



VI Encontro de Iniciação Científica e Tecnológica
VI EnICT
ISSN: 2526-6772
IFSP – Câmpus Araraquara
21 e 22 de Outubro de 2021



ESTUDO DE DOMÍNIO COMPUTACIONAL PARA MODELOS NUMÉRICOS DE CONVECÇÃO NATURAL TURBULENTA EM PLACA PLANA: UM ESTUDO DE CASO

VINÍCIUS RICARDO DA SILVA¹, SÍLVIO APARECIDO VERDÉRIO JÚNIOR², CELIO CAMINAGA³

¹ Graduando em Engenharia Mecânica, Bolsista PIBIFSP, IFSP Câmpus Araraquara, vinicius.s@aluno.ifsp.edu.br.

² Professor EBTT, IFSP Câmpus Araraquara, silvioverderio@ifsp.edu.br.

³ Professor EBTT, IFSP Câmpus Araraquara, caminaga@ifsp.edu.br.

Área de conhecimento (Tabela CNPq): Transferência de Calor – 3.05.01.01-6

RESUMO: Um fator chave que influencia a precisão e o custo das simulações CFD é o tamanho do domínio físico adotado. O presente estudo tem por objetivo definir um domínio físico, independente e otimizado em termos de custo computacional, para avaliação das trocas de calor por convecção natural turbulenta sobre placas de $RA = 5$, em condições isotérmicas. A turbulência foi modelada através do método RANS, com o modelo de turbulência $\kappa - \omega$ SST. O software livre e de código aberto OpenFOAM®, através do MVF, foi utilizado para realizar as simulações numéricas. O estudo deu-se através de dois testes: influência da altura (H_D) e influência do comprimento de base (L_D). Todas as simulações realizadas foram validadas numericamente através de resultados experimentais da literatura técnico-científica. Definiu-se para a aplicação estudada um domínio físico independente e otimizado de tamanho $4 \times 5 \times 5$ m, com erro percentual médio inferior a 1% em relação a referência experimental utilizada.

PALAVRAS-CHAVE: domínio físico; convecção natural; modelagem numérica; OpenFOAM®.

INTRODUÇÃO

A convecção natural é uma subdivisão dos mecanismos de transferência de calor. Devido à presença combinada de gradientes de densidades no fluido, que ocorrem pelos efeitos combinados dos gradientes de temperaturas e forças de corpo proporcionais à densidade (como a força gravitacional), surgem forças de empuxo; as quais são responsáveis motrizes do escoamento (BERGMAN et al., 2014). Esse mecanismo tem influência significativa nas temperaturas de operação em dispositivos de geração de potência e eletrônicos (BERGMAN et al., 2014) e, devido a isso, cada vez mais são desenvolvidos estudos e pesquisas na indústria e na comunidade acadêmica a fim de melhorar a eficiência térmica e garantir maior aplicabilidade do resfriamento por convecção natural nas tecnologias atuais; como representado nos trabalhos de Padilla, Campregher e Silveira-Neto (2006), Yu, Lee e Yook (2011), Silva et al. (2016) e Frank, Heidemann e Spindler (2019).

Ao construir modelos numéricos, diversas hipóteses e parâmetros são descritos para representar a aplicação física estudada. Um fator chave que influencia a precisão e o custo das simulações de CFD é o tamanho do domínio computacional. Na busca de custos computacionais menores e alta precisão dos resultados numérico, é requerido uma escolha ideal de domínio físico que forneça essas características.

Este trabalho tem por objetivo o estudo e definição de um domínio físico computacional independente e otimizado em termos de custo computacional – de geometria $H_D \times L_D \times L_D$ – a ser utilizado no estudo numérico de convecção natural turbulenta em placa plana isotérmica de razão de aspecto (RA) igual a 5. A referência experimental de Kitamura et al. (2015) fundamentará a validação numérica dos resultados obtidos e o processo de análise e discussão dos resultados.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Kitamura et al. (2015) investigaram experimentalmente o escoamento de ar e as taxas de transferência de calor em convecção natural sobre placas planas horizontais isotérmicas aquecidas; variando-se as razões de aspecto nos regimes laminar e turbulento. A partir da utilização do diâmetro equivalente ($d_e = 4A/P$) como comprimento característico, definiram expressões empíricas independente da RA e que relacionam o número de Nusselt médio com o número de Rayleigh. A expressão $Nu_{d_e EXP} = 0,135 \cdot Ra_{d_e}^{0,33}$ foi definida para o regime turbulento para $7 \cdot 10^7 < Ra_{d_e} < 3,5 \cdot 10^8$.

O trabalho recente de Silva et al. (2021) investigou a influência de duas diferentes configurações de malha (não uniforme escalonada e totalmente uniforme), em diferentes níveis de refinamento, na avaliação das taxas de transferência de calor por convecção natural turbulenta em placas planas isotérmicas de $RA = 5$. Concluíram que a configuração de malha escalonada não uniforme mostrou-se mais adequada em precisão e custo computacional a situação-problema estudada.

A modelagem físico-matemática da situação-problema estudada – conforme condições típicas estabelecidas por Bird, Stewart e Lightfoot (2004) e Versteeg e Malalasekera (2007) e hipóteses simplificadoras e modelos físicos adotados por Silva et al. (2021) e Verdério Júnior et al. (2021) – é dada pela Equação da Continuidade, Equação de balanço de *Momentum* com a hipótese da viscosidade turbulenta de Boussinesq aplicados e Equação da Energia; todas na forma turbulenta e definidas através do método RANS. A modelagem da turbulência ocorre através do modelo $\kappa - \omega$ SST, de acordo com Menter, Kuntz e Langtry (2003). Tem-se:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\bar{\rho} \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial \tilde{P}}{\partial x_i} - \bar{\rho} g_i \beta (\bar{T} - T_\infty) \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \bar{u}_j \bar{T}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} \right] \quad (3)$$

$$\bar{u}_j \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} = \min \left[\nu_t \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right); 10\beta^* \kappa \omega \right] - \beta^* \kappa \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \sigma_\kappa^* \nu_t) \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right] \quad (4)$$

$$\bar{u}_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \alpha^* S^2 - \beta' \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \sigma_\omega \nu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \sigma_{\omega 1} \frac{1}{\omega} \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (5)$$

$$\nu_t = \frac{a_1 \kappa}{\max(a_1 \omega; SF_2)} \quad (6)$$

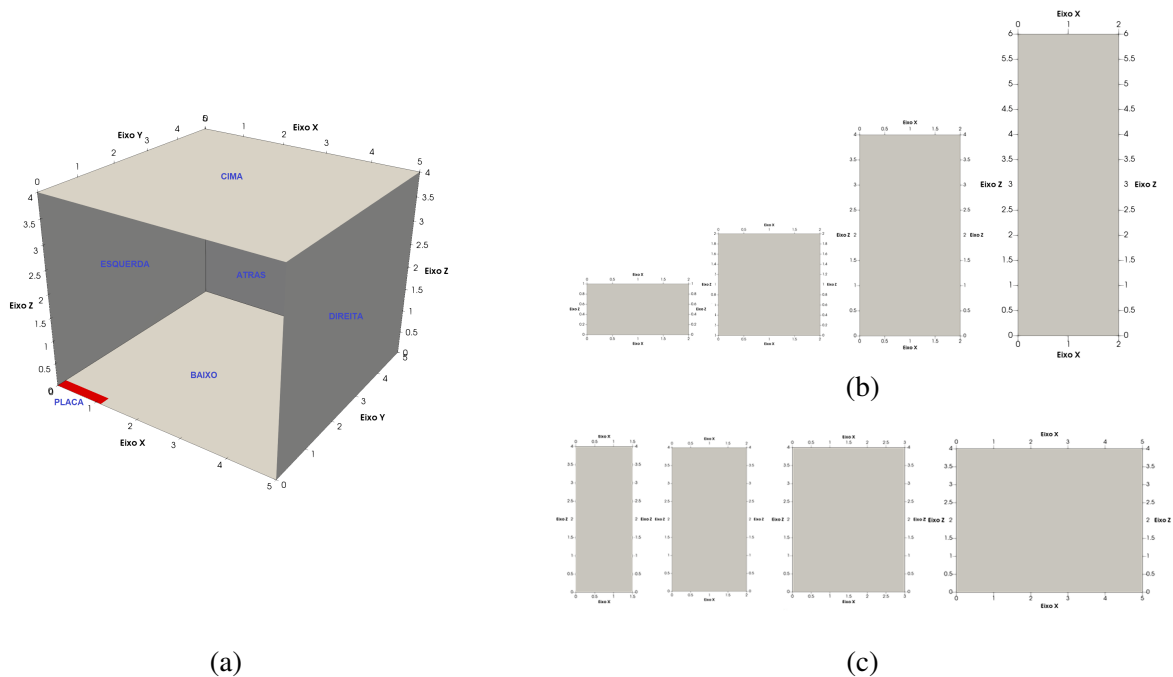
As simbologias e nomenclaturas utilizadas neste trabalho seguem as formulações definidas e também utilizadas por Silva et al. (2021) e Verdério Júnior et al. (2021).

METODOLOGIA

A situação-problema investigada é a transferência de calor por convecção natural sobre uma placa plana isotérmica a 40°C, localizada ao centro da parte inferior de um domínio físico aberto, com dimensões $L_D \times L_D \times L_D$ e preenchido com ar a $T_\infty = 20^\circ\text{C}$. A placa tem um comprimento de 0,4472 m, largura de 2,2361 m, RA igual a 5, área de 1 m² e diâmetro equivalente de 0,7454 m.

Para reduzir o custo computacional, definiu-se uma condição de dupla simetria aos eixos y e z ; o que reduziu o domínio computacional a um quarto do domínio total, como mostrado na Figura 1 (a). Para implementar as condições contorno, subdividiu-se e nomeou-se as regiões do domínio computacional em: regiões abertas, com transporte de massa e energia através dos limites (CIMA, ATRAS, DIREITA e BAIXO), regiões dos planos de simetria (ESQUERDA e FRENTE) e região de parede sólida (PLACA).

FIGURA. 1: Representações esquemáticas dos modelos de (a) simetria em vista isométrica (com identificação das regiões), (b) de testes de alturas e (c) de testes de comprimento de base.



(a)

(c)

Fonte: Elaborada pelo autor.

Foram utilizadas malhas hexaédricas não uniformes cartesianas tridimensionais com $maxCellSize$ igual a 2,00 m, com dois diferentes níveis de refinamento no domínio físico e refinamento específico de maior ordem na região da placa. A seleção e o procedimento de construção das malhas utilizadas, bem como os *softwares* empregados, basearam-se na metodologia e resultados de Silva et al. (2021).

Os testes realizados pautaram-se em determinar, primeiramente, o parâmetro H_D – através dos chamados de Testes de Influência da Altura ou Testes de Altura – e, em seguida, determinar o parâmetro L_D – através dos chamados Testes de Influência do Comprimento de Base ou Testes de Base. A Tabela 1 ilustra a sequência e a característica dos testes realizados.

TABELA. 1: Metodologia de testes para determinação do Domínio Físico.

| Testes Realizados | H_D [m] | L_D [m] |
|---|---|----------------|
| Testes de Influência da Altura | 1, 2, 4 e 8 | 2 |
| Testes de Influência do Comprimento de Base | Altura selecionada a partir dos testes anteriores | 1,5, 2, 3, e 5 |

Fonte: Elaborada pelo autor.

Das características físicas e condições típicas aplicáveis ao problema em estudo – conforme Bird, Stewart e Lightfoot (2004) e Versteeg e Malalasekera (2007) – admitiu-se para o modelo:

- Propriedades físicas constantes e avaliadas a $T_{REF} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$: $\nu = 1,6207 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$; $\bar{\rho} = 1,1509 \text{ kg}/\text{m}^3$; $\bar{C}_p = 1007,126 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; $\beta = 0,00323 \text{ K}^{-1}$; $Pr = 0,7066$; $Pr_t = 0,85$; e $k_t = 26,5331 \cdot 10^{-3} \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$;
- Ar como fluido newtoniano, com as mudanças de densidade segundo a aproximação de *Boussinesq* para inclusão das forças de flutuação;
- Escoamento turbulento com $Ra_{de} = 3 \cdot 10^8$, segundo os limites estabelecido por Kitamura et al. (2015);
- Ra_{de} implementado através de ajuste numérico e virtual da componente vertical z da aceleração da gravidade, através do valor $\vec{g} = (0; 0; -4,0824) \text{ m}/\text{s}^2$.

A partir da função *wallHeatFluxIncompressible*, aplicada ao terminal do OpenFOAM®, obtém-se o fluxo de calor convectivo médio sobre a placa ($\overline{q''}$) para cada simulação. Desta forma, é possível verificar a precisão dos resultados numéricos obtidos, em comparação aos resultados experimentais do modelo empírico de Kitamura et al. (2015). O cálculo do número de Nusselt a partir dos resultados experimentais e do erro percentual médio ocorrem através das expressões:

$$\overline{Nu}_{d_e NUMERICO} = \frac{\overline{q''} \cdot d_e}{\Delta T \cdot k_t} \quad (7)$$

$$\overline{Erro} = \left| \frac{\overline{Nu}_{d_e EXP} - \overline{Nu}_{d_e NUMERICO}}{\overline{Nu}_{d_e EXP}} \right| \cdot 100\% \quad (8)$$

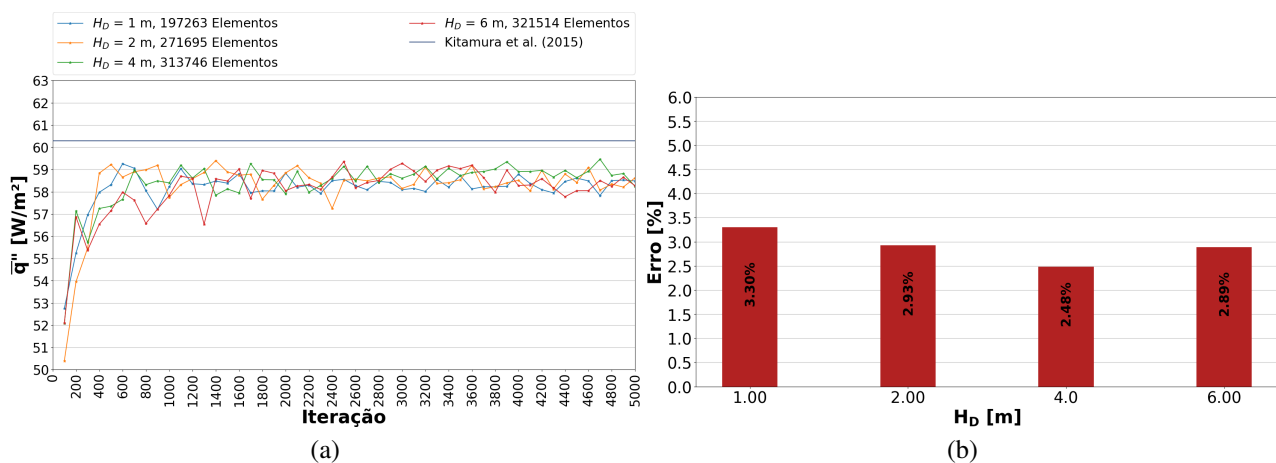
Na determinação da solução do problema estudado foram utilizadas condições de contorno de temperatura prescrita para a PLACA, com $T_p = 40 \text{ }^\circ\text{C}$; aplicação, também para a PLACA, de funções de parede para as propriedades turbulentas κ , ω e ν_t e função de parede térmica do modelo de *Jayatilleke* para α_t ; condição de simetria para as regiões de ESQUERDA e FRENTE; e utilização de condições de corrente livre (com T_∞ e p_{atm}) para as demais regiões abertas do domínio físico. A formulação matemática e a forma de implementação (através de comandos típicos) dessas condições de contorno no OpenFOAM®, bem como as características de discretização e de solução numéricas dos modelos construídos, encontram-se descritas e discutidas em Silva et al. (2021) e Verdério Júnior et al. (2021).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base nos resultados experimentais de Kitamura et al. (2015) pôde-se validar e analisar a precisão dos resultados numéricos obtidos nas simulações realizadas neste trabalho. Dessa referência para $Ra_{d_e} = 3 \cdot 10^8$ têm-se $\overline{Nu}_{d_e EXP} = 84,6806$ e $\overline{q''} = 60,2898 \text{ W/m}^2$. Das Equações 7 e 8 tem-se a avaliação da precisão comparativa dos resultados numéricos com os resultados experimentais da literatura, através dos cálculos dos valores do $\overline{Nu}_{d_e NUMERICO}$ e do erro percentual médio.

Como supramencionado, a definição do domínio físico foi realizado por etapas, conforme apresentado na Tabela 1. A partir dos resultados dos testes de influência da altura (H_D) no domínio físico, têm-se os gráficos apresentados na Figura 2.

FIGURA. 2: Resultados numéricos dos Testes de Altura para o (a) Fluxo de calor convectivo superficial médio versus número de iterações e (b) Erro percentual médio versus (H_D).



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para os dois gráficos apresentados nas Figuras 2 (a) e (b), pode-se observar comportamentos bem próximos

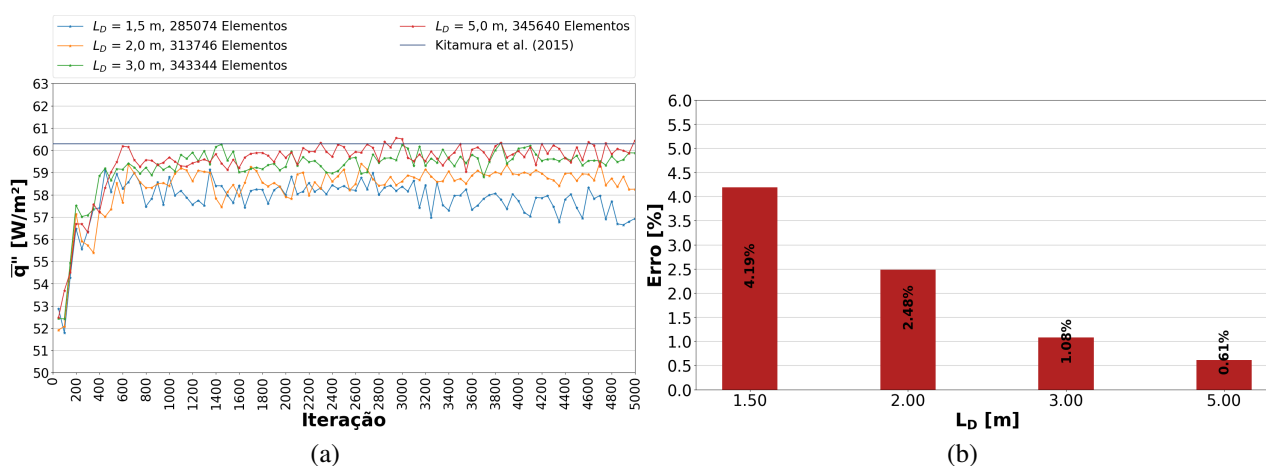
entre os diferentes modelos numéricos avaliados. Da Figura 2 (a) – que apresenta os fluxos superficiais médios de transferência de calor por convecção natural (\bar{q}'') em função do número de iterações realizadas – é possível perceber que as séries são equivalentes e, de forma aproximada a partir do comportamento médio, com o mesmo distância do resultado experimental de Kitamura et al. (2015). Da Figura 2 (b) – da avaliação do erro percentual médio para cada série – pode-se constatar uma variação menor que 1% entre as séries com o maior e o menor erro; reafirmando a característica de equivalência numérica dos diferentes modelos físicos testados.

Quanto ao custo computacional, como visto na Figura 2 (a) e (b), embora a série $L_D = 1\text{ m}$ apresente a menor quantidade de elementos na malha, caracteriza-se pelo maior erro percentual médio. Para as demais séries, as diferenças entre as quantidades de elementos e os respectivos erros são, praticamente, desprezíveis.

Sendo assim, das discussões levantadas e pela proximidade dos resultados, decide-se por definir a altura de $L_D = 4\text{ m}$ para o domínio físico final; observando-se o menor erro relativo apresentado por esse modelo e o irrisório aumento no custo computacional pelo acréscimo de elementos na malha.

Seguindo o fluxo dos processos, foram realizados os Testes de influência do Comprimento de Base L_D , cujos resultados são ilustrados nos gráficos que seguem na Figura 3.

FIGURA. 3: Resultados numéricos dos Testes de Base para o (a) Fluxo de calor convectivo superficial médio versus número de iterações e (b) Erro percentual médio versus (L_D).



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 3 (a) apresenta os resultados dos fluxos superficiais médios versus o número de iterações para os diferentes modelos numéricos estudados, onde é possível observar que a curva de $L_D = 5\text{ m}$ melhor se aproxima do resultado empírico de Kitamura et al. (2015). A Figura 3 (b) apresenta os erros percentuais médios dos comprimentos estudados, sendo possível que o menor erro é relativo ao comprimento $L_D = 5\text{ m}$; com uma diferença entre o maior e o menor erro de 3,58%.

Em termos de custo computacional pelo número de elementos das malhas estudadas, observa-se da Figura 3 (a), que todas são praticamente equivalentes. Dessa forma, por questões de acuracidade e equivalência de custo computacional, decidiu-se pela utilização de um domínio físico com $L_D = 5\text{ m}$.

CONCLUSÕES

O presente estudo avaliou a influência dos parâmetros geométricos H_D e L_D de um domínio físico externo para o estudo da transferência de calor por convecção natural turbulenta sobre placas planas isotérmicas. Os resultados das simulações numéricas puderam ser validados, e com excelente precisão, a partir dos resultados empíricos de Kitamura et al. (2015). Após a realização de oito simulações numéricas computacionais nos testes de altura e de comprimento de base definiu-se um domínio físico numérico duplamente simétrico independente, e com menor custo computacional, de dimensões $4 \times 5 \times 5\text{ m}$.

Por fim, destaca-se a utilização exclusiva de ferramentas numéricas totalmente gratuitas e de código aberto nas simulações CFD realizadas neste trabalho. O que demonstra alternativas para realização e viabilização de pesquisas científicas ou industriais com baixíssimo custo financeiro; o que mostra-se, cada vez mais, como uma tendência diante das restrições orçamentárias nos setores de educação, ciência e tecnologia no mundo e que foram intensificadas pela situação de pandemia de COVID-19.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece o apoio financeiro concedido pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP), Câmpus Araraquara.

REFERÊNCIAS

BERGMAN, T. L. et al. **Fundamentos da Transferência de Calor e de Massa**. 7nd. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. **Transport Phenomena**. 2nd. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2004.

FRANK, A.; HEIDEMANN, W.; SPINDLER, K. Electronic component cooling inside switch cabinets: Combined radiation and natural convection heat transfer. **Heat Mass Transfer**, v. 55, p. 699–709, 2019. ISSN 1676-1790.

KITAMURA, K. et al. Fluid flow and heat transfer of natural convection adjacent to upward-facing, rectangular plates of arbitrary aspect ratios. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 89, p. 320–332, 2015. ISSN 0017-9310.

MENTER, F.; KUNTZ, M.; LANGTRY, R. Ten years of industrial experience with the sst turbulence model. **Heat and Mass Transfer**, v. 4, 01 2003.

PADILLA, E. L. M.; CAMPREGHER, R.; SILVEIRA-NETO, A. Numerical analysis of the natural convection in horizontal annuli at low and moderate ra. **Revista de Engenharia Térmica**, v. 5, n. 2, p. 58–65, 2006. ISSN 1676-1790.

SILVA, V. A. et al. Experimental analysis of the influence of heat sink geometric parameters on natural convection. **Revista de Engenharia Térmica**, v. 15, n. 1, p. 26–32, 2016. ISSN 1676-1790.

SILVA, V. R. et al. Study and validation of meshes in turbulent isothermal problems of natural convection in flat plates. **Revista de Engenharia Térmica**, v. 20, n. 2, p. 33–40, 2021. ISSN 1676-1790.

VERDÉRIO JÚNIOR, S. A. et al. Physical–numerical parameters in turbulent simulations of natural convection on three-dimensional square plates. **International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow**, ahead-of-print, n. ahead-of-print, 2021. ISSN 0961-5539.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics – The Finite Volume Method**. 2nd. ed. [S.l.]: Dynamics – The Finite Volume Method, 2007.

YU, S.-H.; LEE, K.-S.; YOON, S.-J. Optimum design of a radial heat sink under natural convection. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 54, n. 11, p. 2499–2505, 2011. ISSN 0017-9310.