

## Convecção natural em cavidade com meio poroso heterogêneo

## Natural convection in cavity filled with heterogeneous porous medium

### RESUMO

João Victor Cardoso

[joavictorcardoso22@gmail.com](mailto:joavictorcardoso22@gmail.com)

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil

Silvio Luiz de Mello Junqueira

[silvio@utfpr.edu.br](mailto:silvio@utfpr.edu.br)

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil

Allan Pais de Camargo

[allan\\_pais@terra.com.br](mailto:allan_pais@terra.com.br)

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil

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 natural em cavidade preenchida com meio poroso heterogêneo idealizado como bloco sólido, quadrado e condutor de calor, reproduzindo resultados disponíveis na literatura. A cavidade é aquecida por baixo, estabelecendo-se regime de transferência de calor por convecção, sendo analisada a influência da variação do número de Rayleigh,  $Ra=(10^3, 10^4, 10^5, 10^6)$ , e da razão de condutividade térmica sólido-fluido,  $K=(0,1; 1; 50)$ . 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 local e médio, ambos computados na superfície aquecida, demonstram a intensificação da transferência de calor com o aumento do Rayleigh. A influência do  $K$  torna-se significativa à medida que o  $Ra$  é reduzido, caracterizando preponderância da difusão de calor.

Recebido: 19 ago. 2020.

Aprovado: 01 out. 2020.

**Direito autoral:** Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



**PALAVRAS-CHAVE:** Convecção natural, meio poroso heterogêneo, simulação numérica.

### ABSTRACT

The characterization of transport phenomena in porous media relies in solid-fluid-interface-dependent properties, such as porosity, permeability and thermal conductivity. In the present work, the natural convection is numerically simulated in a cavity filled with a square, solid and heat conductive block, resembling a heterogeneous porous medium. The heating from below condition gives rise to plume formation, imposing a convective-transport regime. The analysis focus on the influence of the Rayleigh number,  $Ra=(10^3, 10^4, 10^5, 10^6)$ , and the solid-fluid thermal conductivity ratio,  $K=(0.1; 1; 50)$ . Mass and momentum balance equations are applied separately for each domain (solid and fluid), with the thermal-coupling boundary conditions imposed at the block surfaces. Equations are solved by the Finite Volume method using the commercial software Ansys Fluent. Results, presented in terms of the local and surface-averaged Nusselt number at the heated surface, demonstrate the intensification of heat transfer with the  $Ra$  increment. The influence of  $K$  becomes significant for low  $Ra$ , which implies a diffusive-predominant heat transport.

**KEYWORDS:** Natural convection, porous medium, numerical simulation.



## INTRODUÇÃO

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. Dentre os processos de transporte que podem ocorrer em meios porosos, pode-se citar a transferência de calor por convecção, cuja ocorrência é observada no funcionamento de coletores solares, na dinâmica de lagos e de reservatórios térmicos, no arrefecimento de equipamentos eletrônicos, na operação de equipamentos para processamento de compostos químicos, na operação de reatores nucleares, na formação de película lubrificante, no crescimento de cristais em materiais, na produção de vidros, em processos de galvanização e revestimento de metais, na fundição do ferro e no processamento de alimentos (WAHEED, 2009).

House et al. (1990) simularam numericamente a convecção natural em cavidade preenchida com bloco sólido aquecida lateralmente, observando a influência da variação do número de Rayleigh, da razão de condutividade térmica sólido-fluido e da dimensão do obstáculo. Lee et. al. (2005), por sua vez, investigaram numericamente o efeito da inserção de um bloco sólido condutor de calor no centro de uma cavidade sujeita a aquecimento por baixo, considerando um cenário gravitacionalmente instável. Junqueira et al. (2013) ampliaram o escopo do trabalho de House et al. (1990) considerando variação da razão de aspecto da cavidade preenchida com um arranjo ordenado de blocos sólidos

No presente trabalho, a convecção natural em cavidade preenchida com meio poroso heterogêneo e sujeita a aquecimento por baixo é numericamente simulada avaliando-se o efeito da variação do número de Rayleigh e da razão de condutividade térmica sólido-fluido sobre o processo de transferência de calor por convecção natural. Os resultados obtidos em função do número de Nusselt com o programa computacional Ansys Fluent são comparados com a literatura científica.

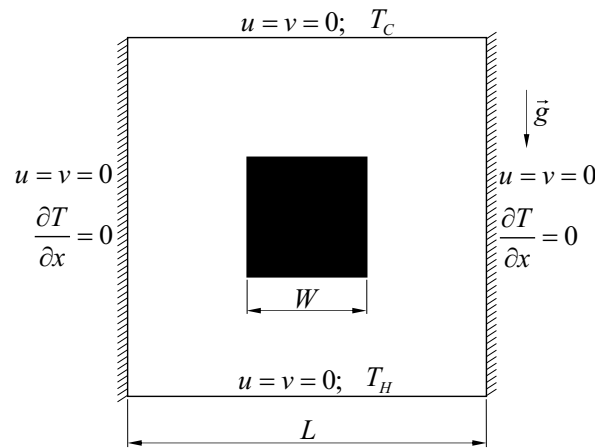
## FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

A geometria e as condições de contorno consideradas são apresentadas na Figura 1. A cavidade quadrada de dimensão  $L$  possui em seu interior um bloco sólido condutor de calor, também quadrado de dimensão  $W = L/3$ . O vetor aceleração da gravidade é paralelo às paredes verticais adiabáticas e aponta para baixo.

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. O balanço de massa, de quantidade de movimento e de energia para o domínio fluido é apresentado respectivamente nas equações (1) - (4) através dos componentes espaciais  $x$  e  $y$  [m], dos componentes da velocidade  $u$  e  $v$  [m/s], da pressão  $p$  [Pa], da viscosidade  $\vartheta$  [m<sup>2</sup>/s], da temperatura  $T$  [K], da aceleração da gravidade  $g$  [m/s<sup>2</sup>], do coeficiente de expansão

isobárico  $\beta$  [1/K], do calor específico a pressão constante  $c_p$  [kJ/kg.K] e da condutividade térmica  $k_f$  [W/m.K]. O balanço de energia no bloco sólido é expressa na Eq. (5). As condições de contorno para a cavidade são apresentadas na Figura 1 contemplando a condição de não deslizamento, paredes verticais adiabáticas, parede inferior mantida a temperatura  $T_H$  e parede superior mantida a  $T_C < T_H$ . Nas superfícies do bloco, além da condição de não deslizamento, tem-se o acoplamento térmico imposto pela igualdade entre do fluxo de calor no domínio sólido e no fluido, sendo relacionadas pela razão e condutividade térmica sólido-fluido  $K=k_s/k_f$ .

Figura 1 – Geometria e condições de contorno de cavidade preenchida com bloco sólido.



Fonte: Autoria própria (2020).

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + g\beta (T - T_C) \quad (3)$$

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{k_f}{\rho c_p} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \quad (5)$$

Os grupamentos adimensionais considerados no presente trabalho correspondem ao número de Prandtl,  $Pr = \nu \cdot k_f / \rho \cdot c_p$  e o número de Rayleigh, definido na Eq. (6), sendo  $\alpha$  [m<sup>2</sup>/s] a difusividade térmica do fluido.

$$Ra = \frac{g\beta (T_H - T_C) L^3}{\nu \alpha} \quad (6)$$

No presente trabalho, os resultados são avaliados em função do número Nusselt local,  $Nu$ , definido na superfície mantida a  $T_H$ , que pode ser computado em função do gradiente térmico adimensional tal, como na Eq. (7). O número de Nusselt médio,  $Nu_{av}$ , é definido de acordo com a Eq. (8).

$$Nu = -\frac{\partial \theta}{\partial X} \quad (7)$$

$$Nu_{av} = \int_0^1 \left( -\frac{\partial \theta}{\partial X} \right) dY \quad (8)$$

## RESULTADOS

Os parâmetros do problema encontram-se listados na Tabela 1, compreendendo o número de Rayleigh e o a razão de condutividade térmica sólido-fluido para Prandtl constante.

Tabela 1 – Parâmetros simulados para a reprodução dos resultados de Lee et al. (2005).

Parâmetro	
Número de Rayleigh – $Ra$	$10^3$ ; $10^4$ ; $10^5$ ; $10^6$
Número de Prandtl – $Pr$	0,7
Razão de condutividade térmica sólido-fluido – $K$	0,1; 1; 50

Fonte: Autoria própria (2020).

O teste de malha foi realizado considerando a configuração crítica à simulação relacionada com  $Ra=10^6$ . As malhas uniformes e estruturadas compreendem desde 30 volumes ao longo de cada direção até 150 volumes. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 2, onde observa-se a tendência de redução do  $Nu_{av}$  conforme a malha é refinada. O erro percentual tende a diminuir com o aumento do número de volumes de controle atingindo 0,061% para a malha 4, assegurando que esta última é capaz de resolver o problema adequadamente.

Tabela 2 – Teste de malha em função do número de Nusselt médio na parede aquecida.

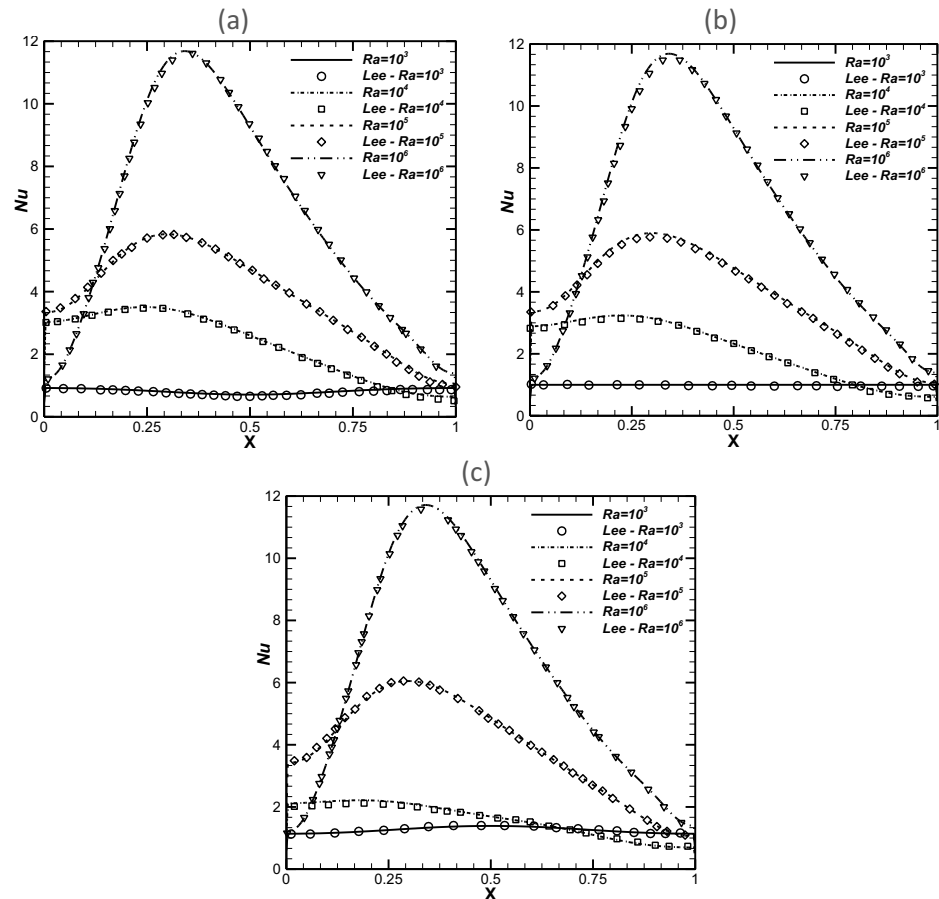
Malha	$Nu_{av}$	Erro [%]
1 – 10x10x10	6,668	2,514
2 – 20x20x20	6,500	1,736
3 – 30x30x30	6,387	0,849
4 – 40x40x40	6,333	0,061
5 – 50x50x50	6,329	-

Fonte: Autoria própria (2020).

A Figura 2 mostra os resultados obtidos para o número de Nusselt local,  $Nu$ , em função do número de Rayleigh e da razão de condutividade térmica sólido-fluido. Observa-se que, para todos os valores de  $K$ , o incremento do  $Ra$  implica no

aumento do valor máximo do  $Nu$ , caracterizando intensificação do gradiente térmico na região inferior do bloco.

Figura 2 – Número de Nusselt local em função do Rayleigh: (a)  $K=0,1$ ; (b)  $K=1$ ; (c)  $K=10$ .



Fonte: Autoria própria (2020).

A Tabela 3 por sua vez, apresenta os resultados para o número de Nusselt médio. Observa-se que influência de variação do  $K$  torna-se significativa mediante o decréscimo do  $Ra$ . Adicionalmente, os resultados obtidos no presente trabalho apresentam boa concordância com os resultados da literatura considerada, havendo erro percentual abaixo de 3 %.

Tabela 3 – Reprodução de resultados da literatura em função do número de Nusselt médio na parede aquecida.

$K$	$Ra$	Lee et. al. (2005)	[Presente]	Erro (%)
0,1	$10^3$	0,810	0,820	1,235
	$10^4$	2,310	2,310	0,000
	$10^5$	3,850	3,840	0,260
	$10^6$	6,300	6,320	0,317
1	$10^3$	1,000	1,000	0,000

	$10^4$	2,130	2,124	0,278
	$10^5$	3,880	3,866	0,371
	$10^6$	6,290	6,324	0,545
50	$10^3$	1,270	1,261	0,747
	$10^4$	1,560	1,595	2,254
	$10^5$	3,940	3,929	0,279
	$10^6$	6,310	6,333	0,364

Fonte: Autoria própria (2020).

## CONCLUSÃO

No presente trabalho, a convecção natural em cavidade preenchida com bloco sólido condutor de calor aquecida por baixo é numericamente simulada em termos da variação do número de Rayleigh,  $Ra$ , e da razão de condutividade térmica sólido-fluido,  $K$ . O número de Nusselt médio tende a aumentar com o incremento do Rayleigh, havendo intensificação da transferência de calor por convecção. A influência da variação do  $K$  é significativa mediante a redução do  $Ra$ , o qual caracteriza regime de transporte puramente difusivo.

## 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

HOUSE, J. M.; BECKERMANN, C. SMITH, T. F. Effect of a Centered Conducting Body on Natural convection heat transfer in an enclosure. **Numerical Heat Transfer, Part: A**, v.18, p.213-225, 1980.

JUNQUEIRA, S. L. M.; DE LAI, F. C.; FRANCO, A. T.; LAGE, J. L. Numerical investigation of natural convection in heterogeneous rectangular enclosures. **Heat Transfer Engineering**, v.34:5-6, p.460-469, 2013.

LEE, J. R.; HA, M. Y. Numerical study of natural convection in a horizontal enclosure with a conducting body. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 48, p.3308-3318, 2005.

WAHEED, M. A. Mixed convection heat transfer in rectangular enclosures driven by a continuously moving horizontal plate. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 52, p.5055-5063, 2009.