetro de saída do gerador de partículas

De acordo com a metodologia apresentada na “seção 2” foram realizados os cálculos de estimativa do diâmetro do orifício sônico presente na etapa de dimensionamento. Para o valor da temperatura no interior do gerador ( $T_0$ ), foi

considerado que durante o processo de transporte das partículas não havia variação da temperatura, portanto considerou-se a temperatura inicial de 300 K. Para máxima a vazão em massa ( $m_{máx}$ ) adotou-se o valor aproximado da vazão de um gerador de partículas líquidas de  $4,6E(-3)$  kg/s. E para a constante universal dos gases (R) o valor de  $287,0530 \text{ J.kg.K}^{-1}$ .

Em relação a pressão, o gerador de partículas é submetido a uma pressão absoluta de entrada que pode variar de 101 kPa à 401 kPa, porém esta pressão de entrada não é igual a pressão encontrada no interior do gerador, pois após a pressão ser inserida no sistema o fluxo de ar passa através da placa porosa e pelas partículas traçadoras, onde há uma grande perda de carga, portanto a pressão é reduzida. Tendo em vista a perda de carga, o diâmetro do orifício sônico foi calculado para os valores de pressão de entrada possíveis, e o resultado é mostrado na Tab. 1.

Tabela 1. Diâmetro do orifício sônico em função da pressão absoluta interna

Pressão absoluta (kPa)	Diâmetro (mm)
101	5,003
201	3,546
301	2,898
401	2,511

Analisando os resultados presentes na Tab. 1, observa-se que a pressão interna presente no gerador de partículas é inversamente proporcional ao diâmetro do orifício sônico, ou seja, quanto maior for a pressão menor será o diâmetro, porém não trata-se de uma relação linear.

### 3.3. Estimativa de perda de carga do sistema

Para a perda associada às partículas sólidas, foi considerado que elas ocupam 30 mm do comprimento do cilindro de fluidização, e o valor usado para a massa específica do ar foi de  $4,66 \text{ kg/m}^3$  a 300 K de temperatura. O resultado encontrado foi de 1243,52 Pa, e não foi considerada a diminuição dessa perda com a redução da quantidade de partículas no interior do gerador durante o transporte dessas partículas.

Em relação a perda de carga da placa porosa foram realizados os experimentos, como mostra a Fig. 3, e os resultados obtidos para a perda de carga da placa porosa encontram-se na Tab. 2.



Figura 3. Experimento para medir perda de carga

Tabela 2. Perda de carga da placa em função da pressão de entrada

Pressão de entrada (psi)	Pressão de entrada (kPa)	Perda de carga (kPa)
7,4	51,02	2,22
14,5	99,97	2,60
21,5	148,24	2,71
28,2	194,43	2,76

### 3.4. Fabricação dos componentes e montagem do gerador de partículas

Para a fabricação dos componentes do gerador de partículas foram usados métodos de usinagem convencional. A parte superior, a placa de união e a parte inferior, todas feitas de poliacetal, foram usinadas pelo processo de torneamento, assim como foram fabricadas as roscas encontradas na parte superior, na peça de união e no cilindro de fluidização. Para os furos foi utilizada uma furadeira de bancada e para as roscas dos furos usou-se um macho. Após a fabricação, as peças foram montadas e o resultado é mostrado pela Fig. 4.

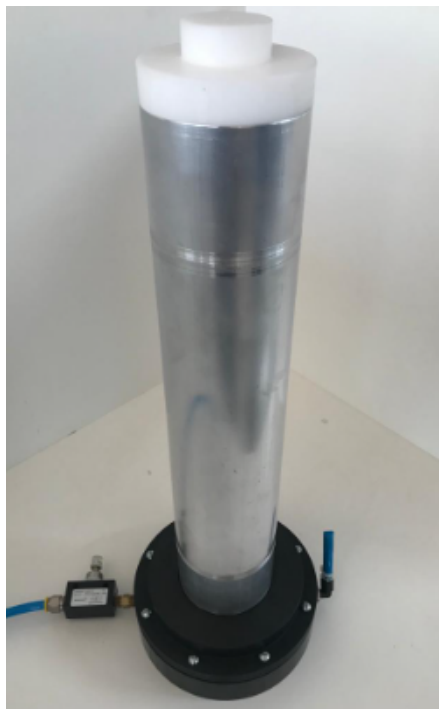


Figura 4. Gerador de partículas construído

### 3.5. Teste do sistema de geração de partículas

Inicialmente foram feitos testes sem a adição de partículas traçadoras. Como resultado desses primeiros testes verificou-se a necessidade da colocação de uma válvula unidirecional na entrada do ar que realizará a fluidização no gerador de partícula, para evitar o retorno de determinada quantidade de ar para a tubulação evitando a flutuação da pressão observada experimentalmente, o que provocava instabilidade no fluxo do gerador.

Em seguida, notou-se que entre o cilindro de fluidização e a peça de união havia vazamento de ar, ou seja, a rosca fabricada para a união das peças não foi o suficiente para exercer a estanqueidade necessária entre as partes, além disso a rosca não possuía resistência mecânica suficiente a ser submetida a surtos de pressão, assim, optou-se pela vedação com a utilização de resina epóxi, já que não existe a necessidade de desmontar estes componentes.

Após a cura completa da resina epóxi foram feitos testes para verificar o funcionamento do gerador de partículas, aplicando a técnica PIV foram adicionadas partículas de quartzo ao sistema, por apresentar baixo custo, além de pressão de entrada de 1 bar e utilizado uma câmera de alta definição e alta taxa de amostragem. A partir deste aparato, foi

possível capturar o registro da imagem com o fluxo de partículas saindo do bocal sônico, na parte superior do gerador, como mostra a Fig 5.

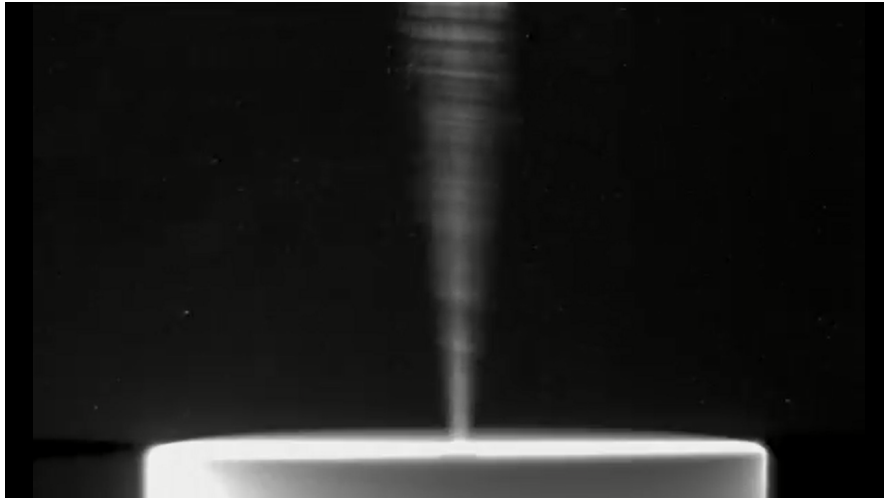


Figura 5. Jato de ar com partículas de quartzo provocado pelo bocal sônico, na saída do gerador de partículas

#### 4. CONCLUSÃO

O estudo relacionado aos tipos de mecanismos passíveis a serem utilizados no projeto permitiu, além de conhecer os tipos de gerador de partículas, encontrar aquele que iria atender a aplicação requerida de forma, assim a opção escolhida foi o sistema apresentado por Raffel, baseado no princípio de fluidização.

O modelo de geração de partículas adotado para uso no projeto não foi reproduzido fielmente, o projeto desenvolvido neste estudo buscou atender a aplicação proposta da melhor forma, reduzindo custo, tempo de fabricação e com maior eficiência. Portanto, o dimensionamento dos componentes, assim como a modelagem em CAD, passou por várias alterações até que fosse encontrado o resultado desejado no projeto.

A estimativa da perda de carga do sistema não foi prevista no plano de trabalho, contudo devido à relevância foi adicionada ao estudo. Assim, observou-se que a perda de carga provocada pela placa porosa é maior que a perda gerada pelas partículas sólidas, onde a perda relacionada a placa de polietileno sinterizado varia de forma parabólica com o aumento da pressão de entrada, e a perda encontrada para as partículas não considera a sua variação ao longo do tempo com a diminuição das partículas traçadoras dentro do cilindro de fluidização. Além disso, a perda de carga das singularidades como tubulações, válvulas e bocal sônico não foi estimada.

Além do sistema de geração de partículas, também foi proposto no plano de trabalho a elaboração da proposta, desenvolvimento e modelagem em CAD de um sistema de integração do gerador ao túnel de vento, porém esse objetivo não foi concluído devido ao tempo insuficiente disponível no cronograma de trabalho, e este fato impactou a determinação da máxima vazão em massa real do gerador construído, que se encontra como uma variável desconhecida.

A análise de concentração de partículas traçadoras transportadas, também não foi estimada, por ter que ser realizada de forma experimental, visto que não foram encontradas formas analíticas de estimar esta concentração, e a solução conhecida, até o momento, trata-se da utilização de um dispositivo, chamado contador de partículas, que a Escola de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Goiás não possui.

Em suma, apesar dos desafios encontrados, o propósito de construir um sistema de geração de partículas sólidas para uso da técnica de Velocimetria por Imagem de Partículas em túnel de vento aberto foi atingido.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à empresa Furnas Centrais Elétricas S. A. pelo suporte financeiro e à empresa EG Filtros Eireli-Me pela adoção das placas de Polietileno Sinterizado.

#### 6. REFERÊNCIAS

- Raffel, M., Willert, C., Wereley, S. e Kopenhans, J. 2007. Particle Image Velocimetry: A practical Guide. Springer, 2ª edição.
- White, F.M. 2011. Mecânica dos Fluidos. LTC, São Paulo, 6ª edição.

## **7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES**

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.