SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA CONVECÇÃO NATURAL TURBULENTA DE FLUIDOS NÃO-NEWTONIANOS UTILIZANDO MODELO LES EM OPENFOAM

Mariah Gross da Costa, Marcus Vinícius Canhoto Alves

INTRODUÇÃO

A transferência de calor por convecção natural ocorre na ausência de agentes externos que promovam o escoamento do fluido. Esse fenômeno é frequentemente dividido em duas classes: (i) cavidades aquecidas pelas superfícies superior e inferior, com as paredes laterais termicamente isoladas; e (ii) cavidades com paredes laterais mantidas em diferentes temperaturas, enquanto as superfícies superior e inferior são adiabáticas. Ambas as configurações são relevantes para a compreensão e solução de diversos problemas de engenharia envolvendo circulação de fluidos. No entanto, este trabalho concentra-se na segunda classe. A escolha da cavidade retangular deve-se à sua ampla aplicabilidade na representação simplificada de sistemas de engenharia, como coletores solares, escoamento de ar em ambientes internos, paredes duplas, janelas com vidro duplo, sistemas de resfriamento de equipamentos eletrônicos e fornos. Nesse contexto, este estudo tem como objetivos gerar a geometria e a malha computacional para a simulação do caso de convecção natural proposto por Tian e Karayiannis (2000) no OpenFOAM, comparar os resultados obtidos com dados experimentais disponíveis na literatura e validar a aplicação do modelo de turbulência k-ω SST para esse tipo de escoamento.

DESENVOLVIMENTO

Com base no experimento de Tian e Karayiannis (2000), foi utilizado o software OpenFOAM (Open Field Operation and Manipulation), uma plataforma de código aberto para simulações de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD). Para isso, foi adaptado um caso disponível em sua biblioteca, denominado hotRoom. A geometria empregada reproduz a configuração experimental, consistindo em uma cavidade retangular com dimensões equivalentes às do estudo de referência. As condições de contorno foram definidas com uma parede mantida a 323 K, a parede oposta a 283 K e as demais superfícies adiabáticas. A temperatura inicial do fluido no interior da cavidade foi fixada em 303 K, correspondente à média das temperaturas das superfícies quente e fria.

O modelo de turbulência selecionado foi o k-ω SST, baseado nas equações RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes). Esse modelo apresenta menor custo computacional em comparação com as abordagens LES (Large Eddy Simulation) e DNS (Direct Numerical Simulation), além de fornecer precisão adequada para diversas aplicações de engenharia. A formulação RANS utiliza um processo de média temporal que transforma as propriedades instantâneas do escoamento em grandezas médias, reduzindo o esforço computacional necessário para a solução do problema.

Foram realizadas quatro simulações com diferentes densidades de malha (25 × 25 × 40, 50 × 50 × 40, 100 × 100 × 40 e 200 × 200 × 40) com o objetivo de avaliar a independência dos resultados em relação ao refinamento da malha. A comparação entre os resultados numéricos e os dados experimentais foi realizada por meio de três indicadores estatísticos: o Desvio Médio Absoluto (AAD), a Raiz do Erro Quadrático Médio (RMS) e o Erro Sistemático (Bias).

RESULTADOS

Para a análise dos resultados, foram avaliadas cinco seções da cavidade ao longo do eixo z e três seções ao longo do eixo x, considerando, em cada uma delas, cinco posições distintas na direção y. Os resultados apresentados neste trabalho correspondem às seções centrais da cavidade $Z^* = 0{,}5$ (onde $Z^* = z/L_3$), $X^* = 0{,}5$ (onde $X^* = x/L_1$) e alturas centrais, $Y^* = 0{,}5$ (onde $Y^* = y/L_2$). Observou-se que as propriedades do escoamento atingiram regime permanente após aproximadamente 300 s de simulação.

A Figura 1(a) apresenta a comparação dos perfis da velocidade adimensional U para as quatro malhas avaliadas. Utilizando a malha 200 × 200 × 40 como referência, os valores de RMS obtidos foram de 10,90% para a malha 25 × 25 × 40, 5,10% para a malha 50 × 50 × 40 e 1,63% para a malha 100 × 100 × 40. Esses resultados indicam a convergência dos resultados com o refinamento da malha. Em concordância com os resultados experimentais de Tian e Karayiannis (2000), verificou-se que os gradientes de temperatura são mais intensos nas regiões próximas às paredes quente e fria. Esse comportamento pode ser observado na Figura 1(b), que compara os perfis de temperatura adimensional obtidos experimentalmente com aqueles calculados utilizando a malha 200 × 200 × 40. Nesta análise, Θ representa a temperatura adimensional, U a componente adimensional da velocidade na direção x e V a componente adimensional da velocidade na direção y, definidas pelas seguintes expressões: $\theta = \frac{T-T_c}{T_h-T_c}$ onde T é a temperatura do ponto, T_c é a temperatura fria e T_h é a temperatura quente, $U^* = u/U_{max}$ onde u é a velocidade u do ponto e $U_{max} = 0{,}005228\ m/s$, $V^* = \frac{v}{V_{max}}$ onde v é a velocidade v do ponto e $V_{max} = 0{,}2165\ m/s$. Esses valores variam de acordo com a distância da superfície quente, $X^* = x/L_1$.

Utilizando os dados experimentais de Tian e Karayiannis (2000) como referência, foram calculados os indicadores estatísticos RMS, AAD e Bias para as comparações apresentadas na Figura 1(b). Para essa análise, foram utilizados 69 pontos para os perfis de temperatura, 50 pontos para os perfis da velocidade adimensional U e 52 pontos para os perfis da velocidade adimensional V. A diferença no número de pontos entre as comparações decorre do processo manual de digitalização e interpolação dos dados experimentais. Os valores de RMS, AAD e Bias obtidos foram, respectivamente, 0,003%, 0,002% e −0,002% para a temperatura; 1,51%, 0,81% e −0,37% para a velocidade U; e 1,00%, 0,72% e −0,12% para a velocidade V. Esses resultados indicam boa concordância entre a simulação numérica e os dados experimentais, uma vez que os erros médios permaneceram próximos de 1% e os desvios médios absolutos e erros sistemáticos foram inferiores a 1%.

Entretanto, as comparações apresentadas anteriormente referem-se apenas às seções centrais da cavidade. Para avaliar possíveis efeitos tridimensionais do escoamento, a Figura 1(c) mostra a variação da velocidade adimensional W ao longo da coordenada adimensional Z em cinco alturas distintas da seção analisada. Observa-se que a componente W não é nula em toda a cavidade, evidenciando a presença de efeitos tridimensionais. Contudo, esses efeitos estão concentrados principalmente nas regiões próximas aos cantos da cavidade e, portanto, não influenciam significativamente os resultados obtidos nas seções centrais utilizadas para validação do modelo.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O maior desafio do trabalho foi a utilização do Sistema de VPN do Supercomputador Santos Dumond que consumiu grande esforço da bolsista e do orientador. Os resultados estão dentro do esperado para um trabalho de apenas 1 ano (6 meses de acesso ao SDumond).

Palavras-chave: Convecção Natural; Escoamento turbulento; Escoamento em cavidades; Modelagem numérica; Transferência de calor; reologia não newtoniana; OpenFOAM.

ANEXOS

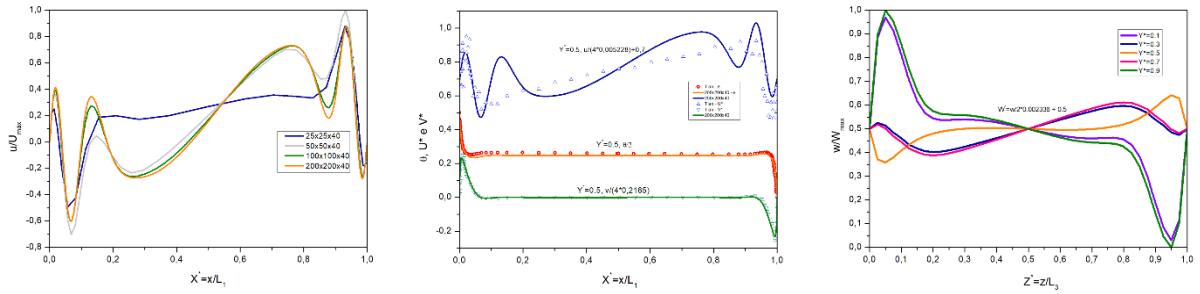


Figura 1. *Comparação entre as diferentes malhas de (a) velocidade u; (b) valores adimensionais de temperatura, velocidade u e velocidade v entre os resultados experimentais com os da simulação numérica; e, (c) Perfis de velocidade w.*

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

TIAN, YS; KARAYIANNIS, TG. Low turbulence natural convection in an air filled square cavity: part i: the thermal and fluid flow fields. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Elsevier, v. 43, n. 6, p. 849–866, 2000.