

AVALIAÇÃO DE RESULTADOS DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE ESCOAMENTO SOBRE O PERFIL NACA 2410 UTILIZANDO O OPENFOAM COM DIFERENTES MODELOS DE TURBULÊNCIA

Marcos Paulo Gomes Fernandes, marcospgf@gmail.com¹

Paulo Alexandre Costa Rocha, paulo@posmec.ufc.br¹

Francisco Olimpio Moura Carneiro, olimpiomcarneiro@gmail.com¹

¹Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici, Av. Humberto Monte, S/N, Bloco 714
60450-000 – Fortaleza – CE

Resumo: Este trabalho apresenta uma análise computacional do escoamento sobre o perfil aerodinâmico NACA 2410, com o objetivo de verificar o comportamento dos resultados dos coeficientes de arrasto e de sustentação para diferentes ângulos de ataque utilizando três modelos de turbulência (k - ϵ , k - ω SST e Spalart-Allmaras). O programa utilizado foi o OpenFOAM, que é um pacote de fluidodinâmica computacional de código livre, com capacidades de geração de malha, obtenção da solução e pós-processamento. Os seguintes parâmetros foram utilizados na geração da malha: dez vezes a corda a montante, cinquenta vezes a corda a jusante, quinze camadas sobre o perfil e dois ciclos para a caixa de refinamento. Esses parâmetros já se mostraram satisfatórios para a solução numérica em outras situações. Os coeficientes de sustentação e arrasto obtidos para os diferentes ângulos de ataque foram comparados com valores experimentais apresentados na literatura. Os valores dos coeficientes de sustentação em geral foram subestimados, variando de três por cento a baixos ângulos de ataque até trinta e quatro por cento a altos ângulos de ataque, indicando a dificuldade que os modelos de turbulência possuem em prever o ponto de separação da camada limite. As maiores discrepâncias ocorreram nos valores dos coeficientes de arrasto, que apresentaram variações da ordem de mil por cento. Mesmo assim este fato já era esperado, uma vez que os modelos assumem que o escoamento é turbulento sobre todo o perfil, o que não é verdade, pois há uma significativa extensão sobre o mesmo onde o regime é laminar. Constatou-se então que a avaliação de desempenho aerodinâmico através de simulação numérica deve ser realizada com cautela, tendo em mente as vantagens e limitações das ferramentas utilizadas.

Palavras-chave: perfil NACA 2410, modelos de turbulência, openfoam

1. INTRODUÇÃO

A análise numérica, através da simulação computacional, de problemas de engenharia está se tornando uma ferramenta muito útil para os engenheiros. Esse tipo de análise possui algumas vantagens quando comparada com o trabalho experimental, das quais duas são mais evidentes: menor custo e um volume grande de informações de um mesmo sistema. No entanto, a simulação computacional exige um estudo detalhado dos parâmetros utilizados para garantir que os resultados obtidos estejam de acordo com a realidade física que envolve o sistema de interesse.

Dois etapas são necessárias para assegurar a representatividade do modelo numérico utilizado. A primeira etapa é a parametrização da geração da malha, representação discreta do domínio físico, que consiste na determinação de parâmetros geométricos e de refinamento que impactam na solução numérica, garantindo assim que os mesmos parâmetros computacionais vão ser utilizados nas diferentes condições físicas do problema (Fernandes et al., 2009). A outra etapa é a validação numérica do modelo de turbulência (Wilcox, 2006), a qual é a etapa onde os resultados obtidos são comparados com valores experimentais para indicar se o modelo utilizado está representando de maneira coerente a realidade física que envolve o problema estudado.

Neste trabalho foi feito um estudo numérico do escoamento sobre o perfil aerodinâmico NACA 2410 utilizando os seguintes modelos de turbulência: k - ϵ (épsilon), k - ω (ômega) SST e Spalart-Allmaras. Para cada modelo, o ângulo de ataque foi variado e foram obtidos valores de coeficientes de sustentação e arrasto. O escoamento foi considerado como sendo incompressível, bidimensional e em regime permanente. Os resultados obtidos foram comparados com valores experimentais apresentados por Abbot et al (1959). A validação dos resultados obtidos é importante para que os

modelos de turbulência possam ser utilizados em outros problemas que envolvam escoamento sobre elementos aerodinâmicos.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

No escoamento turbulento há uma intensa mistura entre as propriedades transportadas devido aos turbilhões gerados pelo mesmo. Tensões de cisalhamento turbulentas surgem em função da intensa troca de quantidade de movimento entre as regiões do escoamento. Essas tensões são normalmente aproximadas pelos tensores de Reynolds e são adicionadas às tensões já existentes. Em 1877, Boussinesq postulou que a transferência de momento existente no escoamento turbulento pode ser modelada considerando-se a viscosidade turbulenta (Versteeg & Malalasekera, 2008). Essa aproximação consiste em relacionar os tensores de Reynolds a essa viscosidade.

Alguns modelos foram desenvolvidos com o objetivo de resolver de maneira mais realista os efeitos da turbulência, os quais são conhecidos como modelos de turbulência. Os três modelos de turbulência utilizados neste trabalho são do tipo RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes), os quais têm a atenção do seus esforços computacionais voltados para as médias das grandezas do escoamento e como a flutuação impacta sobre elas.

O modelo k- ϵ é um modelo de duas equações, uma para k, que é a energia cinética turbulenta, e uma para ϵ , que é a dissipação de energia cinética turbulenta. Por meio dessas duas variáveis pode-se calcular a viscosidade turbulenta (μ_t). As Equações (1), (2) e (3) apresentam as fórmulas para estimar k, ϵ , e μ_t respectivamente:

$$k = [(u')^2 + (v')^2 + (w')^2]/2 \quad (1)$$

$$\epsilon = (k^{2/3})/L \quad (2)$$

$$\mu_t = \rho \cdot C_\mu \cdot (k^2/\epsilon) \quad (3)$$

Onde u', v' e w' são as flutuações de velocidade nas direções x, y e z respectivamente, L é um comprimento de escala que caracteriza o tamanho do turbilhão, ρ é a massa específica do fluido e C_μ é uma constante adimensional.

O modelo k- ω é também um modelo de duas equações, uma para k, que é igual à equação do modelo anterior, e uma para ω , que é descrito com uma frequência de turbulência. As Equações (4) e (5) apresentam as relações utilizadas para calcular ω e μ_t respectivamente:

$$\omega = \epsilon/k \cdot B^* \quad (4)$$

$$\mu_t = (\rho \cdot k)/\omega \quad (5)$$

Onde B^* é uma constante do modelo k- ω .

O modelo k- ω SST (Menter, 1993) utiliza os dois modelos anteriores de forma conjunta tendo em vista que o k- ϵ tem melhor desempenho em regiões completamente turbulentas afastadas da superfície do perfil (corrente livre) e o k- ω tem melhor desempenho nas regiões próximas da parede. Cada um deles é aplicado onde seus resultados são mais precisos. Para isso é inserido no modelo uma função de transição. Essa função realiza a mudança entre os dois modelos para evitar instabilidades.

Por fim, o modelo Spalart-Allmaras (Spalart & Allmaras, 1992) é um modelo que envolve apenas uma equação de transporte para a viscosidade cinemática turbulenta, ν_{til} , que se relaciona com viscosidade turbulenta (dinâmica) pela Eq. (6) apresentada a seguir:

$$\mu_t = \rho \cdot \nu_{til} \cdot f_{v1} \quad (6)$$

$$\nu_t = \nu_{til} \cdot f_{v1} \quad (7)$$

$$\chi = v_{til}/v_t \quad (8)$$

Onde f_{v1} é uma função de amortecimento.

3. METODOLOGIA

Em todos os casos simulados neste trabalho foi utilizada uma geração de malha parametrizada apresentada por Fernandes et al. (2009), na qual os seguintes parâmetros foram utilizados: dez vezes a corda do perfil a montante, cinquenta vezes a corda a jusante, quinze camadas sobre o perfil e dois ciclos para a caixa de refinamento. O programa utilizado foi o OpenFOAM, que é um pacote de fluidodinâmica computacional de código livre, com capacidades de geração de malha, obtenção de resultados e pós-processamento. O método utilizado no acoplamento pressão-velocidade é o SIMPLE (Patankar, 1980). A Figura (1) apresenta a malha utilizada, estando o perfil localizado na coordenada (0,0). A Figura (2) apresenta a malha sobre o perfil em detalhe.

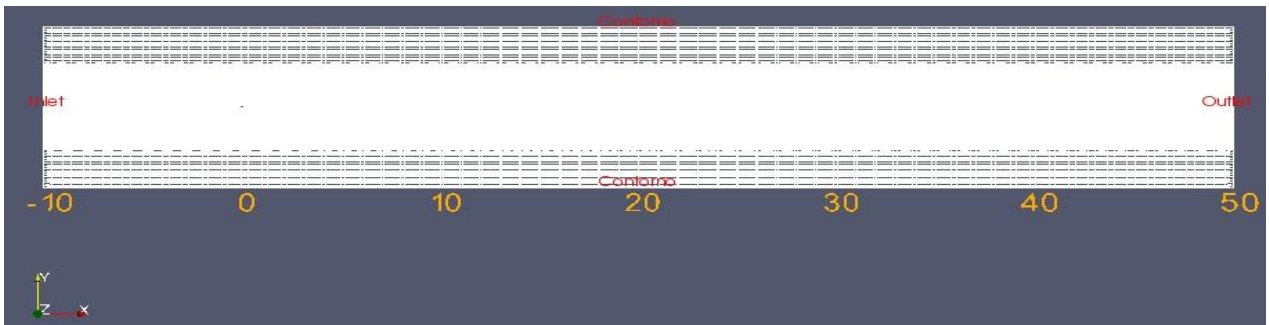


Figura 1. Malha utilizada nas simulações com suas respectivas distâncias de montante e jusante em função da corda do perfil.

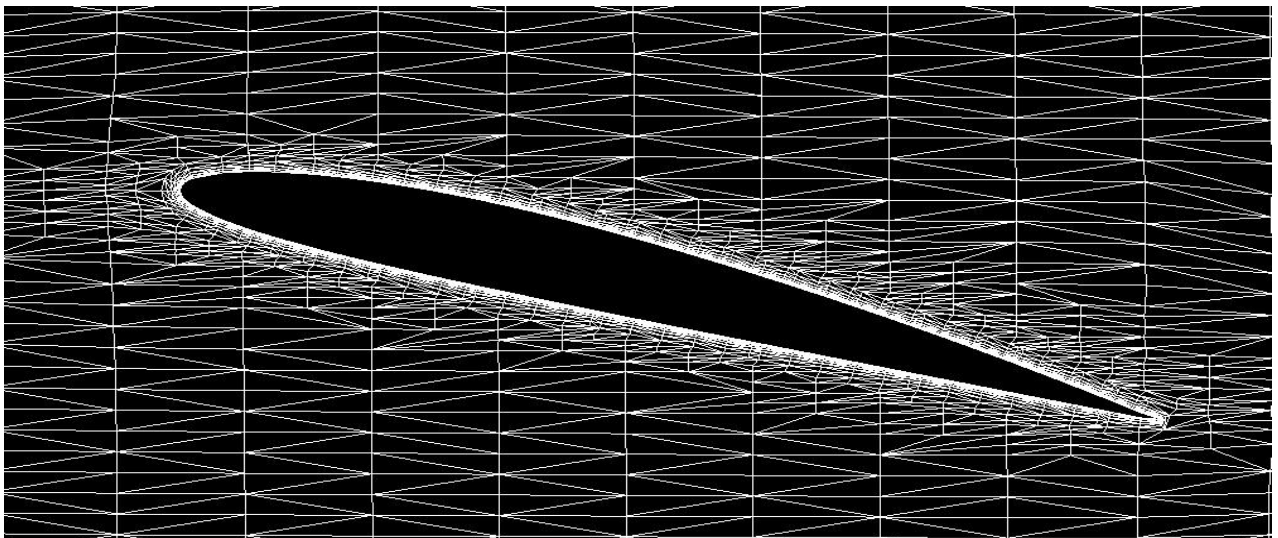


Figura 2. Perfil NACA 2410 com uma inclinação de 16° .

Um número de Reynolds de 9×10^6 e os ângulos de ataque utilizados foram os seguintes: -16° , -14° , -12° , -8° , 0° , 8° , 12° , 14° , e 16° . As condições de contorno para a pressão foram as seguintes: gradiente zero na entrada e pressão manométrica zero na saída. Para a velocidade foi considerado o valor de 138 m/s na entrada e gradiente zero na saída. Utilizou-se um erro máximo de 7×10^{-1} , como critério de convergência, tanto para a sustentação como para o arrasto. Este erro foi calculado tomando a diferença dos valores obtidos entre dois passos de tempo consecutivos.

Para cada modelo de turbulência os valores dos coeficientes de arrasto e sustentação foram obtidos em cada ângulo de ataque e seus deslocamentos em relação aos valores experimentais (Abbott & von Doenhoff, 1959) foram determinados.

3.1. Modelo k- ϵ

Os valores de k e de ϵ utilizados foram os seguintes: $72 \text{ m}^2/\text{s}^2$ para k e $611 \text{ m}^2/\text{s}^3$ para ϵ . Esses valores foram calculados utilizando uma flutuação de velocidade de cinco por cento para uma velocidade de corrente livre de 138,6 m/s. Um valor inicial de $2000 \text{ m}^2/\text{s}^3$ foi utilizado para ϵ como condição de inicial no campo interno para minimizar os efeitos de flutuação das propriedades decorrentes da solução numérica.

3.2. Modelo k- ω SST

O valor para k utilizado nesse modelo foi o mesmo utilizado no modelo anterior e o valor utilizado para ω foi $94,305 \text{ s}^{-1}$. Esse valor foi calculado utilizando os valores de k e de ϵ já calculados e uma constante do modelo (B^*) igual a 0,09. A mesma condição de inicial para ϵ no campo interno foi utilizada também para ω .

3.3. Modelo Spalart-Allmaras

Por ser um modelo de uma equação, o Spalart-Allmaras pode ser mais instável numericamente do que os dois anteriores. Por isso, para se chegar à etapa de simulação dos diferentes ângulos de ataque foram necessárias duas etapas de verificação dos parâmetros do modelo, nas quais foi utilizado um ângulo de ataque de 0° . A primeira consistiu em encontrar quais condições de contorno para v_{nil} e v_t , na superfície do perfil, proporcionavam a convergência da solução para resultados plausíveis. As condições de contorno utilizadas foram as seguintes: valor fixo na parede, função de parede e gradiente zero. Um χ de 10 foi utilizado em todas as simulações dessa etapa. A segunda etapa consistiu em se chegar a um valor de χ que obtivesse os melhores resultados para os coeficientes calculados. Os seguintes valores foram utilizados: 0,05, 0,5, 1, 5, 10, 20 e 100.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nos três modelos de turbulência utilizados houve uma superestimação do arrasto em todos os ângulos de ataque. A sustentação foi subestimada para ângulos de ataque positivos e superestimada para ângulos negativos. Contudo, os maiores afastamentos ocorreram para os coeficientes de arrasto.

A superestimação do arrasto é um fato comum aos modelos de turbulência RANS, pois estes assumem que o escoamento é todo turbulento sobre o perfil, fato esse que não condiz com a realidade, pois há uma significativa extensão sobre o mesmo onde o regime é laminar e de transição. Para a sustentação os resultados se mostraram coerentes e desvios foram observados somente para altos ângulos de ataque, o que indica a dificuldade dos modelos de prever o ponto de separação da camada limite.

4.1. Resultados de Sustentação dos Modelos k- ϵ e k- ω SST

As Figuras (3) e (4) apresentam a comparação entre os resultados das simulações e os resultados obtidos experimentalmente para o coeficiente de arrasto (c_d). Os coeficientes de arrasto serão apresentados e comparados posteriormente.

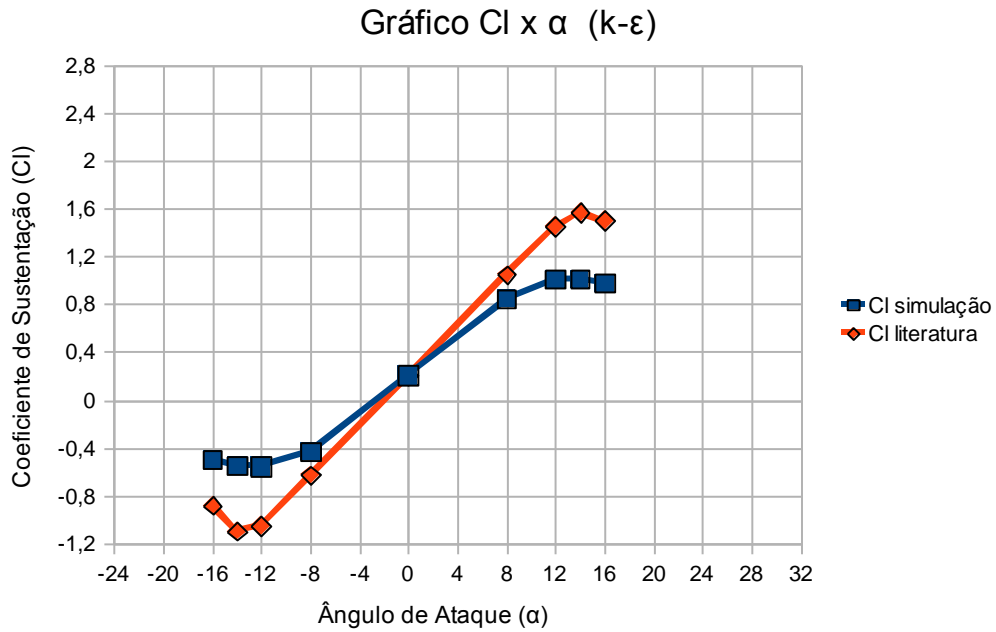


Figura 3. Comparação entre resultados das simulações do modelo k- ϵ com resultados experimentais de Abbott e von Doenhoff (1959)

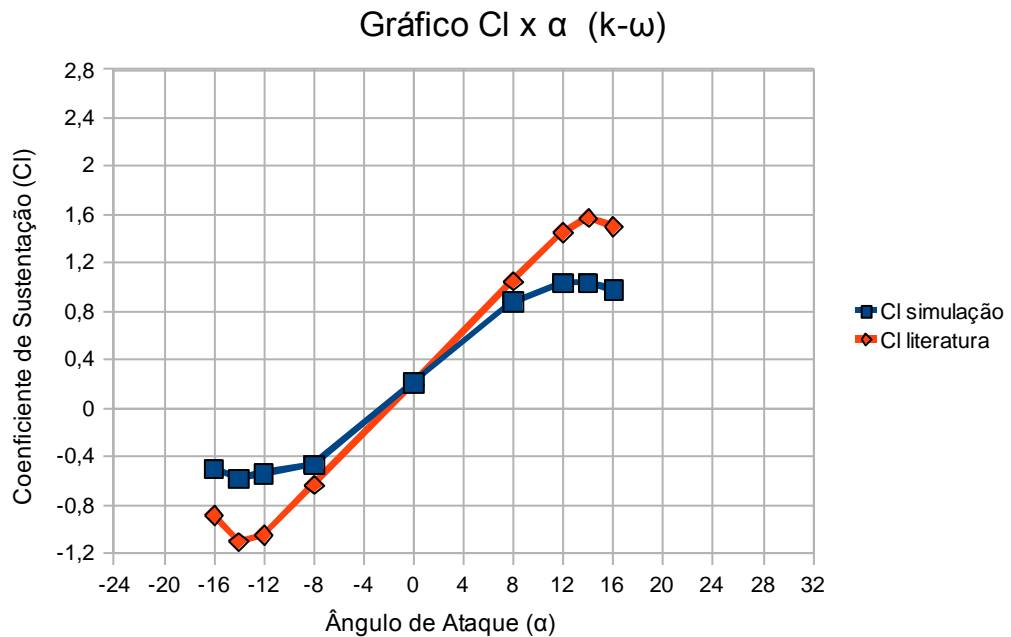


Figura 4. Comparação entre resultados das simulações do modelo k- ω com resultados experimentais de Abbott e von Doenhoff (1959).

4.2. Resultados de Sustentação do Modelo Spalart-Allmaras

Na etapa de verificação das condições de contorno observou-se que a condição para v_t influenciava diretamente na convergência da solução enquanto para v_{il} isto não acontecia. A condição que obteve os melhores resultados foi a de valor fixo, a qual foi utilizada nas próximas etapas. Em relação ao valor de χ , percebeu-se que a sua variação nada influenciou nos resultados obtidos. Um χ igual a 5 foi escolhido, pois ao se analisar os resultados de maneira minuciosa verificou-se que este forneceu a menor superestimação do arrasto.

Esse modelo apresentou erros menores para o coeficiente de arrasto em comparação com os anteriores e o comportamento dos coeficientes de sustentação foi o mesmo para os três.

A Figura (5) apresenta a comparação entre os resultados das simulações com o modelo Spalart-Allmaras e os resultados obtidos experimentalmente para o coeficiente de sustentação (c_l). Os coeficientes de arrasto serão apresentados e comparados posteriormente. A partir de 12° inicia-se o descolamento da camada limite, como pode ser observado pelo início da mudança de inclinação da curva na Figura (5). Observa-se que, a partir desse momento, os resultados passam a ter variações imprevisíveis. Esse comportamento traduz a dificuldade que os modelos de turbulência têm em prever o ponto de descolamento da camada limite.

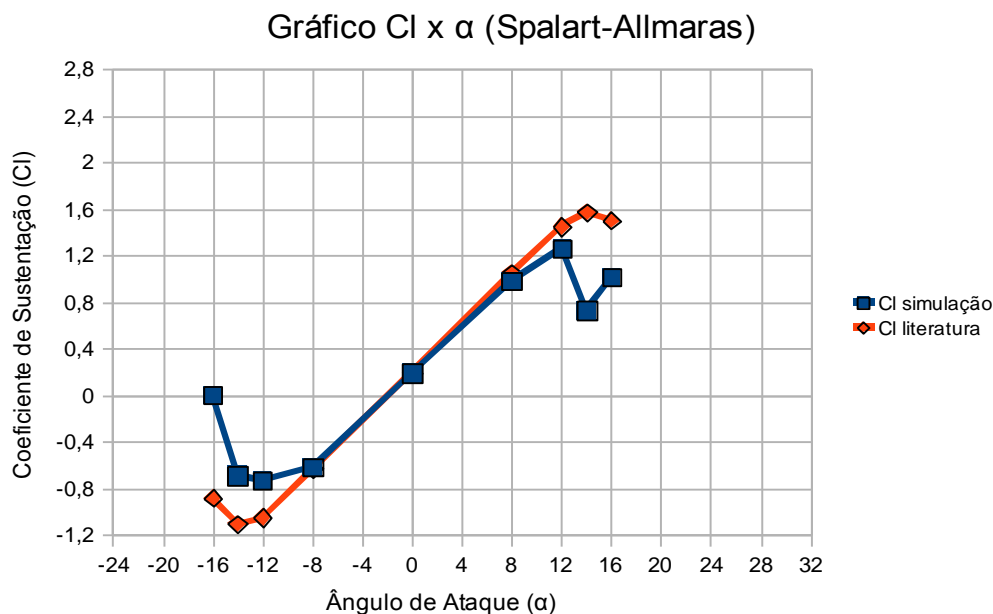


Figura 5. Comparação entre resultados das simulações do modelo Spalart-Allmaras com resultados experimentais de Abbott e von Doenhoff (1959).

4.3. Comparação dos Erros dos Coeficientes de Arrasto Obtidos nas Simulações

A Tabela (1) apresenta uma comparação entre os resultados de coeficientes de arrasto obtidos nos três modelos de turbulência utilizados para todos os ângulos de ataque utilizados.

Tabela 1. Comparação entres os resultados de arrasto obtidos com os três modelos e os valores experimentais apresentados por Abbot & von Doenhoff (1959).

α	C_d referência	C_d simul. k- ϵ	%Erro k- ϵ	C_d simul. k- ω	%Erro k- ω	C_d simul. Spalart	%Erro Spal.
-16°	0,0115	0,2020	1652,28	0,1920	1570,5	0,2020	1654,2479
-14°	0,0160	0,1710	971,22	0,1630	916,22	0,1810	1028,88
-12°	0,0140	0,1410	906,62	0,1300	829,95	0,1370	878,01
-8°	0,0075	0,0092	1123,87	0,0073	878,38	0,0630	736,33
0°	0,0020	0,0320	1495,91	0,0290	1346,53	0,0190	843,67
8°	0,0093	0,0800	755,26	0,0690	642,45	0,0590	539,36
12°	0,0145	0,1440	891,53	0,1240	757,52	0,1070	635,25
14°	0,0183	0,1600	771,65	0,1370	647,09	0,1830	898,04
16°	0,1600	0,2080	1200,74	0,1960	1064,67	0,2030	1166,69

4.3. Comparação Geral entre os Modelos

Avaliando o comportamento dos resultados dos coeficientes de sustentação para os três modelos, verifica-se que os mesmos predizem bem em qual ângulo ataque ocorre o descolamento da camada limite. Por outro lado, ao se investigar o comportamento dos valores obtidos para os coeficientes de arrasto constata-se a dificuldade dos modelos em predizer a força de arrasto sobre o perfil. Isso acontece porque os modelos de turbulência pressupõem que o escoamento é turbulento sobre toda a extensão do perfil, prevendo um acréscimo por atrito turbulento baseado na aproximação de Boussinesq, mesmo em zonas onde o regime é laminar (Wilcox, 2006).

5. CONCLUSÃO

Após realizar todas as etapas desse trabalho foi possível fazer uma análise, qualitativa e quantitativa, sobre a performance de três modelos de turbulência na solução do escoamento sobre o perfil NACA 2410. O fato que mais se destacou, comum aos três modelos, foi a superestimação do arrasto aerodinâmico sobre o perfil. Essas discrepâncias ocorreram, principalmente, porque os modelos de turbulência, além de calcular a viscosidade turbulenta (μ_t) eles a consideram sobre toda a extensão do perfil. Isso leva a um valor maior do que o real, pois de fato há uma região extensa sobre o perfil onde o escoamento é laminar e de transição. Com relação à sustentação, os resultados foram coerentes e os modelos conseguiram predizer corretamente em qual ângulo de ataque o descolamento ocorre. Comparando-se todos os resultados obtidos verifica-se que o modelo Spalart-Allmaras se mostrou o mais adequado para o problema estudado, pois foi este que menos superestimou o arrasto e que obteve os melhores valores para a sustentação.

Os resultados obtidos demonstram que para analisar os coeficientes aerodinâmicos por meio de simulação computacional é preciso ter ponderação, tendo ciência das vantagens e das desvantagens apresentadas pelos modelos utilizados.

6. REFERÊNCIAS

- Abbott, I.H., von Doenhoff, A.T., 1959, "Theory of Wing Sections" , New York: Dover.
- Fernandes, M.P.G., Rocha, P.A.C., Modolo, A.B., Carneiro, F.O.M., 2009, "Estudo de Convergência de Malha na Solução Numérica do Escoamento Sobre Perfil Aerodinâmico Utilizando o Pacote de Fluidodinâmica Computacional OpenFOAM" , Anais do XXXVII Congresso Nacional de Ensino de Engenharia, Recife, Brasil.
- Menter, F.R., 1993, "Zonal Two Equation k- ω Turbulence Models for Aerodynamic Flows", AIAA Paper 93-2906.
- Patnakar, S.V., 1980, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Hemisphere Publishing Corporation, First Edition.
- Spalart, P.R. and Allmaras, S. R. (1992), "A One-Equation Turbulence Model for Aerodynamic Flows", AIAA Paper 92-0439.
- Versteeg, H. K., Malalasekera, W., 2007, "An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method", Prentice Hall, Second Edition.
- Wilcox, D.C., 2006, "Turbulence Modeling for CFD". California: DCW industries.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no trabalho.



RESULTS EVALUATION OF NUMERICAL SIMULATION FLOW OVER A NACA 2410 PROFILE USING DIFFERENT TURBULENCE MODELS WITH OPENFOAM

Marcos Paulo Gomes Fernandes, marcospgf@gmail.com¹

Paulo Alexandre Costa Rocha, paulo@posmec.ufc.br¹

Francisco Olimpio Moura Carneiro, olimpiomcarneiro@gmail.com¹

¹Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici, Av. Humberto Monte, S/N, Bloco 714
60450-000 – Fortaleza – CE

Abstract. *This work presents a computational analysis of the flow over a NACA 2410 aerodynamic profile, aiming to verify the behavior of the drag and lift coefficients for different angles of attack, applying three different turbulence models, (k -epsilon, k -omega SST and Spalart-Allmaras). The software used was the OpenFOAM, which is a Computational Fluid Dynamics open source package, with the capacities of mesh generation, solution obtaining and post processing. The following parameters were used to generate the meshes: ten times the chord length upstream, fifty times the chord length downstream, fifteen layers over the profile and two cycles of the refining box. These parameters have already shown to be satisfactory to the numerical solution in former works. The lift and drag coefficients obtained for different angles of attack were compared against experimental data found in literature. The lift coefficient values were in general underestimated, ranging from three percent to small angles of attack until thirty four percent to high angles of attack, indicating the difficulty that the turbulence models have to preview the boundary layer separation point. The biggest discrepancies occurred in the drag coefficient values, which presented variations in the order of one thousand percent. Above all this fact was already previewed, since the models assume that the flow is turbulent over all the profile, what is not true, because there is a significant extension where the regime is laminar. It can be seen that the aerodynamic performance evaluation must be taken with care, keeping in mind the advantages and limitations of the applied tools.*

Keywords: *NACA 2410 aerodynamic profile, turbulence models, openfoam*