



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

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE ESCOAMENTOS SOBRE RESSALTO QUADRADO NO INTERIOR DE DUTO

Julia Jorge Bastos, julia.jorge@discente.ufg.br¹
Jéssica Luana da Silva Santos, santosjessica@discente.ufg.br¹
Andreia Aoyagui Nascimento, aanascimento@ufg.br¹

¹Universidade Federal de Goiás, Goiás – UFG – Avenida Esperança s/n, Campus Samambaia, Goiânia – GO, 74690-900.

Resumo. Mediante à importância de estudar a dinâmica dos fluidos e os impasses em realizar experimentos nesse âmbito, faz-se relevante desenvolver meios computacionais para visualizar escoamentos, que sejam eficientes e ofereçam resultados suficientemente próximos à realidade. Dito isso, este trabalho consiste em verificar a metodologia IMERSPEC 2D, a qual combina os métodos pseudospectral de Fourier e da fronteira imersa para simular as condições de contorno, a partir da simulação de um escoamento laminar e bidimensional entre duas placas sobre um ressalto de seção transversal quadrada. O objetivo é validar a metodologia e a independência dos resultados do refinamento do número de divisões do domínio físico. Os resultados apresentados no presente trabalho mostram os campos de velocidade obtidos de quatro simulações com pontos de colocação diferentes e os resultados experimentais do trabalho de Onur e Baydar (1992), utilizado como referência, são comparados. Foi possível observar que a proposta oferece aproximação satisfatória à realidade nas condições propostas.

Palavras chave: método pseudoespectral de Fourier, validação numérica, escoamento sobre obstáculo, método da fronteira imersa, método directing-force.

Abstract. Due to the importance of studying the dynamics of fluids and the impasses in carrying out experiments in this context, it is relevant to develop computational means to visualize flows that are efficient and can offer results that are sufficiently close to reality. That said, this work consists of verifying the IMERSPEC 2D methodology, which combines Fourier pseudospectral and immersed boundary methods to simulate the boundary conditions, based on the simulation of a laminar and two-dimensional flow between two plates over a square cross section ledge. The objective is to validate the methodology and the independence of the results by refining the division number of the physical domain. The results presented in the present work show the velocity fields obtained from four simulations with different placement points and the experimental results by Onur and Baydar (1992), that was used as a reference, are compared. It was possible to observe that the proposal offers a satisfactory approximation to reality under the suggested conditions.

Keywords: Fourier's pseudospectral method, numerical validation, flow over obstacle, immersed boundary method, directing-force method.

1. INTRODUÇÃO

Dentre as importantes atividades desempenhadas pela sociedade moderna, pode-se destacar as atividades associadas aos fluidos, e especialmente ao movimento deles. Podemos destacar a extração de petróleo e gás natural, as quais incluem o transporte de produtos e subprodutos por meio de dutos; o estudo do sistema cardio respiratório humano, que consiste em fluxos de ar e sangue pelas vias aéreas e sistema circulatório; no âmbito energético, a geração de energia por usinas eólicas, as quais aproveitam a energia contida na movimentação dos ventos, e tem sido uma alternativa

sustentável e promissora para contribuir com a demanda de energia exigida em razão do avanço tecnológico. Visto isso, existe a necessidade de estudar os escoamentos de fluidos e o fomento de novos métodos mais eficientes para tal.

O interesse em estudar escoamentos internos já tem sido manifestado em trabalhos posteriores: Freitas, et al, 2019, concluiu que a eficiência de um sistema de alimentação de sólidos industrial, o qual consistia em um alimentador protótipo, denominado Batchpump, e um duto de 3 polegadas de diâmetro, é proporcional à pressão de operação do sistema, tendo, posteriormente, experimentado o Batchpump a fim de comparar sua eficiência com outros equipamentos mais usuais (Freitas, et al, 2021)

Mais tarde, Freitas, et al, 2022, por meio de um método sistemático restrito às variáveis pressão e fluxo de ar, buscou otimizar um sistema transportador pneumático de particulados finos de calcário, visando a aplicação industrial desse processo.

Peskin (1972), com o objetivo de simular o escoamento viscoso e incompressível sobre válvulas cardíacas, desenvolveu o método da fronteira imersa. Esse método separa o fluido e a geometria imersa em dois domínios e, através das equações de Navier-Stokes e da continuidade, modela as condições de contorno e a interação fluido-estrutura.

Lima e Silva, et al, 2003, utilizaram o método da fronteira imersa para estudar o escoamento bidimensional e uniforme sobre um cilindro, de forma que não houvesse escorregamento na interface fluido-cilindro nem constantes de ajuste. Essa metodologia, chamada de “Physical Virtual Model” (PVM), se mostrou apropriada para simulações de escoamentos viscosos, incompressíveis e instáveis, e promissora para simular fluxos sobre outras geometrias.

Mais recentemente, Mariano, et al, 2022, combinaram o método pseudoespectral de Fourier e o método da fronteira imersa para analisar escoamentos sobre geometrias complexas com condições de contorno não periódicas. Tal metodologia foi denominada IMERSPEC2D, e mostrou resultados de acurácia satisfatória para simulações bi e tridimensionais, além de dispensar sistemas lineares para encontrar o campo de pressão, o qual adquiriu ordem de convergência maior que a usual.

O presente trabalho tem como objetivo validar o escoamento incompressível no interior de um duto de seção retangular sobre um ressalto de seção transversal quadrada utilizando a metodologia IMERSPEC 2D. O presente trabalho faz uso do código *in house*, bidimensional e verificado. Os resultados apresentados são analisados e comparados com os resultados obtidos por Onur e Baydar (1992).

Onur e Baydar (1992) realizaram experimentos em um túnel de vento retangular para observar o comportamento do escoamento laminar e bidimensional sobre um degrau quadrado e, com os dados recolhidos, compararam com resultados numéricos obtidos das equações de Navier-Stokes e da continuidade, e concluíram boas coerências nas zonas de recirculação próximas ao degrau.

2. METODOLOGIA

O problema físico consiste em um ressalto de seção transversal quadrada fixado na parede inferior de um duto retangular. O sistema modelado está representado na Figura 1, onde pela zona de forçagem, Z_f , é inserido o perfil velocidade desenvolvido na entrada do duto e velocidade nula nas demais partes; zona de Buffer, ou de amortecimento, Z_b , a qual amortece as instabilidades provindas da condição de periodicidade imposta diretamente ao método pseudoespectral de Fourier, uma vez que as fronteiras são periódicas; a geometria do duto é realizada pelo método da fronteira imersa, com velocidade nula na parede do duto à uma distância d , e o bloco de lado h visto pelo escoamento como o ressalto.

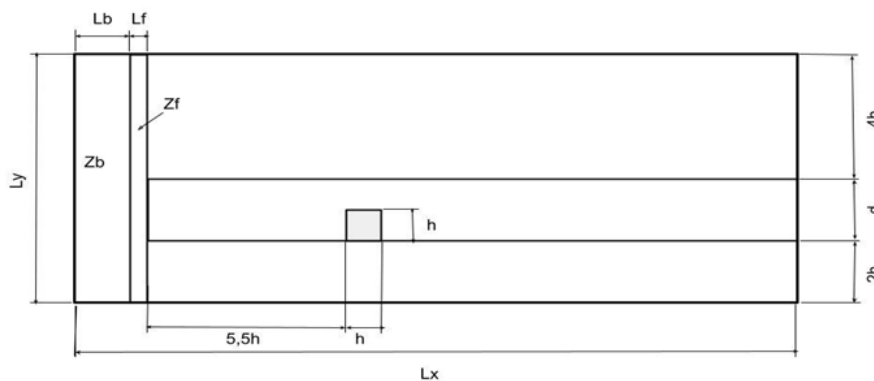


Figura 1. Representação do sistema (Próprio autor)

As grandezas referentes ao modelo físico são adimensionais e relativas à altura h do bloco e estão apresentadas na Tabela 1.

O número de Reynolds, Re , Eq. (1), é igual à 200, sendo U_∞ a velocidade na entrada do duto inserida pela zona de forçagem; d é a distância entre as placas e ν a viscosidade cinemática do fluido. Os valores adotados para essas propriedades também estão presentes na Tabela 1. Dito isso, o escoamento é considerado laminar.

Tabela 1. Tabela de especificações do sistema (Próprio autor)

Símbolo	Descrição	Valor
h	Altura do bloco [m]	1,0
U_∞	Velocidade máxima na entrada do duto [m/s]	1,0
ρ	Massa específica do fluido [kg/m ³]	1,0
Lx	Comprimento adimensional do domínio	20,0h
Ly	Altura adimensional do domínio	8,0h
Lb	Comprimento adimensional da Zona de Buffer	1,5h
D	Distância entre as placas	2h
Lf	Comprimento adimensional da Zona de forçagem	0,5h

$$Re = U_\infty d/\nu \quad (1)$$

A metodologia utilizada para a simulação do escoamento, chamada de IMERSPEC2D, consiste no acoplamento dos métodos pseudoespectral de Fourier e da fronteira imersa. As hipóteses simplificadoras se aplicam para a solução de escoamento incompressível, viscoso, bidimensional, sem transferência de calor, completamente desenvolvido, de propriedades constantes e em regime transiente.

O método pseudoespectral de Fourier utiliza das equações de Navier-Stokes, Eq. (2), e da continuidade, Eq. (3), onde u representa a velocidade, t a variável tempo, p a variável pressão, ν a viscosidade, ρ a massa específica e f_i , Eq. (4), o termo fonte da equação. As equações estão escritas na forma tensorial, podendo i e j assumir valores 1 e 2, os quais são equivalentes às direções x e y , respectivamente.

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial(u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \left(\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2 \partial x_j^2} \right) + \frac{1}{\rho} f_i \quad (2)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_j} = 0 \quad (3)$$

$$f_i(x, t) = \{F_i(x_k, t)\} \text{ se } x = x_k \text{ 0 se } x \neq x_k \quad (4)$$

O termo-fonte é por onde a geometria imersa no fluido é inserida por meio da fronteira imersa, portanto, a velocidade é igual a zero onde os pontos do domínio euleriano são coincidentes com os pontos do domínio lagrangiano. Essa relação está explicitada na Eq. (4), onde x são os pontos eulerianos e x_k são os pontos lagrangianos, e é não nula apenas nos pontos coincidentes.

Para a solução das equações por meio da metodologia IMERSPEC 2D realiza-se a transformada de Fourier nas Eq. (2) e Eq. (3) por meio da Transformada de Fourier Discreta (*Discrete Fourier Transform - DFT*), Eq (5) e Eq. (6). Ao transformar a Eq. (3) é possível obter um plano, denominado π ou plano de divergência nula, onde são projetados todos

os termos da Eq. (2), a fim de manter a conservação da massa. A representação da projeção dos termos no plano π encontra-se na Figura 2.

$$\frac{\partial \hat{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial(\hat{u}_i \hat{u}_j)}{\partial x_j} = -ik_i \hat{p} - vk^2 \hat{u}_i \quad (5)$$

$$ik_j \hat{u}_j = 0 \quad (6)$$

Tal que k é o número de onda, parâmetro de transformação espacial de Fourier e $i = \sqrt{-1}$ é o número imaginário.

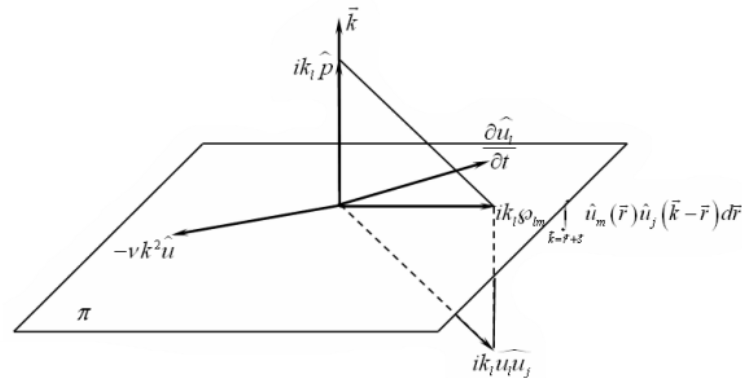


Figura 2. Ilustração do plano π (Mariano, 2007)

Uma das vantagens de resolver a equação de Navier-Stokes Eq. (2) usando o método pseudoespectral de Fourier está no desacoplamento do termo de pressão, pois sua projeção no plano π é um ponto. Dessa forma, não é necessário utilizar outros métodos para solução de sistemas lineares que, frequentemente são usados nos métodos de volumes finitos e no método das diferenças finitas (Fortuna, 2000), sendo essa variável resultado do pós processamento.

Outra vantagem da metodologia IMERSPEC 2D é a substituição da integral de convolução provinda da transformada do termo não linear da Eq. (2), por produto de variáveis entre o domínio físico e no domínio espectral. O algoritmo usado para a solução da integral de convolução está apresentado em detalhes em Mariano (2011) e Canuto (2006).

As etapas do algoritmo se resumem basicamente em:

- 1 - Transformação do campo velocidade inicial por meio da FFT;
- 2 - Projeção do campo velocidade transformado no plano π ;
- 3 - Obtenção do parâmetro temporário;
- 4 - Aplicação da transformada inversa em \hat{u} advindo do termo $-vk^2 \hat{u}$;
- 5 - Cálculo da força lagrangiana F_i ;
- 6 - Cálculo da força euleriana f_i nos pontos coincidentes;
- 7 - Projeção de f_i no plano π ;
- 8 - Tendo o parâmetro temporário e a força euleriana, atualiza-se o campo velocidade;
- 9 - Retorna ao início.

O processo de atualizar a velocidade por meio das informações do campo de força é chamado de *Direct Forcing method*, ou método da imposição direta. Vale salientar que o algoritmo IMERSPEC 2D encontra-se descrito com mais detalhes por Mariano (2011)

A discretização do domínio foi realizada definindo um determinado número de pontos de colocação N_x no eixo X, e N_y no eixo Y, tal que os pontos sejam equidistantes e respeitem a proporção L_x/L_y definida anteriormente no sistema físico.

Usou-se para a discretização temporal o método de Runge-Kutta de quarta ordem e 6 passos (Nascimento, et al, 2020).

As simulações foram executadas até que se ultrapassasse o tempo físico t de 5 segundos, o qual é adimensionalizado pela Eq. (7), sendo t^* o tempo adimensional igual a 5, U_∞ a velocidade na entrada do duto e h a altura do bloco.

$$t^* = tU_\infty/h \quad (7)$$

2. RESULTADOS

Na Figura 3, a imagem à direita está mostrando o campo de velocidade transiente, destacando a formação estrutural a jusante do corpo imerso, por meio da linha de corrente, para o domínio $N_x = 640$ e $N_y = 256$. A imagem à esquerda da Figura 3 são fotos produzidas a partir do experimento realizado por Onur e Baydar (1992) e são usadas para comparação.

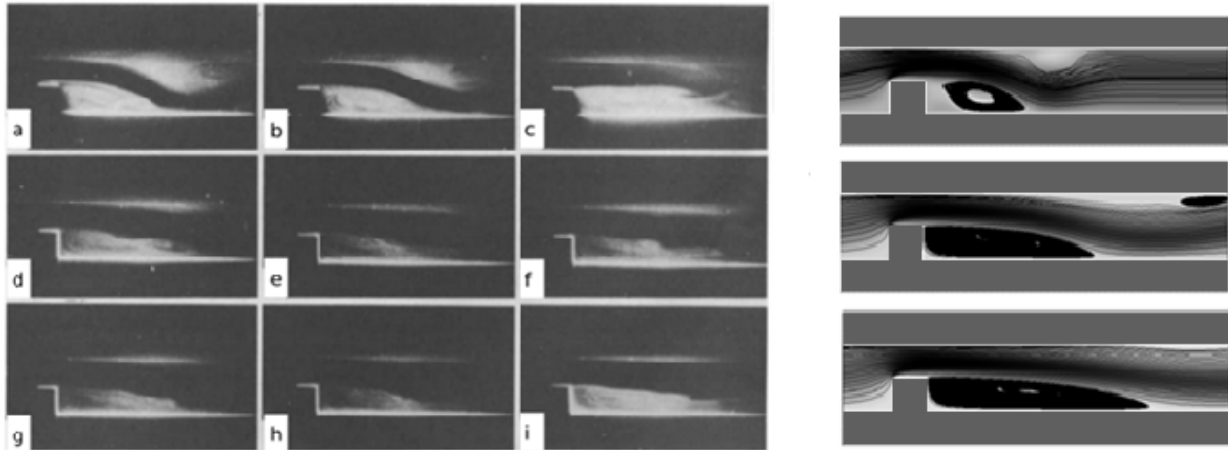


Figura 3. Imagens retiradas de Onur e Baydar (1992) à esquerda e à direita evolução temporal (Próprio autor)

Na Figura 3, as zonas de recirculação em ambas as imagens são visíveis em ambas as imagens, e suas variações com relação ao tempo também. Inicialmente, formam-se duas zonas de recirculação sendo, uma logo após o obstáculo, e outra próxima à parede superior. Com o avançar do tempo, a instabilidade superior diminui consideravelmente a espessura e comprimento, enquanto a recirculação após o obstáculo tem seu comprimento elevado.

Essas recirculações aparecem devido a condição de não escorregamento entre a interface fluido-parede, definido inicialmente pelo método de fronteira imersa na simulação numérica. Como a velocidade na fronteira é igual a zero, o fluido próximo à fronteira e ao obstáculo tende a desacelerar, o que induz o fluido a circular em direção a parede inferior, formando assim uma instabilidade que rotaciona no sentido horário. Ao comparar as imagens da Figura 3, nota-se grande similaridade qualitativa no comportamento do escoamento como um todo, principalmente na posição das instabilidades.

Posteriormente, outros três testes foram realizados, alterando-se apenas o número de pontos de colocação a fim de avaliar a independência dos resultados ao refinamento da malha. Constam na Tabela 2 o número de pontos de colocação de cada simulação e tempo computacional gasto para simular 5 segundos adimensionais.

Tabela 2. Especificações das simulações (Próprio autor)

Simulação	N_x	N_y	Tempo computacional aproximado (min)
1	640	256	6233
2	160	64	2639
3	320	128	4048
4	1280	512	15573

Observando a Tabela 2, pode-se notar que ao dobrar o número de pontos, de 640×256 para 1280×512 , o tempo computacional gastos aumenta aproximadamente 2,5 vezes. Para o número de pontos 320×128 , o qual corresponde a metade dos pontos da simulação 1, o tempo gasto foi 1,5 vezes menor. Ao reduzir o número de pontos para a terça parte, de 640×256 para 160×64 , o tempo computacional diminuiu 2,4 vezes aproximadamente.

No tempo adimensional igual a 5 foram extraídos perfis velocidade de cada simulação nas posições $x = 2,0$, $x = 6,5$, $x = 8,0$, $x = 9,5$ e $x = 11,5$, os quais exibem a variação da velocidade na direção do y dentro do duto. A Figura 4 ilustra

as posições nas quais os perfis foram extraídos e a Figura 5 apresenta os perfis em comparação à simulação 1, $N_x = 640$ e $N_y = 256$, e os dados de referência de Onur e Baydar (1992).

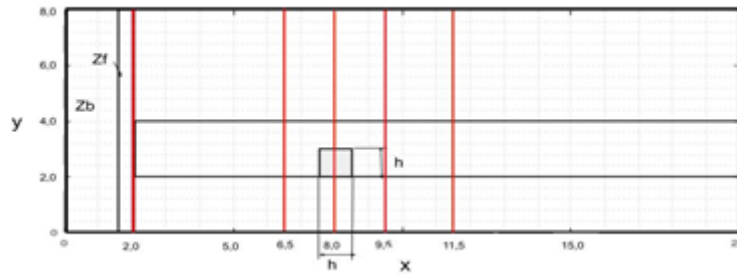


Figura 4. Esquema das posições escolhidas para a extração dos perfis velocidade (Próprio autor)

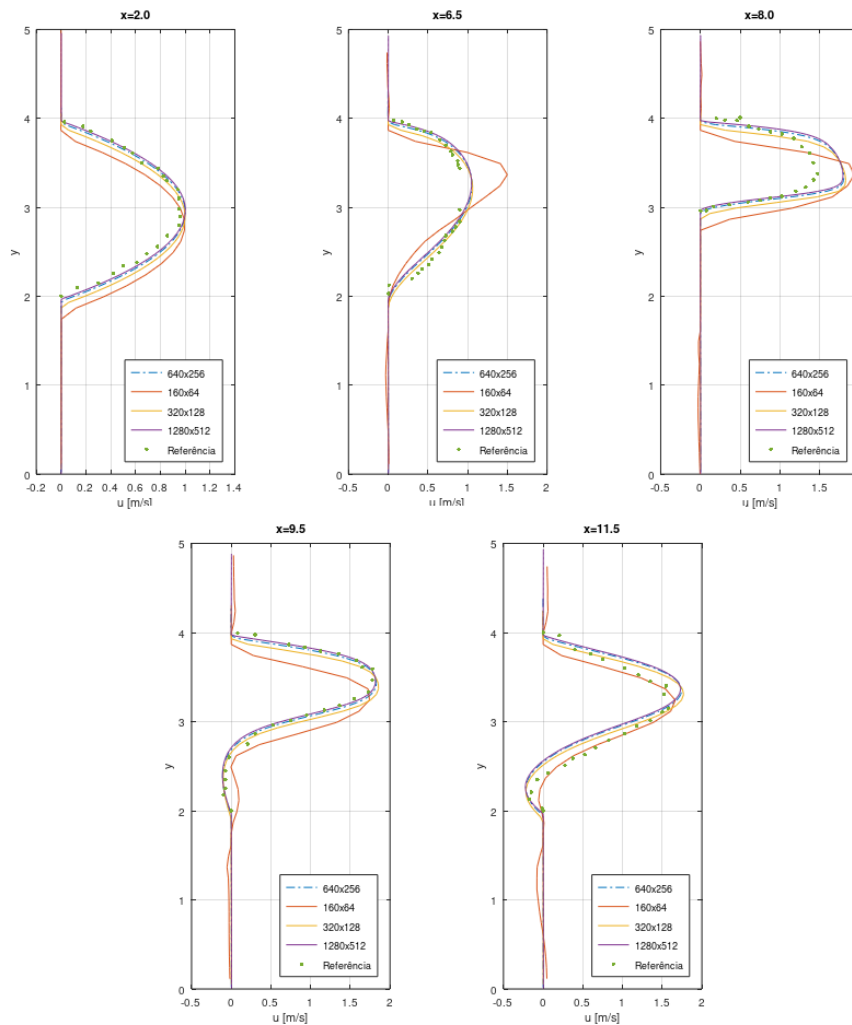


Figura 5. Perfis velocidade da simulação 1, 640x256, simulação 2, 160x64, simulação 3, 320x128, simulação 4, 1280x512 e resultados de referência (próprio autor)

Na Figura 5 estão presentes os perfis velocidade para as diferentes posições, obtidos em $t^* = 5$. Para $x = 2$ e $x = 8$, nota-se que o perfil de entrada no duto está desenvolvido com velocidade máxima de 1,0 m/s. em $x = 8$, nota-se que

devido a presença do obstáculo o escoamento tende a acelerar na porção vazia, assim, atingindo velocidade máxima de aproximadamente 2,0 m/s.

Para $x = 9,5$ e $x = 11,5$, os perfis são a jusante do obstáculo. É possível notar a presença de velocidade contrária ao sentido do escoamento, assim, nota-se que há presença de recirculação primária. Destaca-se que tal recirculação pode ser notada para todos os refinamentos utilizados, sendo menos promissora para número de pontos de colocação inferiores ao 640x256. Ressalta-se que os pontos de referência são a velocidade média registrada pelo experimento na posição indicada (Onur e Baydar, 1992), e foram obtidas pelo *software* Engegauer Digitalizer.

Analisando os perfis velocidade, percebe-se que para 640x256 pontos o perfil velocidade tem comportamento próximo ao obtido por Onur e Baydar (1992). Nota-se também que as simulações, nas quais o número de pontos é o menor, 160x64 e 320x128, apresentaram discordâncias com os perfis do trabalho de referência e os obtidos com 1028x512, apresentam-se semelhantes aos obtidos com malha 320x128 e proposto por Onur e Baydar (1992).

3. CONCLUSÃO

Conclui-se que o método IMERSPEC 2D é válido para simulações computacionais de escoamentos laminares, bidimensionais, viscosos e incompressíveis sobre um obstáculo quadrado, o qual está localizado no interior de um duto. Tal metodologia possibilitou a visualização e análise do escoamento proposto com grande similaridade aos resultados experimentais. A metodologia está mostrando resultados promissores, no que diz respeito a obstáculos apoiados sobre superfície.

Quanto ao refinamento, percebe-se que um número de pontos de colocação maior que o de 640x256 pontos, não apresenta variações significativas quanto aos resultados de velocidade. A diminuição do número de pontos no domínio mostrou alterações, tanto quando reduzido pela metade 320x128, quanto para 160x64, em especial no caso de menor refinamento da malha, no qual grande discrepância entre os comparativos é percebida. O tempo computacional gasto para as simulações não apresentou comportamento proporcional ou aumento ou diminuição dos pontos de colocação, de tal forma que ao dobrar o número de pontos, o tempo gasto foi 2,5 maior, e ao dividir por 3, o tempo necessário foi 2,4 vezes menor.

4. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FURNAS Centrais Elétricas e ao “Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico” (P&D) da ANEEL pelo apoio financeiro e ao Programa de Iniciação Científica da Universidade Federal de Goiás.

5. REFERÊNCIAS

- Canuto, C. et al., 2006. *Spectral Methods: Fundamentals in Single Domains*. [S.l.]: Springer Berlin Heidelberg, (Scientific Computation). ISBN 9783540307266.
- Fortuna, A. de O., 2000. *Técnicas Computacionais para Dinâmica dos Fluidos, conceitos básicos e aplicações*. São Paulo, SP: Universidade de São Paulo.
- Freitas, A. G., dos Santos, R. B., Oliveira, Y., Oliveira, V., Riascos, L. A., 2019. *Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação: Batchpump, Um Novo Alimentador de Sólidos Industrial*. in: COBEF 2019. Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, São Carlos, Brazil. doi:10.26678/abcm.cobef2019.cof2019-0063.
- Freitas, A. G., de Oliveira, V. F., dos Santos, R. B., Riascos, L. A. M., & Zou, R., 2022. *Optimization Method for Pneumatic Conveying Parameters and Energy Consumption Performance Analysis of a Compact Blow Tank*. *Journal of Pressure Vessel Technology*, ASME. 144(6), 064504. doi:10.1115/1.4055111
- Freitas, A. G., dos Santos, R. B., Pereira, L. M., Lima, Y. O., Riascos, L. A. M., 2021. *Transporte pneumático de particulados—Otimização energética em um novo vaso de pressão*. In 2021 14th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON) (pp. 999-1004). IEEE. doi: 10.1109/INDUSCON51756.2021.9529770
- Lima e Silva, A.L.F. Silveira-Neto, A. Damasceno, J.J.R., 2003. *Numerical simulation of two-dimensional flows over a circular cylinder using the immersed boundary method*. *Journal of Computational Physics*, n.189, p.351–370.
- Mariano, F. P., 2011. *Solução numérica das Equações de Navier-Stokes usando uma hibridação das metodologias Fronteira Imersa e Pseudo-Espectral de Fourier*. Tese de doutorado, Universidade Federal de Uberlândia.
- Mariano, FP. Moreira, L. Nascimento, A., 2022. *An improved immersed boundary method by coupling of the multi-direct forcing and Fourier pseudo-spectral methods*. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Brazil, v. 44, n.388.
- Nascimento, A. A. et al, 2020. *Comparison of the convergence rates between fourier pseudo-spectral and finite volume method using taylor-green vortex problem*. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin/Heidelberg, v. 42, n. 9. ISSN 1678-5878.

- Onur, H., Baydar, E., 1992. *Laminar channel flow over a square step*. International Journal of Engineering Science, v. 30, n. 9, p. 1109–1116.
- Peskin, C. S., 1972. *Flow patterns around heart valves: A numerical method*. Journal of Computational Physics, v. 10, n. 2, p. 252–271, ISSN 0021-999