

rotinas se torna uma tarefa relativamente simples. Como exemplo, a exatidão das respectivas soluções pode ser aumentada pela inclusão de modelos de turbulência, que afetam a velocidade junto à parede e a difusividade térmica dos fluidos. Neste caso, dois modelos auxiliares bastante simples podem ser implementados diretamente nas soluções obtidas, fornecendo expressões para a velocidade junto à parede, expressa em termos da tensão de cisalhamento, e da redefinição da difusividade térmica em microescala, escrita em função do percurso livre médio e do período médio transcorrido entre duas colisões sucessivas.

ESTIMATIVA DA VELOCIDADE JUNTO À PAREDE

A fim de obter uma expressão para w_p é preciso aplicar uma nova condição de contorno sobre o respectivo perfil radial de velocidades:

$$\tau = \mu \frac{\partial w}{\partial r} \quad (64)$$

Para o perfil parabólico dado pela equação (4), essa restrição fornece uma definição para w_p em termos da tensão de cisalhamento junto à parede:

$$W_w = W_\infty - \frac{R_i \tau}{4\mu} \quad (65)$$

A tensão de cisalhamento, por sua vez, pode ser definida através da seguinte equação empírica:

$$\tau = 0.0296 Re_z^{0.2} \rho W_\infty^2 \quad (66)$$

Nessa equação, Re é o **número de Reynolds** baseado na coordenada axial, definido como

$$Re_z = \frac{\rho W_\infty z}{\mu} \quad (67)$$

REDEFINIÇÃO DA DIFUSIVIDADE TÉRMICA

O coeficiente de difusão mássico pode ser definido em microescala, a partir do percurso livre médio e do período médio entre colisões sucessivas. Uma vez que o mecanismo convectivo consiste no transporte de energia térmica por meio da translação das moléculas que compõem o meio fluido, a difusividade térmica de um meio sólido ou de um fluido estagnado pode sofrer correção, levando em consideração o transporte advectivo. O modelo proposto inicia com a definição de difusividade mássica em microescala, dada por Reichl (1980)

$$D = \frac{l^2}{2\tau} \quad (68)$$

onde l é o percurso livre médio e τ o intervalo médio de tempo transcorrido entre duas colisões sucessivas. A partir dessa definição é possível obter um fator de amplificação para a difusividade térmica na forma

$$f = \frac{D_{\text{turbulento}}}{D_{\text{browniano}}} \quad (69)$$

Assim, a difusividade térmica pode ser corrigida através do emprego de um fator multiplicativo adimensional, que leva em consideração a decorrência do movimento, isto é, a turbulência:

$$\alpha = f D_{\text{browniano}} \quad (70)$$

O fator de amplificação pode ser obtido ao estimar o percurso livre médio e o período entre colisões para duas escalas de movimento. Para a escala macroscópica, o livre caminho médio é da ordem do raio interno dos tubos, e o período entre colisões é obtido a partir da velocidade da corrente livre, uma vez que

$$W_\infty \cong \frac{l}{\tau} \quad (71)$$

Para a escala microscópica, esses valores não necessitam realmente serem definidos, uma vez que o coeficiente de difusão clássico é medido em