

COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS DOS MODELOS DE TURBULÊNCIA SPALART-ALLMARAS, $k-\epsilon$ E $k-\omega$ SST APLICADOS NA SIMULAÇÃO DA FORMAÇÃO DA ESTEIRA DE VÓRTICES EM UM MODELO SIMPLIFICADO DE ÔNIBUS RODOVIÁRIO

Results comparisons of the turbulence models Spalart-Allmaras, $k-\epsilon$ and $k-\omega$ SST applied on simulation of wake vortex formation in a simplified bus model

Valdson Henrique Prado Gonçalves (1)(P); Vagner Ferreira de Oliveira (2); Rudolf Huebner (3)

(1) Aluno de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG, Brasil.

(2) Aluno de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG, Brasil.

(3) Dr. Prof., Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG, Brasil.

E-mail para Correspondência: vhgoncalves@gmail.com; (P) Apresentador

Resumo: Nos dias atuais, a dinâmica de fluidos computacional é uma ferramenta essencial para desenvolvimento de projetos de diversas áreas, como a aeronáutica, a automobilística e a naval, desde os problemas simples até os mais complexos. Na indústria automobilística, a utilização dessa ferramenta, aliada a investigação experimental, é de grande importância para o estudo das características do escoamento ao redor de corpos rombudos, para a avaliação da influência das forças aerodinâmicas sobre o objeto de estudo, podendo destacar a diminuição da força de arrasto, que visa consequentemente reduzir o consumo de combustíveis e emissões de gases poluentes. Objetivou-se simular e analisar o escoamento ao redor de uma geometria simplificada de ônibus rodoviário, utilizando modelos de turbulência, tais como Spalart-Allmaras, $k-\epsilon$ RNG e $k-\omega$ SST, comparando e validando com dados experimentais da literatura para coeficiente de arrasto.

Palavras chaves: Modelos de turbulência; CFD; coeficiente de arrasto

Abstract: Nowadays, computational fluid dynamics is an essential tool for development of projects in several areas, such as aeronautics, automotive and naval, from the simplest to the most complex designs. In the automobile industry, the use of that tool, combined with experimental investigation, has great importance for the study of the flow characteristics around of blunt bodies, for the evaluation of the influence of the aerodynamic forces on the case studies, could highlight the decrease of the drag force, that it seeks consequently to reduce the fuel consumption and gas emissions. The objective of this study was to simulate and analyze the flow around a simplified bus geometry, using turbulence models, such as



Spalart-Allmaras, $k-\epsilon$ RNG and $k-\omega$ SST, comparing and validating with literature data for drag coefficient.

Keywords: Turbulence models; CFD; drag coefficient.



1 INTRODUÇÃO

No projeto de automóveis, o estudo do escoamento do ar sobre o protótipo tem a finalidade de analisar a formação de vórtices na parte traseira, o que contribui de forma significativa para a geração da força de arrasto, uma força de resistência que surge devido ao movimento do fluido ao redor de corpos robustos. Ahmed (1981) apresenta diferentes estruturas de esteira de vórtice, gerados na parte traseira de um veículo para diferentes configurações, permitindo visualizar regiões de recirculação e pares de vórtices longitudinais para cada modelo testado. Comenta que uma quantidade significativa da energia total consumida durante o movimento de um veículo terrestre é consumida pela superação do arrasto aerodinâmico.

Ahmed, Ramm e Faltin (1984) propuseram um modelo de geometria simples, que possibilitou estudos mais detalhados sobre a estrutura do escoamento em regiões de esteira, e observaram que 85% da força de arrasto é devido ao arrasto de pressão e o restante é arrasto por atrito, e que 9% do arrasto de pressão se deve ao escoamento sobre a superfície do modelo de Ahmed, e o restante é formado na traseira. Além disso, perceberam que o ângulo de inclinação traseira influencia no valor do coeficiente de arrasto do modelo, como foi observado por Gilliéron e Chometon (1999).

O estudo de escoamento ao ônibus rodoviário tem como base a utilização do corpo de Ahmed com ângulo de inclinação traseira a 90° . Trabalhos como de Bruneau et al. (2014) e Grandemange et al. (2015) analisam numericamente a formação dos vórtices para o modelo de Ahmed com traseira quadrada e propõem estratégias para o controle do fluxo de ar na parte traseira, com finalidade de redução de arrasto e consequente diminuição no consumo de combustível. Raina, Harmain e Haq (2017) também realizaram um estudo numérico, utilizando modelos de turbulência RANS, que consistia na análise da influência de defletor de inclinação variável, na parte traseira do corpo de Ahmed, no coeficiente de arrasto e na esteira, e conseguiram uma diminuição de 7% C_d em comparação ao corpo sem o dispositivo.

Esse trabalho apresenta a investigação numérica do escoamento ao redor do corpo de Ahmed com inclinação traseira de 90° , através dos modelos de turbulência Spalart-Allmaras, $k-\epsilon$ RNG e $k-\omega$ SST, destacando a formação de vórtices na esteira do fluxo de ar, além de comparação de valores de coeficiente de arrasto calculado em cada modelo com valores retirados de trabalhos experimentais.

2 MODELOS DE TURBULÊNCIA

Os modelos de turbulência RANS utilizam equações de continuidade e Navier-Stokes filtradas, para escoamento incompressível, com foco para a análise dos efeitos de turbulência das propriedades do escoamento médio, como podem ser observadas nas Eq. (1) e (2).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho \overline{u'_i u'_j}) + S_M \quad (2)$$

Onde ρ é a massa específica do fluido, u_i é o vetor de velocidades, x_i e x_j são coordenadas relacionadas ao sistema de coordenadas, p é a pressão, μ é a viscosidade dinâmica, S_M é uma fonte de momentum e $\overline{u'_i u'_j}$ é o tensor de Reynolds. Os modelos de turbulência utilizam uma equação para obter o tensor de Reynolds, como o modelo Spalart-Allmaras, ou duas equações adicionais, como os modelos k- ϵ RNG e o k- ω SST, que são utilizados nesse trabalho.

Spalart e Allmaras (1992) propuseram o modelo que utiliza uma equação de transporte para viscosidade turbulenta cinemática, com o objetivo de minimizar o custo computacional em simulações de problemas aerodinâmicos. A equação de transporte é dada por

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \tilde{\nu}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \tilde{\nu} u_i) = G_\nu + \frac{1}{\tilde{\sigma}_\nu} \left\{ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \rho \tilde{\nu}) \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j} \right] + C_{b2} \rho \left(\frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j} \right)^2 \right\} - Y_\nu S_{\tilde{\nu}} \quad (3)$$

Onde $\tilde{\nu}$ é a viscosidade turbulenta cinemática, G_ν é a produção de viscosidade turbulenta, Y_ν é a destruição de viscosidade turbulenta, $S_{\tilde{\nu}}$ é um termo fonte para o modelo, e $\tilde{\sigma}_\nu$ e C_{b2} são constantes para o modelo.

O modelo k- ϵ RNG, proposto por Yakhot et al. (1992), utiliza duas equações de transporte, uma para a energia cinética turbulenta e outra para a taxa de dissipação, e remove os efeitos das pequenas escalas das equações de Navier-Stokes, expressando-os em termos das grandes escalas, como podem ser observadas na Eq. (4) e (5).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - \rho \epsilon - S_k \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\epsilon \mu_{eff} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon}) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + R_\epsilon + S_\epsilon \quad (5)$$

Onde k é a energia cinética turbulenta, ϵ é a taxa de dissipação, G_k e G_ϵ representam a taxa de produção de k e ϵ , μ_{eff} é a viscosidade efetiva, α_k e α_ϵ são os números de Prandtl para k e ϵ , S_k e S_ϵ são termos fontes, R_ϵ é um termo do modelo RNG relacionado a taxa de deformação e $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$ e $C_{3\epsilon}$ são constantes do modelo.

Menter (1994) propôs um modelo de duas equações que consiste em uma transformação do modelo k- ϵ em k- ω para escoamentos em regiões próximas a paredes e para regiões distantes com escoamento completamente turbulento a utilização do modelo k- ϵ , o modelo k- ω SST. As equações de transporte são definidas para k e ω , taxa de dissipação específica, onde $\omega = \epsilon/k$, como podem ser observadas nas Eq. (6) e (7).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (7)$$

Onde Γ_k e Γ_ω representam a difusividade efetiva de k e ω , respectivamente, G_ω é a produção de ω , Y_k e Y_ω representam a dissipação de k e ω e D_ω é o termo de difusão cruzada, presente na definição do mesmo. O k - ω SST, assim como o modelo Spalart-Allmaras demonstram resultados satisfatórios em simulação de problemas aerodinâmicos (Versteeg e Malalasekera, 2007).

3 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

A simulação computacional foi baseada no trabalho experimental de Eulalie et al. (2017), que analisa o escoamento externo no corpo de Ahmed com inclinação traseira de 90° , em uma escala de 0,7, com dimensões $C = 0,731$ m, $L = 0,272$ m e $H = 0,201$ m. O domínio computacional da simulação tem dimensões $30H \times 2,5H \times 9H$, baseadas na altura do modelo. A Figura 1 mostra o domínio citado.

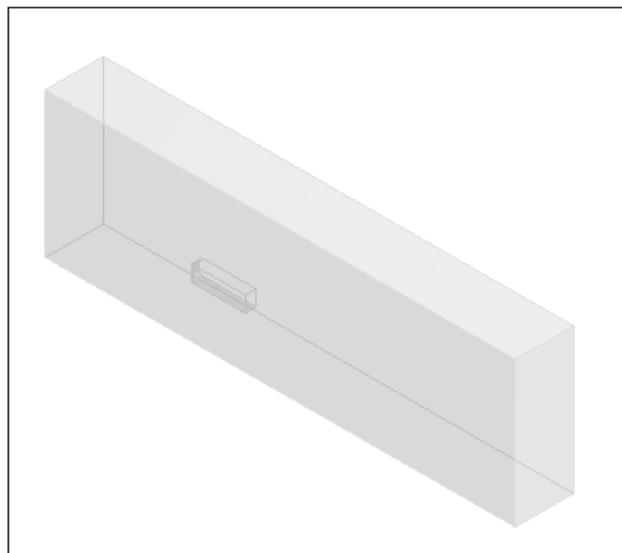


Figura 1: Domínio computacional utilizado nas simulações

A velocidade utilizada nas simulações foi $V = 30$ m/s, para uma intensidade de turbulência de 1%. O número de Reynolds baseado na altura do modelo é $Re = 412000$. A altura c , o intervalo entre a parte inferior do domínio e o modelo, é 0,050 m. Na simulação, foi utilizada condição de simetria com o objetivo de diminuir o custo computacional para a análise.

A malha é composta de elementos tetraédricos, localizados em quase todo o domínio, e elementos prismáticos, encontrados em regiões próximas de paredes, como o corpo e a parte inferior do domínio, com o total de 10 milhões de elementos. Ao redor do corpo e na região onde forma-se a esteira, a malha foi refinada com elementos tetraédricos com dimensões máximas igual a 0,003 m, para uma melhor visualização dos vórtices formados na esteira.

As simulações foram feitas em regime transiente, com passo de tempo definido em 0,001s, para um tempo total de escoamento de 0,4 s. O algoritmo SIMPLE foi utilizado para a solução do acoplamento velocidade-pressão.

4 RESULTADOS

Para os três modelos de turbulência analisados nas simulações, foram estudadas as estruturas dos vórtices que compõe a esteira formada na parte traseira do modelo. As Figuras 2, 3 e 4 mostram as linhas de corrente no plano XY.

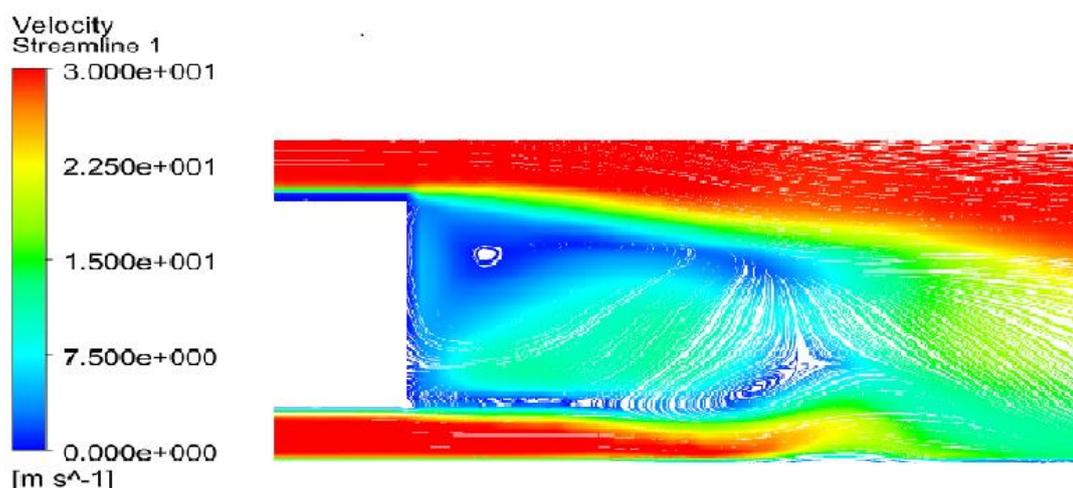


Figura 2: Linhas de corrente na parte traseira para o modelo k-ε RNG

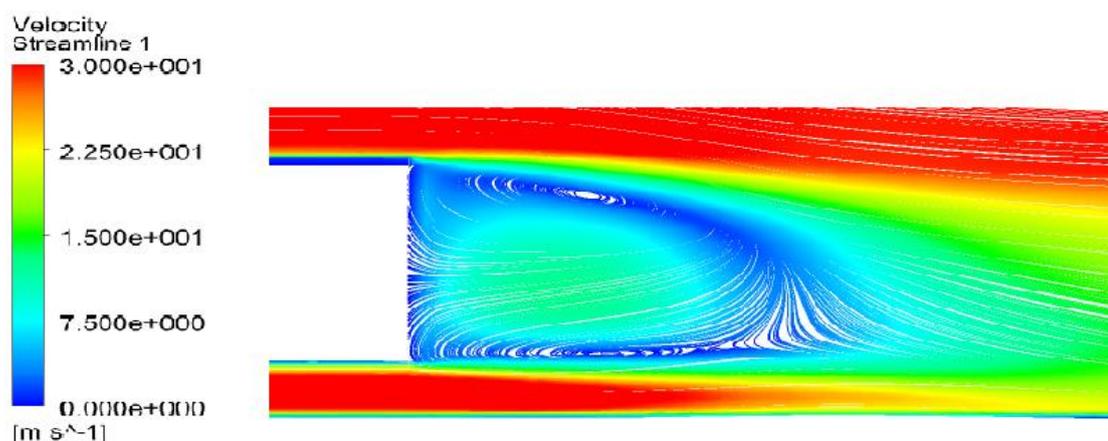


Figura 3: Linhas de corrente na parte traseira para o modelo k-ω SST

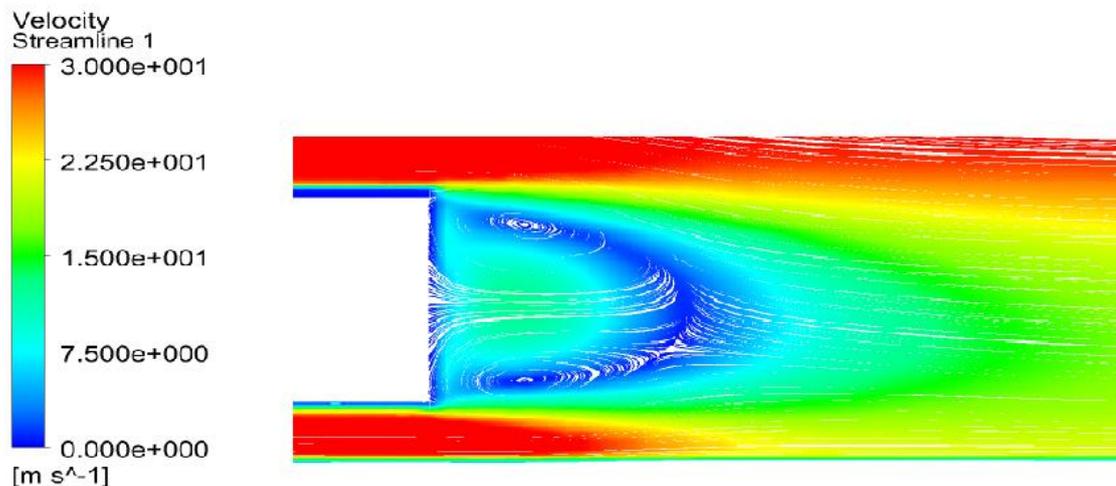


Figura 4: Linhas de corrente na parte traseira para o modelo Spalart-Allmaras

Nos três modelos, consegue-se identificar a formação de dois vórtices, um na parte superior, em sentido horário, e outro na parte inferior, em sentido anti-horário, conforme foi observado por Krajnovic e Davidson (2002). Na Figura 2, os resultados para o modelo $k-\varepsilon$ RNG diferenciam do trabalho citado em relação a localização, uma vez que o vórtice inferior se forma abaixo do superior. Além disso, o centro do vórtice superior está próximo a superfície da parte traseira, e, nesse caso, difere dos resultados dos outros dois estudos, em que o centro está afastado da parte traseira.

A característica da estrutura dos vórtices identificadas nos outros dois modelos de turbulência aproxima-se do que foi obtida por Krajnovic e Davidson (2002), com uma relevância aos vórtices da Figura 3, nos quais as localizações dos seus centros e intensidade assemelham-se ao trabalho citado. Também vale ressaltar que o modelo Spalart-Allmaras apresenta bons resultados em relação ao escoamento na esteira do modelo, similares ao modelo $k-\omega$ SST.

O coeficiente de arrasto, C_d , e o coeficiente de pressão, C_p , para o corpo de Ahmed foi avaliado, como observa-se na Tabela 1. Os valores experimentais foram retirados de Eulalie et al. (2017).



Tabela 1. Comparação entre os valores de Cd e Cp calculados e experimentais

Modelos	Cd	Diferença do Cd em relação ao Experimental (%)	Cp	Diferença do Cp em relação ao Experimental (%)
Experimental	0,364	-	-0,222	-
k-ε RNG	0,325	10,7	-0,189	14,8
k-ω SST	0,336	7,7	-0,195	12,1
Spalart-Allmaras	0,348	4,4	-0,192	13,5

A comparação dos valores apresentados na Tabela 1 mostra que os dois últimos modelos de turbulência conseguem prever de maneira satisfatória o valor para o coeficiente de arrasto do modelo, com uma diferença menor que 10%, comprovando que esses modelos possuem uma boa eficiência para casos de estudos aerodinâmicos. Já para o coeficiente de pressão, os três modelos calcularam valores acima do esperado, demonstrando que modelos RANS apresentam deficiências em análises em regiões de baixas pressões na esteira do escoamento.

Nota-se que o modelo k-ε RNG apresentou resultados insatisfatórios para a análise descrita, o que se deve pelo fato de as características desse modelo não realizar boas aproximações para o escoamento externo, principalmente na região da camada-limite, o que afeta os valores de coeficiente de arrasto.

5 CONCLUSÃO

A simulação computacional do corpo de Ahmed com inclinação de 90° apontou a formação de vórtices na parte traseira, sendo essas estruturas observadas nos três modelos de turbulência utilizados. Os modelos Spalart-Allmaras e k-ω SST obtiveram resultados similares a trabalhos anteriores que utilizaram o mesmo corpo, demonstrando possuírem melhor desempenho no estudo de escoamentos aerodinâmicos do que o k-ε RNG.

Com relação aos valores de coeficiente de arrasto calculados numericamente, observou-se novamente o desempenho satisfatório dos outros modelos em relação ao k-ε RNG, com diferenças menores que 10 % em relação ao valor experimental, evidenciando esses como modelos aceitáveis para esse tipo de análise.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação de Engenharia Mecânica da UFMG e a CAPES pelo suporte para a realização desse trabalho.



REFERÊNCIAS

- Ahmed, S., 1981. An experimental study of the wake structures of typical automobile shapes. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 9, n.1, pp. 49-62.
- Ahmed, S., Ramm, G., & Faltin, G., 1984. Some salient features of the time-averaged ground vehicle wake. *SAE Technical Paper Series 840300*.
- Bruneau, C., Creusé, E., Gilliéron, P., & Mortazavi, I., 2014. Effect of the vortex dynamics on the drag coefficient of a square back Ahmed body: Application to the flow control. *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, vol. 45, pp. 1-11.
- Eulalie, Y., Gilotte, P., & Mortazavi, I., 2017. Numerical study of flow control strategies for a simplified square back ground vehicle. *Fluid Dynamics Research*, vol. 49, n. 3.
- Gilliéron, P., & Chometon, F., 1999. Modelling of stationary three-dimensional separated air flows around an Ahmed reference model. In *ESAIM: Proceedings*, vol. 7, pp. 173-182. EDP Sciences.
- Grandemange, M., Cadot, O., Courbois, A., Hebert, V., Ricot, D., Ruiz, T., & Vigneron, R., 2015. A study of wake effects on the drag of the Ahmed's squareback model at the industrial scale. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 145, pp. 282-291.
- Krajnović, S., & Davidson, L., 2003. Numerical study of the flow around a bus-shaped body. *Journal of Fluids Engineering*, vol. 125, n. 3, pp. 500-509.
- Menter, F. R., 1994. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA journal*, vol. 32, n. 8, pp. 1598-1605.
- Raina, A., Harmain, G., & Haq, M., 2017. Numerical investigation of flow around a 3D bluff body using deflector plate. *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 131, pp. 701-711.
- Spalart, P., & Allmaras, S., 1992. A one-equation turbulence model for aerodynamic flows. In *30th aerospace sciences meeting and exhibit*, p. 439.
- Versteeg, H. K., & Malalasekera, W., 2007. An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method. Pearson Education.
- Yakhot, V., Orszag, S. A., Thangam, S., Gatski, T. B., & Speziale, C. G. (1992). Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique. *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*, vol. 4, n. 7, pp. 1510-1520.