

TRANSPORTE ESCALAR EM ESCOAMENTO EM CONDUTO CIRCULAR FORÇADO. ESTUDO DE CASO: TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Gabriel Fernando Narváez Campo¹, Eric Lamballais² y Edith Beatriz Camaño Schettini¹

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH-UFRGS), Brasil.

² Université de Poitiers – Institut Pprime, França.

E-mail: gabriel.narvaez@ufrgs.br, bcamano@iph.ufrgs.br, eric.lamballais@univ-poitiers.fr

Introdução

O transporte de um escalar passivo em um escoamento se refere à convecção-difusão de um campo escalar dentro do fluido em movimento, sem gerar modificações nas propriedades físicas do mesmo. Na prática, o escalar pode ser considerado como a concentração de um sedimento, um poluente ou um campo de temperatura.

Neste trabalho, o estudo de caso é a transferências de calor em escoamento turbulento em um conduto circular, sob a hipótese de transporte da temperatura como um escalar passivo. Uma representação precisa da transferência de calor é a base fundamental para o correto projeto de trocadores de calor, reatores nucleares, sistemas de esfriamento e aquecimento. Muitos destes sistemas estão compostos por condutos circulares forçados. Porém, na indústria, as bases de dados experimentais, e, conseqüentemente, o entendimento da transferência de calor em escoamentos internos, ainda é escassa e insuficiente (Flageul, 2015). Pela complicação experimental de realizar medições precisas na fina subcamada viscosa (Saha et al., 2014), a simulação numérica direta é uma ferramenta de alto impacto no entendimento de escoamentos turbulentos parietais (Kasagi e Shikazono, 1995).

Cabe destacar que, a aplicabilidade das ferramentas numéricas desenvolvidas e aqui apresentadas pode ser estendida a qualquer transporte de escalar passivo em escoamentos turbulentos. O solver de dinâmica dos fluidos utilizado é o código de 6ª ordem *Incompact3d* (Laizet e Lamballais, 2009), cuja eficiência na predição do perfil médio de velocidade e das tensões de Reynolds, em condutos forçados, foi recentemente avaliada no trabalho de Dairay et al. (2017).

Metodologia

As equações governantes da dinâmica de fluidos são as equações de conservação de quantidade de movimento e conservação de massa. A velocidade média (U_m), o diâmetro do conduto (D) e a massa específica do fluido (ρ) são adotados como grandezas de referência para escalar as equações. Desta maneira, as equações adimensionais de movimento podem ser expressas como

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = -\frac{1}{2}(\vec{\nabla}(\vec{u} \otimes \vec{u}) + \vec{u} \cdot \nabla \vec{u}) - \vec{\nabla} p + \frac{1}{Re} \vec{\nabla}^2 \vec{u} + \vec{f}, \quad [1]$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{u} = 0, \quad [2]$$

onde, \vec{u} , p e $Re = U_m D / \nu$ são a velocidade, a pressão e o número de Reynolds, respectivamente. O vetor $\vec{f} = [f, 0, 0]$ é um termo fonte que compensa as perdas, do gradiente de pressão, por atrito viscoso, ao longo de x , sustentando um fluxo periódico e mantendo $U_m = 1$.

Na parede do conduto é considerada a condição de não deslizamento e na direção principal do escoamento (eixo x) todas as variáveis são consideradas periódicas.

A partir da temperatura dimensional (T), a temperatura na parede ($T_p(x)$), que varia linearmente ao longo de x e a média de ensemble da temperatura (T_m), a temperatura adimensional é definida, como:

$$\theta(x, y, z, t) = \frac{T_p(x) - T(x, y, z, t)}{T_p(x) - T_m}. \quad [3]$$

Desta foram, a equação adimensional de transporte escalar é

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\vec{u} \cdot \vec{\nabla} \theta + \frac{1}{Re Pr} \nabla^2 \theta + f_\theta, \quad [4]$$

onde, $Pr = \nu / \lambda$ é o número de Prandtl que relaciona a viscosidade cinemática do fluido (ν) e sua difusividade térmica (λ). O termo fonte f_θ , que tem o papel equivalente a f na Eq. [1], conserva a média de ensemble da temperatura $\theta_m = 1$. A temperatura na parede do conduto é $\theta_p = 0$ (Piller, 2005), enquanto que na direção do escoamento principal, θ é periódica.

Visando representar com maior acurácia a turbulência, o código de alta ordem *Incompact3d* (Laizet e Lamballais, 2009) é adotado para resolver as equações de movimento do fluido ([1] e [2]) e de transporte escalar ([4]). O código permite uma aproximação das derivadas espaciais com 6ª ordem de precisão, em uma malha cartesiana retangular, e um esquema de avanço temporal de Adams-Bashforth de 3ª ordem.

Na malha cartesiana retangular (Figura 1), a representação do conduto com geometria cilíndrica foi realizada por meio de um método de fronteiras imersas (*IBM*) baseado em uma adaptação do método de forçagem direta (Gautier et al. 2014). Este *IBM* permite garantir as condições de contorno nas paredes do conduto.

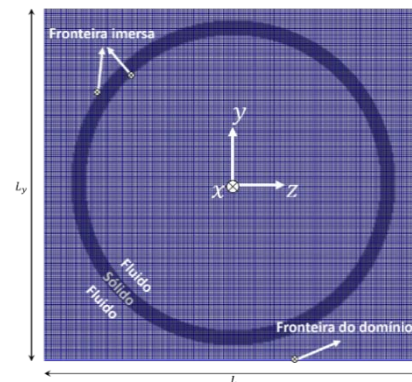


Figura 1.- Malha retangular uniforme projetada no plano yz.

Resultados e discussão

Em todas as simulações foi adotado $Pr = 1$ e $Re = 5500$. É importante destacar que o escoamento em conduto circular é hidrodinamicamente estável, de maneira que uma simulação sem adição de perturbações iniciais vai convergir à solução laminar, independentemente do Re . Desta maneira, as simulações laminares são independentes do Re quando inicializadas com perturbações baixas ou inexistentes.

O código foi verificado avaliando os resultados com soluções analíticas de escoamento laminar permanente (simulações 1 a 6 da Tabela 1). Isto permitiu fazer uma análise de convergência espacial e estudar a precisão na interface fluido-sólido definida pela fronteira imersa (Figuras 2 e 3). A análise mostra que o maior erro na temperatura é de segunda ordem e está localizado na interface. Os mapas de erro revelam um padrão de redução

de erro onde a fronteira imersa está mais perto do contorno computacional. Por outra parte, observa-se uma diferença na ordem de convergência da temperatura, quando se usa o solver de velocidade ou quando se usa a solução analítica da velocidade.

Em uma segunda etapa, uma simulação turbulenta (Simulação 7 da Tabela 1) foi validada com simulações numéricas diretas dos trabalhos de Redjem-Saad et al. (2007) e Saha et al. (2014). Tanto as estatísticas de primeira ordem (perfil azimutal de temperatura média) como as de segunda ordem (erro quadrático médio e fluxo turbulento de calor) ajustam satisfatoriamente com os resultados mais recentes (Figura 4).

Tabela 1.- Parâmetros das simulações: número de pontos ($n_x \times n_y \times n_z$), tamanho do domínio ($L_x \times L_y \times L_z$) e passo de tempo (Δt).

Simulação	$n_x \times n_y \times n_z$	$L_x \times L_y \times L_z$	Δt
1	$8 \times 32 \times 32$	$5 \times 1.28 \times 1.28$	1×10^{-3}
2	$8 \times 32 \times 32$	$5 \times 1.28 \times 1.28$	2×10^{-3}
3	$8 \times 32 \times 32$	$5 \times 1.28 \times 1.28$	4×10^{-3}
4	$8 \times 64 \times 64$	$5 \times 1.28 \times 1.28$	1×10^{-3}
5	$8 \times 128 \times 128$	$5 \times 1.28 \times 1.28$	3×10^{-3}
6	$8 \times 256 \times 256$	$5 \times 1.28 \times 1.28$	5×10^{-3}
7	$640 \times 256 \times 256$	$12.8 \times 1.28 \times 1.28$	8×10^{-4}

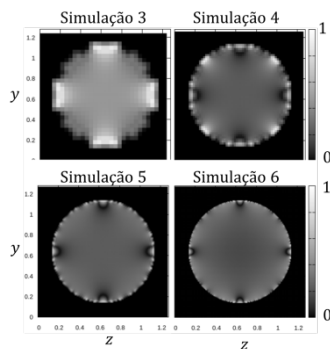


Figura 2.- Mapas de erro absoluto (escalado com o erro máximo) para diferentes resoluções espaciais (Tabela 1). A resolução aumenta de esquerda para direita e de acima para baixo.

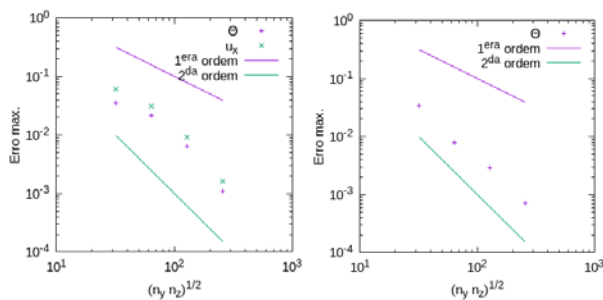


Figura 3.- Análise de convergência de malha (Tabela 1). À esquerda: usando o solver de velocidade; à direita: considerando a solução exata da velocidade.

Conclusões

Com o código de alta ordem *Incompact3d* e o método de fronteiras imersas, foi simulado um escoamento interno em um conduto circular periódico. De forma acoplada, foi solucionada uma equação de transporte de temperatura para representar uma condição isotérmica de transferência de calor.

Simulações laminares indicam que o código tem segunda ordem de precisão na interface fluido-sólido, representada pela fronteira imersa. A simulação turbulenta mostra que o código consegue representar satisfatoriamente os perfis azimutais das

estatísticas de primeira e segunda ordem da temperatura. Portanto, podemos afirmar que o *Incompact3d*, junto com a metodologia de fronteiras imersas, é uma ferramenta poderosa na representação do transporte escalar em escoamentos internos.

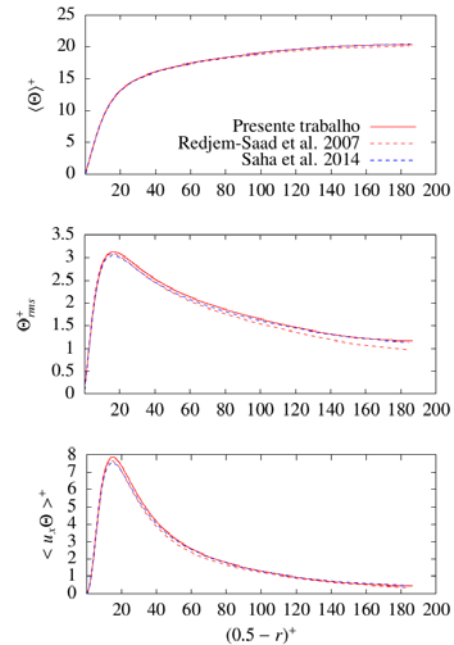


Figura 4.- Perfil das estatísticas da temperatura em unidades de parede (super índice +). Superior: temperatura média; meio: erro quadrático médio; inferior: fluxo de turbulento de calor.

Referências bibliográficas

- Dairay, T., Lamballais, E. and Benhamadouche, S. (2017). "Mesh node distribution in terms of wall distance for large-eddy simulation of wall-bounded flows". *Flow, turbulence and combustion*. <https://doi.org/10.1007/s10494-017-9863-5>, pp. 1-10.
- Flageul, C. (2015). *Création de bases de données fines par simulation directe pour les effets de la turbulence sur les transferts thermiques pariétaux*. Tésis de Ph.D., Poitiers, France.
- Gautier, R., Laizet, S. and Lamballais, E. (2014). "A DNS study of jet control with microjets using an immersed boundary method". *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, ASCE, Vol. 28, pp. 399-410.
- Kasagi, N. and Shikazono, N. (2014). "Contribution of direct numerical simulation to understand and modelling turbulent transport". *Proceedings in royal society of London, Oct. 9. Series A: Mathematical and physical science*, London, Bangladesh. Vol. 451, pp 257-292.
- Laizet, S. and Lamballais, E. (2009). "High order compact schemes for incompressible flows". *Journal of Computational Physics*, Vol. 228, pp. 5989-6015.
- Piller, M. (2005). "Direct numerical simulation of turbulent forced convection in a pipe". *International Journal of Numerical Methods in Fluids*, Vol. 49, pp. 583-602.
- Redjem-Saad, L., Ould-Rouiss, M., and Lauriat, G. (2014). "Direct numerical simulation of turbulent heat transfer in pipe flow". *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 28, pp. 847-861.
- Saha, S., Ooi, A. S. H. and Blackburn, H. M. (2014). "validation criteria for DNS of turbulent heat transfer in pipe flow". *Proceedings in 10th International Conference on Mechanical Engineering*, Dhaka, Bangladesh. pp. 599-604.

Agradecimentos

Este trabalho foi parcialmente financiado pelo programa "Investissements d'Avenir" do governo da França (LABEX INTERACTIFS, reference ANR-11-Labex-0017-01) e pela bolsa de doutorado concedida pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) do Brasil.