

Avaliação da Transferência de Calor Radiativa em Cavidades Complexas Usando o Método da Zona

Gleyzer Martins, Faculdade de Ciências Integradas do Pontal, gmartins@pontal.ufu.br.

Enio Pedone Bandarra Filho, Faculdade de Engenharia Mecânica, bandarra@mecanica.ufu.br.

Oscar Saul Hernandez Mendoza, Faculdade de Engenharia Mecânica, oscarhernandez@femec.ufu.br

Resumo. O método da zona se destaca na literatura pela sua fácil implementação conceitual e pelos resultados acurados, quando aplicados para problemas de transferência de calor em problemas práticos de engenharia. Neste trabalho, propõe-se o desenvolvimento do método da zona aplicada a uma cavidade simétrica com superfícies planas e com superfícies complexas empregando a modelagem da superfície por spline cúbica. As propriedades radiativas dos meios participantes foram determinadas pelo método de soma ponderada de gases cinzas. Os resultados para a superfície plana são satisfatórios quando comparados com a literatura e para superfície complexa, apesar da literatura não apresentar resultados, apresentam boa coerência física.

Palavras chave: Gases cinzas, Spline cúbica, Superfícies complexas

1. INTRODUÇÃO

Geradores de Vapor são equipamentos para gerar vapor a pressões superiores a atmosfera. As caldeiras fogotubulares são uma classe de geradores de vapor que empregam superfícies corrugadas para melhorar a resistência mecânica da fornalha e aprimorar a transferência de calor.

A literatura usualmente emprega os métodos de ordenadas discretas e de volumes finitos para determinar a transferência de calor por radiação em cavidades complexas utilizando as técnicas de região de bloqueio, fronteira embutida e malha ajustada, como levantado por Byun et al. (2003). Coelho et al. (1997), por sua vez, desenvolveu a transferência de calor em cavidades bidimensionais com obstáculos usando os métodos da zona, transferência discreta, ordenadas discretas e volumes finitos de forma a comparar os diferentes métodos e demonstrou que os métodos de volumes finitos e ordenadas discretas são os de mais rápida convergência.

Outros autores tais como Nunes et al. (2000) e Talukdar (2006) avaliaram a transferência de calor radiativa em diferentes superfícies complexas empregando respectivamente o método de N-Ressaltos e transferência discreta obtendo excelentes concordâncias com os resultados das soluções de referência da literatura.

O método da zona foi inicialmente desenvolvido por Hottel e seus colaboradores sendo descrito em Hottel and Sarofim (1976). Este método consiste na divisão dos volumes de gases e das superfícies de troca em elementos de zonas de forma a determinar as áreas de troca direta, que consideram tanto os efeitos dos fatores de forma como os efeitos dos meios participantes, conforme Eq.(1):

$$\begin{aligned} s_i s_j &= \iint_{A_j A_i} \frac{\cos(\theta_i) \cdot \cos(\theta_j) \cdot e^{(-K \cdot r)}}{\pi \cdot r^2} dA_i dA_j \\ g_i s_j &= \iint_{A_j V_i} \frac{K \cdot \cos(\theta_j) \cdot e^{(-K \cdot r)}}{\pi \cdot r^2} dV_i dA_j \\ g_i g_j &= \iint_{V_j V_i} \frac{K \cdot K \cdot e^{(-K \cdot r)}}{\pi \cdot r^2} dV_i dV_j \end{aligned} \quad (1)$$

O método para conservar os balanços de energia nas superfícies e nos volumes empregam o método de Lawson (1995) e os efeitos de reflexão através das áreas de troca total pela formulação matricial desenvolvida por Noble (1975) apresentada por Rhine and Tucker (1991). A transferência de calor radiativa é determinada empregando balanço para as diferentes trocas radiativas entre as superfícies e as superfícies; entre as superfícies e os volumes e entre os volumes e os volumes, conforme Eq(2):

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{i \rightarrow j} &= \epsilon_i \cdot A_i \cdot E_i - \sum_{j=1}^m \overline{S_i S_j} \cdot E_i - \sum_{j=1}^l \overline{S_i G_j} \cdot E_{g,i} \\ \dot{Q}_{i \rightarrow j} &= \sum_{j=1}^l \overline{G_i G_j} \cdot E_{g,i} - \sum_{j=1}^m \overline{G_i S_j} \cdot E_i - 4 \cdot K_i \cdot V_i \cdot E_{g,i} \end{aligned} \quad (2)$$

Para considerar os efeitos espectrais do coeficiente de absorção emprega-se o modelo de somas discretas de gases cinzas, com os coeficientes determinados por Smith et al. (1982), que consiste na soma das áreas de troca direta para um conjunto de gases cinzas com coeficientes de absorção constantes ponderados por coeficientes que estão relacionados com a temperatura do gás.

2. METODOLOGIA

A integração das áreas de troca é realizada empregando as somas discretas desenvolvidas Olsommer (1997), o que representa o maior esforço computacional do método, sendo que a modelagem das superfícies corrugadas emprega o ajuste de spline cúbica. Para determinação das áreas sombreadas estabelece-se uma reta entre os dois elementos das zonas, seja ele volume ou superfície, e pela interseção com as superfícies das fronteiras define-se o sombreado, conforme mostrado na Fig (1):

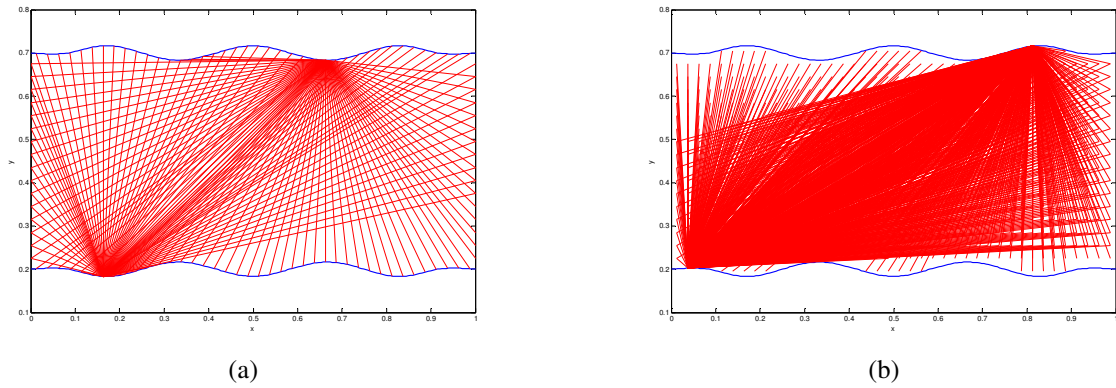


Figura 1 – Representação dos raios considerando as superfícies sombreadas.

Para o desacoplamento entre as equações de momentum, balanço de espécies e balanço de energia, emprega-se um perfil temperatura conhecido para fornalha conforme estabelecido por Goutiere et al. (2000) e dado pela Eq(3) com uma concentração de 10% CO₂ e 20% H₂O dos produtos de combustão.

$$\begin{cases} x \leq 0.1 & T(x, y) = (14000x - 400) \cdot (1 - 3 \cdot y_o^2 + 2 \cdot y_o^3) + 800 [K] \\ x > 0.1 & T(x, y) = -\frac{10000}{9}(x-1) \cdot (1 - 3 \cdot y_o^2 + 2 \cdot y_o^3) + 800 [K] \end{cases} \quad (3)$$

Em que:

$$y_o = \frac{|0.25 - y|}{0.25} \quad (4)$$

3. RESULTADOS

Para validar o código em Fortran implementado empregou-se uma fornalha bidimensional retangular de 1,0 m de comprimento e altura de 0,5m com superfícies planas inferiores e superiores modeladas por spline cúbica considerando uma amplitude de corrugação de 1E-6m e um passo de 0,1667m. Os resultados foram comparados com os obtidos por Martins et al. (2012) que implementou um código específico empregando o método da zona com modelos de somas ponderadas e validado com os resultados de Goutiere et al. (2000), conforme mostrado na Fig (2).

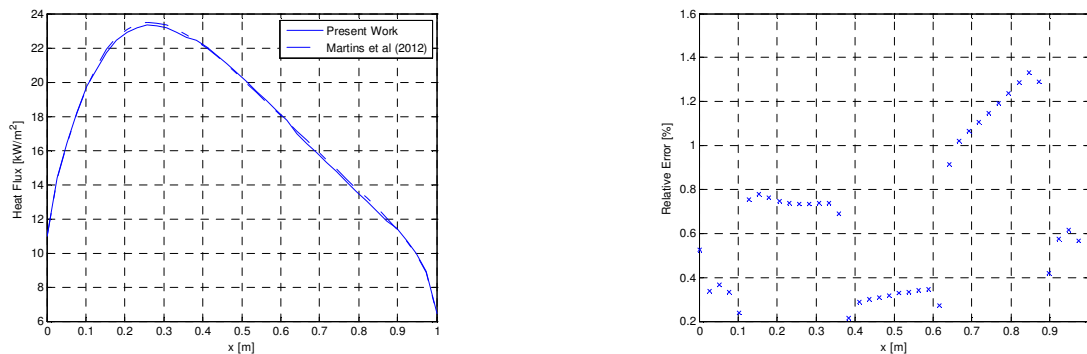


Figura 2. Fluxo de calor radiativo e erro relativo para parede inferior (a) e direita (b) empregando superfícies planas

A Figura 2 representa uma descrição satisfatória da transferência de calor radiativa nas superfícies planas da fornalha teórica pelo código implementado. Os erros relativos tendenciosos podem estar diretamente relacionados ao método de suavização de Lawson. Martins et al. (2012) mostrou que os resultados do método da zona empregando o coeficiente das somas ponderadas de gases cinzas estabelecidos por Smith, et al. (1982) e a integração por soma discreta apresentou resultados próximos dos resultados de Goutiere, o qual empregou o método de traçado de raios com modelos de bandas estreitas estatísticas que são mais precisos que o modelo de soma ponderada.

Para realizar uma análise física das superfícies corrugadas, devido a falta de resultados da literatura, inicialmente estabeleceu-se o perfil de temperatura, conforme mostrado na figura 3.

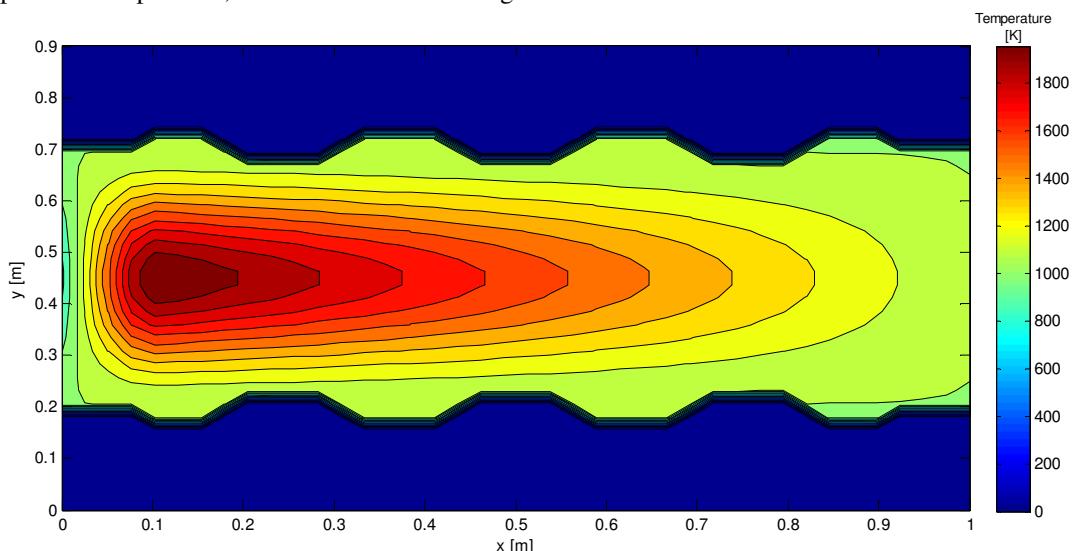


Figura 3. Perfil de temperatura teórico na fornalha.

O perfil de temperatura mostrado na figura 3 é o típico perfil de temperatura apresentado pela combustão em fornalhas, no qual a máxima temperatura encontra-se próxima da parede esquerda com a redução gradativa até a saída. Como o perfil de temperatura foi determinado por uma correlação matemática não se considera os efeitos da dinâmica dos fluidos em combustão para a fornalha, o que acaba por ser uma limitação da modelagem.

Os resultados da transferência de calor radiativa para as superfícies planas e corrugadas com amplitude de 25mm e passo de 125mm usando o perfil de temperatura da figura 3 está mostrado na figura 4.

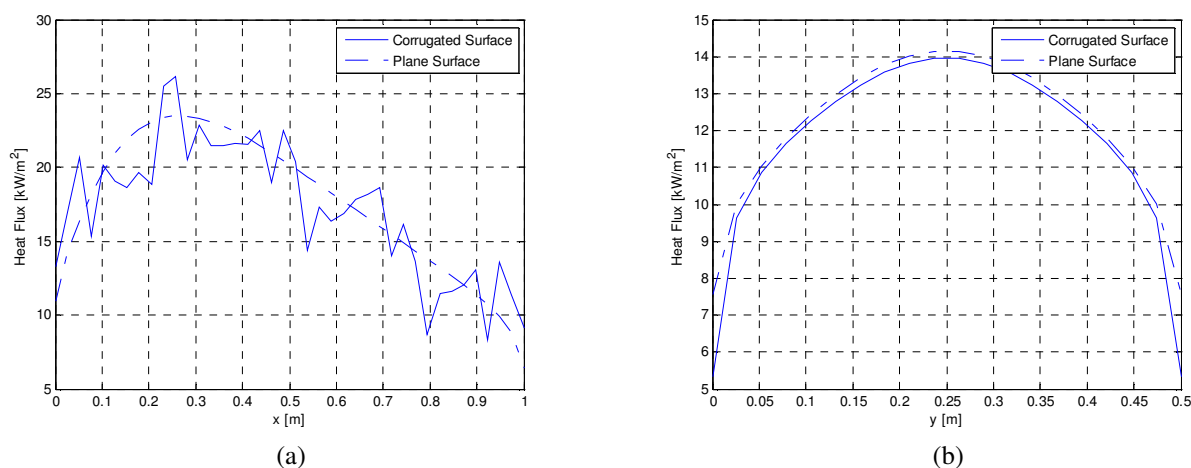


Figura 4. Fluxo de Calor Radiativo na superfície inferior (a) e na parede direita (b) da fornalha corrugada.

A figura 4 mostra que o pico de fluxo de calor ocorre na superfície de máxima amplitude, ver a abscissa de 0.24m, o que representa na Fig (3) o pico mais próximo da máxima temperatura. Da mesma forma, as áreas sombreadas correspondem aos vales dos fluxos de calor, que apresentam uma oscilação ao redor do fluxo de calor da superfície plana. Observou-se ainda o incremento da ordem 5% na troca de calor e a redução do fluxo de calor de saída da

fornalha com sensível redução do fluxo de calor próximo das extremidades de saída indicando que essa região está sombreada pelos picos da superfície corrugada.

4. CONCLUSÃO

A implementação do método da zona com o modelo de soma ponderada de gases cinzas apresentou resultados satisfatórios para superfícies planas, com relativamente fácil implementação quando comparado com Martins (2012). Os resultados para superfícies corrugadas, embora sem resultados disponíveis na literatura, mostraram coerência física além do incremento do fluxo de calor nas superfícies corrugadas da fornalha e da redução do fluxo de calor na saída da fornalha.

Melhorias adicionais na metodologia podem ser realizadas pelo emprego da modelagem da dinâmica do escoamento em combustão para determinar o perfil de temperatura e possibilitar a avaliação adequada dos efeitos das superfícies corrugadas tanto na transferência de calor quanto na dinâmica do escoamento turbulento em combustão. Outras metodologias tais como: ordenadas discretas e transferências discretas podem ser implementadas no sentido de reduzir os custos computacionais e avaliar adequadamente a troca de calor empregando os métodos de completo ajuste do corpo e fronteira embutida para a avaliação da transferência de calor nestas superfícies complexas.

5. REFERÊNCIAS

- Byun, D., Baek, S.W., Kim, M. Y., 2003. Investigation of Radiative Heat Transfer in Complex Geometries Using Blocked-Off, Multiblock, And Embedded Boundary Treatments, Numerical Heat Transfer, Part A, 43: 807–825.
- Coelho, P.J., Gonçalves, J.M., Carvalho, M.G., 1998. “Modelling of Radiative Heat Transfer in Enclosures with Obstacles”. Int. J. Heat Transfer: Elsevier Science Ltda. Vol 41, Nos 4-5. Pp 745-756.
- Goutiere, V., Liu, F., Charette, A., 2000. “An assessment of real-gas modeling in 2D enclosures”. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer : Pergamon. Quebec.
- Hottel, H., Sarofim, A., 1976. “Radiative Transfer”. New York: McGraw-Hill
- Lawson, D.A., 1995. “An Improved Method for Smoothing Approximate Exchange Areas”. International Journal of Heat and Mass Transfer: Pergamon Press. Vol 38. pp. 3109-3110.
- Martins, G., Hernandez, O.S.M., Bandarra, E.P.F., 2012. “Zonal Method Implementation to Determine the Thermal Radiation Heat Transfer in Bidimensional Furnaces.” 14th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering – Encit 2012. Rio de Janeiro, Brazil
- Noble, J.J., 1975. “The Zonal Method: Explicit Matrix Relations for Total Exchange Area” International Journal of Heat and Mass Transfer: Pergamon Press. Vol 18. pp. 261-269.
- Nunes, E.M., Modi, V., Naraghi, M.H.N., 2000. “Radiative transfer in arbitrarily-shaped axisymmetric enclosures with anisotropic scattering media”. International Journal of Heat and Mass Transfer: Pergamon. Vol 43. pp. 3275-3285
- Olsommer, B., Spakovsky, M. V., Favrat, D., 1997, “Transfert de chaleur par rayonnement dans un four d’incinération industriel: application de la méthode des zones”, Int. J. Thermal Sciences, 36, 125-134
- Rhine, J.M., Tucker, R.J., 1991. “Modelling of Gas-Fired Furnaces and Boilers”. British Gas, McGraw-Hill, London.
- Smith, T.F., Shen, Z.F., Friedman, J.N., 1982, “Evaluation of Coefficients for The Weighted Sum of Gray Gases Model”, J Heat Transfer, 104:602-8.
- Talukdar, P., 2006. “Discrete transfer method with the concept of blocked-off region for irregular geometries” Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer : Elsevier. Pp. 238-348.

4. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

O(s) autor(es) é (são) os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.