

Relatório Final

Titulo do projeto de pesquisa: Verificação e Validação de Modelos de Turbulência para Formulações Médias

Bolsista: Thamires das Chagas Silva

Orientador: João Luiz Filgueiras de Azevedo

Período a que se refere o relatório: Agosto de 2017 a Fevereiro de 2018

Resumo

O objetivo do presente estudo é validar modelos de turbulência já disponíveis no código computacional BRU3D. Esse código vem sendo desenvolvido na Divisão de Aerodinâmica (ALA) do Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE) desde 2000, e tem por finalidade representar escoamentos turbulentos em configurações complexas de utilidade aeroespacial. A formulação utilizada no código BRU3D consiste nas equações de Navier-Stokes com média de Reynolds. Para tal abordagem é necessário usar uma técnica de fechamento de turbulência adequada. Os modelos escolhidos para o desenvolvimento deste trabalho foram o Spalart-Almaras (SA) e o NLBSL, ambos já implementados no código BRU3D. Esses modelos foram testados em casos clássicos da indústria aeronáutica e, após um estudo de refinamento de malha, os resultados obtidos foram comparados com dados experimentais, a fim de verificar a variação nas soluções devido aos diferentes modelos de turbulência utilizados.

1. Introdução

Fluidos estão presentes em toda a natureza, logo a compreensão e o domínio dos fenômenos que os cercam são de grande interesse para as indústrias que fazem proveito de suas propriedades. Para o setor aeroespacial, é de grande relevância prever o comportamento do escoamento em torno de

veículos aeroespaciais, principalmente quanto aos efeitos de turbulência.

Uma forma de representar a física completa de um escoamento aeroespacial é através da simulação direta das equações de Navier-Stokes (DNS). Contudo, esta abordagem requer o uso de malhas muito refinadas e passos no tempo muito pequenos para poder representar as menores escalas de turbulência, ou seja, as escalas de Kolmogorov. Tal premissa torna o uso deste método inviável para a indústria devido ao elevado custo computacional de memória e de processamento. Uma alternativa para representar escoamentos de interesse aeroespacial com um custo mais acessível é utilizar a formulação das equações de Navier-Stokes com média de Reynolds (RANS).

A formulação RANS representa somente as propriedades médias do escoamento, modelando suas flutuações. Essa simplificação reduz o tempo e custo computacional das simulações. O grande desafio desse método é utilizar um modelo de turbulência capaz de recuperar as informações perdidas durante o processo de filtragem temporal. Alguns modelos de turbulência já foram validados no meio científico através de soluções numéricas comparadas com dados experimentais. Contudo, não existe um único método capaz de representar qualquer condição de escoamento, pois parte do modelamento de turbulência é elaborado a partir de dados de natureza empírica.

Neste trabalho é feita uma validação de modelos de turbulência que já estão implementados no BRU3D. Atualmente estão disponíveis 7 modelos no código, sendo eles: Spalart-Allmaras (SA), *Shear Stress Transport* (SST), BSL-EARSM (*BaSeLine - Explicit Algebraic Reynolds Stress Models*), Craft-Launder RSM (*modified*), Wilcox *low-Re* $k-\omega$, *StressBSL* RSM e CFD++ *Realizable* $k-\epsilon$. Os modelos escolhidos para o desenvolvimento do presente esforço foram o modelo de Spalart-Allmaras e o modelo BSL-EARSM, também conhecido como modelo NLBSL (*NonLinear BaSeLine model*). Estes modelos foram aplicados no caso da asa ONERA M6, a qual possui dados experimentais consistentes disponíveis na literatura. Isso possibilita verificar o quanto esses modelos são capazes de representar os fenômenos de turbulência. Também foi incluso um estudo de refinamento de malha.

2. Materiais e Métodos

Originalmente, as equações de Navier-Stokes equivalem apenas às equações de quantidade de movimento. Contudo, na terminologia utilizada na dinâmica dos fluidos computacional, por uma questão de facilidade de nomenclatura, considera-se que a expressão equações de Navier-Stokes se refere ao conjunto de equações que representam quantidade de movimento, continuidade e energia. Elas podem ser escritas conforme as equações 1-3, respectivamente.

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau}, \quad (1)$$

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot u = 0, \quad (2)$$

$$\rho \frac{DH}{Dt} = \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot [\vec{\tau} \cdot u - q]. \quad (3)$$

Nas equações 1-3, ρ representa a densidade, u é o vetor velocidade do fluido, p é a pressão, $\vec{\tau}$ é o tensor de tensões viscosas, H é a entalpia total, q é o vetor de fluxo de calor, que representa o valor transportado pelo fluido por condução e t é o tempo. Este é um sistema de equações que não está fechado, uma vez que há mais variáveis do que há equações. Portanto, algumas hipóteses são assumidas para que seja possível fechá-lo. Assim, admiti-se que o ar se comporta como um gás perfeito, ou seja, obedecendo a lei dos gases perfeitos, e o fluxo de calor é dado pela lei de condução de calor de Fourier. O tensor de tensões viscosas é dado por

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \lambda_\mu (\nabla \cdot u) \delta_{ij}, \quad (4)$$

sendo considerado, assim, um fluido newtoniano, onde λ_μ é o segundo coeficiente de viscosidade molecular dinâmica e δ_{ij} é o delta de Kronecker. Nesse trabalho, a viscosidade dinâmica pode ser definida admitindo a hipótese de Stokes, dada por

$$\lambda_\mu = -\frac{2}{3}\mu. \quad (5)$$

As equações de Navier-Stokes são utilizadas na forma conservativa, conforme as equações 6-8.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) + \frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} = 0, \quad (6)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0, \quad (7)$$

$$\frac{\partial e}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}[(e + p)u_j - \tau_{ij}u_i + q_j] = 0, \quad (8)$$

onde e é a energia total por unidade de volume do fluido, que é definida pela equação 9.

$$e = \rho(e_i + \frac{1}{2}|u|^2). \quad (9)$$

Com as equações escritas na forma conservativa problemas numéricos são evitados nos casos onde existem descontinuidade no campo de escoamento. Um exemplo é o caso de ondas de choque, que são regiões muito finas nas quais as propriedades do escoamento podem mudar abruptamente [1], sendo possível que essas regiões sejam menores do que o menor espaçamento de malha.

As equações de Navier-Stokes são capazes de representar um escoamento com todas as suas escalas de turbulência [2]. Entretanto, como mencionado, uma solução numérica direta dessas equações (DNS) tem um custo muito elevado por exigir um grande refinamento de malha e pequenos passos no tempo para computar as menores escalas de turbulência [3]. Na maioria dos casos práticos de engenharia o cálculo de um valor médio das propriedades do escoamento é suficiente [2].

Assim, o código BRU3D, como é usual para formulações compressíveis, utiliza o conceito de

médias de Favre para simular os casos com um menor custo computacional. Destaca-se que o conceito de médias de Favre é similar ao das médias de Reynolds, exceto que é feita uma média de grandezas ponderadas pela massa, de forma a evitar o aparecimento de produtos triplos de correlação, como ocorreria por exemplo nos termos de advecção no caso compressível. As equações resultantes, por uma questão de convenção da comunidade, continuam sendo chamadas de equações médias de Reynolds (RANS), apesar de serem efetivamente o resultado de um processo de média de Favre. A aplicação do processo de média possibilita usar as equações de Navier-Stokes sem calcular todas as escalas de turbulência [2]. Dessa forma, é necessário que haja um modelo de turbulência que represente adequadamente os efeitos das flutuações do escoamento.

O primeiro modelo de turbulência adotado, o SA, se enquadra na classe de modelos de viscosidade de vórtices lineares [4]. Ele é baseado em uma equação de transporte para o coeficiente de viscosidade turbulenta modificado, $\tilde{\mu}$. Sua equação na forma conservativa é

$$\frac{\partial \tilde{\mu}}{\partial t} + \frac{\partial(\tilde{\mu} u_j)}{\partial x_j} = c_{b1} \tilde{P} \tilde{\mu} - c_{w1} f_w \rho \left(\frac{\tilde{\nu}}{d} \right)^2 + \frac{1}{\sigma} \left\{ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \tilde{\mu}) \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j} \right] + c_{b2} \rho \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_k} \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_k} \right\}, \quad (10)$$

sendo o coeficiente de viscosidade turbulento definido por

$$\nu_t = \tilde{\nu} f_{v1}, \quad \tilde{\mu} = \rho \tilde{\nu}, \quad f_{v1} = \frac{\chi^3}{\chi^3 + c_{v1}^3}, \quad \chi = \frac{\tilde{\nu}}{\nu}. \quad (11)$$

Na equação 10, \tilde{P} é o termo de produção de turbulência, e Ω é a magnitude do tensor de vorticidade. As constantes desse modelos foram ajustadas de acordo com um grande número de casos típicos de turbulência. As formulações dos demais termos e os valores das constantes podem ser consultadas na bibliografia [4].

Como visto, o modelo SA resolve uma única equação de transporte para o coeficiente de viscosidade de vórtice modificado. Isso resulta em um menor custo computacional em relação aos modelos de turbulência que utilizam duas equações ou mais.

O segundo modelo escolhido é o BSL-EARSM, não linear. O EARSM é uma extensão aplicada ao modelo BSL, de forma a considerar os efeitos de advecção e difusão nas equações de transporte dos tensores anisotrópicos. Essas considerações são negligenciadas em algumas formulações de turbulência [5].

Wallin e Johansson propõem que os tensores de anisotropia sejam mensurados através de coeficientes inicialmente desconhecidos [6]. Uma possível solução para esses tensores é dada por

$$-\overline{\rho u_i'' u_j''} \approx 2 C_\mu^{eff} \frac{\rho k^2}{\epsilon} S_{ij} - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} - \rho k a_{ij}^{nl}. \quad (12)$$

Os termos $\overline{\rho u_i'' u_j''}$ são derivados da hipótese de Boussinesq, assim como nos modelos lineares. O termo C_μ^{eff} é um coeficiente efetivo de viscosidade adotado pelo modelo, o qual carrega os efeitos de vorticidade, e o termo a_{ij}^{nl} contém uma contribuição anisotrópica. Esses são os principais termos acrescentados à formulação do modelo BSL, dando origem ao modelo BSL-EARSM.

3. Resultados

A geometria de interesse desse trabalho foi a asa ONERA M6 [7]. Esse caso foi escolhido por ser muito utilizado na validação de códigos computacionais voltados à escoamentos aerodinâmicos, pois seus dados experimentais são bem aceitos na comunidade científica. Para esse trabalho foram utilizadas 3 malhas, como ilustra a Figura 1, para uma verificação de convergência de malha. Todas as malhas apresentam uma distância de *far field* de 200 cordas médias aerodinâmicas (cma). As condições para as simulações foram de número de Mach de 0.84, ângulo de ataque de 3.06° e número de Reynolds de $11,72 \times 10^6$, baseado na cma, conforme o teste 2308 do AGARD AR 138 [7].

Os dados experimentais serão comparados em algumas seções da envergadura da asa ONERA M6, representadas neste trabalho em função da posição adimensional ao longo da semi-envergadura,

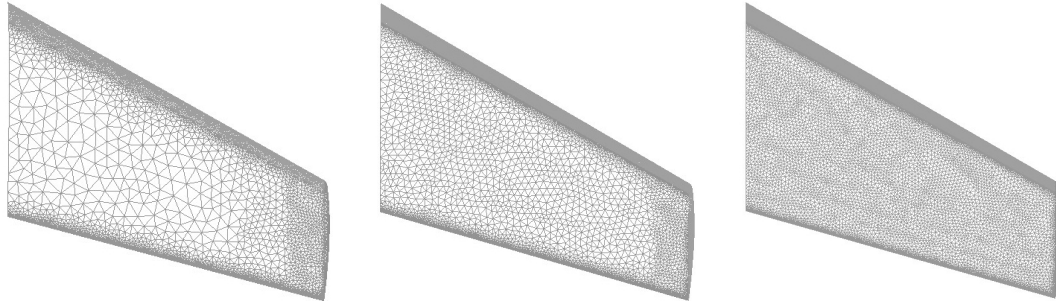
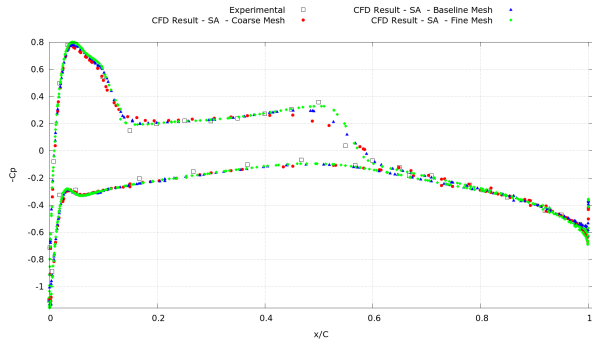
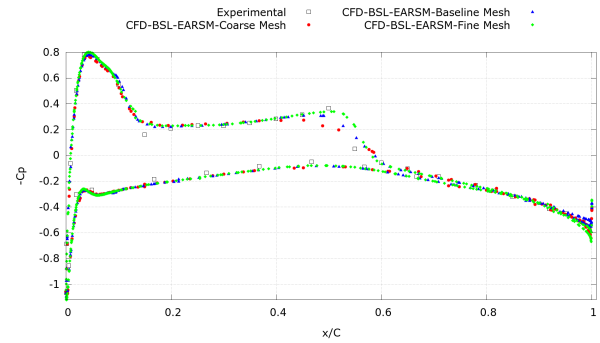


Figura 1: Malhas sob a ONERA M6 - grosseira, média (ou *baseline*) e fina, respectivamente.

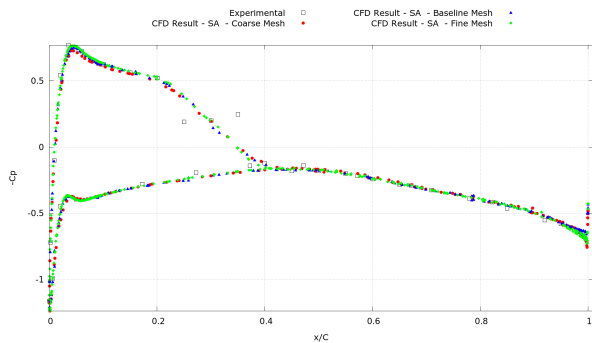
η . A Figura 2 mostra as soluções para os modelos de turbulência aqui utilizados. Como pode ser visto na Figura 2, as duas formulações de turbulência apresentam resultados muito semelhantes. Na seção $\eta = 0,80$ da semi-envergadura, nos resultados de ambos os modelos, nota-se que alguns pontos dos dados experimentais não foram alcançados pelas simulações. As simulações mostram uma única onda de choque enquanto os dados experimentais [7] ainda mostram duas.



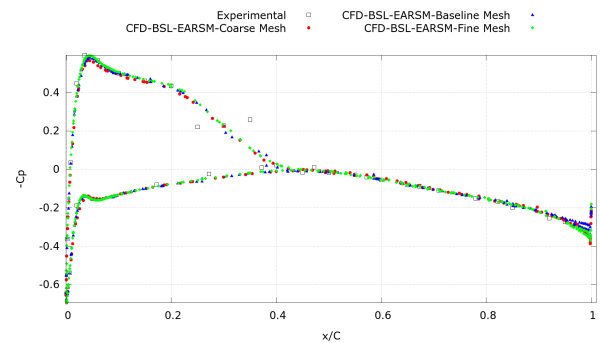
(a) - SA em $\eta = 0,44$



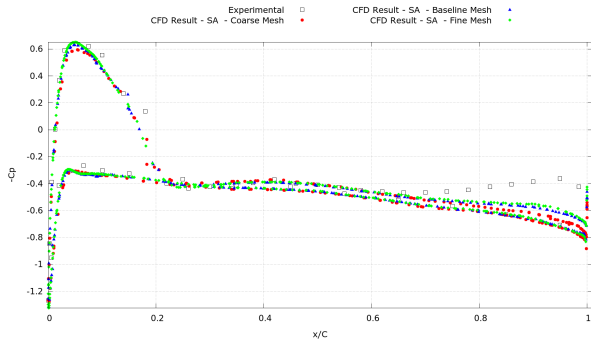
(b) - BSL-EARSM em $\eta = 0,44$



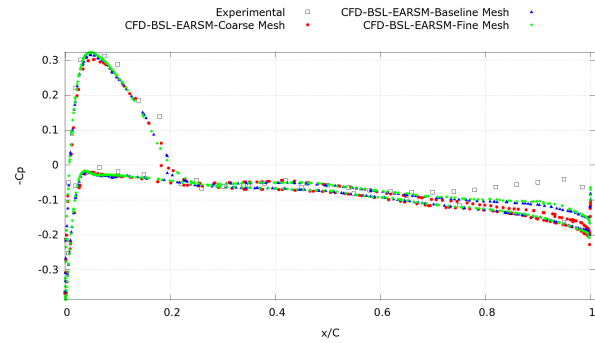
(c) - SA em $\eta = 0,80$



(d) - BSL-EARSM em $\eta = 0,80$



(e) - SA em $\eta = 0,99$



(f) - BSL-EARSM em $\eta = 0,99$

Figura 2: Comparação dos resultados numéricos de coeficiente de pressão (C_p) com os dados experimentais.

A Figura 3 ilustra a topologia das ondas de choque que se formam sobre o extradorso da asa ONERA M6 por meio da visualização de iso-superfícies de número de Mach iguais a 1,40 e 1,12 para os resultados com o modelo SA e para a malha mais fina. As presentes simulações, com ambos os modelos, reproduzem de forma bastante adequada a topologia de escoamento e o formato das ondas de choque presentes sobre o extradorso da asa. Entretanto, como discutido, o que se tem neste caso é uma configuração de um choque duplo nas seções mais internas da asa, sendo que estes choques se unem à medida que se caminha para a ponta da asa. Como pode ser visto nas Figuras 2(c) e 2(d), na estação a $\eta = 0,80$ da semi-envergadura, os resultados das simulações, para ambos os modelos, já estão apresentando uma união das duas ondas de choque, enquanto que, de acordo com os dados experimentais [7], tal união só ocorre mais próximo à ponta da asa.

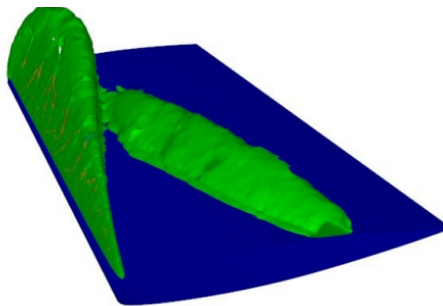


Figura 3: Ilustração da distribuição de ondas de choque sobre o extradorso da asa (malha fina).

Durante as atividades desse projeto de iniciação científica, a aluna desenvolveu um algoritmo para verificar a ordem do resultado da simulação em relação ao refinamento de malha [8]. O algoritmo foi validado pela aluna com todos os casos do artigo mencionado e alguns casos presentes no *Turbulence Modeling Resource* [9]. A ferramenta não foi aplicada a este trabalho pois ela será validada pelos membros da ALA.

4. Próximas Etapas

Embora, dentro do ordenamento usual do PIBIC do IAE, este seria um relatório parcial, no caso da presente bolsista, este é o seu relatório final, uma vez que a bolsista está colando grau no final de fevereiro de 2018. Entretanto, o desenvolvimento deste trabalho motivou a bolsista a dar continuidade a seus estudos por meio de um programa de mestrado. Assim, a expectativa no presente momento é que o trabalho aqui descrito possa ser continuado em um esforço de mestrado no PG/CTE-E, para o qual a bolsista estará submetendo seu material de candidatura em março ou abril deste ano, de forma a um possível início do programa em agosto de 2018.

Quanto aos aspectos técnicos específicos da continuidade do trabalho, em discussão com o grupo de pesquisa da ALA a respeito dos resultados obtidos nas simulações da ONERA M6 e de outros trabalhos em desenvolvimento pelo grupo, foi identificada a necessidade de verificação da formulação e/ou calibração do modelo BSL-EARSM implementado no código BRU3D. Chegou-se a tal conclusão devido ao modelo apresentar alta dissipação em outros casos rodados. Assim, a bolsista tem interesse de prosseguir com os estudos desse modelo a fim de validá-lo no BRU3D.

5. Conclusões

O presente trabalho realizou um estudo de dois modelos de turbulência implementados no código BRU3D, juntamente com um estudo de refinamento de malha para a geometria de interesse. Os resultados obtidos puderam ser confrontados com os dados experimentais disponíveis. Com as soluções visualizadas foi comprovado que, para o caso da asa ONERA M6, com as condições do

teste 2308 do AGARD AR-138, os modelos de turbulência SA e BSL-EARSM possuem praticamente a mesma capacidade de reproduzir os resultados experimentais. Ficou claro que nenhum dos modelos, com as malhas propostas, conseguem atingir a união das duas ondas de choque na posição correta. Tendo os dois modelos alcançado os demais resultados, é possível que seja necessário um refinamento de malha maior para tornar possível a simulação das ondas de choque de forma semelhante ao que foi constatado no experimento em túnel de vento. Claramente, existem também muitas extensões possíveis do presente trabalho, e aquela identificada na seção anterior é a forma principal como se pretende dar continuidade ao esforço de pesquisa aqui descrito.

Agradecimentos

A bolsista agradece aos colegas do grupo de pesquisa da ALA pelo auxílio durante este esforço, e ao CNPq pelo apoio através do Processo 151201/2017-0.

Referências

- [1] ANDERSON, J. D. J., *Fundamentals of Aerodynamics*. 5ed. New York: McGraw-Hill International Editions, 2011.
- [2] FREIRE, A. P. S., MENUT, P. P. M., SU, J., *Turbulência: Anais da I Escola de Primavera em Transição e Turbulência*. 1ed. Rio de Janeiro: ABCM, 2002.
- [3] SCALABRIN, L. C., *Numerical Simulation of Three-Dimensional Flows over Aerospace Configurations*. 2002. 163f. Thesis (Master of Science) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.
- [4] SPALART, P. R., ALLMARAS, S. R., A One Equation Turbulence Model for Aerodynamics Flows. *La Recherche Aéronautique*, Vol. 1, 1994, pp. 5-21.
- [5] BIGARELLA, E. D. V., AZEVEDO, J. L. F., Blunt-Body Flow Simulations with Advanced Eddy-Viscosity and Reynolds-Stress Turbulence Closures - *Proceedings of the 19th International Congress of Mechanical Engineering - COBEM*, Brasília, DF, Brazil, 2007.

-
- [6] WALLIN, S., JOHANSSON, A. V., An Explicit Algebraic Reynolds Stress Model for Incompressible and Compressible Turbulent Flows. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 403, 2000, pp. 89-132.
- [7] SCHMITT, V. CHARPIN, F., Pressure Distributions on the ONERA-M6-Wing at Transonic Mach Numbers: Experimental Data Base for Computer Program Assessment. *AGARD Advisory Report AR-138*, 1979.
- [8] CELIK, I. B., GHIA, U., ROACHE, P. J., FREITAS, C. J., COLEMAN, H., RAAD, P. E. (2008), Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD Applications, Jul. *American Society of Mechanical Engineers - ASME*, Vol. 130.
- [9] Turbulence Modeling Resource. [Online]. Available: https://turbmodels.larc.nasa.gov/flat_plate_sst.html [Acesso: nov/2017].