



Acta Scientiarum. Technology

ISSN: 1806-2563

eduem@uem.br

Universidade Estadual de Maringá  
Brasil

Ströher, Gylles Ricardo; Nicoleti, Joel Fernando; Zapparoli, Edson Luiz; Ströher, Gisely Luzia; de  
Andrade, Cláudia Regina

Avaliação de modelos RANS de turbulência para o problema de jato livre circular axissimétrico

Acta Scientiarum. Technology, vol. 33, núm. 4, 2011, pp. 425-433

Universidade Estadual de Maringá  
Maringá, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=303226533011>

- Como citar este artigo
- Número completo
- Mais artigos
- Home da revista no Redalyc

redalyc.org

Sistema de Informação Científica  
Rede de Revistas Científicas da América Latina, Caribe, Espanha e Portugal  
Projeto acadêmico sem fins lucrativos desenvolvido no âmbito da iniciativa Acesso Aberto

# Avaliação de modelos RANS de turbulência para o problema de jato livre circular axissimétrico

Gylles Ricardo Ströher\*, Joel Fernando Nicoleti, Edson Luiz Zaparoli, Gisely Luzia Ströher e Cláudia Regina de Andrade

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Rua Marçílio Dias, 635, 86812-460, Apucarana, Paraná, Brasil. \*Autor para correspondência. E-mail: gylles@utfpr.edu.br

**RESUMO.** No presente trabalho, o problema de jato livre circular axissimétrico foi resolvido numericamente. A equação da conservação de massa, momento, energia e da modelagem da turbulência foram discretizadas aplicando o método de volumes finitos. Três modelos RANS de turbulência sem modificações foram testados,  $k-\varepsilon$  padrão,  $k-\varepsilon$  realizável e  $\nu 2-f$  para determinar quais modelos proveem a melhor previsão do campo de escoamento de um jato livre turbulento nos seguintes regimes de escoamento: incompressível, subsônico e supersônico sobreexpandido. Os resultados numéricos para cada caso simulado foram comparados com dados experimentais disponíveis na literatura. Nenhum modelo de turbulência testado previu satisfatoriamente os três regimes de escoamentos, e o modelo  $k-\varepsilon$  realizável mostrou melhor concordância frente aos dados experimentais para o regime incompressível e supersônico, enquanto o modelo  $\nu 2-f$  mostrou melhor previsão do escoamento para o regime subsônico.

**Palavras-chave:** dinâmica dos fluidos computacional, volume finito, jato livre turbulento, modelos RANS de turbulência.

**ABSTRACT.** Assessment of turbulence RANS models for axisymmetric round free jet problem. In the present study, the problem of axisymmetric round free jet was numerically solved. The governing equations (continuity, momentum, energy and turbulence) were discretized using the finite volume method. In order to determine which models provide the best prediction for the flow field of a turbulent free jet, three models (standard  $k-\varepsilon$ , realizable  $k-\varepsilon$  and  $\nu 2-f$ ) were tested on the following flow regimes: incompressible, subsonic and over-expanded supersonic. The numerical results from each simulated case were compared with experimental available data in the literature. None of the turbulence models tested predicted adequately the three flow regimes. Nevertheless, according to results, the  $k-\varepsilon$  realizable model presented better agreement to the experimental data for the incompressible and supersonic regimes, whereas the  $\nu 2-f$  model better predicted the flow for subsonic regime.

**Keywords:** computational fluids dynamics, finite volume, turbulent free jet, turbulence RANS models.

## Introdução

Um modelo de turbulência que seja eficiente, robusto e estável é essencial para simulações de escoamentos encontrados em diversas aplicações aeroespaciais e industriais. Entretanto, até o momento, não há um modelo de turbulência universal que tenha validade em qualquer tipo de escoamento e que contemple uma ampla faixa de regime de escoamentos, por exemplo, escoamentos incompressível, subsônico e supersônico.

Para o caso específico do escoamento de jato livre circular turbulento, existe grande número de trabalhos que avaliam o desempenho de modelos RANS. Mani et al. (1997) compararam o desempenho de três modelos de turbulência:

Baldwin-Barth, Spalart-Allmaras e o  $k-\omega$  SST implementado no código NASTD para um jato livre axissimétrico supersônico. Os autores concluíram que os três modelos são robustos e de fácil convergência, entretanto, o modelo  $k-\omega$  SST apresentou melhores resultados quando comparado com dados experimentais.

Mahmoud et al. (2010) concluíram a partir de comparações entre os dados experimentais e numéricos que os modelos  $k-\varepsilon$  padrão e o RSM mostraram-se válidos para um jato axissimétrico turbulento do tipo co-corrente com razões de velocidade entre 0 a 1.

Berg et al. (2006) compararam dois modelos de turbulência de duas equações  $k-\varepsilon$  e  $k-\omega$  para um jato retangular com razão 2:1, os resultados

mostraram que o modelo  $k-\varepsilon$  teve sucesso na descrição das principais características do escoamento, incluindo a vena contracta e taxa de decaimento da velocidade.

Arshed et al. (2004) obtiveram bons resultados utilizando o modelo de turbulência  $k-\varepsilon$  padrão de um jato livre axissimétrico turbulento com velocidade no plano de saída do bocal de  $80 \text{ m s}^{-1}$  em regime transiente.

Alguns autores também propuseram algumas modificações no modelo  $k-\varepsilon$  padrão para reprodução de jatos circulares, como a alteração da constante  $C_{\varepsilon 1}$  de 1,44 para 1,60 (POPE, 1978).

A constante  $C_{\varepsilon 1}$  tem uma relação inversa com a taxa de mistura do jato. Quando o valor de  $C_{\varepsilon 1}$  aumenta a taxa de mistura diminui. Baseado nesta relação, o valor de  $C_{\varepsilon 1} = 1,56$  foi utilizado no modelo  $k-\varepsilon$  padrão por Kuczmarski et al. (2011) para reproduzir dados experimentais de jatos livres subsônicos ( $\text{Mach}_0$  0,3 a 1). Tal modificação da constante  $C_{\varepsilon 1}$  forneceu resultados satisfatórios na reprodução dos dados dos jatos subsônicos.

Zhou et al. (1999) obtiveram bons resultados utilizando um modelo  $k-\varepsilon$  modificado para simulação numérica da combustão turbulenta em um jato axissimétrico em regime permanente. As constantes  $C_{\mu}$  e  $C_2$  foram modificadas segundo a correção de Rodi (1980) para que não fosse superestimada a taxa de expalhamento do jato.

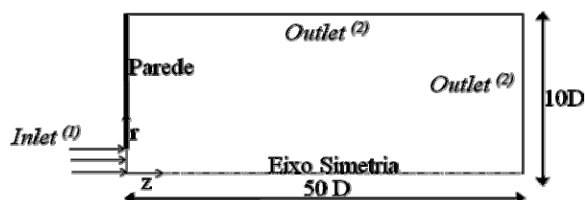
Outros autores como Launder e Spalding (1972), McGuirk e Rodi (1979) propuseram modificações nas constantes  $C_{\varepsilon 1}$  e  $C_{\varepsilon 2}$  do modelo  $k-\varepsilon$  padrão transformando-as em funções dependentes de  $\partial V_z / \partial z|_c$  ( $V_z$  é componente axial da velocidade,  $z$  é coordenada axial e  $c$  é o eixo de simetria axial) e  $b_{1/2}$  (posição radial em que a componente axial da velocidade é a metade da linha centro do jato). Entretanto, há forte objeção a modificações destas constantes, uma vez que a ideia de generalidade do modelo é perdida e o uso da variável  $b_{1/2}$  e da derivada  $\partial V_z / \partial z|_c$  restringe o uso do modelo. Consequentemente, para outros tipos de escoamento como o de jatos opostos e de jatos cruzados, o modelo modificado, provavelmente, não apresentará a mesmo desempenho, além que pouca ou nenhuma argumentação física estará embasando o seu uso.

Como argumentam Chen e Jaw (1998), a necessidade de alterar as constantes  $C_{\varepsilon 1}$ ,  $C_{\varepsilon 2}$  e  $C_{\mu}$  na previsão de escoamentos cisalhantes simples é uma decepção depois do esforço envolvido para modelar a energia cinética turbulenta ( $k$ ) e a sua dissipação ( $\varepsilon$ ).

Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho de três modelos de turbulência:  $k-\varepsilon$  padrão de Launder e Spalding (1972),  $k-\varepsilon$  realizável de Shih et al. (1995) ambos de duas equações e o modelo  $\nu_2-f$  de Durbin (1995) de quatro equações, sendo estes sem sofrerem qualquer modificação em suas constantes originais e mantendo-se constante os parâmetros característicos do escoamento de um jato circular livre para os seguintes regimes de escoamentos: compressível, subsônico e supersônico sobreexpandido.

## Material e métodos

A geometria em consideração, as condições de contorno e o sistema de coordenadas são apresentados na Figura 1. O problema físico em estudo é um jato de ar livre circular proveniente de um bocal de diâmetro  $D$  que se expande para um ambiente no qual o escoamento não é afetado por um contorno fixo. O escoamento é em regime permanente, axissimétrico e turbulento.



**Figura 1.** Domínio computacional (desenho sem escala). Caso incompressível, condição de contorno (1): perfil de velocidade plano; (2) Pressure Outlet. Casos incompressíveis, condição de contorno (1): Pressure Inlet; (2) Pressure Outlet.

O escoamento de jato livre foi resolvido utilizando um domínio bidimensional axissimétrico. Em simulações prévias, a dimensão de domínio computacional de  $50 D$  e  $10 D$  nas coordenadas espaciais  $z$  e  $r$ , respectivamente, mostrou-se suficiente para garantir as hipóteses assumidas nas condições de contorno. Tais dimensões são superiores as tipicamente encontradas na literatura para simulação de jatos livres, Mani et al. (1997)  $\text{Mach } 2,0$  ( $z/D = 30$ ,  $r/D = 10$ ) e Kuczmarski et al. (2011) para  $\text{Mach}$  de 0,3 a 1 ( $z/D = 10$ ,  $r/D = 1,5$ ).

Cada caso simulado numericamente foi comparado com os seguintes dados experimentais disponíveis na literatura. A seleção dos casos foi baseada na disponibilidade de informações tais que pudessem condições de reprodução para a realização da simulação numérica e preferencialmente acompanhada de uma análise de erros experimentais.

Caso I: jato livre turbulento incompressível, com número de Reynolds  $\text{Re}_0 = 22.500$  (o subíndice “0” significa condições nas de saída do bocal), de Frost e Jambunathan (1996).

Caso II: jato livre turbulento subsônico, com número de Mach,  $Ma_0 = 0,6$  e  $0,9$ ,  $Re_0 = 1.700.000$  e temperatura estática  $T_0 = 298,15$  K, de Simonich et al. (2001).

Caso III: jato livre turbulento subsônico, com número de Mach<sub>0</sub> = 0,51,  $Mach_\infty = U_0/c_\infty = 0.50$  e  $T_0/T_\infty = 0,95$  (o subíndice “ $\infty$ ” significa condições ambientes), de Engblom et al. (2005).

Caso IV: jato livre turbulento supersônico sobrexexpandido, com  $Ma_0 = 2,0$ ,  $T_0 = 672,78$  K e razão de pressão de 5,8 apresentado no trabalho de Mani et al. (1997).

Para os Casos II a IV, as condições de contorno foram calculadas a partir das seguintes equações do escoamento compressível unidimensional, disponíveis em Fox et al. (2006).

Para a temperatura em (1)

$$\frac{T_{te}}{T_\infty} = 1 + \frac{k-1}{2} Ma^2 \quad (1)$$

Para a pressão em (1)

$$\frac{P_{te}}{P_\infty} = \left( 1 + \frac{k-1}{2} Ma^2 \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (2)$$

Em que o subíndice (te) indica condição de estagnação ou total e  $k$  é a constante adiabática do ar.

O campo de escoamento foi obtido pela solução numérica das equações de Navier Stokes com médias de Reynolds e das equações dos modelos de turbulência disponíveis no programa comercial (Fluent 6.3). Dependendo do caso analisado, diferentes algoritmos numéricos foram utilizados. Para os Casos I, II e III foi utilizado o método segregado com o algoritmo de acoplamento pressão-velocidade SIMPLEC (VANDOORMAAL; RAITHBY, 1984) sendo os termos convectivos discretizados usando o esquema *upwind* de primeira ordem. Para o Caso IV, foi utilizado o método Roe (ROE, 1986) com o esquema *upwind* de segunda ordem.

As soluções numéricas foram consideradas convergidas quando o resíduo máximo de todas as equações discretizadas foi menor que  $1 \times 10^{-5}$  e quando a integral da quantidade de momento na direção radial tornou-se independente da coordenada espacial  $z$ .

Malhas cartesianas uniformes foram geradas para a solução do domínio apresentado na Figura 1. Teste de independência de malha utilizando, o modelo  $k-\epsilon$  realizável, foi realizado com três ou quatro malhas computacionais com diferentes números de células. Caso I: 30.000, 61.235 e 99.190 células, Caso II e III:

111.400, 160.000 e 198.000 células e Caso IV: 210.000, 444.300, 620.620 e 750.000 células.

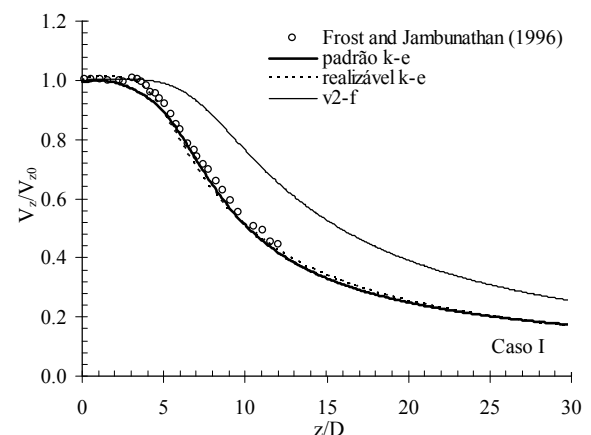
A diferença máxima entre a componente axial da velocidade na linha centro (ao longo da linha de centro do jato na direção  $z$ ) entre as duas malhas mais refinadas foi menor que 0,5% para todos os casos, assim, a malha com refinamento intermediário foi utilizada para cada caso.

## Resultados e discussão

### Caso 1: jato livre turbulento incompressível

O primeiro caso teve o objetivo de reproduzir os dados experimentais de Frost e Jambunathan (1996), o trabalho destes autores foi escolhido, pois o perfil de velocidade experimental na saída do jato é praticamente plano. Os autores também forneceram o perfil de intensidade de turbulência em função do raio do bocal, esta informação é valiosa envolvendo problemas de jatos livres em regime turbulento como será apresentado ao longo deste trabalho e, geralmente, não é informada em estudos experimentais.

O decaimento da componente axial da velocidade adimensional ( $V_z/V_{z0}^{-1}$ ,  $V_{z0}$  = velocidade média na saída do bocal) na linha de centro do jato, a partir da saída do bocal obtido com cada modelo turbulência é apresentado na Figura 2.

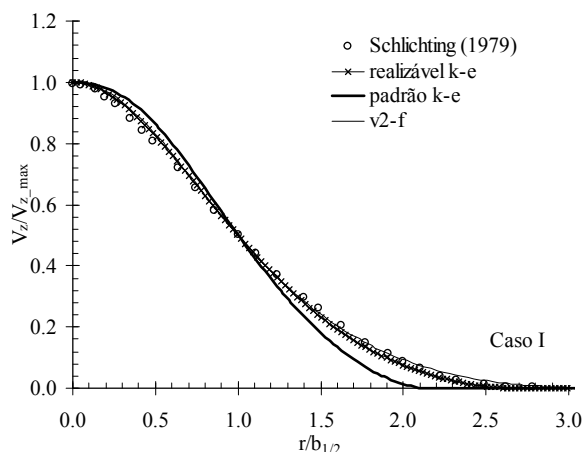


**Figura 2.** Comparação do decaimento da velocidade axial média experimental com os perfis obtidos numericamente com os modelos de turbulência.

A Figura 2 indica que a solução obtida com os dois modelos  $k-\epsilon$  é praticamente a mesma e concordam satisfatoriamente com os dados experimentais, entretanto o modelo  $v2-f$  não previu satisfatoriamente o decaimento da velocidade.

No trabalho experimental de Frost e Jambunathan (1996), não são fornecidos os perfis radiais de velocidade para que se possa fazer uma comparação, assim a Figura 3 apresenta o perfil da

componente axial da velocidade ao longo da coordenada radial comparada com o perfil autossimilar (self-similar) dado por Schlichting (1979) na região em que o escoamento do jato se encontra completamente desenvolvido. Informações adicionais sobre a teoria da autossimilaridade de jatos livres turbulentos pode ser obtida em George (1989) e Pope (2005).



**Figura 3.** Comparação entre o perfil autossimilar obtido com os modelos de turbulência e o de Schlichting (1979),  $b_{1/2}$  é a posição na direção radial na qual a velocidade é a metade da velocidade da linha de centro do jato.

As comparações apresentadas indicam que os modelos  $k-\epsilon$  realizável e  $v2-f$  concordam satisfatoriamente com os dados da literatura (Figura 3), enquanto o modelo  $k-\epsilon$  padrão forneceu bons resultados somente para  $r/b_{1/2} < 1,2$ . Este comportamento do modelo  $k-\epsilon$  padrão era esperado pela conhecida deficiência deste modelo na previsão da taxa de espalhamento do jato como discute Pope (1978). Este resultado indica que validar um modelo apenas pela comparação de sua solução com o perfil autossimilar, procedimento realizado por muitos autores, pode prover conclusões equivocadas sobre o desempenho do modelo em questão. No presente trabalho isto é evidenciado pelos resultados obtidos com os modelos  $k-\epsilon$  padrão e o  $v2-f$  em que o primeiro apresentou bons resultados para o decaimento axial da velocidade e o segundo fornecendo bons resultados quando comparado com o perfil autossimilar.

#### Caso 2: jato livre turbulento subsônico (a)

O segundo caso teve como objetivo reproduzir os dados experimentais de Simonich et al. (2001). Os dados experimentais destes autores foram escolhidos pelo fato do perfil de velocidade experimental na saída do bocal ser praticamente plano.

A intensidade de turbulência na saída do bocal é um importante parâmetro que afeta o comprimento da região do núcleo potencial do jato (STANLEY; SARKAR, 2000). Entretanto, este parâmetro é de difícil medida e, geralmente, não é informado em estudos experimentais.

A intensidade de turbulência não é disponibilizada no trabalho de Simonich et al. (2001), assim, vários níveis de intensidade turbulenta foram testados para cada modelo com número de Mach na saída do bocal 0,6 e como segunda condição de contorno turbulenta o diâmetro hidráulico. Os resultados são apresentados na Figura 4, na qual são comparados os perfis de velocidade adimensional da linha de centro do jato em função da distância adimensional da saída do jato com dados experimentais de Simonich et al. (2001).

O modelo  $k-\epsilon$  padrão não apresentou boa concordância com os dados experimentais para o caso subsônico. Um indicativo deste fato pode ser remetido à deficiência deste modelo para escoamentos com altas taxas de cisalhamento.

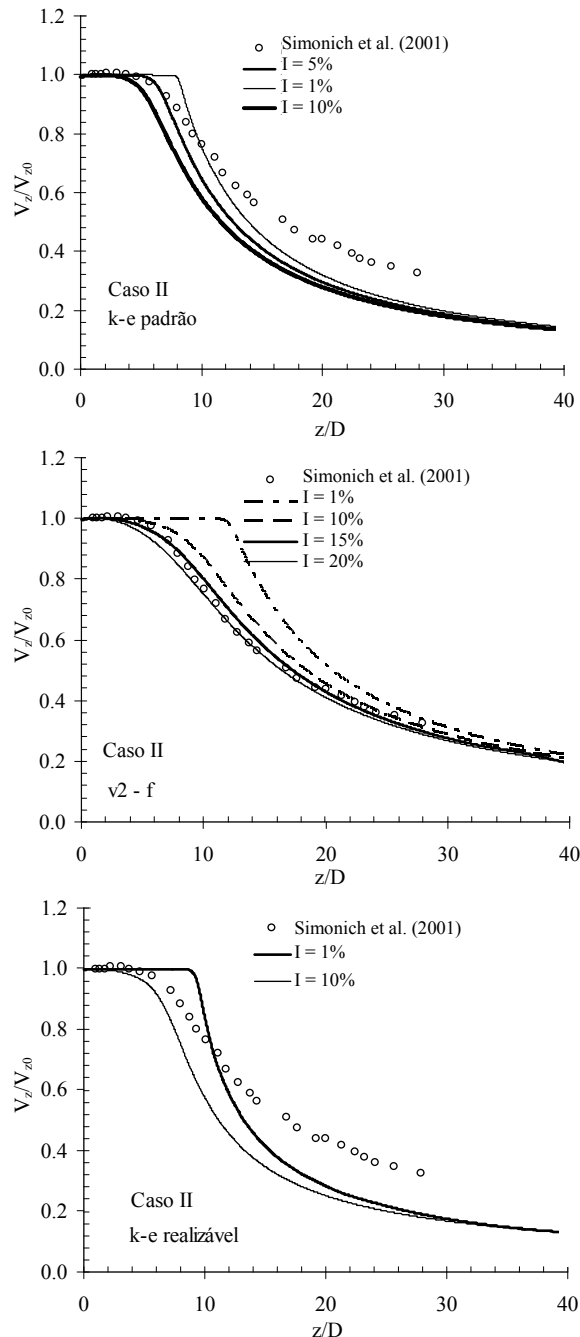
A velocidade média em um jato livre é predominante na direção axial, característica que torna este escoamento da mesma natureza dos problemas de camada limite, ou seja, a região do espaço em que a solução está sendo procurada não se estende muito longe da direção transversal, sendo esta região caracterizada pelo cisalhamento entre as camadas do fluido, em que quando intensas o modelo  $k-\epsilon$  padrão indica um fraco desempenho.

A previsão do decaimento da velocidade do jato obtido com o modelo  $k-\epsilon$  padrão e o realizável com níveis de intensidade de turbulência de 1, 5 e 10% não descreveu o comportamento real (com base nos dados experimentais) do decaimento da velocidade. Com  $I = 1\%$  os modelos concordam apenas na região núcleo potencial, mas superestima o decaimento da velocidade na região desenvolvida.

Os resultados do modelo  $v2-f$  ao contrário dos resultados com o jato incompressível concordaram bem com os dados experimentais para  $I = 15$  e 20% prevendo satisfatoriamente a região núcleo potencial e a região completamente desenvolvida. Para valores menores da intensidade de turbulência o modelo superestima o comprimento da região núcleo potencial.

Adicionalmente, pôde-se confirmar que a intensidade de turbulência na saída do bocal é um parâmetro importante que afeta o comprimento da região de núcleo potencial do jato, de modo que quanto maior a intensidade de turbulência menor será a região de núcleo potencial. Observa-se também que, para a região longe do bocal

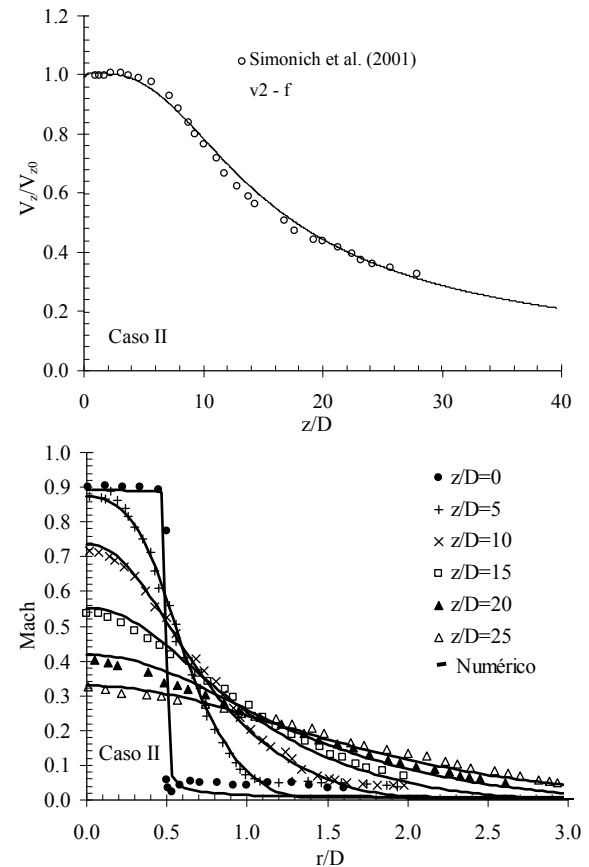
(aproximadamente  $z/D > 30$ ), os perfis de velocidade se tornam semelhantes, indicando erroneamente, como será visto mais adiante, que nesta região o grau de turbulência de origem do bocal aparentemente não tem influência sobre a região de escoamento desenvolvido.



**Figura 4.** Decaimento da velocidade adimensional da linha de centro do jato para o modelo de turbulência k- $\epsilon$  realizável, em vários níveis de intensidade de turbulência.

Como o modelo de turbulência  $v2-f$  apresentou melhor concordância com os dados experimentais

para o jato subsônico, testou-se o mesmo modelo para prever o escoamento de um jato com número de Mach igual a 0,9. Os resultados mostrados na Figura 5 revelam novamente uma satisfatória concordância com os dados experimentais, na referida figura são fornecidos o decaimento da componente axial da velocidade em função da posição axial e o decaimento do número de Mach em função da posição radial.

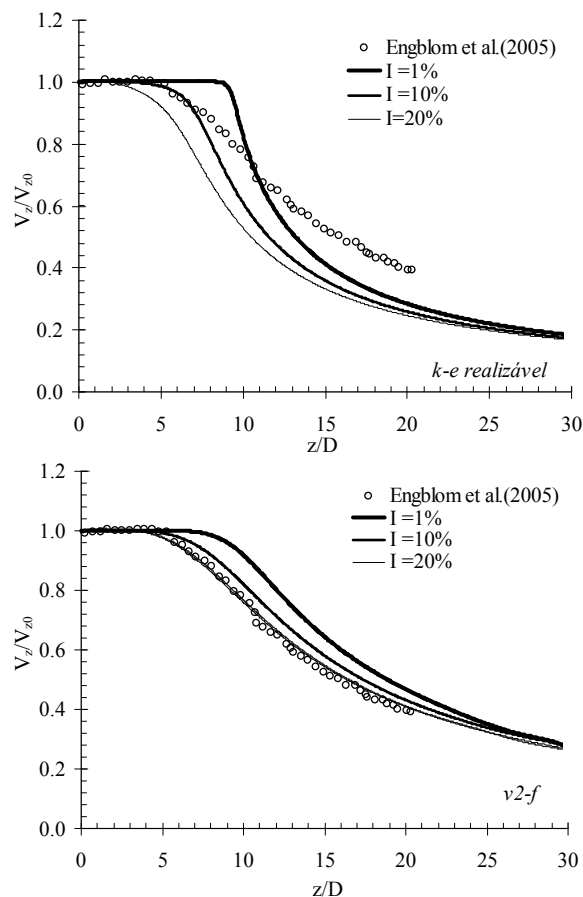


**Figura 5.** Comparação entre a previsão do modelo  $v2-f$  (linha contínua) e os dados experimentais (símbolos) para número de  $Mach_0 = 0,9$ .

### Caso III: jato livre turbulento subsônico (b)

O terceiro caso teve como objetivo reproduzir os dados experimentais de Engblom et al. (2005). Para evitar uma conclusão equivocada a respeito do desempenho destes dois modelos na previsão de um jato com condições de bocal subsônicas, buscou-se reproduzir perfis experimentais de outro autor utilizando a mesma malha computacional utilizada para o caso dos dados fornecidos por Simonich et al. (2001).

A Figura 6 apresenta os resultados das simulações utilizando os seguintes valores de intensidade de turbulência 1%, 10% e 20%, para prever o decaimento da velocidade da linha centro do jato.



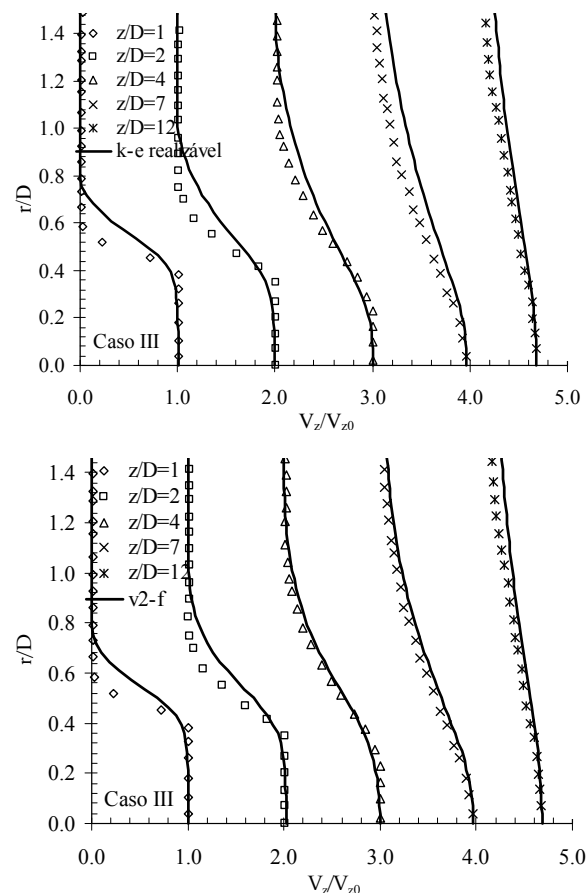
**Figura 6.** Comparação do modelo  $k-\epsilon$  realizável e do  $\nu 2-f$  frente aos dados experimentais para o decaimento da velocidade da linha centro do jato.

Para  $I_0 = 20\%$  o modelo  $\nu 2-f$  prevê bem o comportamento do jato subsônico, apresentando boa concordância com os dados experimentais, enquanto o modelo  $k-\epsilon$  realizável subestima o decaimento da velocidade. Utilizando a intensidade de turbulência de 20% foram obtidos os perfis da componente da velocidade axial em função da coordenada radial e comparados com os dados experimentais de Engblom et al. (2005).

A Figura 7 indica que até a posição  $z/D = 2$  os modelos  $\nu 2-f$  e  $k-\epsilon$  realizável fornecem praticamente os mesmos perfis e ambos apresentam leve desvio quando a componente da velocidade axial decai rapidamente, em torno de  $r/D = 0,4$  a  $0,8$ . Já para posições mais distantes do bocal,  $z/D = 4, 7$  e  $12$ , o modelo  $\nu 2-f$  concorda melhor com os dados experimentais do que o modelo  $k-\epsilon$  realizável.

Os resultados obtidos nesta seção indicam que o modelo  $\nu 2-f$  fornece melhores resultados que os demais modelos de turbulência testados para o caso em que as condições no bocal são subsônicas. Dos perfis obtidos com cada modelo de turbulência, o modelo  $\nu 2-f$  é o que prevê o menor decaimento da

velocidade do jato, tanto para caso incompressível quanto subsônico, ou seja, este modelo fornece a menor taxa de decaimento.



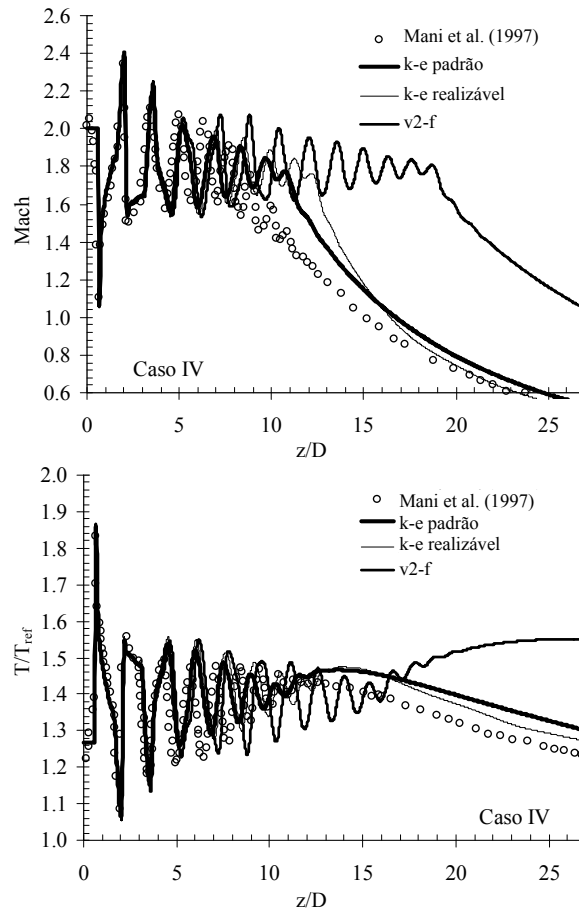
**Figura 7.** Comparação dos perfis da componente da velocidade axial obtidos com o modelo  $\nu 2-f$  (linha contínua) frente aos dados experimentais de Engblom et al. (2005) (símbolos).

O curto comprimento da região potencial fornecida pelo modelo  $k-\epsilon$  padrão e o  $k-\epsilon$  realizável indica que estes modelos estão prevendo vórtices turbulentos muito energéticos, provocando muita mistura entre o jato e o fluido vizinho.

#### Caso IV: jato livre turbulento supersônico sobreexpandido

O quarto caso teve como objetivo reproduzir os dados experimentais de Mani et al. (1997). Além dos quesitos já comentados para selecionar um conjunto de dados experimentais da literatura, os dados experimentais de Mani et al. (1997) foram escolhidos pois os autores já testaram no referido trabalho três modelos de turbulência (Baldwin-Barth, Spalart-Allmaras e  $k-\omega$  SST) diferentes do presente trabalho.

A Figura 8 compara os resultados obtidos numericamente com os dados experimentais para o decaimento do número de Mach da linha de centro do jato e o perfil de temperatura, respectivamente.

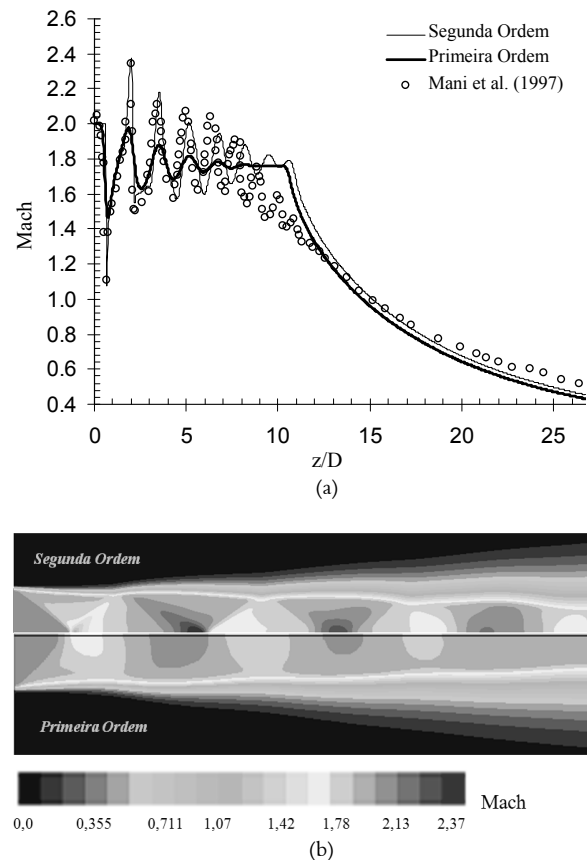


**Figura 8.** Comparação entre os dados experimentais e a previsão dos modelos de turbulência.

Os dados experimentais fornecidos por Mani et al. (1997) apresentam oscilatório decaimento na distribuição do número de Mach com diminuição na amplitude até  $z/D$  aproximadamente 10 e redução mais acentuada depois deste ponto. O perfil de temperatura também exibiu comportamento oscilatório, em que o número de Mach é máximo, a temperatura é mínima.

A Figura 8 indica que as ondas de choque iniciais são bem previstas pelos três modelos de turbulência testados. Os picos de temperatura e do número de Mach foram previstos satisfatoriamente até o terceiro pico, resultado também obtido por Mani et al. (1997) usando os modelos de turbulência Baldwin-Barth, Spalart-Allmaras e  $k-\omega$  SST.

Foi avaliada a influência do esquema de discretização sobre a solução numérica, a Figura 9 apresenta a solução obtida com os esquemas *upwind* de primeira e de segunda ordem, em que são apresentados o perfil de número de Mach em função da posição axial (Figura 9a) e o contorno do número de Mach (Figura 9b).



**Figura 9.** Comparação das previsões do comportamento do jato entre os esquemas *upwind* de primeira e de segunda ordem.

Os perfis da Figura 9a indicam que ambos os esquemas de discretização fornecem comportamento qualitativo semelhante, no sentido que a localização ( $z/D$ ) das ondas de choque foram as mesmas com os dois esquemas, entretanto o esquema *upwind* de primeira ordem subestima a amplitude da oscilação do número de Mach, provendo uma solução mais suave que a real. Entretanto, na região de escoamento desenvolvido em que tanto a velocidade e os gradientes são menores os dois esquemas apresentaram soluções semelhantes.

Da Figura 9b observar-se que o esquema de primeira ordem introduz efeito viscoso (viscosidade artificial) que dissipa a solução reduzindo os gradientes e espalhando o perfil.

Como pôde ser observado dos resultados apresentados no presente trabalho, os três modelos de turbulência não previram adequadamente o comportamento do jato, a amplitude das ondas de choque foi diminuindo lentamente, induzindo a um grande número de oscilações e superestimando o número de ondas de choque, especialmente para o modelo  $v2-f$ . O perfil de temperatura fornecido por este modelo também apresentou aumento irreal a partir de  $z/D = 20$ .



Os resultados obtidos por este trabalho indicaram que nenhum dos três modelos de turbulência testados reproduziu satisfatoriamente os três regimes de escoamento (incompressível, subsônico, supersônico sobreexpandido) de um jato circular, evidenciando a necessidade de mais estudos em relação à modelagem da turbulência. É notório que a modelagem RANS não comporta formulação implícita para as flutuações turbulentas, sendo necessário para resolução do problema de fechamento da turbulência recorrer a um conjunto de experimentos “calibração” *ad hoc*. Entretanto, tal calibração é válida somente para determinados regimes e/ou regiões de escoamento, e qualquer que seja a extrapolação pode não prover resultados precisos, no entanto é evidente que isto é fundamentalmente menos limitante do que uma adicional modificação dos valores numéricos das constantes de um modelo de turbulência para um problema específico.

No trabalho de Shih et al. (1995), em que o modelo  $k-\varepsilon$  realizável é proposto, este modelo é testado para o jato livre circular fornecendo bons resultados, entretanto para condições de escoamento subsônicas exploradas no presente trabalho, este modelo não apresentou vantagens em relação ao modelo  $\nu_2-f$ .

Sabe-se que os grandes turbilhões retêm a maioria da energia cinética turbulenta ( $k$ ) no escoamento e não possuem uma função significativa na dissipação de  $k$ . Por outro lado, Kolmogorov (1941) apresentou que as características dos pequenos turbilhões são funções da viscosidade ( $\nu$ ) e da taxa de dissipação da energia cinética turbulenta ( $\varepsilon$ ), e que os pequenos turbilhões são responsáveis pela dissipação da energia cinética turbulenta.

No campo de escoamento de jato livre existem turbilhões de todos os tamanhos simultaneamente, os turbilhões de tamanhos grande e pequeno realizam a transferência de energia cinética turbulenta retida pelos grandes turbilhões para os pequenos antes que a energia seja consumida pela dissipação viscosa e convertida em energia térmica. Assim, mostra-se natural considerar ambas as escalas de turbulência (grande e pequena) juntas na modelagem da turbulência. Ambos os modelos  $\kappa-\varepsilon$  baseiam-se apenas nas grandes escalas (velocidade  $\sqrt{k}$  e  $\kappa/\varepsilon$  para o comprimento).

Contudo, foi verificado no presente trabalho que o modelo  $\kappa-\varepsilon$  realizável apresenta-se mais indicado para jatos livres turbulentos circulares axissimétricos incompressíveis e supersônicos, o que indica que a modelagem de  $\varepsilon$  que é baseada na equação da vorticidade é mais adequada para as condições destes

regimes de escoamento, enquanto o modelo  $\nu_2-f$  mostrou-se mais adequado ao regime subsônico para os casos estudados do presente trabalho.

## Conclusão

Três modelos RANS  $k-\varepsilon$  padrão,  $k-\varepsilon$  realizável e  $\nu_2-f$  foram testados para o escoamento de um jato livre circular turbulento em diferentes regimes de escoamento: incompressível, subsônico e supersônico sobreexpandido. Sem nenhuma modificação dos modelos de turbulência, obteve-se boa concordância entre os resultados numéricos e experimentais para todos os casos avaliados. Entretanto, nenhum modelo previu satisfatoriamente os três regimes de escoamento, evidenciando a necessidade de mais estudos aplicados à modelagem da turbulência. O modelo  $k-\varepsilon$  realizável mostrou melhor concordância frente aos dados experimentais para o regime incompressível e supersônico, enquanto o modelo  $\nu_2-f$  mostrou melhor previsão do escoamento para o regime subsônico.

## Referências

- ARSHED, G. M.; SHUJA, S. Z.; YILBAS, B. S.; BUDAIR, M. O. Numerical investigation of a transient free jet resembling a laser-produced vapor jet. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 47, n. 5, p. 1037-1052, 2004.
- BERG, J. R.; ORMISTON S. J.; SOLIMAN H. M. Prediction of the flow structure in a turbulent rectangular free jet. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 33, n. 3, p. 552-563, 2006.
- CHEN, C. J.; JAW, S. Y. **Fundamentals of turbulence modeling**. Washington, D.C.: Taylor and Francis, 1998.
- DURBIN, P. A. Separated Flow Computations with the  $k-\varepsilon-\nu^2$  Model. **American Institute of Aeronautics and Astronautics**, v. 33, n. 4, p. 659-664, 1995.
- ENGBLOM, W. A.; GEORGIADIS, N. J.; KHAVARAN, A. Investigation of variable-diffusion turbulence model correction for round jets. In: AEROACOUSTICS CONFERENCE, 11., 2005. Monterey. **Conference...** Monterey: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2005. p. 1-19.
- FOX, R. W.; McDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.
- FROST, S. A.; JAMBUNATHAN, K. Effect of nozzle geometry and semi-confinement on the potential core of a turbulent axisymmetric free jet. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 23, n. 2, p. 155-162, 1996.
- GEORGE, W. K. The self-similarity of turbulent flows and its relation to initial conditions and coherent structures. In: ARNDT, R. E. A.; GEORGE, W. K. (Ed.). **Recent advances in turbulence**. New York: Springer, 1989. p. 39-73.

- KOLMOGOROV, A. N. Local structure of turbulence in an incompressible fluid at very high Reynolds numbers. **Doklady Akademii Nauk USSR**, v. 4, n. 30, p. 299-303, 1941.
- KUCZMARSKI, M. A.; MILLER, A. R.; ZHU, D. CFD-Guided development of test rigs for studying erosion and large-particle damage of thermal barrier coatings. **Modelling and Simulation in Engineering**, v. 1, n. 1, p. 1-13, 2011.
- LAUNDER, B. E.; SPALDING, D. B. **Lectures in mathematical models of turbulence**. London: Academic Press, 1972.
- MANI, M.; LADDF, J. A.; CAIN, A. B.; BUSH, R. H. An assessment of one-and two-equation turbulence models for internal and external flows. In: AMERICAN INSTITUTE OF AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS FLUID DYNAMICS CONFERENCE, 28., 1997. Snowmass Village. **Conference...** Snowmass Village: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1997. p. 1-10.
- MCGUIRK, J. J.; RODI, W. The calculation of three-dimensional turbulent free jets. In: **First International Symposium on Turbulent Shear Flows**. Berlin: Heidelberg; New York: Springer-Verlag, 1979. p. 71-83.
- MAHMOUD, H.; KRIAA, W.; MHIRI, H.; PALEC, G.; BOURNO, P. A numerical study of a turbulent axisymmetric jet emerging in a co-flowing stream. **Energy Conversion and Management**, v. 51, n. 11, p. 2117-2126, 2010.
- POPE, S. B. An explanation of the turbulent round-jet/plane-jet anomaly. **American Institute of Aeronautics and Astronautics**, v. 16, n. 3, p. 279-281, 1978.
- POPE, S. B. **Turbulent flows**. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- ROE, P. L. Characteristic based schemes for the Euler equations. **Annual Review of Fluid Mechanics**, v. 18, n. 1, p. 337-365, 1986.
- SCHLICHTING, H. **Boundary layer theory**. New York: McGraw-Hill, 1979.
- SHIH, T. H.; LIOU, W. W.; SHABBAR, A.; YANG, Z.; ZHU, J. A new  $k-\varepsilon$  eddy-viscosity model for high Reynolds number turbulent – lows - model development and validation. **Computers Fluids**, v. 24, n. 3, p. 227-238, 1995.
- SIMONICH, J. C.; NARAYANAN, S.; BARBER, T.; NISHIMURA, J. M. Aeroacoustic characterization, noise reduction, and dimensional scaling effects of high subsonic jets. **American Institute of Aeronautics and Astronautics**, v. 39, n. 11, p. 2062-2069, 2001.
- RODI, W. Turbulence models and their application in hydraulics. In: **A State of the Art Review**. Delft: Institute Association of Hydraulics Research, 1980.
- STANLEY, S. A.; SARKAR, S. Influence of nozzle conditions and discrete forcing on turbulent planar jets. **American Institute of Aeronautics and Astronautics**, v. 38, n. 9, p. 1615-1623, 2000.
- VANDOORMAAL, J. P.; RATHBY, G. D. Enhancements of the SIMPLE method for predicting incompressible fluid flows. **Numerical Heat Transfer**, v. 7, n. 1, p. 147-163, 1984.
- ZHOU, X.; SUN, Z.; DURST, F.; BRENNE, G. Numerical simulation of turbulent jet flow and combustion. **Computers and Mathematics with Applications**, v. 38, n. 9, p. 179-191, 1999.

*Received on September 22, 2009.*

*Accepted on July 13, 2010.*

License information: This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.