

CONVECÇÃO NATURAL EM CAVIDADES ABERTAS: estudo computacional de tipos de malha e domínio no software OpenFOAM

Tássio Tetsuo Yoshinaga[1], Thiago Parente Lima[1*]

[1] Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Instituto de Ciência e Tecnologia, Diamantina, Minas Gerais, Brasil, 39100-000.

***e-mail:** thiago.parente@ufvjm.edu.br

Resumo: O estudo de cavidades abertas pode contribuir com tecnologias de aquecimento solar passivo, resfriamento de componentes eletrônicos, entre outras. O objetivo deste trabalho é simular a transferência de calor por convecção natural em uma cavidade aberta, avaliando a influência do tipo de malha computacional e dimensões do domínio na transferência de calor da cavidade, utilizando o software OpenFOAM. Como resultados observou-se que o uso da malha triangular nas fronteiras do domínio resultaram na divergência das simulações. Por sua vez, o tamanho do domínio resulta numa maior instabilidade da pluma ascendente que deixa a abertura da cavidade, porém, sem influência significativa no número de Nusselt da cavidade.

Palavras-chave: CFD, OPENFOAM, SALOME, NETGEN, BUOYANTFOAM.

1. INTRODUÇÃO

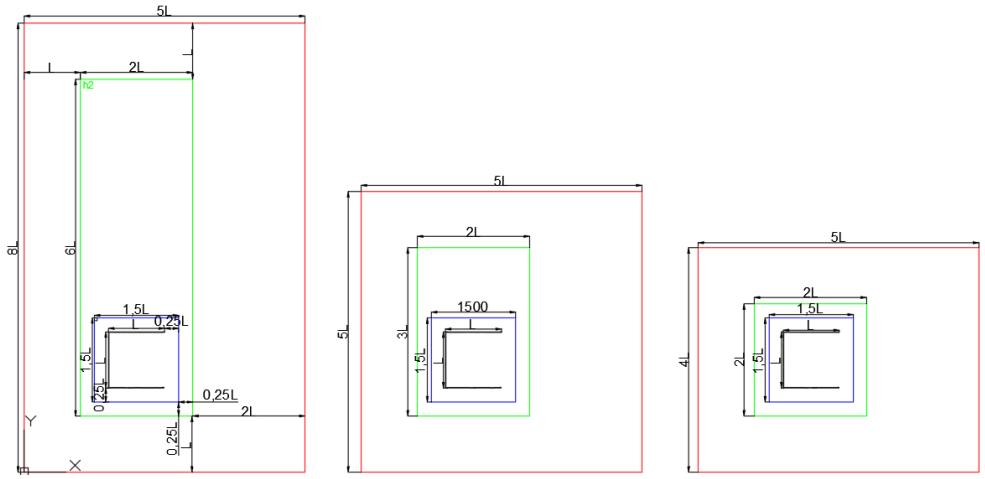
A transferência de calor em cavidades tem recebido maior atenção devido as suas aplicações na engenharia, tais como, aquecimento solar passivo, conservação de energia em construções, receptores concentradores de energia solar e equipamentos eletrônicos [1]. O estudo de cavidades abertas pode contribuir com estas tecnologias, auxiliando na análise e otimização da transferência de calor nestes dispositivos. Por se tratar de um problema clássico da transferência de calor, diferentes configurações de cavidades abertas já foram estudadas [2, 3].

O objetivo deste trabalho é simular a transferência de calor por convecção natural em uma cavidade aberta, avaliando a influência do tipo de malha computacional e dimensões do domínio na transferência de calor da cavidade, utilizando o software OpenFOAM.

2. METODOLOGIA

No estudo da influência das dimensões do domínio, foram utilizados três domínios bidimensionais, considerando a parede vertical interna da cavidade aquecida com temperatura constante e as demais paredes da cavidade como adiabáticas [4]. A fronteira inferior do domínio foi considerada como uma superfície sólida. Esta configuração foi necessária para se obter estabilidade numérica durante as simulações. Os domínios possuem três zonas com diferentes níveis de refinamento de malha, indicadas pelas regiões azul, verde e vermelho na Figura 1.

Figura 1. Dimensões do domínio computacional, onde L =1 m.



O estudo da influência do tipo de malha foi realizado no domínio de maior dimensão (8·L). As malhas foram construídas no software SALOME, utilizando o algorítimo NETGEN 1D-2D. Foram testadas três configurações de malha compostas predominantemente por triângulos (Figura 2, esq.), por quadrângulos (Figura 2, dir.), utilizando a opção "*Quad-dominated*" no software SALOME, e mista, com triângulos nas regiões azul e verde e quadrângulos na região vermelha, conforme Figura 1.

A verificação do código foi realizada por meio de um estudo de malha [5], utilizando três níveis de refinamento no domínio de maior dimensão e malha composta por quadrângulos. A configuração das malhas no software SALOME é apresentada na Tabela 1. Todas as malhas foram refinadas nas regiões

próximas a parede, utilizando a ferramenta "*Viscous layers*" com a configuração: *Total thickness*=1, *Number of layers*=5 e *Strech factor*=1. No estudo da influência do domínio e dos tipos de malha foram utilizadas apenas as malhas com refinamento h1.

Figura 2. Malha da região azul, composta por triângulos (esq.) e quadrângulos (dir.).

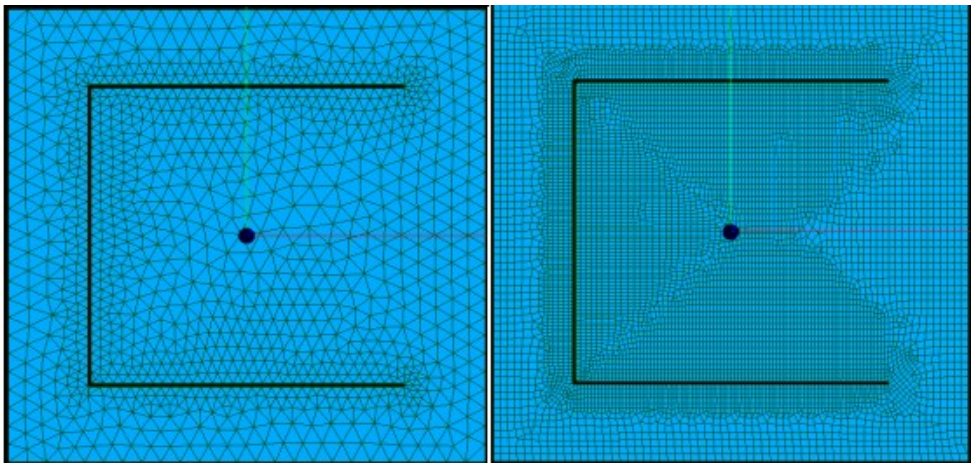


Tabela 1: Configuração das malhas no software SALOME.

Região	**Refinamento da malha**		
	h3 (grosseiro)	h2 (médio)	h1 (fino)
Vermelha	Max. Size: 40 Min. Size: 25	Max. Size: 31 Min. Size: 25	Max. Size: 16 Min. Size: 13
Verde	Max. Size: 25 Min. Size: 20	Max. Size: 16 Min. Size: 13	Max. Size: 16 Min. Size: 10
Azul	Max. Size: 20 Min. Size: 10	Max. Size: 16 Min. Size: 08	Max. Size: 10 Min. Size: 07

Para verificar os resultados obtidos com as simulações, foi utilizado como parâmetro o número de Nusselt médio calculado na parede aquecida conforme [6]. Todos os resultados foram obtidos para a cavidade com número de Rayleigh igual 10^5, definido na parede aquecida, e número de Prandtl igual a 1, conforme [6]. O problema foi simulado em regime transiente, com tempo total de 60s.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O conjunto dos resultados é apresentado na Tabela 2.

Tabela 2. Sumário dos resultados do estudo de malha e domínio

Estudo	Domínio	Tipo de elemento	Refinamento	$\overline{Nu_L}$	Total de volumes
Verificação de código	8·L	Quadrangular	h1	7,55	49 mil
	8·L	Quadrangular	h2	7,61	89 mil
	8·L	Quadrangular	h3	7,55	167 mil
Domínio	8·L	Quadrangular	h1	7,55	167 mil
	5·L	Quadrangular	h1	7,56	111 mil
	4·L	Quadrangular	h1	7,55	91 mil
Tipo de malha	8·L	Triangular	h1	--	382 mil
	8·L	Quadrangular	h1	7,55	49 mil
	8·L	Misto	h1	7,55	240 mil

O número de Nusselt médio na parede aquecida, calculado na malha quadrangular com refinamento h1 e domínio 8·L foi de 7,55, com um *convergence grid index* (CGI) de 1,23% [5]. [4] e [7] reportaram valores de de número de Nusselt de 7,65 e 7,79, respectivamente, apresentando boa concordância com o presente trabalho, validando assim o código utilizado.

O estudo do tamanho do domínio mostrou que este pode ser reduzido para o tamanho 4·L, sem que haja prejuízo nos resultados do número de Nusselt médio. Entretanto, para este domínio, o fluxo de calor na parede aquecida apresentou uma maior variação ao longo do tempo, resultado da maior instabilidade observada na pluma de fluido ascendente que deixa a cavidade. Considerando os últimos 20 s, o fluxo de calor médio na parede aquecida, calculado para os domínios 8·L, 5·L e 4·L na malha quadrangular, com refinamento h1, foram de: $35{,}52 \pm 1{,}52 \cdot 10^{-3}$; $32{,}56 \pm 1{,}53 \cdot 10^{-3}$ e $32{,}55 \pm 8{,}74 \cdot 10^{-3}$ W/m², respectivamente.

Quanto ao tipo de malha utilizada. A utilização da malha composta por triângulos, resultou na divergência da solução para os três níveis de refinamento: h1, h2 e h3. A simulações com a malha quadrangular e mista não apresentaram divergência. Outras simulações realizadas indicam que a utilização de volumes triangulares nas fronteiras de domínios abertos não é recomendada em simulações de convecção natural no OpenFOAM, podendo resultar na divergência da solução.

4. CONCLUSÃO

As simulações realizadas apresentaram resultados condizentes com a literatura. Para o problema de convecção natural em cavidades abertas, é recomendado o uso de malhas quadrangulares nas fronteiras do domínio. O tamanho do domínio pode ser reduzido até 4·L, sem prejuízo significativo nos resultados de número de Nusselt médio.

Agradecimentos

À FAPEMIG pelo apoio financeiro através de bolsa de iniciação científica concedida por meio do Edital nº 005 PIBIC/FAPEMIG/2022 da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri.

REFERÊNCIAS

[1] W. Chakroun, M.M Elsayed, S.F. Al-Fahed, Experimental Measurements of Heat Transfer Coefficient in a Partially/Fully Opend Tilted Cavity, Journal Of Solar Energy Engineering 1997, Vol. 119 pag. 298-303.

[2] M.M. Elsayed, W. Chakroun, Effect of Aperture Geometry on Heat Transfer in Tilted Partially Open Cavities, Journal of Heat Transfer 1999, Vol. 121 pag. 819-827.

[3] J.R. Alvarado, G.M. Montiel, V.H.I. Villafán, C.A. Estrada, N.J. Flores, Experimental and numerical study of conjugate heat transfer in an open square-cavity solar reciver, Elsevier, International Journal of Thermal Sciences 156 (2020) 106548.

[4] J.F. Hinojosa, R.E. Cabanillas, G. Alvarez, C.E. Estrada, Nusselt number for the natural convection and surface thermal radiation in a square tilted open cavity, Elsevier, International Communications in Heat and mass Transfer 32 (2005) 1184-1192.

[5] Celik, Ishmail B. et al. Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications. Journal of fluids Engineering-Transactions of the ASME, v. 130, n. 7, 2008.

[6] INCROPERA, Frank P. Fundamentos de transferência de calor e da massa. 6. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC ed., 2008.

[7] CHAN, Y. L.; TIEN, C. L. A numerical study of two-dimensional laminar natural convection in shallow open cavities. International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 28, n. 3, p. 603-612, 1985.