

USO DO SOFTWARE OPENFOAM PARA ESTUDO DA CONVECÇÃO FORÇADA NO INTERIOR DE UMA CAVIDADE.

Pedro Eloi de Oliveira Rodrigues, pedrodeoliveira@discente.ufg.br¹
Andreia Aoyagui Nascimento, aanascimento@ufg.br¹
Felipe Pamplona Mariano, fpmariano@ufg.br¹

¹Universidade Federal de Goiás, EMC, Bloco A, Q. 86 - 3º piso, Av. Universitária, 1488 - Qd. 86 Bloco A - Setor Leste Universitário, Goiânia - GO, 74605-010.

Resumo. O presente trabalho foi desenvolvido com o objetivo de usar e posteriormente validar o código *buoyantSimpleFoam* do software *OpenFOAM* para posterior aplicação na análise da termo ventilação em uma UAS. A validação do código computacional no qual o problema físico foi implementado é de grande importância para que os resultados obtidos sejam de confiança. Neste contexto, o trabalho em tela, buscar replicar os resultados obtidos em um artigo modelo que estuda a convecção forçada no interior de uma cavidade ventilada, realizando uma análise comparativa, em especial do ponto de vista qualitativo. Dentre outras coisas, o artigo modelo estuda os perfis de velocidade e temperatura para diferentes números de Reynolds e Prandtl no interior de uma cavidade aberta, com entrada e saída de massa nos lados superior esquerdo e inferior direito, respectivamente. Para esta validação, o número de Prandtl foi mantido constante e o número de Reynolds variou entre diversos valores, inclusive, excedentes aos do artigo. Os resultados se mostraram qualitativamente coerentes com os do artigo modelo, evidenciando linhas de corrente semelhantes aos do mesmo. Além disso, os perfis de velocidade evidenciaram picos na região da porta de saída e os perfis de temperatura nas regiões próximas às paredes da cavidade.

Palavras chave: Validação. *OpenFOAM*. Termo ventilação. Cavidade. Número de Reynolds.

Abstract. The present paper was developed with the purpose of using and later validating the *buoyantSimpleFoam* code of the *OpenFOAM* software for later applications in the analysis of thermo ventilation in a HCU. The validation of the computational code in which the physical problem that was implemented is of great importance so that the results obtained are reliable. In this context, this project seeks to replicate the results obtained in a model paper that studies forced convection inside a ventilated cavity, performing a comparative analysis, especially from a qualitative point of view. Among other things, the model paper studies velocity and temperature profiles for different Reynolds and Prandtl numbers inside an open cavity with mass inlet and mass outlet on the upper left and lower right sides, respectively. For this validation, the Prandtl numbers were kept constant and the Reynolds number varied between several values, even exceeding those in the article. The results were qualitatively consistent with those of the model paper, evidencing current lines similar to those of the same. In addition, the velocity profiles showed peaks in the exit port region and the temperature profiles in the regions close to the cavity walls.

Keywords: Validation. *OpenFOAM*. Thermo Ventilation. Cavity. Reynolds number.

1. INTRODUÇÃO

Cavidades ventiladas são aquelas que possuem aberturas em suas fronteiras para entrada e saída de massa. Devido ao fato de a cavidade possuir uma geometria simples, o estudo do escoamento e da transferência de calor no interior da mesma possui diversas aplicações de engenharia, sendo amplamente utilizada tanto na validação de códigos computacionais, como no estudo de sistemas de ar condicionado ou refrigeração de componentes eletrônicos (Mioralli *et. al.*, 2017). Independente da aplicação, o conhecimento do campo de escoamento ou perfil de temperatura no interior da cavidade, permite uma melhor otimização do projeto.

O estudo em questão pode ser realizado tanto através de métodos experimentais quanto de métodos numérico computacionais. Mioralli *et. al.* (2017) realizou uma análise numérica da convecção forçada e laminar no interior de uma cavidade quadrada e aberta. Os autores apresentaram as linhas de corrente e os perfis de velocidade e temperatura para diferentes números de Reynolds (Re) e Prandtl (Pr). Foi observado que independentemente do número de Pr, o aumento de Re resulta em um crescimento das regiões de recirculação no interior da cavidade.

Youssef *et. al.* (2018) investigou numericamente como a alteração de parâmetros de entrada (altura da abertura, velocidade e temperatura) de um sistema de ar frio interferem no conforto térmico no interior de uma cavidade. Para isso, os autores utilizaram de critérios fornecidos pelo manual da ASHRAE (2009) para a avaliação do conforto térmico, observando que a variação da temperatura ou velocidade de alimentação não afetam o conforto térmico. Porém, também foi apresentado a influência da carga térmica na superfície inferior da cavidade nos resultados, mostrando que o conforto térmico aumenta quando se reduz os valores do fluxo térmico.

Macias-Melo *et. al.* (2018) apresentaram em seu trabalho um estudo comparativo entre os métodos experimental e numérico da transferência de calor por convecção no interior de uma cavidade retangular. Para isso, foi confeccionada uma cavidade com diferentes configurações de entrada e saída de ar, onde uma das paredes foi submetida à um fluxo de calor uniforme e constante. Os autores concluíram que o método numérico apresentou uma aproximação quantitativa aceitável, com erros, em geral, inferiores a 5%.

O estudo numérico computacional de uma cavidade ventilada pode ser realizado através de diversos softwares, como o FLUENT ANSYS, utilizado por Youssef *et. al.* (2018) ou o OpenFOAM, utilizado por Mioralli *et. al.* (2017). Limane *et. al.* (2014) simularam diferentes modelos de turbulência e códigos presentes na biblioteca do OpenFOAM, no intuito de validar modelos de ventilação em edifícios.

Neste contexto, o trabalho em questão busca o utilizar e iniciar a validação do OpenFOAM 8.0, através da replicação de parte dos resultados obtidos Mioralli *et. al.* (2017), para aplicação no estudo da termo ventilação em uma Unidades Assistenciais de Saúde (UAS). Os resultados apresentados abordam os perfis de velocidade e temperatura no interior da cavidade para diferentes números de Re.

2. METODOLOGIA

O problema em questão foi implementado no código *buoyantSimpleFoam* do OpenFOAM, o qual utiliza do método dos volumes finitos para a discretização do domínio espacial. As equações envolvidas no problema físico são resolvidas iterativamente através do método SIMPLE para o acoplamento pressão velocidade para com uma malha uniforme e estruturada de 160x160 (Mioralli *et. al.*, 2017; Maliska, 2004).

2.1. Problema físico

O problema físico, Fig. 1, consiste em uma cavidade 2D com entrada de massa no lado superior esquerdo e saída de massa no lado inferior direito. Todas as paredes da cavidade são adiabáticas e isotérmicas.

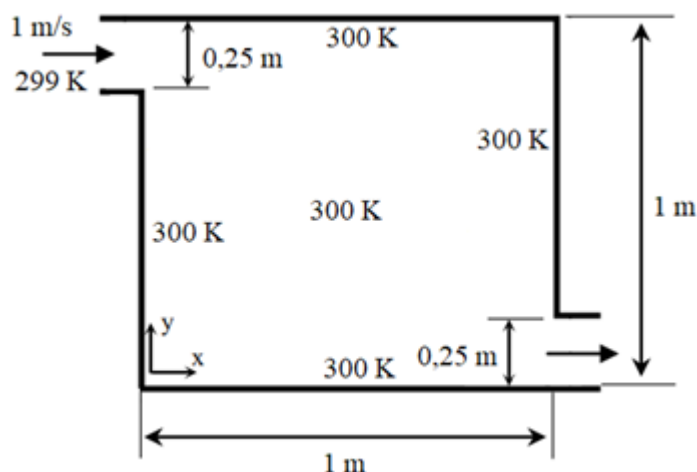


Figura 1. Esquema gráfico do problema físico (adaptado de Mioralli *et. al.*, 2011)

O escoamento é bidimensional, laminar, incompressível e em regime permanente, fluido newtoniano sem dissipação viscosa de energia, com a viscosidade dinâmica e o calor específico constantes e uniformes. Tais hipóteses implicam na não existência de forças de empuxo e conseqüentemente convecção natural.

2.2. Modelo matemático

A equação da conservação da massa, implementadas no código do OpenFOAM, nas coordenadas cartesianas x e y respectivamente, são:

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

onde u e v são as componentes nas direções horizontal e vertical da velocidade, respectivamente.

As equações da quantidade de movimento nas direções x e y , respectivamente, Eq. 2 e Eq. 3,

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

onde a ρ é massa específica, μ a viscosidade dinâmica e p a pressão. De forma semelhante, a equação da energia é escrita na Eq. 4:

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

onde a k é condutividade térmica, c_p o calor específico e T a temperatura (White, 2011).

Os números adimensionais Pr e Re são obtidos quando se realiza a adimensionalização das Eq. 2 a Eq. 4. Para isso, é necessário conhecer cada uma de suas variáveis adimensionais (Mioralli *et. al.*, 2017; White, 2011):

$$U = \frac{u}{u_{ent}} \quad V = \frac{v}{u_{ent}} \quad X = \frac{x}{L} \quad Y = \frac{y}{L} \quad P = \frac{p}{\rho u_{ent}^2} \quad \theta = \frac{T - T_{ent}}{T_P - T_{ent}} \quad (5)$$

onde o índice *ent* se refere às variáveis de entrada, o índice P às variáveis nas paredes e L à altura da cavidade.

O número de Pr é definido como a razão entre a difusividade de momento linear e a difusividade térmica, podendo ser escrito como $(\mu c_p)/k$. O número de Re , por outro lado, é definido como a razão de forças inerciais por forças viscosas, podendo ser escrito, para este caso, como $(\rho u_{in} L)/\mu$ (White, 2011). Assim, as equações de transporte adimensionais são escritas como:

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (6)$$

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) \quad (7)$$

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) \quad (8)$$

$$U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{1}{Pr Re} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right) \quad (9)$$

Como foram definidos valores para a velocidade e altura da cavidade, Fig. 1, Re foi ajustado para cada simulação variando apenas a viscosidade dinâmica do fluido. A massa específica foi admita como unitária.

Para a independência da malha, seção 2.3, o número de Nusselt (Nu) local, médio da parede e médio total foi calculado, respectivamente, pelas Eqs. 10.

$$a) Nu_{local} = -\frac{\partial \theta}{\partial n} \quad b) \overline{Nu}_i = -\frac{1}{s_1^i - s_2^i} \int_{s_1^i}^{s_2^i} Nu \, dS \quad c) \overline{Nu} = \sum_i \frac{\overline{Nu}_i (s_1^i - s_2^i)}{S_{total}} \quad (10)$$

onde n é a direção normal à parede; o índice i representa qual a parede onde os cálculos estão sendo realizados; S é a coordenada cartesiana paralela à parede; S_1^i e S_2^i são as extremidades de cada parede; S_{total} é o comprimento total de toda a fronteira da cavidade.

2.3. Independência da malha

Com base nos testes de Mioralli *et. al.* (2017), foram consideradas diversas malhas estruturadas e uniformes afim de verificar sua independência nos resultados. Para cada malha foi calculado o Nu médio da cavidade através da Eq. 10c.

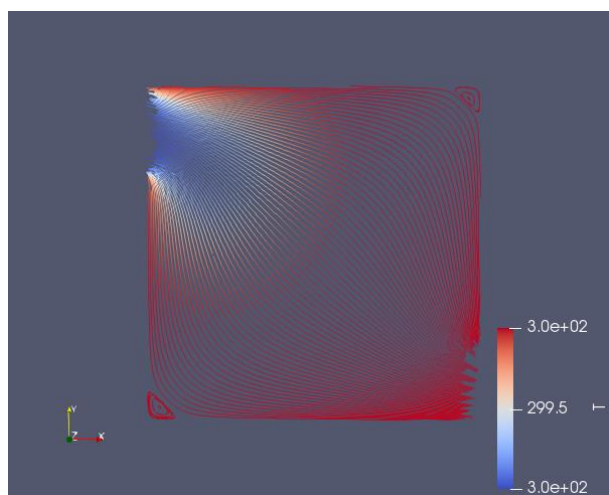
Tabela 1. Resultados para a independência da malha para $Re = 50$ e $Pr = 5$ (próprio autor)

Malha (X-Y)	40x40	80x80	120x120	160x160	200x200	240x240	280x280
\overline{Nu}	5,73	6,01	6,20	6,41	6,52	6,56	6,57

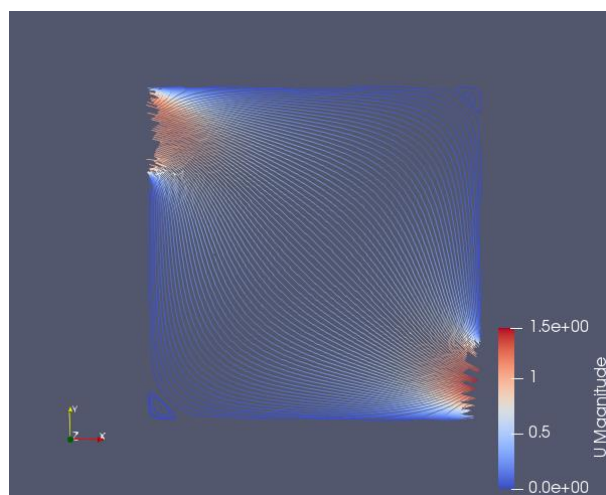
De acordo com a Tabela 1, todas as configurações de malha apresentam boa concordância entre si. Por este motivo e por questões de tempo de simulação, assim como Mioralli *et. al.* (2017), foi escolhida a malha de 160x160.

3. RESULTADOS

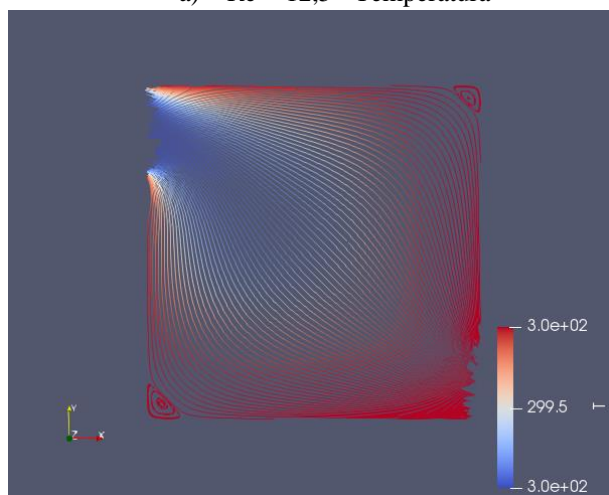
Foram realizadas um total de sete simulações, variando apenas o número de Reynolds. Foram assumidos os valores $Re = 12.5, 25, 50, 100, 200, 400$ e 500 , mantendo Pr constante e igual a 5. Os valores para velocidade e temperatura presentes na Fig. 1 permanecem os mesmos em todas as simulações realizadas. Mioralli *et. al.* (2017) realizou simulações apenas com $Re = 50, 100$ e 500 .



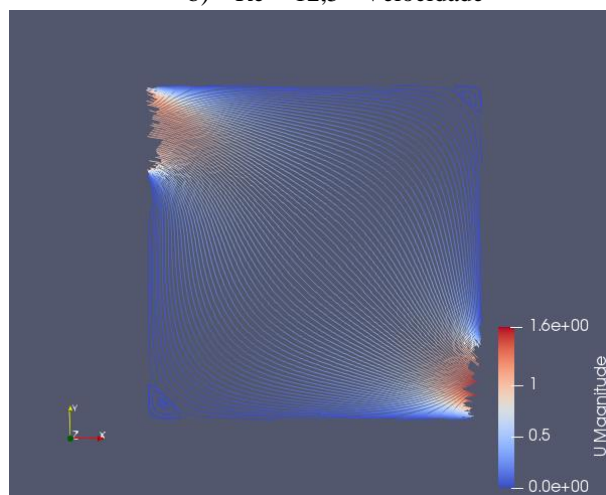
a) $Re = 12,5$ - Temperatura



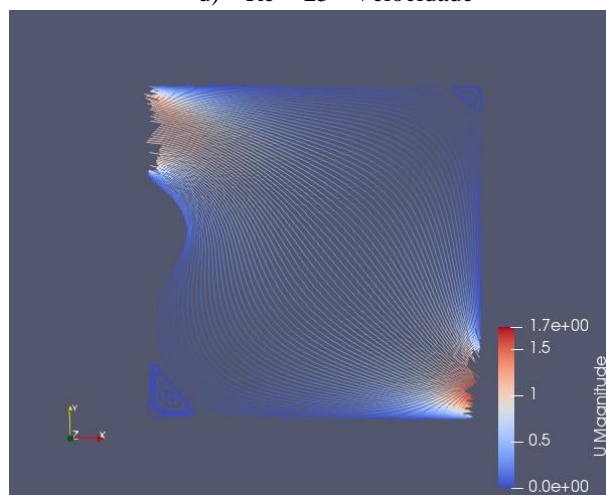
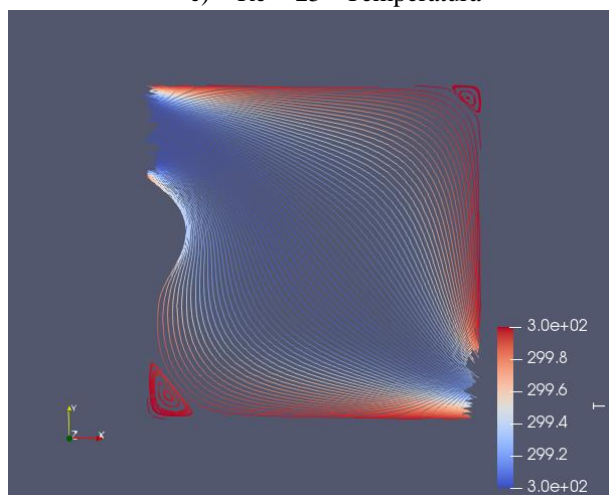
b) $Re = 12,5$ - Velocidade



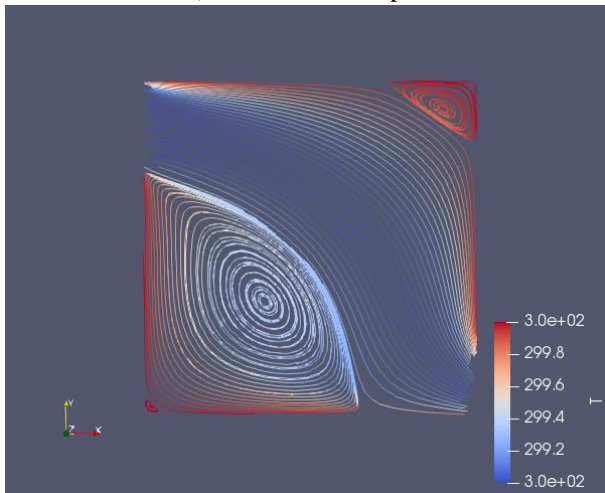
c) $Re = 25$ - Temperatura



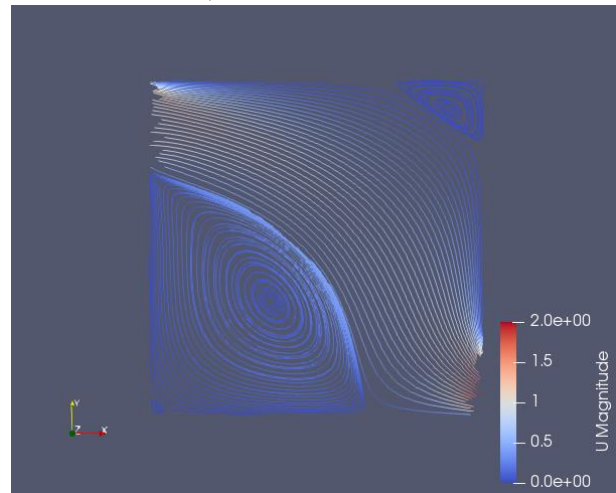
d) $Re = 25$ - Velocidade



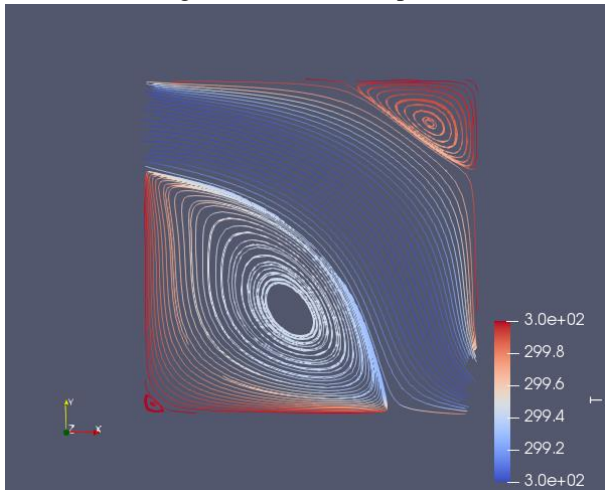
e) Re = 50 - Temperatura



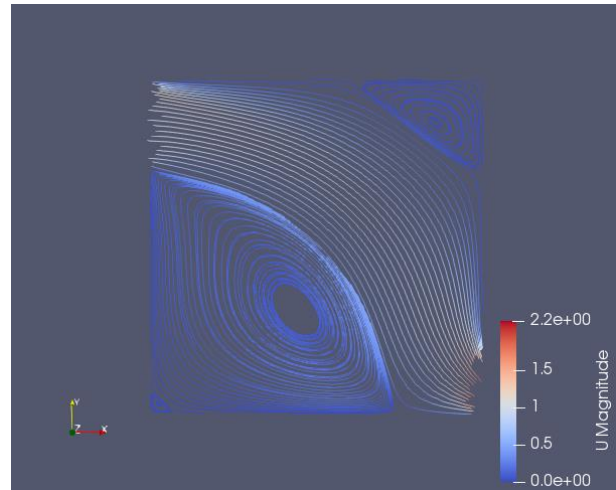
f) Re = 50 - Velocidade



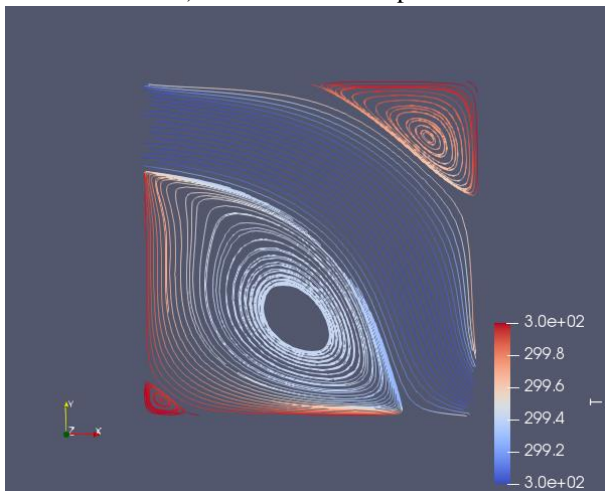
g) Re = 100 - Temperatura



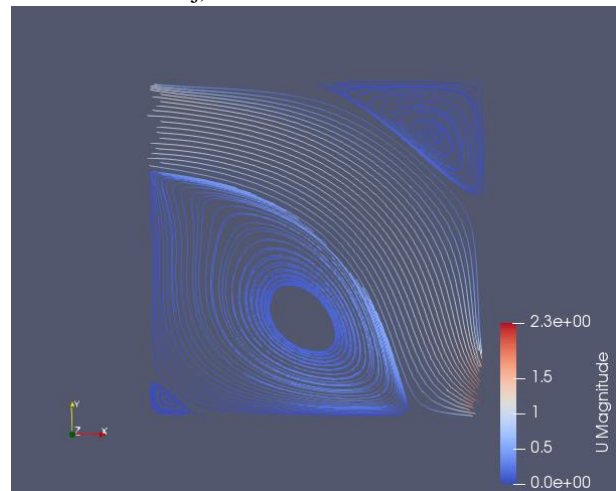
h) Re = 100 - Velocidade



i) Re = 200 - Temperatura



j) Re = 200 - Velocidade



k) Re = 400 - Temperatura



l) Re = 400 - Velocidade



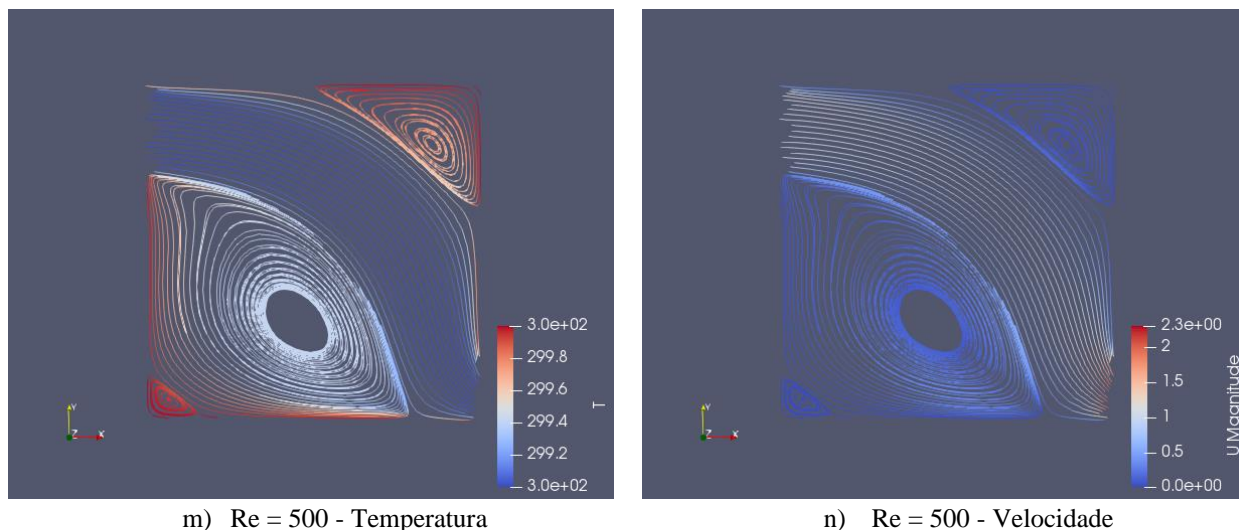
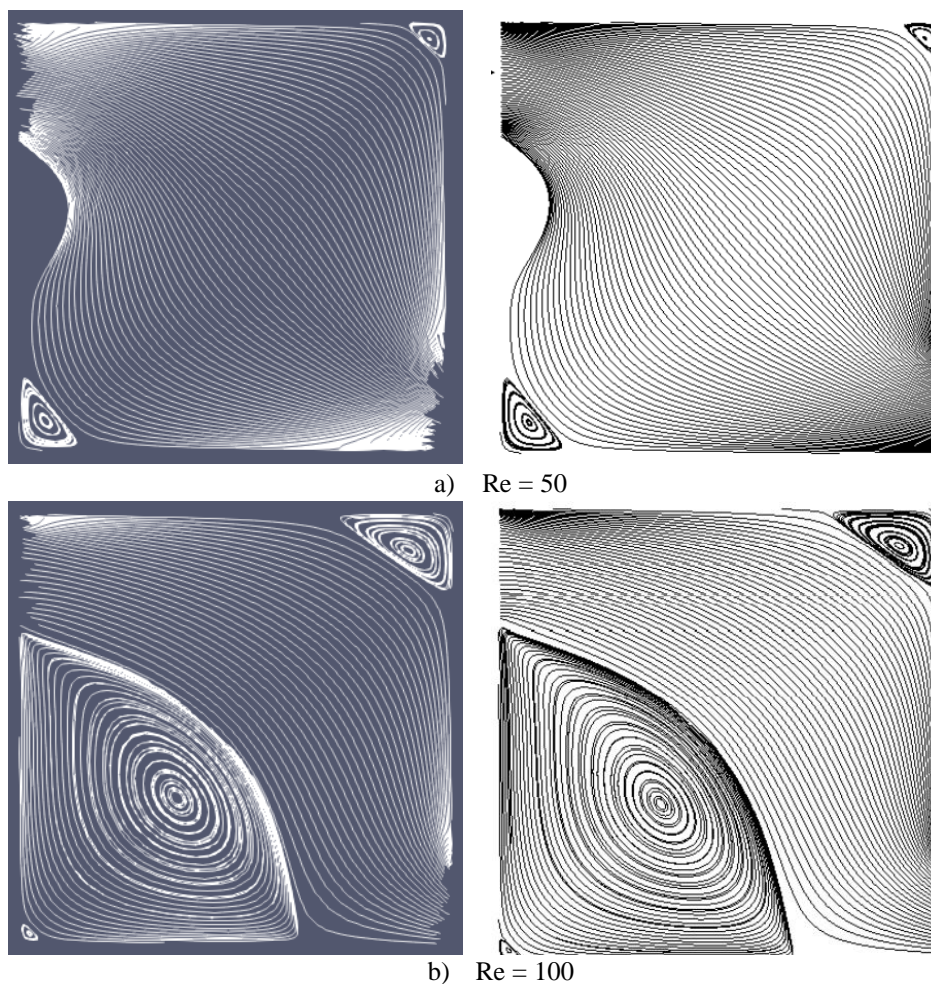


Figura 2. Perfis de velocidade e temperatura (próprio autor)

Na Figura 2 está apresentada a velocidade e temperatura para os números de Re especificados. É perceptível que conforme se aumenta Re, a região da cavidade ocupada por recirculações tende a aumentar. Este aumento se torna bastante discreto de Re = 400 para Re = 500. Em Re = 12,5 nota-se pequenas recirculações nos cantos inferior esquerdo (sentido horário) e superior direito (sentido anti-horário), onde a maior parte das linhas de corrente ligam as portas de entrada com as de saída da cavidade. Para Re = 100, há um grande aumento de ambas as recirculações (em especial a inferior), surgindo uma outra menor no canto inferior esquerdo (sentido anti-horário), o que está em acordo com os resultados de Mioralli *et. al.* (2017), segunda coluna da Fig. 3.



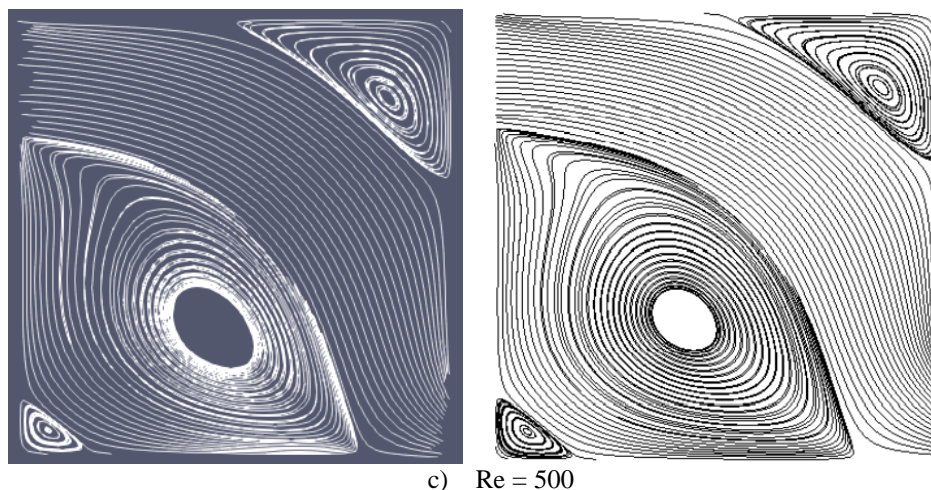


Figura 3. Comparação entre as linhas de corrente (próprio autor, adaptado de Mioralli *et. al.*, 2017)

Para $Re = 200, 400$ e 500 , há uma lenta evolução no tamanho das recirculações, que se torna ainda mais sutil quando ao se comparar os resultados de $Re = 400$ com os de $Re = 500$. Além disso, as linhas de corrente que ligam as aberturas de entrada e saída se tornam cada vez mais estreitas. De acordo com Mioralli *et. al.* (2017), para $Re = 50$, elas ocupam cerca de 90% da cavidade e para $Re = 100$ esse valor é reduzido para cerca de 60%.

Com base nos perfis de velocidade, percebe-se que seus valores são muito baixos próximos às paredes (condição de aderência) e dentro das recirculações, atingindo os maiores valores próximo às seções de entrada e principalmente saída e nas interfaces das recirculações. O pico de velocidade cresceu com o número de Re , havendo uma diferença percentual máxima de aproximadamente 44%.

Os maiores valores de temperatura foram observados próximo às paredes, devido ao fato de as mesmas serem isotérmicas e estarem a 300 K. A temperatura na região central da cavidade também foi avaliada em função do número de Re . A Figura 4 apresenta os resultados.

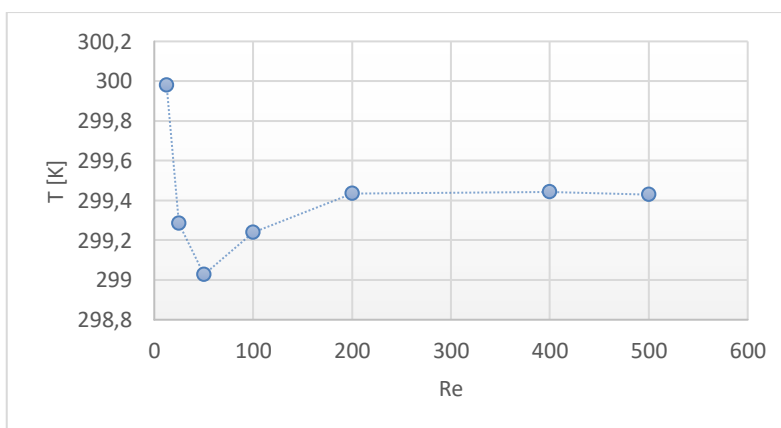


Figura 4. Variação da temperatura posição (0,5; 0,5) da cavidade em função de Re (próprio autor)

Na Figura 4, com Re entre 12,5 e 50, há um acentuado declínio no valor da temperatura, mostrando que aumentando Re , obtém-se menores valores para as temperaturas nas regiões mais próximas da saída da cavidade. A partir de $Re = 100$, há um novo aumento na temperatura, pois com o aumento da primeira recirculação do canto inferior esquerdo, a região central passa a se encontrar no interior da mesma, Fig. 2 (g) e Fig. 2 (h), possui maiores valores de temperatura do que as linhas de corrente que unem a entrada com a saída.

Com relação a velocidade no ponto central (0,5; 0,5), Fig. 5, percebe-se que ocorre o inverso da temperatura. Até $Re = 50$ há um aumento nos valores de velocidade, e após $Re = 100$ um declínio. Ao contrário da análise da temperatura, dentro das recirculações observa-se menores valores de velocidade do que entre a entrada e a saída da cavidade.

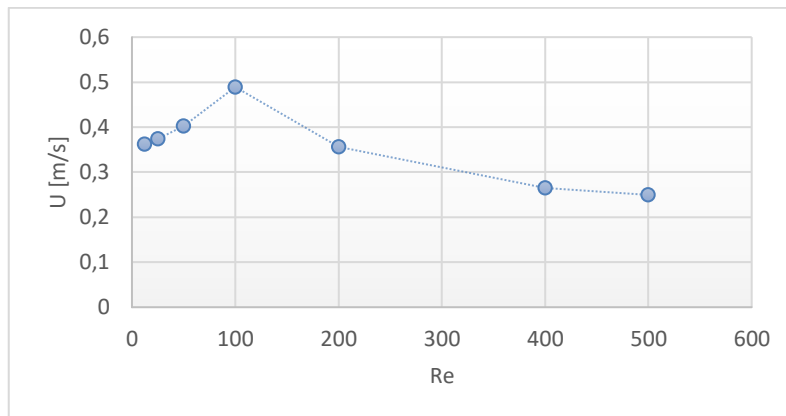


Figura 5. Variação da velocidade na posição (0,5; 0,5) da cavidade em função de Re (próprio autor)

4. CONCLUSÕES

De acordo com a documentação do OpenFOAM (2018), o *buoyantSimpleFoam* é um código aplicável à escoamentos compressíveis, turbulentos e em regime permanente. Como foi dito, o trabalho de Mioralli *et. al.* (2017) admite as hipóteses de escoamento incompressível e laminar, o que contraria, a princípio, a informação presente na documentação.

Foi necessário, portanto, verificar se o código em questão permitiria a solução de um problema com as hipóteses apresentadas. Substituindo o modelo de turbulência inicialmente implementado ($k-\epsilon$) para escoamento laminar e a equação da massa específica (equação de estado para gás perfeito) para um valor constante, foi possível obter as soluções apresentadas.

Os resultados apresentados se mostraram coerentes com os de Mioralli *et. al.* (2017), mostrando que com as devidas modificações, o *buoyantSimpleFoam* pode ser utilizado para resolver problemas cujo escoamento é permanente e se encontra em regime permanente.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à PRPI, UFG e ao Ministério Público do Trabalho de Goiás.

6. REFERÊNCIAS

- ASHRAE *Handbook-Fundamentals 2009*, ASHRAE; 2009 [chapter 20].
- Limane, A., Fellouah, H., & Galanis, N. (2015). Thermo-ventilation study by OpenFOAM of the airflow in a cavity with heated floor. *Building Simulation*, 8(3), 271–283.
- Macias-Melo, E. v., Aguilar-Castro, K. M., Xamán, J., & Hernández-Pérez, I. (2018). Experimental study of convective heat transfer in a ventilated rectangular cavity. *Journal of Building Physics*, 42(3), 388–415.
- Maliska, C. R. *Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional*. 2ª edição Rio de Janeiro: LTC, 2004.
- Mioralli, P. C., Scalon, V. L., Avallone, E., & Júnior, S. A. V. (2017). *Analysis of laminar forced convection inside a square ventilated cavity using the OpenFOAM®* (Vol. 16, Issue 1).
- OPENFOAM. In: OpenFOAM. [S. l.], 2018. Disponível em:
<https://www.openfoam.com/documentation/guides/latest/doc/guide-applications-solvers-heat-transfer-buoyantSimpleFoam.html>. Acesso em: 1 fev. 2022.
- White, F. M. *Mecânica dos Fluidos*. 6ª edição. Rio de Janeiro: McGraw-Hill, 2010.
- Youssef, A. A., Mina, E. M., ElBaz, A. R., & AbdelMessih, R. N. (2018). Studying comfort in a room with cold air system using computational fluid dynamics. *Ain Shams Engineering Journal*, 9(4), 1753–1762.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.