



SEI-SICITE 2021

Pesquisa e Extensão para um mundo em transformação

# Simulação numérica da convecção mista em cavidade com o topo deslizante preenchida com bloco isotérmico

*Numerical simulation of convection in a lid-driven cavity filled with an isothermal block*

Allan Pais de Camargo\*, Silvio Luiz de Mello Junqueira†

## RESUMO

Os fenômenos de transporte em meios porosos dependem de propriedades como a porosidade, a permeabilidade e a condutividade térmica, as quais são fortemente influenciadas pela interface sólido-fluido. Nesse trabalho, propõe-se simular numericamente a convecção mista em cavidade preenchida com meio poroso heterogêneo idealizado como bloco sólido, quadrado e isotérmico, reproduzindo resultados disponíveis na literatura. A cavidade com topo deslizante é mantida à temperatura constante, inferior à temperatura do bloco, estabelecendo-se regime de transferência de calor por convecção mista, sendo analisada a influência da variação do número de Richardson,  $Ri = (0,1; 1; 10)$ , e da dimensão do bloco,  $B = (1/8, 3/4)$ . As equações de conservação da massa, quantidade de movimento e energia são aplicadas separadamente em cada domínio (sólido e fluido) com condições de contorno de acoplamento térmico prescritas nas superfícies do bloco. As equações são solucionadas através do Método dos Volumes Finitos fazendo uso do programa comercial Ansys Fluent. Resultados apresentados em função do número de Nusselt médio, demonstram a intensificação da transferência de calor com o aumento do Richardson para  $B=1/8$ . No entanto, a transferência de calor mantém-se inalterada para  $B=3/4$ .

**Palavras-chave:** Convecção mista, meio poroso heterogêneo, cavidade com topo deslizante.

## ABSTRACT

Transport phenomena in porous media depend on properties such as porosity, permeability and thermal conductivity, which are strongly influenced by the solid-fluid interface. In the present work, the mixed convection is numerically simulated in a cavity filled with a heterogeneous porous medium idealized as a solid, square and isothermal block, reproducing results available in the literature. The cavity with the sliding top is kept at a constant temperature, lower than the block temperature, establishing a heat transfer regime by mixed convection, and the influence of the variation of the Richardson number is analyzed,  $Ri = (0.1; 1; 10)$ , and the block size,  $B = (1/8, 3/4)$ . The conservation equations for mass, momentum and energy are applied separately in each domain (solid and fluid) with thermal coupling boundary conditions prescribed on the block surfaces. The equations are solved using the Finite Volume Method using the commercial program Ansys Fluent. Results presented as a function of the average Nusselt number, computed on the block surface, demonstrate the intensification of heat transfer with increasing Richardson to  $B=1/8$ . However, heat transfer remains unchanged for  $B=3/4$ .

**Keywords:** Mixed convection, heterogeneous porous medium, lid-driven cavity.

\* Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil; [allancamargo@alunos.utfpr.edu.br](mailto:allancamargo@alunos.utfpr.edu.br)

† Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Curitiba; [silvio@utfpr.edu.br](mailto:silvio@utfpr.edu.br)



## 1 INTRODUÇÃO

O estudo da convecção em meios porosos é um tópico de interesse em vários ramos da ciência e tecnologia, tendo diversas aplicações, como por exemplo, filtragem, secagem de alimentos, dispersão de poluentes, produção de óleo e gás, entre muitas outras (Kaviany, 2012). Os fenômenos de transporte em meios porosos dependem de propriedades do substrato poroso, como a permeabilidade, a porosidade e a condutividade térmica, as quais relacionam-se com a morfologia da interface sólido-fluido. Em razão da complexa e intrincada topologia observada em meios porosos naturais, tais como formações rochosas, modelos para a representação da matriz sólida são utilizados a fim de que seja possível representar o fenômeno na escala do poro, isto é, havendo identificação e mapeamento das nuances do poro.

Morzynski e Popiel (1988) investigaram numericamente o efeito da viscosidade do fluido na convecção mista, empregando uma cavidade limpa com o topo deslizante sujeita a uma condição gravitacionalmente estável para valores fixos dos números de Reynolds e Prandtl. Estudos a respeito da influência do número de Prandtl na convecção mista foram desenvolvidos por Moallemi e Jang (1991) em uma cavidade com o topo deslizante submetida a condição gravitacionalmente instável. Islam et al. (2012) expandiram o escopo do estudo, investigando o efeito da inserção de um bloco quadrado e isotérmico no interior da cavidade, mantendo o número de Reynolds constante e variando o número de Richardson e o tamanho do bloco. Poletto (2015) investigou o problema da convecção mista em uma cavidade quadrada com o topo deslizante e um bloco quadrado condutor em seu interior, sob uma condição gravitacionalmente estável, analisando a influência dos números de Reynolds e de Grashof, bem como o tamanho do bloco e a razão de condutividade térmica sólido-fluido na transferência de calor. Os resultados de Poletto (2015) foram estendidos por Poletto *et al.* (2016), onde os autores empregaram a análise de escala nas equações de balanço e obtiveram correlações para identificar os regimes de predominância da convecção natural ou forçada, através dos parâmetros geométricos da cavidade e do escoamento.

No presente trabalho, a convecção mista em cavidade preenchida com meio poroso heterogêneo é numericamente simulada, avaliando-se o efeito da variação do número de Richardson e da dimensão do bloco isotérmico sobre o processo de transferência de calor. Os resultados obtidos em função do número de Nusselt são comparados com a literatura científica.

### 1.1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

A Figura 1 ilustra a geometria e as condições de contorno empregadas no presente trabalho. A cavidade quadrada de dimensão  $L$  possui em seu interior um bloco central, também quadrado, de dimensão  $D$ . Foi definida a razão  $B=D/L$  como uma parametrização para o bloco. O vetor aceleração da gravidade,  $\vec{g}$ , atua no sentido oposto ao eixo  $y$  do sistema de coordenadas definido no canto inferior esquerdo da cavidade.

O escoamento é considerado bidimensional, laminar, em regime permanente e com propriedades constantes. As forças de empuxo são modeladas através da aproximação de *Boussinesq-Oberbeck*. Os balanços de massa, de quantidade de movimento e de energia para o domínio fluido são apresentados respectivamente nas equações adimensionais (1) – (4), onde são consideradas as variáveis adimensionais  $(X,Y)=(x,y)/L$ ;  $(U,V)=(u,v)/U_0$ ;  $\theta = (T - T_C)/(T_H - T_C)$  e  $P = p/\rho U_0^2$ . O balanço de energia no bloco sólido é expresso na Eq. (5).

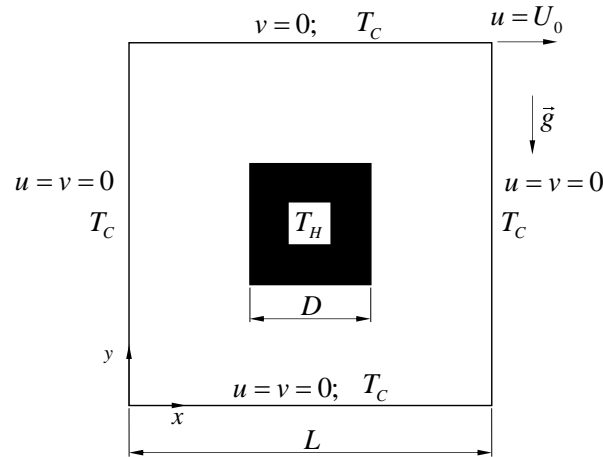
As condições de contorno para a cavidade são apresentadas na Fig. 1. A cavidade possui as paredes verticais e horizontais mantidas à mesma temperatura  $T_C$ . O bloco central é mantido à temperatura  $T_H > T_C$ . A

\* Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil; [allancamargo@alunos.utfpr.edu.br](mailto:allancamargo@alunos.utfpr.edu.br)

† Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Curitiba; [silvio@utfpr.edu.br](mailto:silvio@utfpr.edu.br)

condição de não deslizamento é aplicada em todas as superfícies da cavidade, exceto na superfície superior, onde é prescrita a velocidade  $U_0$ .

**Figura 1 – Geometria e condições de contorno.**



Fonte: Autoria própria (2021).

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (1)$$

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{1}{Re} \left( \frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) \quad (2)$$

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{1}{Re} \left( \frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) + Ri\theta \quad (3)$$

$$U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{1}{RePr} \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right) \quad (4)$$

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} = 0 \quad (5)$$

Os grupamentos adimensionais considerados no presente trabalho correspondem ao número de Reynolds,  $Re = \rho U_0 H / \mu$ , número de Richardson,  $Ri = Gr / Re^2$ , número de Prandtl,  $Pr = \nu_f / \alpha_f$  e número de Grashof,  $Gr = g\beta(T_H - T_C)L^3 / \nu_f^2$ .

Os resultados são avaliados em função do número Nusselt local,  $Nu_{av}$ , calculados ao longo das quatro superfícies do bloco e dividido pelo comprimento total das superfícies,  $4D$ . O número de Nusselt médio,  $Nu_{av}$ , é definido de acordo com a Eq. 6

$$Nu_{av} = \int_0^1 -\frac{\partial \theta}{\partial Y} \Big|_{Y=0} dX \quad (6)$$

\* Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil; [allancamargo@alunos.utfpr.edu.br](mailto:allancamargo@alunos.utfpr.edu.br)

† Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Curitiba; [silvio@utfpr.edu.br](mailto:silvio@utfpr.edu.br)



## 2 SOLUÇÃO NUMÉRICA

As Eqs. (1) – (6) são resolvidas numericamente via Método dos Volumes Finitos (Patankar, 1980). São empregados os esquemas de interpolação QUICK (Leonard, 1979) para os campos de velocidade e temperatura. O esquema PRESTO é utilizado para o campo de pressão. O algoritmo SIMPLE (Patankar e Spalding, 1972) é empregado para o acoplamento pressão-velocidade.

## 3 RESULTADOS

Para assegurar que a modelagem numérica apresentada anteriormente, bem como o programa computacional utilizado são capazes de resolver o problema proposto no presente trabalho, foram realizados testes de verificação da literatura. Os trabalhos de De Lai (2009), Lee et al. (2005), Cheng (2011) e Islam et al. (2012) foram reproduzidos, apresentando resultados satisfatórios.

Os parâmetros do problema encontram-se listados na Tabela 1, compreendendo o número de Richardson e o tamanho adimensional do bloco. Os números de Reynolds e Prandtl são mantidos constantes.

**Tabela 1 – Parâmetros analisados no presente trabalho.**

Parâmetro	Valores
$Ri$	0,1; 1; 10
$Pr$	0,71
$Re$	100
$B$	1/8 e 3/4

**Fonte: Autoria própria (2021).**

A Tabela 2 apresenta os resultados para o número de Nusselt médio. Observa-se que influência da variação do  $Ri$  é notável apenas para  $B=1/8$ , sendo mais expressivo no caso em que  $Ri=10$ . Os resultados obtidos para  $B=3/4$  indicam que a transferência de calor não é alterada com a variação do  $Ri$ . Adicionalmente, os resultados obtidos no presente trabalho apresentam boa concordância com os resultados da literatura considerada, sendo verificado um erro percentual abaixo de 1,601 % em todos os casos estudados.

Resultados adicionais são apresentados na Figura 2, onde estão plotados os perfis de velocidade adimensionais ao longo dos planos médios da cavidade: a componente vertical,  $V$ , é calculada ao longo de  $Y=1/2$  e, a componente horizontal,  $U$ , é calculada ao longo de  $X=1/2$ . Novamente os resultados obtidos apresentam uma boa concordância com os resultados da literatura. A Figura 3 exhibe as linhas de corrente e isothermas para  $B=1/8$ .

**Tabela 2 - Número de Nusselt médio calculado nas superfícies do bloco.**

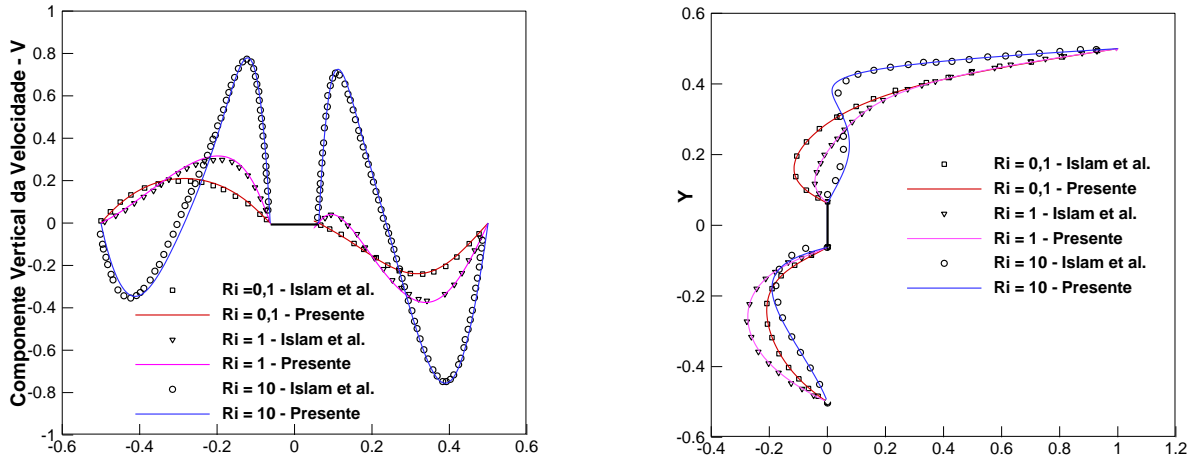
B	Ri	Islam et al. (2012)	[Presente]	Erro (%)
1/8	0,1	7,589	7,524	0,856
	1	7,698	7,584	1,486
	10	12,201	12,006	1,601
3/4	0,1	8,835	8,781	0,614
	1	8,835	8,781	0,613
	10	8,835	8,786	0,556

**Fonte: Autoria própria (2021).**

\* Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil; [allancamargo@alunos.utfpr.edu.br](mailto:allancamargo@alunos.utfpr.edu.br)

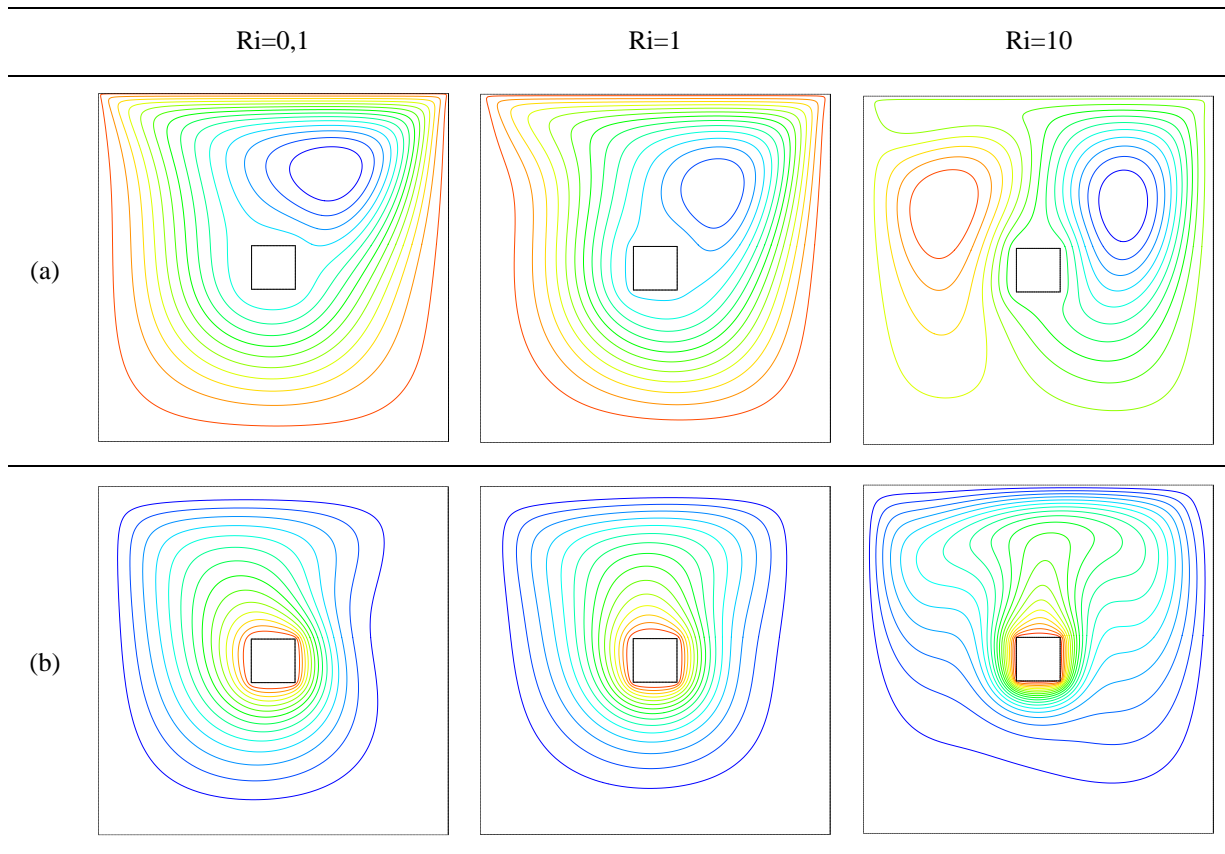
† Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Curitiba; [silvio@utfpr.edu.br](mailto:silvio@utfpr.edu.br)

Figura 2 - Perfis de velocidade adimensionais dos planos médios da cavidade: para  $B=1/8$ .



Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 3 – Resultados para  $B=1/8$ : (a) linhas de corrente e (b) isotermas.



Fonte: Autoria própria (2021).

\* Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil; [allancamargo@alunos.utfpr.edu.br](mailto:allancamargo@alunos.utfpr.edu.br)

† Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Curitiba; [silvio@utfpr.edu.br](mailto:silvio@utfpr.edu.br)



## 4 CONCLUSÃO

No presente trabalho, a convecção mista em cavidade preenchida com bloco sólido isotérmico é estudada numericamente em termos da variação do número de Richardson,  $Ri$ , e do tamanho a dimensional do bloco,  $B$ . Os resultados mostram uma tendência no aumento do número de Nusselt médio com o incremento do Richardson para  $B=1/8$ , havendo intensificação da transferência de calor por convecção. Por outro lado, quando  $B=3/4$ , não foi notada nenhuma alteração no número de Nusselt médio conforme o número de Richardson varia.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o Programa de Bolsas de Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (PIBITI), o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), a Fundação de Apoio à Educação, Pesquisa e Desenvolvimento Científico e Tecnológico da UTFPR (FUNTEF-PR) e ao CENPES/PETROBRAS.

## REFERÊNCIAS

CHENG, T. S. **Characteristics of mixed convection heat transfer in a lid-driven square cavity with various Richardson and Prandtl numbers**. International Journal of Thermal Sciences, vol. 50, pp. 197 – 205, 2011.

DE LAI, F.C. **SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA CONVECÇÃO NATURAL EM CAVIDADE PREENCHIDA COM MEIO POROSO HETEROGÊNEO**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Engenharia Industrial Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

ISLAM, A. W.; SHARIF, M. A. R.; CARLSON, E. S. **Mixed convection in a lid driven square cavity with an isothermally heated square blockage cavity**. International Journal of Heat and Mass Transfer, vol.: 55, p.: 5244-5255, 2012.

KAVIANY, M. **Principles of heat transfer in porous media**. 2.ed. New York: Springer Science & Business Media, 2012.

MOALLEMI, M. K.; JANG, K. S. **Prandtl number effects on laminar mixed convection heat transfer in a lid-driven cavity**. Int. J. Heat Transfer, vol.: 35, no.: 8, p.: 1881-1892, 1992.

MORZYNSKI, M.; POPIEL, Cz. **Laminar heat transfer in a two-dimensional cavity covered by a moving wall**. Numerical Heat Transfer, Vol. 13, pp. 265 – 273, 1988.

POLETTI, V.G. **Estudo da convecção em cavidade quadrada com o topo deslizante preenchida com bloco sólido condutor de calor**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Engenharia Industrial Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

POLETTI, V. G.; DE LAI, F. C.; FRANCO, A. T.; JUNQUEIRA, S. L. M. **Numerical simulation of the convection in a non-homogeneous lid-driven square cavity subjected to a gravitational stable condition**. Apresentado na Heat Transfer, Fluids Engineering & Nanochannels, Microchannels, and Minichannels Conferences, HT/FE/ICNMM ABCM, Washington, D.C., 2016.

\* Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil; [allancamargo@alunos.utfpr.edu.br](mailto:allancamargo@alunos.utfpr.edu.br)

† Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Curitiba; [silvio@utfpr.edu.br](mailto:silvio@utfpr.edu.br)