



Simulação numérica da transferência de calor por convecção natural em uma cavidade quadrada com inserções porosas
Numerical simulation of natural convection heat transfer in a square cavity with porous inserts

Felipe Coelho de Andrade Fava^{1,*}, Roberto Carlos Moro Filho²

¹ Estudante do Programa de Pós-Graduação em Métodos Numérico em Engenharia, Universidade Federal do Paraná – UFPR, PR, Brasil

² Professor do Programa de Pós-Graduação em Métodos Numérico em Engenharia, Universidade Federal do Paraná – UFPR, PR, Brasil

*Corresponding author, E-mail: felipefava2009@hotmail.com

Received: 10 November 2025 | Accepted: 19 December 2025 | Published online: 24 December 2025

Resumo: Este trabalho é um estudo preliminar e trata da investigação da convecção natural em cavidades retangulares preenchidas total ou parcialmente com material poroso, sob condições de desequilíbrio térmico local. São apresentadas simulações numéricas para o escoamento laminar em regime permanente, com base em uma formulação macroscópica das equações de transporte. As equações da conservação da massa, quantidade de movimento e energia são escritas para um volume elementar representativo, resultando em um conjunto de equações válidas para todo o domínio computacional. Essas equações são discretizadas utilizando o método dos volumes de controle, e o sistema resultante de equações algébricas é resolvido pelo procedimento semi-implícito de Stone. O acoplamento pressão-velocidade é feito através do algoritmo SIMPLE. Resultados de *benchmarks* consolidados na literatura são comparados com soluções numéricas de escoamento laminar obtidas neste trabalho. Foram realizados testes de independência de malha para avaliar a influência do refinamento espacial sobre as variáveis de interesse. São apresentados os campos de temperatura e as linhas de corrente correspondentes às fases fluida e sólida, permitindo a visualização detalhada dos padrões de escoamento e da distribuição térmica sob diferentes condições de contorno. Também são apresentados os valores do número de Nusselt médio na parede aquecida, obtidos a partir do modelo macroscópico, para diversos números de Darcy. Por fim, é apresentado um estudo de sensibilidade em relação ao número de Rayleigh e à porosidade.

Palavras-chave: convecção natural; porosidade; simulação numérica; cavidade; escoamento laminar.

Abstract: This work is a preliminary study and deals with the investigation of natural convection in rectangular cavities filled fully or partially with porous materials under local thermal non-equilibrium conditions. Numerical computations for steady state laminar natural convection on a macroscopic formulation of the transport equations are presented. The equations of mass continuity, momentum and energy are written for an elementary representative volume yielding a set of equations valid for the entire computational domain. These equations are discretized using the control volume method and the resulting system of algebraic equations is then solved through the batch-implicit procedure using the Stone algorithm. The pressure-velocity coupling is done by using the SIMPLE algorithm. The Benchmark results for laminar flow are compared with similar numerical solutions obtained in this work. Numerical mesh tests were performed to verify the influence of refinement on the obtained results. The stream functions and the fluid and solid temperature fields are presented, where it is possible to visualize the flow patterns for different boundary conditions. The average Nusselt number at the hot wall, obtained from the macroscopic model, for several Darcy numbers are presented. A sensitivity study to the Rayleigh number and to the porosity is presented.

Keywords: natural convection; porosity; numerical simulation; enclosure; laminar flow.

1 Introdução

O estudo da convecção natural em cavidades é de extrema importância em diversos campos da engenharia. É possível citar uma ampla gama de aplicações, como o conforto térmico em edificações, a dissipação da poluição urbana, a captação e o armazenamento de energia solar, o aquecimento de reatores nucleares e a eficiência de equipamentos em geral que dependam da transferência de calor. Diversos trabalhos sobre o tema foram realizados ao longo dos últimos anos. O primeiro autor a formular matematicamente o problema foi Batchelor (1954), enquanto Poots (1958) realizou os primeiros cálculos e traçados de linhas isotérmicas e funções de corrente dentro da cavidade. De Vahl Davis (1968) estabeleceu o primeiro modelo numérico computacional e apresentou resultados para números de Rayleigh de até 10^6 , propondo em 1986 um *benchmark* numérico para convecção natural em uma cavidade quadrada aquecida em uma das paredes.

Posteriormente, com o avanço dos métodos numéricos e do poder computacional disponível para simulações, diversos autores como Fusegi et al. (1991), Pallares et al. (1996), Aquino (2001) e Frederick e Quiroz (2001) conduziram estudos recentes buscando representar os fenômenos de forma mais próxima da realidade, com escoamentos mais complexos e diferentes condições de contorno. Ampofo e Karayiannis (2003) obtiveram resultados experimentais para convecção natural turbulenta em uma cavidade retangular, enquanto Corvaro (2006) conduziu experimentos de convecção natural em cavidades quadradas, aquecendo uma das paredes para obter campos de temperatura, variações do número de Nusselt, linhas de corrente e campos de velocidade, posteriormente comparando com resultados numéricos.

Nithiarasu et al. (1997), desenvolveram um estudo sobre a transferência de calor por convecção natural em meio poroso, apresentando linhas de corrente e padrões isotérmicos para um meio de porosidade uniforme e para um meio de porosidade variável, ambos aquecidos pelo lado esquerdo e resfriados pelo lado direito.

Baytas (2002), estudou o escoamento em uma cavidade porosa e apresentou resultados para diferentes valores de condutividade térmica, traçando linhas isotérmicas e funções de corrente para vários casos testados.

Nogueira et al. (2011), estudaram a convecção natural em cavidades retangulares utilizando diferentes razões de aspecto, mostrando que o número de Nusselt é fortemente influenciado pela razão L/D (comprimento/altura), enquanto Nithyadevi et al. (2007) investigaram o efeito da razão de aspecto em cavidades com paredes laterais parcialmente aquecidas. Mais recentemente, Arici et al. (2015) estudaram o efeito da razão de aspecto na convecção natural em uma cavidade com paredes onduladas, para diferentes números de Rayleigh e ângulos de inclinação (de 0° a 180°).

No presente trabalho, a validação do modelo é realizada considerando o caso de uma cavidade sem material poroso (cavidade limpa), aquecida isotermicamente pela parede esquerda, que foi comparado com *benchmarks* e estudos experimentais consolidados. É apresentada uma análise de sensibilidade com a variação do número de Rayleigh e da porosidade sobre as linhas de corrente e sobre a transferência de calor. Também é apresentado um estudo considerando cavidades preenchidas total e parcialmente com material poroso.

2 Geometrias analisadas

2.1 Geometria da cavidade limpa e porosa

Considerando uma cavidade quadrada com lados iguais, $H = 1$ m, conforme esquematizado na Figura 1, a parede esquerda é aquecida isotermicamente em relação à temperatura de referência da parede direita, enquanto as paredes superior e inferior são consideradas adiabáticas. Admite-se que as propriedades do fluido e do meio poroso são constantes e que todas as paredes são rígidas e impermeáveis.

O número de Rayleigh utilizado para controle das simulações é dado pela Eq. 1:

$$Ra = \frac{g\beta H^3 \Delta T}{\nu\alpha} \quad (1)$$

onde g é a aceleração da gravidade, β é o coeficiente de expansão térmica do fluido, T é a temperatura, ν é a viscosidade cinemática e α é a difusividade térmica do fluido. A permeabilidade, de acordo com Kuwahara et al. (1998), é obtida pela Eq. 2:

$$K = \frac{D_p^2 \phi^3}{144(1-\phi)^2} \quad (2)$$

onde D_p é o diâmetro de partícula e ϕ é a porosidade.

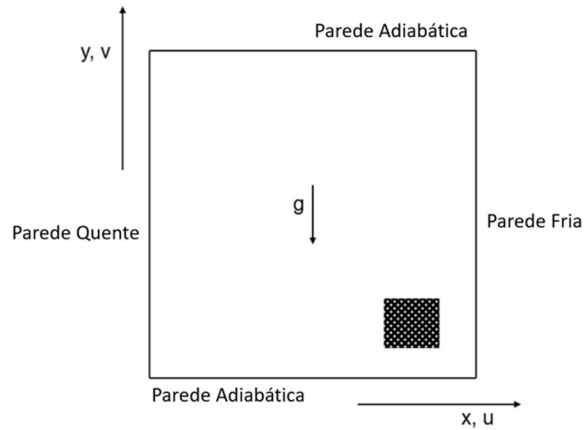


Figura 1. Esquema do modelo e das coordenadas utilizado nos testes iniciais.

2.2 Geometrias da cavidade com inserções porosas

Além da geometria da cavidade totalmente preenchida com meio poroso, também são analisadas uma barreira porosa e um contorno poroso, conforme esquematizado na Figura 2.

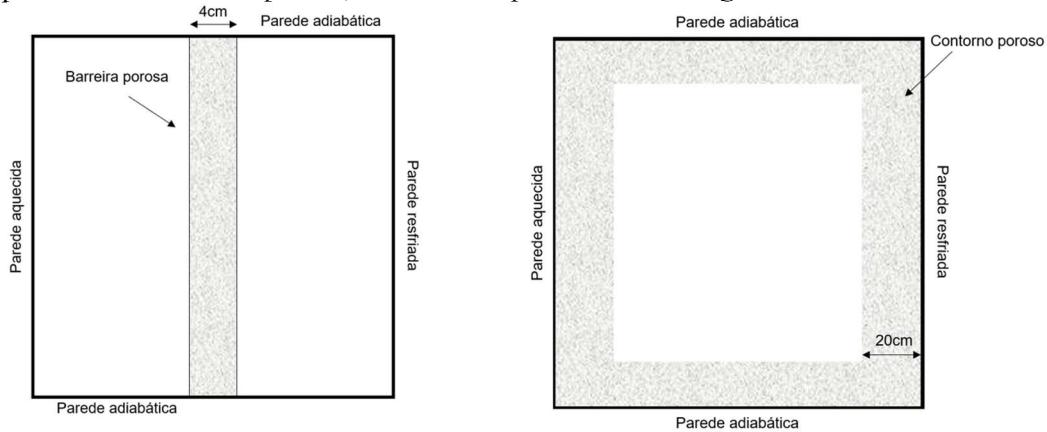


Figura 2. Esquema dos modelos de cavidade com barreira porosa e contorno poroso.

A barreira porosa é posicionada no meio do eixo x da cavidade e possui 4 cm de espessura, enquanto o contorno poroso é disposto nas paredes internas da cavidade e possui 20 cm de espessura.

3 Equações governantes

3.1 Equação macroscópica da conservação da massa

A Eq. 3 representa a equação macroscópica da conservação da massa para um fluido incompressível

$$\nabla(\rho \mathbf{u}_D) = 0 \quad (3)$$

onde \mathbf{u}_D é a velocidade média de superfície (também conhecida como velocidade de Darcy).

3.2 Equação macroscópica da quantidade de movimento

Para o escoamento por convecção natural considerado neste estudo, adota-se a aproximação de Boussinesq, que permite tratar o fluido como incompressível, observada na Eq. 4:

$$\rho_T \cong \rho[1 - \beta(T - T_{ref})] \quad (4)$$

onde a subscrição *ref* representa o valor de referência do sistema e β é o coeficiente de expansão térmica, dado pela Eq. 5:

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left. \frac{\partial \rho}{\partial T} \right|_p \quad (5)$$

Utilizando uma metodologia de médias volumétricas aplicadas ao campo de escoamento, os trabalhos de Kaviany (1995) e Pedras (2000) propuseram uma equação da quantidade de movimento, nos moldes da equação de Navier-Stokes. Uma das características dessa equação é a capacidade de descrever o escoamento tanto em meios limpos quanto em meios porosos. Braga (2003), estendeu os trabalhos de Pedras (2000) incluindo um termo de empuxo na equação. A equação macroscópica da quantidade de movimento assume então a forma descrita na Eq. 6:

$$\nabla \left(\frac{\rho \mathbf{u}_D \mathbf{u}_D}{\phi} \right) = -\nabla(\phi p) + \mu \nabla^2 \mathbf{u}_D - \left[\frac{\mu \phi}{K} \mathbf{u}_D + \frac{C_F \phi \rho |\mathbf{u}_D| \mathbf{u}_D}{\sqrt{K}} \right] + \rho \beta \mathbf{g} \phi (T_f - T_{ref}) \quad (6)$$

onde o último termo da equação representa a contribuição de Darcy-Forchheimer (Pedras, 2000). O símbolo K representa a permeabilidade do meio poroso, $C_F = 0,55$ é o coeficiente de arrasto de forma (coeficiente de Forchheimer), p é a pressão intrínseca (média volumétrica na fase fluida) do fluido, ρ é a densidade do fluido, μ é a viscosidade dinâmica do fluido e T_f e T_{ref} são, respectivamente, a temperatura do fluido e a temperatura de referência.

3.3 Modelo com duas equações da energia

Considerando a condição de desequilíbrio térmico local entre a fase fluida e a fase sólida, faz-se necessária a adoção de um modelo com duas equações da energia, uma para cada fase (Moro e Malalasekera, 2020).

Neste trabalho, os efeitos de dispersão e tortuosidade são desprezados. Dessa maneira, as Eq. 7 e Eq. 8 representam as equações da energia para a fase fluida e para a fase sólida, respectivamente:

$$(\rho c_p)_f \nabla \cdot (\mathbf{u}_D T_f) = \nabla \cdot \{ \mathbf{K}_{eff,f} \cdot \nabla T_f \} + h_v (T_s - T_f) \quad (7)$$

$$\nabla \cdot \{ \mathbf{K}_{eff,s} \cdot \nabla T_s \} = h_v (T_s - T_f) \quad (8)$$

onde c_p é o calor específico, T_f e T_s são, respectivamente, as médias intrínsecas das temperaturas da fase fluida e da fase sólida, h_v é o coeficiente volumétrico de transferência de calor, e $\mathbf{K}_{eff,f}$ e $\mathbf{K}_{eff,s}$ são os tensores de condutividade efetiva para a fase fluida e sólida, respectivamente, dados pelas Eq. 9 e Eq. 10:

$$\mathbf{K}_{eff,f} = [\phi k_f] \mathbf{I} \quad (9)$$

$$\mathbf{K}_{eff,s} = (1 - \phi) [k_s] \mathbf{I} \quad (10)$$

onde k_f e k_s são os valores de condutividade térmica do fluido e do sólido, respectivamente, e \mathbf{I} representa um tensor unitário.

4 Modelo numérico

As equações governantes foram discretizadas utilizando o método dos volumes finitos, descrito por Patankar (1980), e o sistema resultante de equações algébricas é resolvido utilizando o procedimento semi-implícito desenvolvido por Stone (1968).

O algoritmo SIMPLE foi empregado para o tratamento do acoplamento pressão-velocidade, para corrigir os campos de pressão e velocidade, começando pela solução das duas equações de quantidade de movimento. Em seguida, uma equação de correção de pressão, derivada da equação de continuidade, é resolvida para ajustar os campos de pressão e velocidade, assegurando que o escoamento satisfaça o princípio da conservação da massa em todo o domínio computacional.

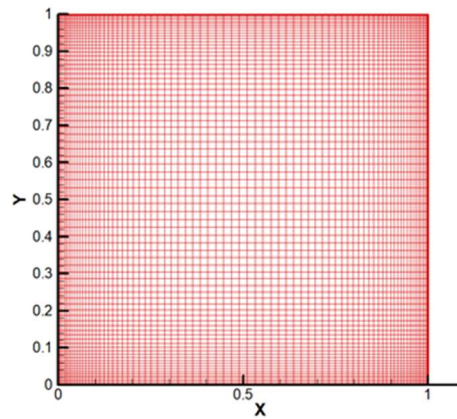


Figura 3. Malha computacional 80x80 utilizada.

Todas as simulações foram realizadas utilizando um processador AMD®Ryzen™ 3 3300X operando a 3,8GHz, com 16GB de memória RAM. Para todos os casos foi adotado um critério de convergência de 10^{-5} . A influência da malha nas soluções numéricas foi investigada por meio de testes de convergência, no qual o número de nós foi incrementado até a obtenção de resultados invariantes dentro de uma tolerância estabelecida. Para uma representação mais precisa do gradiente térmico em regiões próximas à parede, a malha foi refinada nestas áreas. A configuração final selecionada, representada na Figura 3, compreende uma malha de 80x80 elementos.

5 Resultados e discussões

5.1 Comparações e resultados obtidos para uma cavidade quadrada limpa

Os resultados para o escoamento laminar no interior de uma cavidade limpa, obtidos pela variação do número de Rayleigh nos valores de 10^3 , 10^4 , 10^5 e 10^6 , são comparados com os resultados de De Vahl Davis (1983) ilustrados nas Figuras 4 e 5. A comparação avaliou as linhas de corrente e os campos de temperatura, de forma que as imagens coloridas à esquerda representam os resultados deste trabalho, enquanto as imagens à direita em preto e branco representam os resultados de De Vahl Davis (1983).

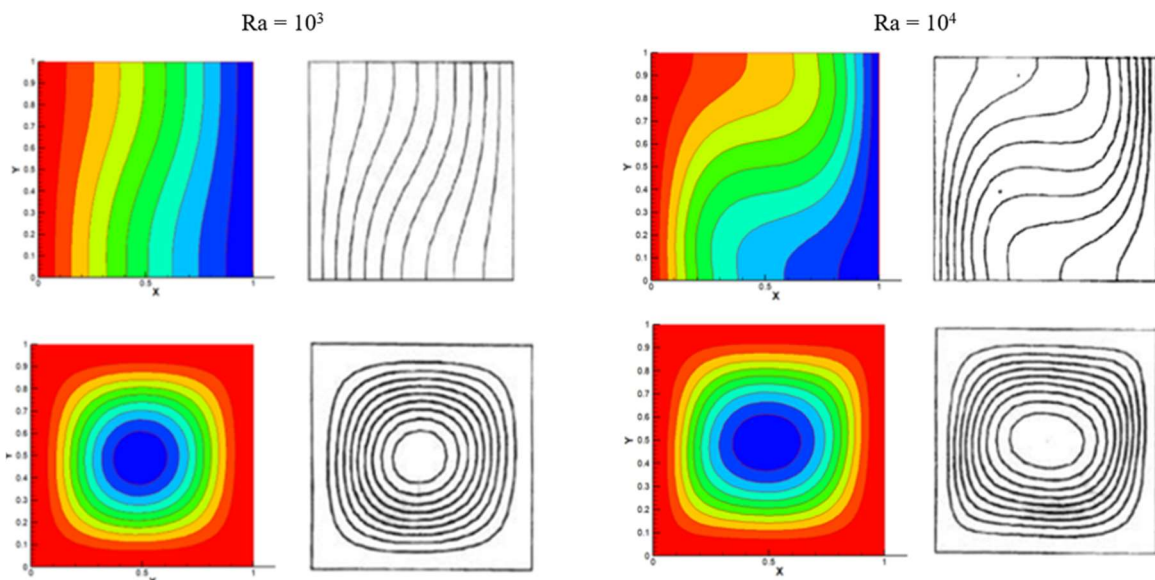


Figura 4. Campos de temperatura e linhas de corrente para uma cavidade limpa, aquecida pela parede esquerda e resfriada pela parede direita, com números de Rayleigh de 10^3 e 10^4 .

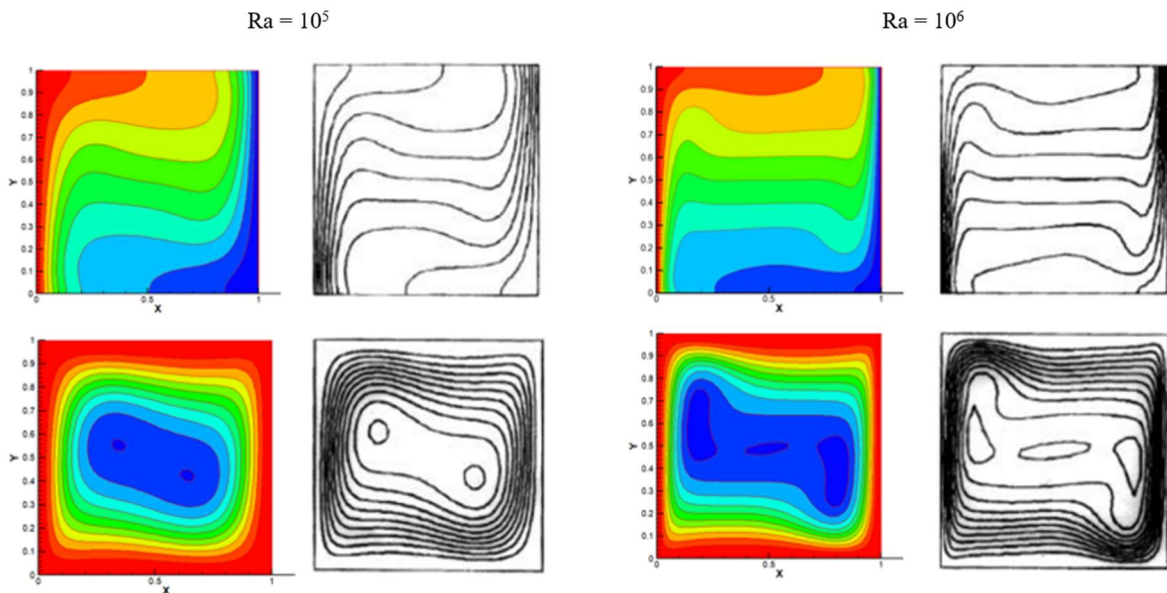


Figura 5 – Campos de temperatura e linhas de corrente para uma cavidade limpa, aquecida pela parede esquerda e resfriada pela parede direita, com números de Rayleigh de 10^5 e 10^6 .

É possível observar, através dos resultados obtidos, a similaridade entre os resultados de De Vahl Davis (1983) e os resultados obtidos no presente trabalho. Para um número de $Ra = 10^3$, as linhas de corrente revelam a presença de um único vórtice, centralizado e sem distorções no interior da cavidade. O campo de temperaturas, por sua vez, exibe linhas isotérmicas com uma orientação quase paralela às paredes verticais. Ao elevar o número de Rayleigh para 10^4 , o vórtice central assume uma configuração ligeiramente elíptica, enquanto as linhas isotérmicas passam a indicar um gradiente de temperatura mais acentuado nas regiões próximas às paredes verticais. Com $Ra = 10^5$, observa-se um alongamento do vórtice central, que então se subdivide em dois vórtices menores, deslocados da região central da cavidade. Nesta condição, a intensificação do gradiente térmico nas proximidades das paredes torna-se ainda mais evidente. Finalmente, para $Ra = 10^6$, os vórtices se afastam significativamente em direção às paredes verticais, permitindo o surgimento de um terceiro vórtice no centro da cavidade. O gradiente de temperatura próximo às paredes aumenta ainda mais, e as linhas isotérmicas adotam um perfil majoritariamente horizontal, em nítido contraste com o padrão verificado para os números de Rayleigh mais baixos.

Para um caso com número de Rayleigh de $1,89 \times 10^5$, os autores Krane e Jessee (1983) realizaram um estudo experimental e traçaram uma linha média de temperatura no eixo y em $y = H/2$. Essa comparação também foi realizada no presente trabalho e pode ser observada na Figura 6.

Os números de Nusselt médios obtidos são apresentados na Tabela 1, que inclui uma comparação com outros estudos encontrados na literatura.

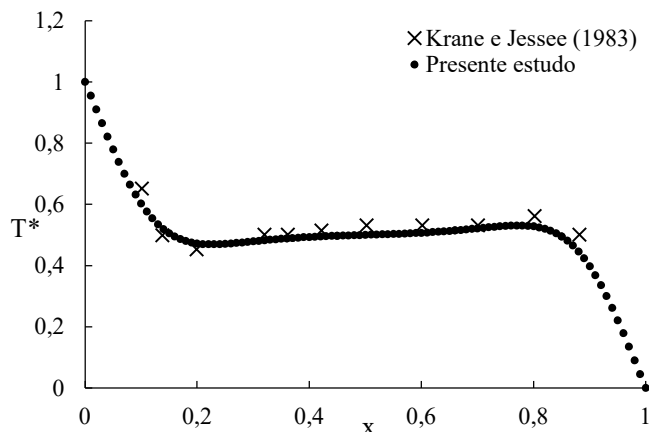


Figura 6 – Comparação de T^* em $y = H/2$ com os dados experimentais de Krane e Jessee (1983) para $Ra = 1,89 \times 10^5$.

Os números de Nusselt obtidos na parede aquecida para os casos simulados também foram comparados com outros trabalhos que utilizaram o estudo de De Vahl Davis (1983) para a validação de seus modelos. O cálculo foi realizado utilizando a formulação descrita na Eq. 11:

$$Nu = \frac{hL}{k} = \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=0} \frac{L}{T_H - T_c} \tag{11}$$

e o valor do número de Nusselt médio é calculado pela Eq. 12:

$$\overline{Nu} = \frac{1}{H} \int_0^H Nudy \tag{12}$$

Os resultados comparativos podem ser vistos na Tabela 1:

Tabela 1. Comparação do número de Nusselt médio, com Ra variando de 10³ a 10⁶ para a validação do modelo de uma cavidade quadrada limpa.

Estudos	Ra			
	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶
De Vahl Davis (1983)	1,117	2,238	4,509	8,817
Markatos e Pericleous (1984)	1,108	2,201	4,430	8,754
Fusegi et al. (1991)	1,105	2,302	4,646	9,012
Barakos et al. (1994)	1,114	2,245	4,510	8,806
Presente estudo	1,118	2,213	4,490	8,944

5.2 Resultados obtidos para uma cavidade totalmente preenchida com material poroso

Em seguida, o caso intermediário com Ra = 10⁶ foi escolhido para uma análise de sensibilidade referente à variação da porosidade do meio. Os valores simulados de ϕ foram de 0,7, 0,8, 0,9 e 0,95, e os resultados são mostrados na Figura 7.

Os resultados indicam que a redução da porosidade dificulta significativamente o escoamento, retardando o efeito de achatamento do vórtice central observado em simulações anteriores. Para os valores de porosidade de 0,7, 0,8 e 0,9, não há diferenças significativas nas linhas de corrente, que só se tornam elípticas para uma porosidade de 0,95.

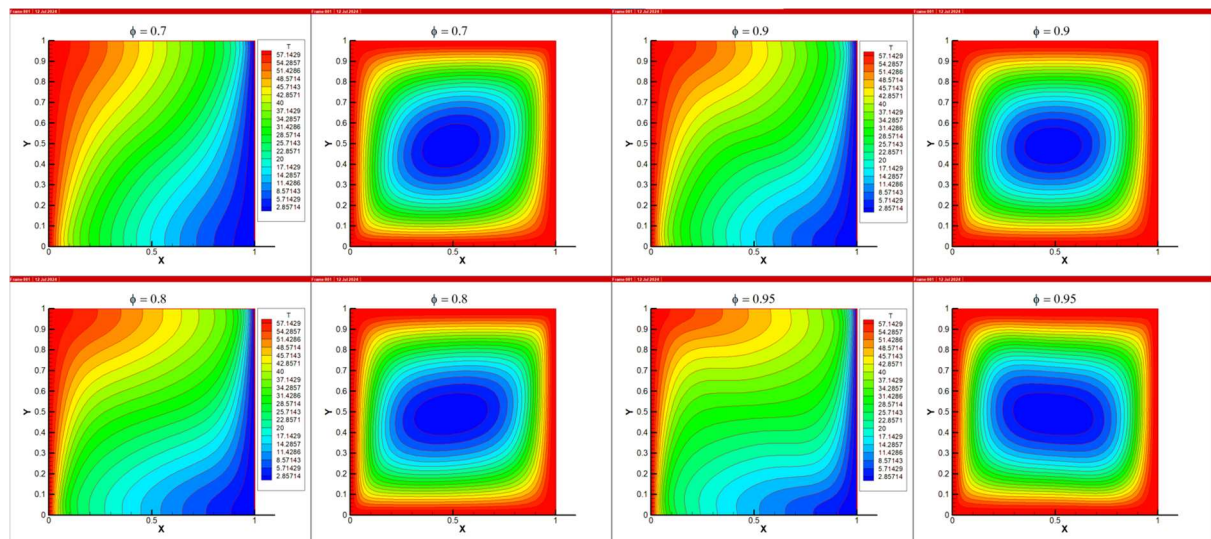


Figura 7. Campos de temperatura e linhas de corrente obtidas para uma cavidade quadrada porosa com Ra = 10⁶ e ϕ variando de 0,7 a 0,95.

Analisando os resultados dos campos de temperatura, nota-se que o gradiente de temperatura próximo às paredes verticais aumenta conforme a porosidade aumenta. Este efeito parece mais pronunciado ao observar o caso de porosidade de 0,95, onde o gradiente de temperatura decai de maneira mais abrupta no interior da cavidade em comparação com os casos de porosidade de 0,7, 0,8 e 0,9.

5.3 Resultados obtidos para uma cavidade com uma barreira porosa

Passando para a análise do escoamento com uma barreira porosa de 4 cm posicionada verticalmente na posição média do eixo x da cavidade, foram adotadas diferentes porosidades para verificar a influência dela

no escoamento. A Figura 8 mostra os resultados das linhas de corrente e dos campos de temperatura dos casos simulados com barreiras porosas de porosidade 0,6, 0,7, 0,8 e 0,9, para $Ra = 10^6$.

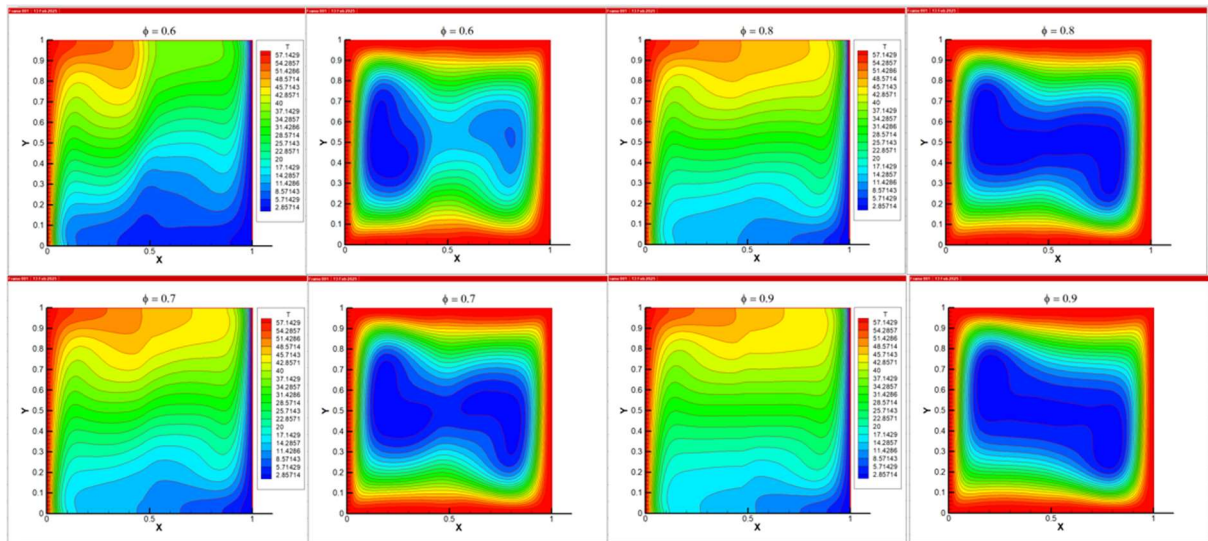


Figura 8. Campos de temperatura e linhas de corrente obtidas para uma cavidade quadrada com uma barreira porosa de 4cm, com $Ra = 10^6$ e $\phi = 0,6, 0,7, 0,8$ e $0,9$.

Para uma porosidade de 0,6, é possível observar dois vórtices no interior da cavidade em lados opostos da barreira. Uma descontinuidade significativa no campo de temperaturas também é observada. Com porosidade de 0,7, os vórtices começam a se aproximar e a descontinuidade nas isotermas torna-se mais suave. Nas porosidades de 0,8 e 0,9, os dois vórtices unem-se formando um único vórtice, e os campos de temperatura sofrem uma influência ainda menor da barreira.

5.4 Resultados obtidos para uma cavidade com um contorno poroso

Em seguida, um contorno poroso de 20 cm é introduzido na cavidade, e os resultados são obtidos para um Ra variando de 10^3 a 10^8 , com porosidade fixa de 0,9. Os resultados são mostrados na Figura 9.

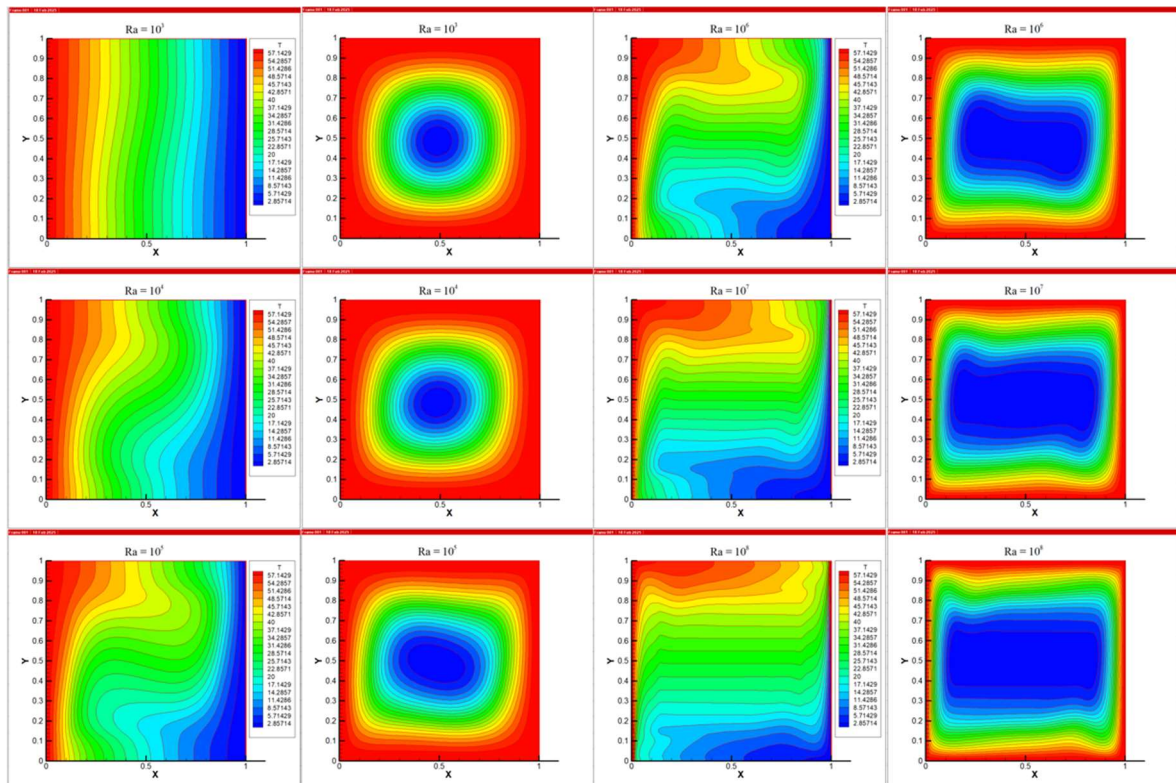


Figura 9. Campos de temperatura e linhas de corrente obtidas para uma cavidade quadrada com um contorno poroso de 20cm, com $\phi = 0,6$ e Ra variando de 10^3 a 10^8 .

Como resultado da inserção do contorno poroso na cavidade, é possível observar que o duplo vórtice não se forma no interior da cavidade, mesmo para números de Ra mais elevados. Ao invés disso, o vórtice único formado apresenta um formato achatado quando comparado às cavidades limpas e porosas simuladas. A estratificação dos campos de temperatura também é atrasada dentro do contorno poroso, que acaba se distorcendo em regiões próximas à fronteira entre da camada porosa com o meio limpo.

6 Conclusões

Neste trabalho foram conduzidas simulações do escoamento por convecção natural em regime laminar em cavidades limpas, porosas e parcialmente preenchidas com material poroso, estudando as linhas de corrente e os campos de temperatura pela variação do número de Rayleigh e da porosidade, assumindo um modelo de desequilíbrio térmico local. Para os casos de cavidade limpa, o modelo foi validado por meio da comparação com estudos clássicos da literatura, obtendo concordância com os trabalhos numérico de De Vahl Davis (1983) e experimental de Krane e Jessee (1983), tanto em relação aos campos de temperatura e linhas de corrente obtidos quanto aos valores do número de Nusselt.

Nas simulações que consideraram uma cavidade porosa, os parâmetros do número de Rayleigh e porosidade foram alterados. Embora nenhum estudo numérico e experimental tenha sido encontrado na literatura para os valores de porosidade testados, os resultados parecem estar de acordo com outros trabalhos publicados com porosidades diferentes. Neste sentido, foi observado que a redução da porosidade diminui significativamente a intensidade da convecção e dificulta a formação de múltiplos vórtices. O aumento da porosidade, por outro lado, intensifica a convecção e o gradiente térmico nas paredes verticais, comportamento coerente com o aumento da permeabilidade e com a maior participação do escoamento na transferência de calor. Os resultados demonstram a sensibilidade do fenômeno em relação às propriedades estruturais do meio poroso, aspecto relevante para o projeto de dispositivos térmicos que utilizem materiais porosos como isolantes ou trocadores de calor.

A análise com barreira porosa revelou que a presença de um obstáculo interno altera de maneira expressiva o padrão de escoamento e a distribuição de temperatura, atuando como um elemento dissipador de energia cinética e térmica. Já o modelo com contorno poroso apresentou uma redução significativa da intensidade da convecção natural em relação à cavidade limpa, mesmo para altos números de Rayleigh, evidenciando que a inclusão de camadas porosas nas fronteiras pode ser uma estratégia eficaz para o controle térmico e a mitigação de gradientes acentuados de temperatura no interior de cavidades confinadas.

De modo geral, os resultados confirmam que o comportamento do escoamento e da transferência de calor em cavidades parcialmente porosas é governado por uma interação complexa entre os efeitos de difusão térmica e transporte convectivo, modulada pela porosidade e pela configuração geométrica das regiões porosas. Essa compreensão é essencial para aplicações práticas em sistemas de isolamento, armazenamento de energia térmica, processos de secagem e dispositivos eletrônicos, onde o controle do fluxo de calor é crítico.

Como sugestão de trabalhos futuros, a extensão do modelo para escoamentos transientes e turbulentos, bem como a consideração de geometrias tridimensionais podem ser feitas. Além disso, a integração de modelos de radiação térmica e efeitos anisotrópicos na condutividade dos meios porosos pode ampliar a aplicabilidade do método em sistemas reais. A aplicação prática do modelo em geometrias de máquinas, ambientes, tubulações, reatores, trocadores de calor e sistemas de armazenamento de energia também representa um caminho promissor, permitindo avaliar com maior precisão o impacto de inserções porosas no desempenho térmico e fluidodinâmico desses dispositivos.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia – PPGMNE, à UFPR e à CAPES pelo financiamento e apoio à esta pesquisa.

Referências bibliográficas

Ampofo, F and Karayiannis, TG (2003) ‘Experimental benchmark data for turbulent natural convection in an air-filled square cavity’, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 46, n. 19, pp. 3551–3572. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(03\)00147-9](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(03)00147-9)

- Aquino, FRQ (2001) *Convecção natural em cavidades triangulares*. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Faculdade de Engenharia, Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá.
- Arici, M, Kan, M and Karabay, H (2015) ‘Effect of aspect ratio on natural convection in a cavity with wavy walls’, *Acta Physica Polonica A*, v. 128, n. 2B. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.128.B-197>
- Barakos, G, Mitsoulis, E and Assimacopoulos, D (1994) ‘Natural convection flow in a square cavity revisited: laminar and turbulent models with wall functions’, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, v. 18, pp. 695–719. <https://doi.org/10.1002/flid.1650180705>
- Batchelor, GK (1954) ‘Heat transfer by free convection across a closed cavity between vertical boundaries at different temperatures’, *Quarterly of Applied Mathematics*, v. 12, pp. 209–233. <https://doi.org/10.1090/QAM/64563>
- Baytas, AC and Pop, I (2002) ‘Free convection in a square porous cavity using a thermal nonequilibrium model’, *International Journal of Thermal Sciences*, v. 41, n. 9, pp. 861–870. [https://doi.org/10.1016/S1290-0729\(02\)01379-0](https://doi.org/10.1016/S1290-0729(02)01379-0)
- Brinkman, HC (1947) ‘A calculation of the viscous force exerted by a flowing fluid on a dense swarm of particles’, *Applied Scientific Research*, pp. 27–34. <https://doi.org/10.1007/BF02120313>
- Corvaro, M and Paroncini, M (2009) ‘An experimental study of natural convection in a differentially heated cavity through a 2D-PIV system’, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 52, n. 1–2, pp. 355–365. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.05.039>
- De Vahl Davis, G (1968) ‘Laminar natural convection in an enclosed rectangular cavity’, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 11, pp. 1675–1693. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(68\)90047-1](https://doi.org/10.1016/0017-9310(68)90047-1)
- De Vahl Davis, G (1983) ‘Natural convection of air in a square cavity: a benchmark numerical solution’, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, v. 3, pp. 249–264. <https://doi.org/10.1002/flid.1650030305>
- De Vahl Davis, G and Jones, IP (1983) ‘Natural convection of air in a square cavity: a comparison exercise’, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, v. 3, pp. 227–248. <https://doi.org/10.1002/flid.1650030304>
- Forchheimer, P (1901) ‘Wasserbewegung durch Boden’, *Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure*, v. 45, pp. 1782–1788.
- Frederick, RL and Quiroz, F (2001) ‘On the transition from conduction to convection regime in a cubical enclosure with a partially heated wall’, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 44, pp. 1699–1709. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(00\)00219-2](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(00)00219-2)
- Fusegi, T, Hyun, JM and Kuwahara, K (1991) ‘Three-dimensional simulations of natural convection in a sidewall-heated cube’, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, v. 13, pp. 857–867. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/flid.1650130704>
- Kaviany, M (1995) *Principles of Heat Transfer in Porous Media*. New York: Springer.
- Krane, RJ and Jessee, J (1983) ‘Some detailed field measurements for a natural convection flow in a vertical square enclosure’ in *Proceedings of the 1st Joint Conference ASME-JSME on Thermal Engineering*, vol. I, pp. 323–329.
- Kuwahara, F, Kameyama, Y, Yamashita, S and Nakayama, A (1998) ‘Numerical modeling of turbulent flow in porous media using a spatially periodic array’, *Journal of Porous Media*, v. 1, n. 1, pp. 47–55. Disponível em: <https://doi.org/10.1615/JPorMedia.v1.i1.40>
- Lemos, MJS de and Braga, EJ (2003) ‘Modeling of turbulent natural convection in saturated rigid porous media’, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, v. 30, n. 5, pp. 615–624. [https://doi.org/10.1016/S0735-1933\(03\)00099-X](https://doi.org/10.1016/S0735-1933(03)00099-X)
- Malico, I, Zhou, XY and Pereira, JCF (2000) ‘Two-dimensional numerical study of combustion and pollutant formation in porous burners’, *Combustion Science and Technology*, v. 152, n. 1, pp. 57–79. <https://doi.org/10.1080/00102200008952127>

- Markatos, NC and Pericleous, K (1984) ‘Laminar and turbulent natural convection in an enclosed cavity’, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 27, pp. 755–772. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(84\)90145-5](https://doi.org/10.1016/0017-9310(84)90145-5)
- Moro Filho, RC and Andrade, FO de (2022) ‘Numerical simulation of turbulent flow and heat transfer in a partially porous pipe’ in *13ª Escola de Primavera de Transição e Turbulência (EPTT 2022)*, Blumenau: ABCM. <https://doi.org/10.26678/ABCM.EPTT2022.EPT22-0072>
- Moro Filho, RC and Malalasekera, W (2020) ‘An analysis of thermal radiation in porous media under local thermal non-equilibrium’, *Transport in Porous Media*, v. 132, pp. 683–705. <https://doi.org/10.1007/s11242-020-01408-x>
- Nithiarasu, P, Seetharamu, KN and Sundararajan, T (1997) ‘Natural convective heat transfer in a fluid-saturated variable porosity medium’, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 40, n. 16, pp. 3955–3967. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(97\)00008-2](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(97)00008-2)
- Nithyadevi, N, Kandaswamy, P and Lee, J (2007) ‘Natural convection in a rectangular cavity with partially active side walls’, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 50, n. 23–24, pp. 4688–4697. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.03.050>
- Nogueira, R, Martins, M and Ampessan, F (2011) ‘Natural convection in rectangular cavities with different aspect ratios’, *Thermal Engineering*, v. 10, pp. 44–49. <https://doi.org/10.5380/reterm.v10i1-2.61951>
- Ozisik, MN (1985) *Heat Transfer: A Basic Approach*. Singapore: McGraw-Hill.
- Pallares, J, Cuesta, I, Grau, FX and Giralt, F (1996) ‘Natural convection in a cubical cavity heated from below at low Rayleigh numbers’, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 39, n. 15, pp. 3233–3247. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(95\)00390-8](https://doi.org/10.1016/0017-9310(95)00390-8)
- Patankar, SV (1980) *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. New York: Hemisphere Publishing Corporation.
- Pedras, MHJ (2000) *Análise do escoamento turbulento em meio poroso descontínuo*. Tese (Doutorado), Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.
- Poots, G (1958) ‘Heat transfer by laminar free convection in enclosed plane gas layers’, *Quarterly of Applied Mathematics*, v. 11, pp. 257–273. <https://doi.org/10.1093/qjmam/11.3.257>
- Santos de Jesus, ACFI (2021) *Solução numérica do modelo de Stokes-Brinkman para escoamentos em meios porosos*. Dissertação (Mestrado), Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Stone, HL (1968) ‘Iterative solution of implicit approximations of multidimensional partial differential equations’, *SIAM Journal on Numerical Analysis*, v. 5, n. 3, pp. 530–558. <https://doi.org/10.1137/0705044>
- Ward, JC (1964) ‘Turbulent flow in porous media’, *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, v. 90, n. HY5, pp. 1–12.